REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU

Faculté du génie de la construction

Département de génie civil

Option Structures et

Matériaux **THËSE**

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT 3ème Cycle

LA RELATION DU RESSUAGE AVEC LA FISSURATION DUE AU RETRAIT PLASTIQUE DES BETONS AUTOPLAÇANTS, EN PARTICULIER PAR TEMPS CHAUD

Présenté par Yakoubi Ishaq

DEVANT LE JURY

DAHMANI Lahlou	Professeur	UMMTO, Université de Tizi-Ouzou	Président
AIT AIDER Hacène	Professeur	UMMTO, Université de Tizi-Ouzou	Rapporteur
AGGOUN Salima	MC HDR	L2MGC. Université de Cergy-Pontoise	Rapporteur
MEHADËNE Rachid	Professeur	UMMTO, Université de Tizi-Ouzou	Examinateur
BOUKENDAKDJI Othmane	Professeur	LME. Université de Media	Examinateur
HOUARI Hacène	Professeur	LMDC. Université de Constantine	Invité

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été préparés au sein du Laboratoire de Modélisation Expérimentale et Numérique des Matériaux et Structures en Génie Civil (LAMOMS), Laboratoire de Génie Civil et Environnement (LGCE) et le Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil (L2MGC). Nombreux sont ceux que je voudrais remercier pour m'avoir aidé durant ces années de thèse.

Je tiens à exprimer en premier toute ma reconnaissance à Monsieur Hacéne Ait aider pour avoir accepté d'être directeur de ma thèse et pour l'aide considérable qu'il m'a apportée afin de réaliser ce travail de recherche.

J'exprime mes sincères remerciements à Madame Salima Aggoun et à Monsieur Hacéne Houari pour la qualité de leur encadrement.

Je remercie tout particulièrement Madame Salima Aggoun pour son aide précieuse, et ses encouragements pendant mon séjour en France, sans lesquels je n'aurais jamais fini cette thèse.

Je n'oublie pas tous personnes qui ont contribué à la réussite de ma thèse par les encouragements ou par le matériel, sans lesquels ce travail n'aurait pu se faire.

Ma reconnaissance s'adresse donc à mes collègues Messaoudi Farih, Fayrouz Slaimi, Aldjia Bouzeboudja et Tarek Chiker,

Je remercie chaleureusement tous les doctorants et le personnel du laboratoire de L2MGC en France, plus particulièrement Lilian Cristofol.

Toutes mes remerciments s'adressent également à mon ami Bellah Moussa pour son soutien constant et sa compagnie inestimable.

Je remercie monsieur Abderezzak Birouk, chef d'entreprise de métallurgie à Jijel pour son aide logistique durant toutes les années de ma thèse.

Je dois toute ma gratitude à ma famille, mes frères et sœurs, Najla, Mourad, Ahlem, Dounia et Yacine.

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à mes parents, pour leur soutien constant, leur patience et leur affection, Qu'ils trouvent ici un geste modeste de reconnaissance et de gratitude.

Table des matières

Remerciements ii

Table des matières iii

Liste des abréviations viii

Liste des tableaux ix

Liste des figures x

ntroduction générale 1

Chapitre 1 Généra ités et problématique 4

1.1 ntroduction 5

1.2 Généralités sur les bétons autoplaçants 5

1.3 Particularité de la composition des BAP 6

1.4 Intérêt. ter-hnique d'utilisation des BAP dans la construci.lon 7

1.5 Utilisation des BAP dans les pays à climat chaud ?

1.6 Effet du climat chaud sur les propriétés du béton 9

1.7 Problématique et état. de l'art 16

1.8 Solutions préventives pour limiter la fissuration 17

1.8.1 Prévention externe 18

1.8.2 Prévention interne 19

1.9 Conclusion 28

Chapitre 2 Déformation plastique et phénomènes lés à la fissuration des BAP 29

2.1 ntroduction 30

2.2 Diffèrent type de retrait à l'état frais 31

2.2.1 Retrait de séchage 31

2.2.2 Retrait endogène 33

2.2.3 Retrait thermique 34

2.3 Retrait des BAP à long terme 35

2.4 Retrait plastique 36

2.5 Phénomènes en relation avec le retrait plastique .43

2.5.1 Pression capillaire 43

2.5.2 Hydratation et temps de prise 46

2.6 Relation retrait plastique- fissuration .48

2.7 Ressuage 50

2.7.1 Généralités 50

2.7.2 Effets du ressuage sur le béton 53

2.7.3 Facteurs influant le ressuage 54

2.7.4 Principales méthodes de mesure 57

2.8 Intérêt. de l'estimation du taux d'évaporation 58

2.9 Effet des facteurs météorologiques sur l'évaporation 58

2.9.1 Effet du vent 58

2.9.2 Effet de la température 59

2.9.3 Effet de I'humidité relative 59

2.10 Retrait empêché et dispositifs de mesure 59

2.11 Analyse critique des dispositifs de mesure du retrait empêché 61

2.12 Conclusion 62

Chapitre 3 Méthodes et outils expérimentaux 63

3.1 Introduction 64

3.2 Matériaux utilisés 64

3.2.1 Ciment 64

3.2.2 Granulats 65

3.2.3 Super plastifiant 66

3.2.4 Les ajouts minéraux 66

3.2.5 Eau de gâchage 66

3.3 Formulations 66

3.3.1 Bétons autoplaçants 67

3.3.2 Bétons ordinaires 67

3.3.3 Mortier de béton équivalent « MBE » 68

3.4 Caractérisations des bétons et des mortiers 70

3.4.1 Tests à l'état frais 70

3.4.2 Tests à l'état durci 72

3.5 Marge d'autoplaçabilité pour un surplus en eau et en superplastifiant 73

3.5.1 Intérêt. de la marge d'autoplaçabité dans les climats chauds 74

3.5.2 Calcul de la marge d'autoplaçabllité 75

3.5.3 Récapitulatif de la marge d'autoplaçabilité 77

3.6 Essais et conditions climatiques 79

3.6.1 Essais 79

3.6.2 Conditions climatiques 83

3.7 Plan expérimental 84

3.8 Conclusion 85

Chapitre 4 Etude comparative de ressuage, fissuration et prise des bétons etdesMBE 86

4.1 ntroduction 87

4.2 Etude du ressuage des bétons et des MBE 87

4.2.1 Ressuage des bétons 88

4.2.2 Ressuage des MBE 89

4.3 Résultats et discutions 89

4.3.1 Différences de ressuage entre BAP et B0 89

4.3.2 Différences de ressuage entre mBAPe et mBOe 92

4.3.3 Différences de ressuage entre Béton et leurs mortiers équivalents 96

4.4 Fissuration due au retrait plastique des bétons et MBE 98
4.4.1 Fissuration des bétons 98
4.4.2 Fissuration des MBE 98
4.5 Résultats et discutions 99
4.5.1 Longueur de fissuration des MBE 99
4.5.2 Largeur de fissuration des bétons 104
4.6 Relation entre le ressuage et la fissuration due au retrait plastique 108
4.7 Etude de la prise des bétons et des MBE 110
4.8 Résultats et discutions 110
4.8.1 Temps de prise dans les conditions de laboratoire 110
4.8.2 Temps de prise dans le cas de température élevée 113
4.8.3 Temps de prise dans le cas de température élevée et ventilation 115
4.9 Influence du temps de prise sur la fissuration et le ressuage 117
4.10 Conclusion 118

Chapitre 5 Effet d'un surplus en eau et en super- plastifiant sur la fissuration des BAP 120

5.1 lntroduction 121
5.2 Effet de l'eau et du superplastifiant sur la longueur de fissuration des BAP 122
5.2.1 Effet d'un supplément en eau sur la longueur de fissuration 122
5.2.2 Effet d'un supplément en superplastifiant sur la longueur de fissuration 125
5.3 Effet de l'eau et du superplastifiant sur la largeur de fissuration des BAP 129
5.3.1 Effet d'un supplément. en eau sur la largeur de fissuration 129
5.3.2 Effet Du Superplastifiant 133
5.4 Bilan 137
5.5 Conclusion 140

Conclusion générale 141

Contributions 143

Bibliographie **146**

Annexe A **157**

Annexe 8 **158**

Annexe C **159**

Liste des abréviations

BAP	Béton autoplaçant
BO	Béton ordinaire
mBAPe	Mortier de béton autoplaçant équivalent
mBOe	Mortier de béton ordinaire équivalent
E	Eau
L C	Liant
PNS	Ciment
PMS	Poly Naphtalène Sulfonate
PCP	Polymélamine Sulfonate
ARR	Polycarboxylate polyoxéthylène
G	Adjuvant réducteur de retrait
S	Gravier
Sp	Sable
F	Superplastifiant
AV	Fines
SOJ	Agent de viscosité
C3A	Trioxide de soufre
M Ap	Aluminate tricatcique
CL	Marge Autoplaçabi ité Conditions
CTE	de laboratoire Conditions de
C T E+V	température élevée
	Conditions de température élevée + ventilation

Liste des tableaux

Tableau 1 Principaux données climatiques du désert algérien[4] 10

Tableau 2 Propriétés physiques et chimiques du ciment 65

Tableau 3 Propriétés des granulats 66

Tableau 4 Proportions des mélangesdes bétons 68

Tableau 5 Proportions des mélangesdes mortiers de bétons équivalents 69

Tableau 6 Résultats de résistance à la compression et à la traction des bétons et leurs mortiers équivalents 73

Tableau 7 Marge d'autoplaçabilité du mBAPe4 cas de (eau constant / Sp voriob1.) 76

Tableau 8 Marge d'autoplaçabilité du mBAPe'l cas de (eau variable / Sp cansrnm) 77

Tableau 9 Marge d'autoplaçabilité pour tout.es les formulations des bétons et leurs mortiers équivalents 78

Tableau 10 Résultats du taux, capacité de ressuagepour BAP, et B0 91

Tableau 11 Résultats du taux, capacité de ressuagepour mBAPe, et mBOe 94

Liste des figures

Figure 1 - Caractéristiques d'un béton autoplaçant. 6

Figure 2 - Abaque ACI pour évaluer le taux d'évaporation d'une surface du bét.onl3] 8

Figure 3 - Effet des conditions d'exposition sur la résistance à la compression du béton[S] 10

Figure 4 - Influence du rapport E / C sur la résistance à la compression à 28jours du béton dans des environnements chauds[4] 11

Figure 5 - Seuil de cisaillement initiale et augmentation de seuil de cisaillement avec le temps normalisé testés à 18-30 C [8] 12

Figure 6 - Viscosité plastique et augmentation de Viscosité plastique avec le temps normalisé testés à 18-30 C°[8] 12

Figure 7 - Effet des conditions d'exposition sur la contrainte de retrait plastique du béton[S].14

Figure 8 - Age d'apparition des fissures des BAP et Béton ordinairell S] 14

Figure 9 - Image microscopique de l'effet. du pontage des fissures dans les bétons fibrés (a) fibre de verre, (b) Fibre de polypropylène[40] 20

Figure 10 - Influence du dosage en super plasüflant sur l'aire fissurée pour les mortiers formulé avec e/f (filler calcaire+ ciment)= 1,07[13] 26

Figure 11 - Image microscopique et schématique de la formation d'un fi lm de polymères AMV sur le front de séchage[73, 74) 27

Figure 12 - Microfissures due au retrait de séchage dans un échantillon de pate de ciment .32

Figure 13 Relation entre le retrait endogène et le retrait chimique[75] 34

Figure 14. Différents types de retraits 35

Figure 15 - Effet du tassement sur la fissuration due au retrait plastique[101) 38

Figure 16 - Module de retrait pour le BAP dans les conditions de séchage sans ventilation[102] ..... .38

Figure 17 - Retrait plastique des BAP et BO dans les conditions de séchage ((a)- sans vent et (b)-avec ventilation)[102] 39

Figure 18 - Résistance à la traction de béton d'une teneur en eau de 194 kg/ m3[111] .41
Figure 19- Simulation deux D de la pression capillaire origine du retrait plastique (fissuration) [118] 43
Figure 20- Pression capillaire des différents BAP en fonction du temps[120] .44
Figure 21- Pression capillaire des bétons autoplaçants et bétons ordinaires[102) 45
Figure 22- Pression capillaire des bétons autoplaçants et bétons ordinalres[121] 45
Figure 23- Coubre type de l'hydratation du ciment .46
Figure 24- Formation des hydrates 47
Figure 25- Relation aire fissurée-retrait piastique[13) .48
Figure 26- Fissuration à l'état frais en termes de retrait plasuque et capacité de déformation du béton[135] .49
Figure 27- Phénomène du ressuage dans un béton frais 50
Figure 28-Aspeet. de la. pellicule d'eau sur la surface du béton 51
Figure 29-Courbe typique du phénomène de ressuage d'une pâte cimentaire 52
Figure 30-Différents dispositifs de retrait empêchés 60
Figure 31-Courbes granuiométrique du sable et des graviers 65
Figure 32-Essais au cône dAbrams pour le BAP et 130 70
Figure 33-Essais de la boite en L pour nos formulations BAP 71
Figure 34-Essais de stabilités au tamis pour formulations BAP 72
Figure 35-Dimensions du mini cône et mini vfunnel. 74
Figure 36- Points d'action pour un BAP dans le climat sévère 75
Figure 37-Essai de ressuage 79
Figure 38-Dispositif de retrait empêché (a) béton (b) mortier 80
Figure 39-Loupes et microscope utilisé dans la mesure des fissures 81
Figure 40- Apparition des fissures (a) Image photographique (b) Image microscopique 81
Figure 41-Mesure de la prise (a) appareil Vlcat (b) échantillon du MBE 82
Figure 42-Chambre climatique (a) prise (b) retrait empêché 83
Figure 43- Courbe du ressuage des BAP et BO 90
Figure 44- Taux de ressuage des BAP et BO en fonction du temps 90

Figure 45- Taux et Capacité du ressuage du BAP et BO en fonction de résistance à la compression 91
Figure 46- Courbe du ressuage des mortiers de béton équivalent mBAPe et mBOe 93
Figure 47- Taux de ressuage des mBAPe et mBOe en fonction du temps 93
Figure 48- Taux et Capacité du ressuage des mBAPe et mBOe en fonction de résistance à la compression 94
Figure 49- Différence de ressuage entre le béton et le mortier 97
Figure 50- Courbes de longueurs de fissuration de mBAPe et mBOe en fonction du temps dans les conditions de laboratoire 100
Figure 51- Courbes de longueurs de fissuration de mBAPe et mBOe en Fonction du temps dans les conditions de (30C ° Temp) 101
Figure 52- Courbes de longueurs de fissuration de mBAPe et mBOe en fonction du temps dans les conditions de (SOC ° Temp) 102
Figure 53- Courbes de longueurs de fissuration de mBAPe et mBOe en fonction du temps dans les conditions de (30C ° T.mporoturo+15km / h V•nt) 103
Figure 54- Courbes de longueurs de fissuration de mBAPe et mBOe en fonction du temps dans les conditions de (SOC °T.mp•roturo+15km / h V.m) 104
Figure 55- Largeur de fissuration des BAP et BO dans les conditions de laboratoire 105
Figure 56- Largeur de fissuration des BAP et BO dans les conditions de (30C ° T.mp) 106
Figure 57- Largeur de fissuration des BAP et BO dans les conditions de (SOC° T•mp) 106
Figure 58- Largeur de fissuration des BAP et BO dans les conditions de (30C ° Temperature+15km / h Vent) 107
Figure 59- Largeur de fissuration des BAP et BO dans les conditions de (SOC ° Temperature+15km / h Vent) 108
Figure 60- Temps de prise des BAP et BO dans les conditions de laboratoire 111
Figure 61- Temps de prise des mBAPe et mBOe dans les conditions de laboratoire 111
Figure 62- Temps de prise des BAP et BO dans les conditions de 50 C ° Temp 113
Figure 63- Temps de prise des mBAPe et mBOe dans les conditions de 50 C ° Temp 113
Figure 64- Temps de prise des BAP et BO aux conditions de 50 C ° Temp+ 15 km/h Vent 115

Figure 65- Temps de prise des mBAPe et mBOe aux conditions de 50 C ° T + 15 km/h V 115
Figure 66- Effet d'un supplément d'eau sur la. longueur de fissure de mBAPe en 30 C ° 122
Figure 67- Effet du supplément d'eau sur la longueur de fissure de mBAPe en (30 C ° Temp+ 15 km/h Vent) 123
Figure 68- Effet du supplément d'eau sur la longueur de fissure de mBAPe en (50 C ° Temp) 124
Figure 69- Effet. d'un supplément d'eau sur la longueur de fissuration de mBAPe en (50 C ° r.,,« 15 km/h Vent) 125
Figure 70- Effet d'un surplus en superplastifiant sur la longueur de fissure de mBAPe en 30 C °)26
Figure 71- Effet d'un surplus en superplastifiant sur la. longueur de fissure de rnBAPe en (30 C ° Temp+ 15 km/h Vent) 127
Figure 72- Effet du surplus en superplastifiant sur la longueur de fissure de mBAPe en 50 C ° 128
Figure 73- l~ffet. d'un supplément. de superplastiliant sur la longueur de Iissurat.ion de mBAPe en (50 C ° T.mp+ 15 km/h V.,,t) 129
Figure 74- Effet du supplément d'eau sur la largeur de fissure des BAP en (30 C ° Temp) 130
Figure 75- Effet du supplément d'eau sur la largeur de fissure des BAP en (30 C ° Temp+ 15 km/h Vent) 131
Figure 76- Effet. du supplément d'eau sur la. largeur de fissure des BAP en (50 C ° Temp) 132
Figure 77- Effet du supplément d'eau sur la largeur de fissure des BAP en U>0 C ° Temp+ 15 km/h Vent) 133
Figure 78- Effet cl 'un surplus en superplastifia.nt sur la largeur de fissures des SAP en 30 C ° 134
Figure 79- Effet du supplément en superplastifiant sur la largeur de fissures des SAP en (30 C ° Temp+ 15 km/h Vent) 135
Figure 80- Effet du supplément en superplastifiant sur la largeur de fissures des BAP en (50 C "Ternp) 136

Figure 81~ Effet du supplément en superplastifiant sur la largeur de fissures des BAP en (50 C ° Temp+ 15 km/h Vent) 137

Introduction générale

Dans la construction, l'utilisation des bétons autoplaçants a permis l'élimination d'énormes problèmes de mise en œuvre tels que la vibration, le blocage et la ségrégation. Les BAP peuvent être considéréescomme des matériaux de construction innovants qui offrent beaucoup d'avantages par rapport aux bétons conventionnels.

Comme l'utilisation des BAP deviennent de plus en plus répandue, les spécifications de certaines caractéristiques telles que la durabilité, la qualité de mise en œuvre. la compacité et l'optimisation des formules deviennent de plus en plus importantes. Les connaissancesactuelles concernant les compositions des BAP permettent. d'assurer dans une certaines mesures ces caractéristiques. Celle-ci est contrecarrée toutefois par le non-contrai de leurs déformations. Lorsqu'elle est empêchée, elle conduit à la formation de microfissures, voire de fissures. En effet, toute déformation conduisant à la fissuration joue un rôle important vis-à-vis de la cinétique de pénétration et des transferts des agents agressifs. Ces fissures entraînent une augmentation de la porosité et par conséquent de la perméabilité.

Cette thèse fait le point sur la question de la maîtrise des fissures, et tout particulièrement le cas de fissuration due au retrait plastique des BAP. Le cas de fissurations dues à l'application de forces extérieures autres que celles dues à un retrait gêné ou empêché n'est pas traité ici. Au cours des deux dernières décennies, des recherches importantes ont été consacréesau retrait et à la fissuration des BAP. La majorité des études ont porté sur le retrait à long terme et sur la réduction de potentielle fissuration due au retrait à l'état durci.

Le but des premières études effectuées dans ce cadre est d'essayer de comprendre la différence entre le BAP et le béton ordinaire en termes de déformations. Dans un second temps, les recherches sont orientées vers la proposition de solutions visant à minimiser le retrait plastique et son potentiel de fissuration.

La littérature affirme que le BAP dans les conditions normales se fissure plus qu'un béton ordinaire, ceci est dû principalement à la présencedes fines. La tension capillaire maximale qui se développe au cours du séchage est proportionnelle à la tension surfacique de l'eau interstitielle, plus le diamètre des pores est petit, plus la pression est grande. D'un autre coté les fines absorbent une grande quantité d'eau et par conséquent minimise le ressuage. Ces problèmes remettent en question l'intérêt des BAP, notamment dans les pays marqués par un

climat chaud, où le taux d'évaporation est important. Ce phénomène de ressuage peut être dans ce type de climat un avantage précieux, considéré comme la seule protection naturel le de la surface du béton et qui garantit. l'humidification du matériau durant les temps d'évaporation excessive.

Ce travail consiste à investir la manifestation du ressuage depuis son originejusqu'à la solution proposée afin de protéger la surface du BAP, particulièrement dans les climats chauds. Il n'est guère aisé de cerner correctement ce phénomène mettant en évidence un manque de connaissances expérimentales et de modélisations convaincantes notamment pour les bétons autoplaçants.

Le but de cette étude est de formuler un béton qui répond au critère d'autopla.çabilîté sans ségrégat.ion d'une part, et qui a. d'aut re part, un ressuage suffisant pour protéger sa surface.

L'intérêt de ce phénomène dans les conditions sévères nous a poussé par la suite à expérimenter des BAP avec des quantités supplémentaires d'eau et de superplastifiant afin de réduire l'aire fissurée. L'idée de ce travail est basée sur le fait qu'en ces conditions sévères, une grande quantité d'eau s'évapore dès les premières heures du coulage el. ceci requiert une correction en formulation.

La problématique de la présente étude tente alors de trouver la relation entre le ressuage et la fissuration due au retrait plastique, puis d'envisager une solution prédictive par l'ajustement. de paramètres de formulation pour limiter la. portée de ces fissures.

Nous sommes donc arrivés à mettre au point un protocole expérimental qui permet d'entrevoir les adaptations nécessaires aux formulations des BAP pour limiter ce phénomène (fissurations dues au retrait plastique).

Malgré les travaux menés sur le retrait et la fissuration des BAP, peu de chercheurs ont essayé de trouver une solution vis-à-vis de la formulation. Dans cette étude notre objectif est :

- Etudier le phénomène de ressuage des BAP et le comparer à celui du béton ordinaire.
- Trouver la relation entre le ressuage et la fissuration dans les climats chauds et à quel point ce phénomène (ressuage) pourrait servir d'avantage à protéger la surface du matériau.
- Comparer la fissuration observée sur des BAP à jeune âge avec des bétons ordinaires ayant les mêmes rapports E/C.
- Etudier l'effet d'un supplément en eau et en superplsatifiant sur la fissuration des BAP.

Notre mémoire se divise en parties suivantes :

Première partie : elle inclut les chapitres 1 et 2, dont le premier comporte des résumés et recueils des connaissances actuelles sur les BAP, état de l'art sur les travaux réalisés en termes de déformation plastique et une présentation des solutions existantes pour limiter la fissuration. Le deuxième chapitre comporte une présentation de la terminologie, des concepts et des procédures associées à l'étude de la fissuration des bétons ordinaires et des BAP dans les climats chauds, avec une revue de la littérature des programmes de recherche similaires à ceux effectués ici. Cette partie synthétise également les procédures et les tests de retrait empêché comparés avec les méthodes existantes ainsi qu'une discussion critique sur leur capacité de création de fissuration selon Jeurs géométries et leurs formes.

Deuxième partie : cette partie est composée du chapitre 3 qui présente les matériaux utilisés, la préparation des échantillons et les procédures des essais avec un descriptif des méthodes uti lisées, les outils expérimentaux et dispositifs pour étudier le ressuage, la fissuration des bétons et des mortiers ainsi que le temps de prise de ces derniers.

Troisième partie : c'est la partie expérimentale, regroupée dans les chapitres 4 et S.

Le programme expérimental traite de la problématique de la fissuration due au retrait plastique et des solutions vis-à-vis de la formulation.

Le 4ème chapitre est consacré à l'étude comparative du ressuage des bétons ordinaires et de celui des BAP d'une part et leurs mortiers équivalents d'une autre part ainsi que l'étude de la fissuration dans les conditions climatiques sévères. Le temps de prise des différentes formulations a été également étudié dans ce chapitre.

Le Sème chapitre est consacré à l'effet. d'un surplus en eau et en super-plastifiant sur la fissuration des BAP par temps chaud. Cette partie regroupe les résultats dans des graphs séparésavec un bref examen, suivi d'une discussion. interprétation et une conclusion finale.

Des perspectives pour la poursuite de ces recherches ont été exposéeset présentéessous forme de points permettant d'orienter les prochains travaux expérimentaux.

Chapitre 1

Généralités et problématique

1.1 Introduction

Ce chapitre représente une introduction au retrait plastique et fissuration des BAP, il contient des définitions et des généralités sur ce type de béton.

L'une de ces parties est consacréeà l'influence du climat sévère sur les propriétés des bétons en général et les bétons autoplaçants en particulier, ainsi que les travaux de recherche effectués sur la fissuration des BAP dans les pays chaud.

Cette partie bibliographique présente également des solutions et des préventions existantes dans la littérature, pour limiter la fissuration des BAP.

1.2 Généralités sur les bétons autoplaçants

Le béton autoplaçant est un matériau de haute performance qui est conçu pour circuler dans un coffrage sous son propre poids. Il est considéré comme une nouvelle classe de béton en raison de la nécessité des nouvel les méthodologies de construction. Au début des années 2000, l'intérêt pour le BAP a conduit à la fondation de nombreux comités scientifiques et projets de recherche avec l'objectif de recueillir et de présenter un examen de la technologie du BAP, ainsi que de fournir des recommandations et proposer une vue unifiée sur les tests et l'évaluation de ce type de béton.

Les BAP ont été utilisés la première fois au Japon dans les années 80 afin de réduire le coût de vibratlon et de la mise en œuvre avec l'intention d'améliorer la durabilité à long terme. Depuis sa première utilisation, les BAP sont devenus le centre d'intérêt. de la recherche et ils ont gagné une place dans le domaine de la construction, ces bétons ont révélé beaucoup d'avantages mais aussi des inconvénients. En 2016, ils sont encore un sujet de recherche partout dans le monde. Le sujet de ces recherches diffère d'une région à une autre selon la spécificité du pays et de son climat ainsi que de ses exigences de construction. Jusqu'à présent, les BAP ont déjà été utilisés dans de nombreux projets urbains et dans la construction des infrastructures. Ils sont très populaires pour le préfabriqué, vue sa mise en œuvre très pratique. Cependant, ce type de béton reste toujours sans recommandations générales ou méthode de formulation unifiée, cette dernière reste restreinte aux experts et spéculée par les grands groupes de construction.

13 Particularité de la composition des BAP

La formulation d'un béton autoplaçant a une particularité par rapport aux autres types de béton. Elle nécessite lutilisation des matériaux et des conditions suivantes :

- Une contenance élevée en matière cimeruaire afin d'assurer la durabilité à long terme.
- Des ajouts minéraux pour limiter les risques de ségrégation et assurer ta maniabilité.
- Un super plastifiant ou un haut réducteur d'eau pour garantir une certaine fluidité.
- Une sélection rigoureuse des granulats avec une minimisation de son volume global et de son diamètre maximal afin d'éviter te phénomène du blocage et ta ségrégation.
- L'utilisation d'un agent de viscosité est nécessaire dans certains cas mais en général il peut être éliminé.

Figure 1 - Caractéristiques d'un béton autoplaçant.

Les propriétés des BAP à l'état durci peuvent être considérablement influencés par l'augmentation de la teneur en fines et des ajouts minéraux, qui affectent ou diminuent par conséquent la résistance à ta compression, augmentent le module élastique, le fluage et te retrait (autogène et séchage). *A* l'inverse leurs présence améliore la maniabilité, la consistance et minimise tes risques de ségrégation.

Les adjuvants chimiques ont une légère influence sur la résistance à ta compression ainsi que sur te temps de prise.

1.4 Intérêt technique d'utilisation des BAP dans la construction

Bien que le BAP ne remplace pas complétement le béton conventionnel, le manque de main-d'œuvre qualifiée et les exigences de la construction demandant un produit de qualité supérieure ont favorisé l'utilisation des BAP.

La technique de mise en œuvre du béton est restée la même depuis longtemps. Le concept de base du compactage du béton en utilisant l'énergie de vibration est restée inchangée. L'un des problèmes associés à une compression manuelle par vibration est l'assurance de qualité, notamment dans les structures complexes, résultant une compression insuffisante pendant la coulée. Un autre problème important est lié à l'impact de la manipulation classique et des techniques de mise en œuvre sur la santé et la sécurité des travailleurs. Les méthodologies de construction ne permettent pas plus de liberté lors de la conception structurelle et imposent souvent des restrictions considérables sur l'archltecte. L'introduction de la technique du béton autoplaçant a permis de changer considérablement la façon de construire et le coulage du béton.

Son intérêt technique dans la construction est très grand, parmi ces nombreux avantages, on peut citer :

- amélioration de la qualité du béton et la réduction de la réparation sur site.
- réduction du temps de construction.
- réduction des coûts globaux.
- possibilités d'utilisation de «fines», qui sont actuellement des produits déchets coûteux à éliminer.
- donner de meilleures finitions de surface.
- une plus grande liberté dans la conception.

1.5 Utilisation des BAP dans les pays à climat chaud

Le climat chaud est un terme utilisé pour désigner les pays qui ont des valeurs de température et de vent très élevésavec une humidité relative qui peut être très basseou très élevée.

La fissuration à jeune âge est une préoccupation permanente pour les constructeurs et un défaut de protection de la surface peut causer de nombreux problèmes en termes de durabilité,

lieux de faiblesse (fissures) à partir desquels les agents agressifs peuvent pénétrer et créer des dommages aux armatures au fil du temps. Ce type de fissure est observé sur une surface de

béton récemment placé, plus particulièrement pour les éléments de béton de structure horizontales, surtout dans les pays qui affichent un climat chaud tels que l'Australie, la Nouvelle-Zélande, Etat Unies., Afrique du Sud, Moyen Orient, et le grand désert africain au sud de l'Algérie, où les conditions chaudes sont souvent présentes durant tous les mois de l'année.

Les premières études de classement et de caractérisation des climats dans la construction ont été initiées par Manze1[1]. et publiées sous forme d'un tableau. Beaucoup de chercheurs ont ensuite uti l isés ces travaux comme référence pour développer leurs propres équations estimatives du taux d'évaporation, la plus connue est le manographe de l'ACI en 1992 [2]. qui fournit un moyen d'estimer la vitesse d'évaporation et le transfert de l'humidité à la surface du béton en fonction de la température ambiante, la température du béton, l'humidité relative et la vitesse du vent.

Figure 2 - Abaque ACI pour évaluer le taux d'évaporation d'une surface du bét.on[3].

Avec une connaissance préalable du taux de ressuage, les précautions à prendre en se basant sur ces données sont bénéfiques pour la correction de la teneur en eau ou les paramètres de formulations, particulièrement dans les conditions et les périodes assezsensibles.
Chaque année, un grand nombre de projets de construction en béton sont exécutés à travers le monde, dans de nombreux pays au climat chaud. Bien que beaucoup de projets d'infrastructure en béton ont été réalisés ou sont en cours de réalisation en Algérie, l'utilisation des BAP reste limitée, et jusqu'à présent, il n'y'a pas de vraies statistiques concernant son utilisation. Contrairement à la pratique, les travaux de recherchessur les BAP avancent plus nettement.

1.6 Effet du climat chaud sur les propriétés du béton

De graves défaillances apparaissent dans certaines constructions en béton, et plus particulièrement celles réalisées en béton autoplaçant, ce qui affecte sa durabilité, notamment dans les pays chaud. Généralement, ce problème est dû à trois causes principales:

- Effet agressif des conditions météorologiques.
- Utilisation de matériaux non appropriés à un tel type de béton ou de mauvaise quai ité
- Travail non qualifié ou pratiques de conception qui ne sont pas en convenance avec les conditions locales.

La détérioration du béton dans les conditions climatiques chaudes (dans les régions désertiques) est enregistrée sous forme de fissuration précoce lors de la réalisation, ou à long terme, au fil du temps. Le temps chaud est défini dans le Manuel ACI comme une combinaison de haute température de l'air, avec une Faibleou haute humidité relative et vitesse du vent.

La plupart des régions du sud algérien sont typiquement considérées comme climat chaud. Dans ces régions, les températures estiva les excèdent souvent les 40 C_o. Le tableau 1 récapitule les principales données climatiques des régions sahariennes algériennes au cours des 10 dernières années.

Les principaux effets des conditions chaudes sur la qua ité du béton peuvent être comme suit :

- Perte rapide de consistance et de maniabilité
- Chute de résistance à la compression
- Augmentation de la fissuration due au retrait plastique

De nombreuses enquêtes ont été menées pour évaluer les effets des conditions climatiques chaudes sur les propriétés du béton et la quasi-totalité de ces recherches sont menés sur les propriétés à l'état durci et les caractéristiques de durabilité.

paramètres	Valeur maximal	Valeur minimal	Intervalle Durant la saison estival
Température	56 C"	3 C°	29-40 C°
Humidité	75%	5%	10-45%
Précipitations mensuelle	14mm	14mm	0-4mm
vitesse du vent	35km/h	0 km/h	25-35km/h

Tableau 1 Principaux donnéescl irnatiques du désert algérien[4]

L'étude de Abdullah et Almusallam[5]. montre l'effet du climat. chaud sur les propriétés du béton exposé aux différentes conditions climatiques. L'effet de la température, le vent et l'humidité relative sur le retrait plastique. la résistance à la compression et la porosité ont été étudiés. Les principaux résultats ont montré l'effet du climat sévère et les conditions météorologiques sur la détérioration du béton et de ses propriétés {fissuration, résistance à la compression). Une température trop élevée affecte la porosité du béton.

Berhane [6] a étudié l'effet du climat chaud et humide sur la résistance à la compression du mortier, les variables de cette étude étaient la température de l'air, du mortier et le type de ciment. Il affirme que le climat chaud à une influence négative sur la résistance à la compression à 28 jours, cette dernière chute avec l'utitisation d'une classe cimentaire très élevée.

Figure 3 - Effet des conditions d'exposition sur la résistance à la compression du béton[S].

Ait Aider [4] montre qu'une augmentation du rapport E/C dans les climats sévères peut donner un effet contraire à celui des travaux de Barhane et peut assurer !a résistance nécessaire à 28 jours. Cette augmentation du rapport E/C garantit l'humidité nécessaire pour le processus d'hydratation. Ces travaux ont été effectués sur des éprouvettes de béton de différents rapport E/C conservés dans cinq différent cures et conditions climatique.

- Température 20 C°, l'humidité relative de 100%, immersion total dans l'eau (TI).
- Température 25 C°, l'humidité relative de 35%, dans des conditions de laboratoire (LC).
- Température 50 C°, l'humidité relative de 10%, sans aucune cure {NC), après dans les conditions de laboratoire jusqu'a l'âge de 28jours.
- Température 50 C°, l'humidité relative de 10%, mis dans un tissue humide pendant 5 jours (HC), puis en conditions de laboratoire jusqu'a l'âge de 28jours.
- Température 50 C", l'humidité relative de 10%, film humide de sac de ciment pendant Sjours (FB), puis en conditions de laboratoire jusqu'à l'âge de 28jours.

Figure 4 - Influence du rapport E / C sur la résistance à la compression à 28jours du béton dans des environnements chauds[4].

Le comportement rhéologique du béton est aussi influencé par la température et les climats chauds. Ces conditions ont un effet négatif sur la consistance et la maniabilité. Cette dernière se caractérise par l'affaissement. des bétons ordinaires ou l'étalement pour les BAP. Plus la température est élevée, plus il y'a une perte d'ouvrabilite. De plus la température affecte les superplastifiants et influe leurs compatibilité avec les matériaux cimentaires[7].

Petit[8] a montré également. dans d'autre travaux l'effet de la température sur le seuil de cisaillement et la viscosité plastique initiale Fig. 5 et 6.

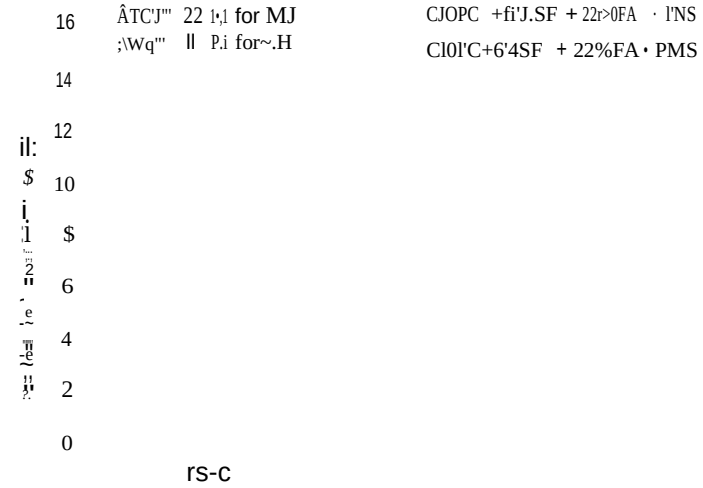


Figure 5 - Seuil de cisaillement initiale et augmentation de seuil de cisaillement avec le temps normalisé testés à 18-30 C [8].

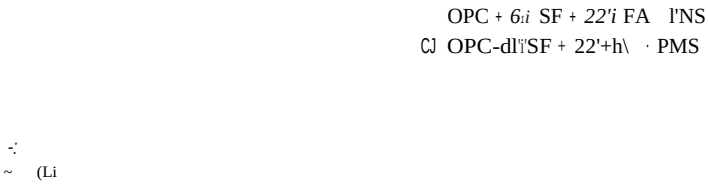


Figure 6 - Viscosité plastique et augmentation de Viscosité plastique avec le temps normalisé testés à 18-30 C°[B].

Cette étude rhéologique a été menée sur des mortiers avec différents types de super plastifiants, des ajouts minéraux en substitution du ciment avec deux rapports E/L, les résultats trouvés montre que le seuil de cisaillement et la viscosité plastique varient

linéairement avec l'effet couplé du temps et de température pour les mélanges faits avec deux types de super plastifiants (PMS et PNS). Cependant, pour les mélanges à base de super plastifiant PCP, la. température du matériau et le type de l'ajout minérale influencent l'évolution de la rhéologie avec le temps.

Nehdi et El-Mertini[9] confirme l'influence de la température sur les paramètres rhéologiques dont les principaux résultats de leurs études sur l'effet de la température et le temps de malaxage indiquent que les constantes Bingham sont significativement affectées par les variations de température.

Dans l'étude de Golaszewki [10] l'influence de la performance des super plastifiants a été investiguée en tenant compte des facteurs suivants : origine chimique de super plastifiants, le dosage de super plastifiant, rapport E / C, le type de ciment, les propriétés du ciment et la température physique et chimique du matériau.

Les résultats de cette recherche indiquent que la température influence les propriétés des mortiers formulés avec des supers plastifiants. Une baisse de la température diminue le seuil de cisaillement, mais augmente sensiblement la viscosité. Par contre une augmentation de la température a un effet inverse sur ces deux propriétés.

La dernière conséquencedu coulage du béton dans un climat chaud, sujet de notre thèse, est la fissuration due au retrait plastique, observée sur les bétons ou sur les mortiers à l'état Irais dans les premières heures du coulage, elle prend une ou plusieurs formes :

- Fissures diagonales au bord de la dalle.
- De très longues fissures à la surface du béton orientées de façon aléatoire.
- Fissures au niveau des armatures ou dans les points du changement de section.

Ces fissures peuvent aller de quelques centimètres jusqu'au mètres en longueur et de micromètres jusqu'aux millimètres en largeur.

Une fissure très longue déforme la surface du béton e(. gâche l'aspect. esthétique et architectural de la construction, tandis qu'une fissure très large et profonde affaiblie la structure et permet la pénétration de l'humidité, et expose l'armature à la corrosion.

Ces fissures sont liées à l'amplitude et. la cinétique du phénomène du retrait. plastique, qui est lui-même lié à la composition du béton et aux conditions climatiques dans lesquelles le béton est coulé. Ces fissures se développent principalement sur la surface horizontale du béton, elle est généralement la conséquencede la disparition de ra pellicule d'eau de ressuage.

La vitesse à laquelle cette eau atteint la surface et la quantité totale accumulée dépend de la profondeur du béton.

Sur une étude comparative de fissuration due au retrait plastique, Samman et a1[11] affirment que la présence du vent accélère la dessiccation, et augmente la perte d'eau et conduit rapidement à la fissuration précoce. Les travaux de Almusallam et al[S, 12] sur la fissuration due au retrait plastique montrent clairement l'effet du climat sévère sur ce dernier et son effet sur la propagation des fissures àjeune âge.

Figure 7 - Effet des conditions d'exposition sur la contrainte de retrait plastique du béton[SJ

Quelques années après T urcry [13] a étudié le retrait empêché des BAP comparés avec des bétons ordinaires dans des conditions de séchage sans et avec ventilation, les résultats confirment l'influence des conditions météorologique sur la fissuration et sur l'âge de son apparition.

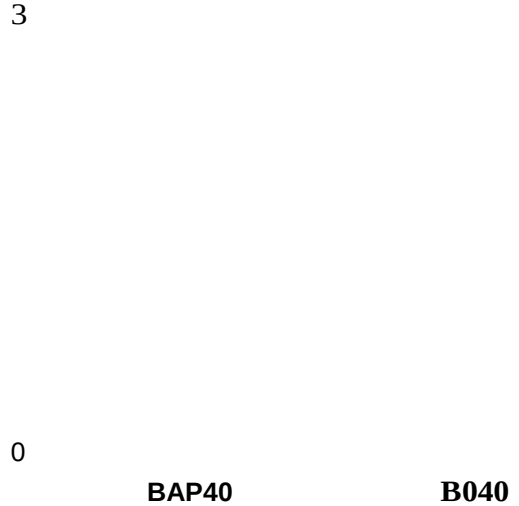


Figure 8 - Age cl'apparition des fissures des BA P et Béton ordinaire[13]

Mbemba-Kiele[14] affirme que le séchage excessif en générale et particulièrement en présence du vent a une importante influence sur la fissuration du béton, Dans des conditions sévères, le vent, bien qu'il soit faible (20km/h), influe, de façon prononcé les bétons. Et l'absence de cure surtout dans les premières heures de coulage peut étre fatale pour !a durabilité du béton. Pour son étude, les conditions de séchageont été simulées dans une chambre climatique de 20 C° de température et de 50 % d'hygrométrie et une vitesse du vent de 5m/s. L'exposition d'un béton à des conditions climatique sévèresest la cause du déséquilibre hygrométrique qui se manifeste dans ce dernier, traduit par le mouvement de l'eau du béton vers l'extérieur.

Fontana et a1[15] ont étudié le risque de fissuration due au retrait plastique en comparant trois méthodes de mesure de retrait empéché, le paramètre climatique influant dans cet étude est le vent qui diffère en vitesse d'une méthode à une autre. Dans sa propre méthode proposée la vitesse du vent a été limité à 6 m/s. Typiquement, la vitesse et la température du courant d'air du vent diminue progressivement le long du tunnel tandis que l'humidité relative augmente progressivement de 27% à l'avant de la soufflerie jusqu'à 32% dans sa fin.

« La relation du ressuage avec la fissuration due au retrait plastique » est le sujet de notre étude et le climat sévère est le contexte de cette recherche. Les travaux effectués dans cette thèse concernent les bétons autoplaçants comparés avec des bétons ordinaires. Pour chaque formulation du BAP il existe une formulation ordinaire équivalente en rapport E/C et avoisinante en résistance à la compression. Pour compléter notre analyse de la fissuration dans ces conditions, une étude complémentaire a été effectuée portant sur des mortiers dits mortiers de bétons équivalents, dont le but est d'enregistrer les longueurs de fissuration de l'ensemble de ces formulations en fonction du temps.
La mesure du ressuageet du temps de prise sera effectuée pour toutes les formulations.

Les paramètres choisis pour cette étude sont :

- rapports E/C
  conditions de séchage.
- quantité d'eau et de super plastifiant.

Les principaux phénomènesétudiés sont :

- ressuage
  fissuration
- temps de prise

1.7 Problématique et état de l'art

Dans la littérature l'apparition de la fissuration précoce est attribuée à quatre forces motrices, L'évaporation rapide de l'eau, le tassement différentiel, la dilatation thermique différentielle et le retrait endogène dans la phase plastique[16, 17]. La formation de fissures à jeune âge se produitjuste après la pose du matériau, soit avant le début de prise initiale, lorsque le béton a perdu sa fluidité mais n'a pas encore atteint toute la cohésion appréciable[18].

Le rétrécissement du béton durant cette phase est provoqué premièrement par l'hydratation du ciment[19] (dégagement de chaleur), et la formation des ménisques qui crée une forte contrainte de traction à la surface (due à l'évaporation de l'eau capillaire)[20, 21]. L'immigration des gouttes d'eau par évaporation laisse des vides dans le matériau et pousse les grosses particules à se tasser et se consolider[22]. Ce mouvement vertical avec le rétrécissement horizontal sont les causes directes de cette fissuration précoce, particulièrement quand le béton est retenu ou lorsque ce retrait est gêné ou empêché[23].

L'étude des facteurs affectant le retrait plastique est importante dans la prévision de ce dernier afin d'éviter la fissuration.

Bien qu'il révèle beaucoup d'avantage et quelques inconvénients (la fissuration précoce), il existe peu d'études consacrées à la fissuration des BAP due au retrait plastique, à cause d'un manque de dispositifs appropriés qui permettent la mesure du retrait empêché à petite échelle. Certaines études [13, 24] sont consacrées au retrait plastique et au retrait endogène. Ëtudier la déformation du BAP à jeune âge peut aider à contrôler et prévenir la fissuration précoce. Tandis que dans d'autres travaux, étudier directement le retrait empêché et les tests de fissuration en variant les paramètres endogènes et exogènes est une solution directe pour la modélisation et l'expérimentation de ce phénomène. Plusieurs recherches[25, 26] ont choisi de suivre la deuxième approche.

La littérature affirme que le BAP se fissure plus qu'un béton ordinaire clans les conditions normales due principalement à !a présence des fines, leur utilisation pour les dalles(BAP) avec une grande surface d'exposition augmente leurs taux d'évaporation, à l'inverse des bétons ordinaires qui marquent un taux de ressuage plus élevé. Par contre, cette contenance en matière fine pour les BAP augmente leur compacité, réduit considérablement leur porosité, et par conséquent assure leur durabilité[27]. La littérature avance nettement que la portée du retrait des BAP est beaucoup plus importante que celle des bétons courants (BO), Eyi [28] affirme que le retrait des BAP reste toujours supérieur par rapport à celui du BO . Bien que

d'autres auteurs soutiennent qu'il n'y a pas de grandes différences entre le comportement des deux bétons vis à vis du retrait à jeune age[29, 30].T urcry déclare que le retrait plastique du BAP peut être plus grand dans des conditions moins sévères, mais en présence du vent les deux types subissent le même sort[31].

Comme le béton autoplaçant (BAP) a généralement un volume de pète plus élevé par rapport au béton vibré, il est prévu qu'il aura un tassement et un retrait àjeune age plus élevé[32]. Nos connaissancessur le risque de fissuration sont très faibles, car il y a peu de publications sur le retrait et la fissuration des BAP. Toutes ces publications portent principalement sur des comparaisons de béton vibré ordinaire avec des BAP ou sur l'influence des ajouts minéraux. Yasumoto et Al [33] ont étudié l'effet des différents ajouts minéraux sur la fissuration des BAP. Les résultats montrent que la substitution en ciment réduit la fissuration surtout dans le cas d'utilisation du filler calcaire. Turcry et A1[34] ont étudié le risque de fissuration des BAP comparé avec des bétons ordinaires, le dispositif de retrait empêché utilisé est celui de l'anneau, leurs résultats indiquent que le risque de fissuration est le même pour les deux types de bétons. Par contre ces fissures, dans le cas des BAP, apparaissent beaucoup plus tôt.

Leemann [32] indique que le module d'élasticité du BAP est inférieure à celui du 80 ainsi que la résistance à la compression à 28 jours, contrairement au retrait plastique très élevé pour les BAP.

I.ofqren [30] et Al ont étudié la fissuration précoce du béton autoplaçant ,cette étude est portée principalement sur l'influence des différents constituants et les mélanges sur la tendance de fissuration due au retrait plastique, les résultats indique qu'une forte tendance à la fissuration se génère lorsque le béton subit un grand retrait endogène ou lorsqu'il est exposé à un taux d'évaporation très élevé.

1.8 Solutions préventives pour limiter la fissuration

Les qualités recherchéesà travers un BAP seraient très affectées si certaines précautions ne sont pas prises dès le départ et/ou durant son jeune age, en particulier par temps chaud et clans un environnement très sévère. En outre les performances d'un BAP s'en amenuiseraient par une température environnante élevée, une faible humidité relative ou une augmentation de la vitesse du vent, une influence qui serait appelée à devenir plus prononcée si l'action de ces différents facteurs climatiques est conjuguée.

Afin de contrôler la fissuration du béton à jeune âge, plusieurs solutions et procédures différentes ont été proposées.Ces solutions ou préventions peuvent être sois en intervention sur l'environnement pour éviter ou minimiser le taux <l'évaporation (externe) ou au sein du matériau lui-même (interne).

1.8.1 Prévention externe

Limiter la fissuration par la prévention externe consiste à minimiser l'effet. des conditions climatiques, faire baisser la température ambiante, ou la température du béton par le refroidissement des matériaux de construction, particulièrement les granulats et l'eau de gâchage avant la préparation du mélange et le malaxage, ainsi que la réduction de la vitesse du vent et de garder l'humidité relative clans des valeurs favorables. Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes et techniques pour stopper l'effet des conditions météorologiques sur la fissuration due au retrait plastique. La plupart de ces méthodes sont inscrites dans des recommandations générales[35]appliquées dans les chantiers et chaque entreprise développe ses propres moyens pour minimiser les effets des conditions météorologiques sur le béton. Ces méthodes sont classéesselon le paramètre climatique sur lequel elles interviennent.

1.8.1.1.1 Vitesse du Vent

Pour minimiser l'elfet. du vent sur les bétons, les constructeurs utilisent la méthode de brise-vent qui permet de stopper son mouvement par des obstacles afin de protéger sa surface, surtout dans la phase plastique et les premières heures après le coulage[36]. Ces brise-vent diffèrent en taille et en matière selon la vitesse du vent et son orientation.

1.8.1.1.2 Température du matériau

Une technique consiste à baisser la température du béton lui-même par l'utilisation des glaces dans l'eau afin de refroidir le mélange. Certaines entreprises font baisser la température des granulats on les stockant dans des endroits à bassetempérature pour obtenir une température normale après le malaxage.

1.8.1.1.3 Température ambiante

Pour minimiser l'effet de la température amblante, il y a plusieurs solutions dans la construction, la plus répandue est l'installation des parasols dans les sites du chantier afin de réduire la température à la surface du béton.

Une autre solution consiste également à bien choisir les moments du coulage du béton. ou la température ambiante sera moins élevée, comme la nuit ou avant le lever du soleil. Cette solution est utilisée dans la région où il y a une grande différence de température entre la nuit et lejour et durant les périodes extrêmement chaudes.

1.8.1.1.4 Humidité relative

L'utilisation d'un vaporisateur afin d'augmenter l'humidité relative au niveau du site du coulage et malaxage du béton est une solution envisageabledans certains cas pour minimiser l'évaporation excessive.

1.8.2 Prévention interne

La prévention interne contre la fissuration due au retrait plastique consiste à modifier la formulation du béton elle-même en changeant les proportions et le pourcentage des constituants, et même le type du matériau utilisé. Le calcul de la nouvelle formulation prend en compte les paramètres climatiques, type de béton et les propriétés et les caractéristiques des matériaux utilisés. La deuxième méthode consiste à incorporer des ajouts qui interviennent au sein de la microstructure durant la période dormante ou qui sert à protéger la surface contre l'évaporation excessive.Ces ajouts diffèrent et se classent selon leur mode d'action et selon leur nature chimique et physique.

1.8.2.1 Cures et protection de la surface

Ces mesuresvisent à réduire le retrait au séchage,en protégeant la surface du béton soit avec des couverts naturels ou chimiques afin de limiter la perte d'eau par évaporation et éviter la dessiccation. Cette solution est déterminante dans les premières heures. Parmi les méthodes de protection de la surface du béton on peut citer :

- Aspersion de la surface avec des produits (une protection superficielle avec un produit de cure ur.ilisé selon des modes d'emploi bien spécifiques, effectuée immédiatement après le coufage)[37].

- Recouvrement de la surface avec des films de plastique, ou par des matériaux absorbant l'humidité tels que des jutes humides, des paillasses ou des lits de sable humide.

1.8.2.2 Incorporation des fibres et adjuvants.

L'incorporation des adjuvants ou l'introduction des fibres avec les mélanges cimentaires permet de contrôler la propagation des fissures.

1.8.2.2.1 Les fibres

Le but de l'incorporation des libres est de réduire la contrainte de traction sur le béton jusqu'a ce que le matériau développe une résistance mécanique. D'un autre côté le malaxage des fibres avec le béton frais offre une capacité mécanique au mélange à jeune âge et permet au béton de résister les contraintes de traction ou d'éviter la propagation des fissures. L'utilisation des fibres polymères synthétiques tels que le polypropylène ou des fibres de polyester permet de réduire le potentiel de fissuration[38].

Mora et a1[39] ont étudié l'influence de l'introducüon des fibres métalliques et un adjuvant réducteur de retrait à base de glycol sur la fissuration due au retrait plastique, les tests de retrait empêché ont été effectuées et exposés à des températures de 40C° avec un vent de vitesse de 40 km/h. Le résultat obtenu montre que l'incorporation de ces adjuvants réduit la fissuration. Les recherches menées par Tara Rahmani et a1[40] montrent que l'inclusion de fibres dans le béton contribue à la réduction de la fissuration due au retrait et que les fibres métalliques sont plus efficaces par rapport aux autre types de fibres parce qu'elles améliorent la capacité de déformation en traction du béton et limitent la propagation des fissures, tandis que les fibres de verre ont de meilleures performances par rapport aux fibres de polypropylène. La réduction de la largeur maximale de la fissure et la zone totale de la fissure dans ses travaux varie respectivement de 30-50% et 40-60%.

Figure 9 - Image microscopique de l'effet du pontage des fissures dans les bétons fibrés (a) fibre de verre, (b) Fibre de polypropylène[40].

Barluenga [41] affirme dans une étude comparative entre les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires (test de retrait empêché modifié d'après celui de Kraai)[42].que l'utilisation des fibres de verre courtes dans le contrôle de fissuration est très efficace et les résultats montrent que l'incorporation de ce type de fibre avec une faible fraction volumique réduit la zone de fissuration totale et la longueur maximale des fissures. Une étude microscopique de la surface fissurée confirme l'effet positif de la présence de fibres de verre dispersées sur le contrôle de fissuration.

Valeria Corinaldesi et a1[43] concluent dans leurs travaux sur la caractérisation des BAP formulés avec différents type de fibres que l'ut.ilisal.ion de ces derniers s'avère être très efficace pour contrôler à la fois la fissuration précoce et pour faire retarder le retrait de séchage particulièrement des bétons autoplaçants et les bétons riche en poudre et pauvres en gros agrégats en général.

Dans la littérature, beaucoup de recherches favorisent l'utilisation des fibres pour réduire ou minimiser la fissuration due au retrait plastique, et les recherches récentes ont pour objectif de développer des matériaux e(. d'utiliser des fines plus performantes et plus efficaces dans ra réduction de fissuration des bétons. Javier Puentes et a1[44] ont étudié l'effet des nana-fibres sur la fîssuration des BAP àjeune âge.

1.8.2.2.2 Adjuvants réducteur de retrait

Un adjuvant réducteur de retrait appartient à une classe de produits de composés organiques et chimiques connus comme agents tensio-actifs, Au niveau moléculaire, les tensioactifs sont des amphiphiles, i.e. chaque agent tensio-actif est composé d'une tète polaire et une queue non polaire. Des molécules qui lorsqu'elles sont ajoutées à une solution aqueuse, s'accumulent à l'interface solution-air et permettent de réduire considérablement les interactions de surface [45].

Réduire la tension inter faciale dans les pores fluides du béton permet de réduire les contraintes capillaires et les déformations dues au retrait (phase de transfert de l'humidité in térleur vers l'extérieur par le séchage)[46].

L'utilisation de l'adjuvant réducteur de retrait. dans la construction est très répandue. Plusieurs travaux de recherche et études ont été menés afin d'exploiter et. développer son influence positive sur la fissuration des bétons [47-51].

D'autres travaux de recherche[49] ont également constaté une réduction substantielle de la fissuration due au retrait plastique du béton contenant des ARR. Cette réduction a été attribuée à un taux d'évaporation inférieure, une retardation d'accumulation de pression capillaire et une diminution du tassement.

Lofgren et Esping [30, 52] montrent que l'ajout d'un adjuvant réducteur de retrait (Glycol polymère, 1% et 2% en masse du ciment) est capable de réduire à la fois le taux d'évaporation et l'a ire totale des fissures dü au retrait plastique.

Passuello [53] dit que l'addition des adjuvants réducteurs de retrait au béton retarde l'apparition des fissures et. réduit. sa largeur de 40%.

Pour les bétons autoplaçants, Valeria Corinaldesi [54] a étudié l'effet de ces adjuvants sur la durabilité des BAP. Ses principaux résultats confirment l'efficacité de ces derniers dans la réduction de retrait de séchage (libre ou empêché).

Les essais effectués sur le retrait plastique des BAP contenant un ARR comparé avec des BAP sans adjuvant. montrent que l'effet de relaxation de contrainte est la cause principale de la réduction de retrait total.

0Jiveira[55] a étudié l'utilisation des ARR clans les BAP afin de contrôler leur retrait endogène. li a mentionné que leur utilisation avec des produits expansifs permettent d'améliorer leur efficacité en termes de réduction de retrait.

L'utilisation d'adjuvant réducteur de retrait a été suggérée pour améliorer les performances du béton en termes de diminution du risque de fissuration liée au retrait de séchage. Diverses formes de ARR sont disponibles commercialement et ils peuvent agir par différents mécanismes. Certains ARR agissent principalement sur le séchage et la perte de masse. Saliba et a1[47] résument que le taux d'évaporation des mélanges de béton avec le ARR est inférieur à celui des mélanges de béton sans ARR après les premières heures de séchage. Le système poreux des bétons avec ARR conduit à moins d'évaporation et moins de tassement, ce qui explique la réduction en fissuration.

1.8.2.2.3 Accélérateurs de prise

Les accélérateurs de prise sont des solutions introduites dans Je mélange pendant le malaxage et qui agissent chimiquement sur le ciment et augmentent sa vitesse d'hydratation, ee qui rend le temps de prise finale plus court, et réduit la durée entre la phase plastique et Je

durcissement. Les accélérateurs les plus utilisés sont à base de chlorure. L'utilisation des accélérateurs de prise permet de réduire la durée de durcissement et par conséquent le béton développe rapidement la résistance à la traction pour éviter la fissuration due au retrait plastique. Bien que la plupart des travaux se mettent d'accord sur l'effet positif du retardateurs de prise sur la fissuration due au retrait plastique[30, 56]. Combrinck et a1[57] disent que ces adjuvants peuvent augmenter légèrement le retrait plastique et la fissuration dans certains cas.

1.8.2.2.4 Retardateurs d'évaporation

Le retardateur d'évaporation est un film à base d'eau ou d'alcool qui réduit au minimum l'évaporation de l'eau de surface du béton récemment coulé, augmentant à la fois la consistance et le temps de prise de la surface. Cet adjuvant est mélangé avec de l'eau, durant le malaxage. En général le retardateur d'évaporation n'affectera pas la résistance finale du béton. Minimiser le taux d'évaporation permet de réduire considérablement la fissuration due au retrait plastique (58]. Cet adjuvant est recommandé dans les cas d'évaporation excessive[59]. Ces produits sont très efficaces contre le séchage et peuvent réduire la fissuration de plus de 40 %[60].

1.8.2.3 Modification de la formulation

L'optimisation des paramètres de composition afin de déduire la meilleure formulation pour les différentes conditions est une solution pour limiter la fissuration des bétons.

1.8.2.3.1 Les fines

L'utilisation des fines en substitution du ciment est l'une des caractéristiques d'une formulation de BAP. Il est connu qu'une formulation qui contient des fines demande plus de quantité d'eau ce qui minimise l'eau interstitielle et par conséquent réduit le taux de ressuage. La présence de ces fines dans un béton améliore sa cohésion et empêche la ségrégation. Cependant, dans les conditions sévères, cette propriété est un inconvénient plus qu'un avantage.

La littérature est divisée à propos de l'effet. des fines sur la Iissurat.lon due au retrait plastique. Une partie des chercheurs interprètent le taux de fissuration plus élevé en présences des ajouts minéraux par ra réduction du taux de ressuage. Par contre certains chercheurs défont son effet positif sur la déformation plastique et sa capacité à minimiser l'aire fissurée.

Selon Ghoddousi et Shirzadi[23], l'utilisation de la fumée de silice avec le latex modificateur dans des BAP avec un rapport E/L égale à 0.45 réduit considérablement les fissures dues au retrait plastique.

T urcry [13] a montré l'effet des additions minérales sur la fissuration dans une étude sur le retrait empêché des BAP. 11 a utilisé des mortiers dont le volume de sable est fixé à 45 % du volume total. 11 a pris comme variable la quantité de super plastifiants, volume des additions sur le volume du ciment et le report Elliant. L'utilisation des grands rapports Addition/ ciment conduit à une fissuration très élevée, à l'exception des fil lers ca Icaire sans adjuvant. Pour des rapports Elliant égal à 1.07, les mortiers avec filaires calcaires fissurent moins que ceux avec cendres volantes.

Barluenga [61, 62] a réalisé une étude sur l'effet des additions minérales sur la fissuration des BAP, il a utilisé comme fines des fillers calcaires et d'autres additions comme le métakaolin. Dans ces tests, l'auteur a évalué le risque fissuration due au retrait à jeune âge, l'évaporation de l'eau, la pression capillaire et il a mesuré la fissuration sur des dalles, exposées à un vent de vitesse de 3 m/s. L'auteur affirme que l'utilisation des Illlers calcaire dans les BAP accélère la vitesse d'hydratation et diminue le taux d'évaporation, tandis que l'utilisation des métakaolins augmente le risque de fissuration.

1.8.2.3.2 Granulats

Les agrégats constituent 70% du volume total du béton. Même si les agrégats sont généralement considérés comme des matières inertes, leurs propriétés influencent le retrait du béton. Les agrégats empêchent le retrait ı ibre de la pâte de ciment et peuvent être un obstacle pour le retrait. Les granulats sont des matériaux poreux susceptibles de diminuer en volume ou de gonfler[63, 64]. Leur volume, forme, diamètre et teneur en eau influent la fissuration dans un béton.

Sécher les gros granulats peut être une solution pour limiter la fissuration des bétons dans les climats chauds. Cartas et al [65] s'accordent sur le principe que même si la teneur en eau totale est maintenue constante, l'eau restant dans ra pâte de ciment dépend en fait de la saturation initiale des agrégats. En outre la quantité réel le d'eau absorbée par les agrégats peut être différente de la quantité théorique. Les résultats de fissuration effectués sur trois mélanges de béton formulés avec des agrégats secs, partiellement saturés et totalement saturés montrent que le béton avec des agrégats secs présente le risque de fissuration le plus faible, car l'uülisatlon des granulats secs permet d'ajouter plus de quantité d'eau au mélange.

L'effet de la taille des granulats ainsi que leurs quantité sur la fissuration a été étudié par Bisschop [66]. Les recommandations fournies par son étude indiquent que la réduction du volume, le diamètre des granulats et l'utilisation des granulats sphériques minimisent la fissuration. Les effets de la taille des agrégats et le degré de microfissuration interne sont évalués par lppei Maruyama et a1[67].

Une étude de l'effet du volume global des graviers et sa granulométrie sur le retrait de séchage des bétons autoplaçants a été menée par Wen Zhu et a1[64]. L'augmentation du volume des graviers diminue la prédisposition des BAP au retrait du séchage,ce qui diminue la fissuration, le volume optimal des graviers est égale à 33%. Le retrait du séchage des BAP diminue avec l'augmentation du volume des graviers de diamètre de 16 à 20 mm.

1.8.2.3.3 Rapport E/C

Il *y* a peu d'études consacréesà l'influence du rapport E/C sur la fissuration due au retrait plastique des BAP dans les climats sévères. Augmenter le rapport E/C minimise le retrait de séchage mais cela nécessite une connaissancede tous les paramètres intrinsèques (formulation) et non intrinsèques (climat) afin de définir le meilleur rapport pour chaque situation car le cahier des charges des BAP est très exigent.

Dans les conditions normales Roziere et a1[68] affirment qu'une augmentation de la teneur en eau et le rapport E/C augmentent le retrait et la sensibilité à la fissuration, ce qui peut donner le contraire dans des conditions sévères. Les bétons avec les rapports E/C les plus élevés assurent plus d'humidité, cette caractéristique est bénéfique, particulièrement dans les période sévères[4].

T urcry [13] affirme que dans une formulation de mortier autoplaçant, l'aire fissurée diminue considérablement en passant ₫'un rapport. E/F = 0.9 à 1.1.

1.8.2.3.4 Volume de pâtes

Le volume de la pâte d'un mélange de béton est généralement défini comme étant la somme du volume du ciment, d'eau, d'addition minérale et d'adjuvants chimiques. L'augmentation du volume de la pâte améliore l'ouvrabilité mais elle peul avoir des effets négatifs sur les déformations. Par exemple, le retrait de séchage est plus grand dans les bétons qui ont des volumes de pâte très élevés[69]. En général, les bétons autoplaçants sont formulés avec des volumes de pâte très élevés par rapport au béton ordinaire. Dans une étude de J'influence des pâtes sur la fissuration due au retrait des BAP, Roziére[68] a fait varier la pâte de ciment de

291 jusqu'au 457 l/m3. a trouvé que le retrait libre augmente avec l'augmentation du volume de pâte, ce qui accroit le risque de fissuration. Pour réduire la fissuration due au retrait plastique des BAP, il faut minimiser la pâte du ciment.

1.8.235 Super plastifiants

Dans la littérature, les super plastifiants sont connus comme un defflocculant à base de matériaux synthétiques solubles dans leau ayant des propriétés très élevées de réduction d'eau. Ils comprennent des composés chimiques tels que la formaldéhyde-mélamine sulfonée, Naphtalène sulfonâtes-formaldéhyde et les Ethers carboxylates[70]

Lou et a1[56] mentionnent que l'utilisation d'un certain type de super plastifiants peut réduire l'aire fissurée. Il y a peu de recherches consacrées à l'étude de l'effet du super plastifiants sur la fissuration due au retrait plastique des BAP. Turcry[13] a mentionné dans ses travaux que les mortiers contenant le plus d'adjuvants et. le moins d'eau sont moins sensibles à la fissuration, étant donné que le super plastifiant est le premier facteur qui modifie le comportement à l'état frais, il peut avoir un effet positif sur la fissuration, surtout en présence du vent. Cette hypothèse a été confirmée dans les travaux de Girrotto et a1[71]. Dans cette étude qui relie la rhéologie à la fissuration due au retrait plastique, l'auteur affirme que le super plastifiant réduit considérablement la fissuration.

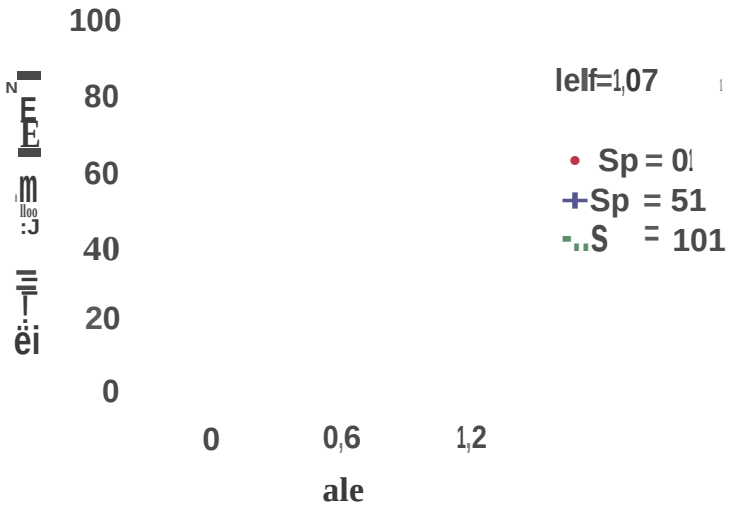


Figure 10 - Influence du dosage en super plastifiant sur l'aire fissurée pour les mortiers formulé avec e/f (filler calcaire+ ciment)= 1,07[13]

1.8.2.3.6 Agents de viscosité

Il est connu dans la littérature que l'utilisaüon des agents de viscosité augmente la fissuration, cette idée est basée sur le fait qu'un AV réduit le taux de ressuage et minimise la ségrégation[72]. Cependant, d'autres travaux de recherche expriment le contraire et mentionnent que l'utilisation de certains agents de viscosité peuvent être une solution de réduction de fissuration [73]. Lin et a1[74] affirment que la fissuration est en corrélation avec la tension superficielle et le dosage en agent de viscosité. Dans cette étude, les adjuvants modifiant la viscosité à base de cellulose (AMV) ont été choisis comme solution pour minimiser la portée de fissuration due au retrait plastique, particulièrement dans le climat chaud. Leurs travaux expérimentaux ont été menés sur des mélanges contenant 25% d'ajouts minéraux de type cendres volantes et de laitier, et deux agents de viscosités de densités différentes. Les résultats indiquent qu'en absence d'AlVIV dans un mélange qui contient des additions de laitier, la viscosité augmente et le taux de ressuage diminue et la fissuration augmente par conséquent. Le contraire a été constaté lors de l'ajout de cendres volantes. Les mélanges qui contiennent des agents de viscosité spécifiées semblent être significativement efficaces dans la réduction de la tension superficiel le, et la réduction de largeur des fissures.

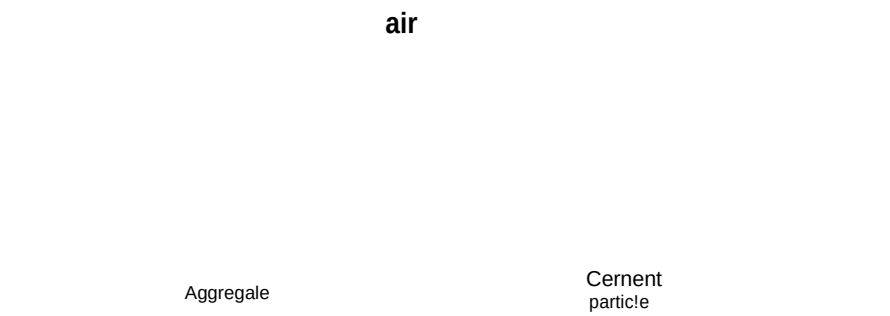


Figure 11 - Image microscopique et schématique de la formation d'un film de polymères AMV sur le front de séchage[73,74)

1.9 Conclusion

Chaque béton doit être conçu pour assurer une durabilité satisfaisante, et plus particulièrement les BAP, surtout quand ils sont utilisés dans les climats chauds. Dans ce chapitre nous avons montré la particularité de ce type de béton et nous avons cité les conditions de ses formulations exigeantes pour atteindre les propriétés de fluidité et de maniabilité.

Ensuite, la problématique de l'utilisation des BAP dans les pays qui affichent un taux d'évaporation très élevées a été présentée et suivie d'un état d'art. des travaux de recherche menées dans ce cadre.

Plusieurs solutions ont été proposées afin de résoudre ou apaiser l'effet. du séchage sur la fissuration due au retrait plastique des BAP. Ces solutions ont été classées selon leur prévention interne ou externe et selon son action sur le béton lui-même ou le climat où le BAP est coulé.

Le but dans cette thèse est de valoriser le phénomène du ressuage en tant que protection naturelle de la surface du béton contre l'évaporation, dans les chapitres qui suivent, un protocole expérimental a été mis en place permettant d'étudier ce phénomène et de définir sa relation avec la fissuration, mais il faudra d'abord définir les mécanismes et les phénomènes qui provoquent la fissuration due au retrait plastique. Cette partie elle sera résumée dans le prochain chapitre.

Chapitre 2

Déformation plastique et phénomènes liés à la fissuration des BAP

2.1 Introduction

Dès les premières heures après le coulage, le béton subit des déformations conduisant à des changements volumiques qui diffèrent en intensité, en durée, en période de manifestation et en contrainte. La pâte cimentaire subit un gonflement lorsqu'elle est mouillée et un rétrécissement lorsqu'elle est séchée. Ces déformations sont classées comme suit :

- Déformation instantanée :
  - retrait plastique
  - retrait chimique
  - retrait de dessiccation
  - retrait endogène
  - retrait thermique
- Déformation différée :
  - fluage
  - retrait à long terme
  - dilatation thermique

Le phénomène de retrait se manifeste en deux phases distinctes, une à l'état frais et une autre à l'état durci.

Le retrait qui touche le béton à l'état frais se manifeste avant les 24 h après le coulage, tandis que le retrait à long terme apparait quelques jours plus tard et continue jusqu'à la fin de la durée de vie du béton.

Notre étude est limitée à la déformation à jeune âge et particulièrement au retrait plastique. Il peut être définit comme toute déformation qui se produit en phase plastique, la période entre la fabrication et la prise du matériau. Le retrait plastique se traduit comme un rétrécissement horizontal ou vertical. Dans la plupart des structures, ce type de retrait est empêché. En conséquence, les contraintes de traction se développent et le béton peut se fissurer si les contraintes dépassent la résistance à la traction du béton. La fissuration des bétons est un phénomène très connu dans la construction, son mécanisme est très complexe et dépend de plusieurs variables. Ces dernières sont appelées «fissures due au retrait plastique», elles peuvent être potentiellement préjudiciables à l'intégrité structurale et la durabilité de l'élément

en béton, mais elles sont dans tous les cas inesthétiques car elles sont généralement larges, longues et visibles à l'œil nu et facilitent la pénétration de substances hostiles à l'intérieur du

béton. Comprendre son origine et son développement dans la vie d'un béton nécessite la connaissance de toutes ces variables et facteurs influant (pression capillaire, retrait, ressuage, évaporation.... etc.). Ce chapitre résume toutes les notions et les définitions des phénomènes en relation avec le retrait plastique ainsi que les mécanismes qui conduisent à ce phénomène et qui contribue à son développement.

2.2 Diffèrent type de retrait à l'état frais

2.2.1 Retrait de séchage

Le retrait de séchage est défini comme étant le rétrécissement du béton en raison de la perte de l'humidité du matériau, cette déformation volumique est la résultante du séchage et la migration de l'eau libre dans les canaux capillaires vers l'extérieur. Le retrait de séchage est principalement lié à la pâte de ciment el dépend forcement. de la quantité d'eau présente dans le mélange, mais aussi aux conditions climatiques dans lesquelles le matériau est coulé.

Tazawa [75] a utilisé un modèle micromécanique basé sur le principe de la tension capillaire, pour décrire le comportement du béton vis à vis du retrait de séchage. L'étude a montré que l'humldité relative interne du matériau ne peut être reliée directement au retrait de séchage. Contrairement à ce dernier, Zhang[76] a étudié l'effet. du rapport. E/L sur l'humidité intérieure du béton et sur le retraie de séchage, les résultats indiquent qu'une réduction rapide de l'humidité intérieure est accompagnée d'une augmentation rapide de la déformation due au retrait du béton.

Dans les cas extrêmes de température élevé et conditions climatique sévère, le séchage de retrait peut être une raison majeure de la détérioration des structures en béton[77]. L'humidité du béton diminue avec le temps à travers la surface, en raison des mécanismes de séchage, principalement par le débit capillaire et la diffusion moléculaire, qui sera active lorsque le matériau est. exposé à l'air[78].

Plusieurs propriétés mécaniques dont le retrait de séchage sont influencées par la teneur en humidité dans le béton à cause de l'interaction de la matrice solide avec l'eau interstitielle. Beyea[79] indique que le retrait de séchage des bétons avec grand rapports E/C est très élevé par rapport au béton avec des petits rapports E/C. Certains auteurs déclarent que l'évaporation de l'eau de surface ne provoque pas le rétrécissement, cependant. le retrait de

séchage est créée en grande partie par l'évaporation de l'eau adsorbée et est maintenue par la tension hydrostatique dans les petits pores (< 50 nm)[72].

Le retrait de séchage augmente avec I'augmentaüon du volume de pate de cîment[69] et par conséquent le retrait de séchage des BAP est plus élevées par rapport au béton ordinaire[SO].

Güneyisi[81] a étudié le retrait de séchage des bétons autoplaçants contenant des mélanges de ciment Portland avec des cendres volantes, du laitier de haut fourneau, de la fumée de silice et le métakaolin. 11 a été observé que ce retrait diminue avec l'utllisation des cendres volantes, du laitier et du méta kaolin tandis qu'il augmente avec les fumées de silice. Le retrait de séchage représente une forte source de fissuration surtout dans les climats sévères.

Bisschop[82] affirme que dans le cas de retrait de séchage, la fissuration se présente sous forme d'un réseau de micro fissures interconnectées. La figure 12 représente son aspect sur un échanti l Ion de pâte de ciment.

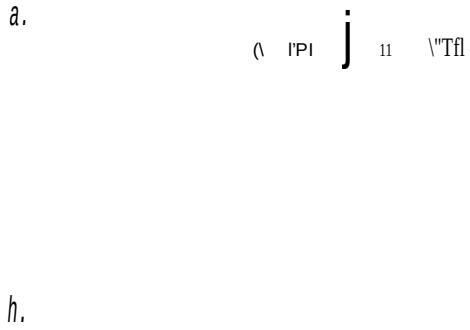


Figure 12 ~ Microfissures due au retrait de séchage dans un échanti l Ion de pate de ciment. (a) Réseau microfissures sur la surface exposé au séchage. (b) images combinée des

microfissures sur 4 sections transversales[82].

2.2.2 Retrait endogène

Le retrait endogène est défini comme étant le changement de volume de béton au cours du processus d'hydratation qui est dans des conditions de température et de poids constantes. Il est tout simplement le résultat de la réaction chimique et structurelle interne des constituants du béton.

Les facteurs influençant l'amplitude de retrait endogène sont souvent contredits. Il est déjà connu que ce type de retrait est inévitable après le coulage du béton. L'effet. de la formulation joue un rôle primordial sur le retrait endogène.

Ce type de retrait peut porter plusieurs appellations: retrait chimique, retrait le Chatelier, retrait d'auto-dessiccation[83].

Il y a deux principales raisons de retrait endogène: le faible rapport d'eau sur liant et le grand nombre d'adjuvant minéral actif. Plusieurs études ont été consacrées à l'étude de retrait endogène, comme Tian et Sun[84] qui ont développé un système de mesure automatique de retrait endogène. D'autres ont étudié les facteurs qui influent ce phénomène[BS],tandis que plusieurs ont essayé de comprendre son mécanisme et son origine[86]. La littérature propose plusieurs études qui ont tenté de donner un modèle mathématique pour le retrait endogène, basé sur les connaissancesthéoriques et expérimentales. Il existe deux principaux modèles dans la littérature: le premier est basé sur la théorie de la tension capillaire et la mécanique viscoélastique[87]. tandis que le deuxième prend comme variable le type de ciment, l'hydrat.ation, le temps de prise, la température et le rapport. E/L[75]. Cependant ces modèles restent limités et ne prennent pas en compte tous les paramètres influant sur le retrait endogène. Les études actuelles indiquent que l'hydratatton du ciment modifie la structure des pores et la diminution de l'humidité relative intérieure, qui se traduit par une variation significative de la contrainte de traction capillaire. Ceci est la cause principale du retrait endogène du béton[88].

Le retrait endogène est plus élevé dans les bétons qui ont des grandes résistances à la compression comme les bétons hauts performants (BHP). A long terme ce phénomène a été bien étudié et expliqué par un comportement d'auto-dessiccation mais à court terme ou dans les premières heures du durcissement du béton, il reste encore théoriquement inexpliqué. La température influe considérablement. la cinétique et l'amplitude du retrait. enclogène[89].

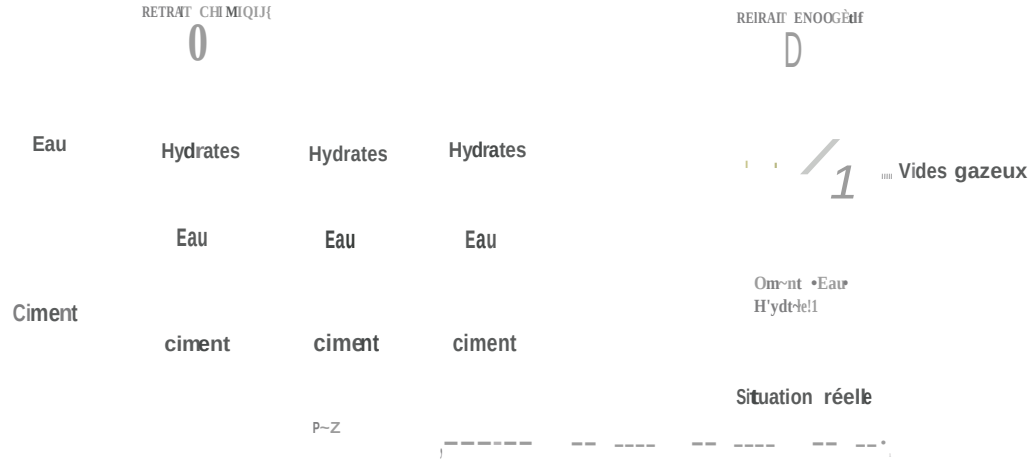


Figure 13 Relation entre le retrait endogène et le retrait chimique[75].

Craeye [24] explique que la taille des pores des bétons autoplaçants ne peut avoir aucune influence sur leur retrait endogène, et. l'utilisation de différents types de fillers calcaire ont donné les même valeur de retrait endogène.

Le retrait endogène conduit à des fissurations de forme macroscopique indépendantes les unes par rapport aux autres et elles ne forment aucun réseau ou interconnections entre elles.

Le matériau utilisé joue un rôle important sur la forme de ces fissures. Et le changement des ajouts minéraux peut changer la morphologie des fissures[69].

2.2.3 Retrait thermique

Le retrait thermique est dû principalement à une différence de température entre l'intérieur du béton et la couche surfacique en exposition directe avec l'air ambiant. Cette différence en température entre l'intérieure et l'extérieure est créé par le climat et la réaction de l'hydratation du ciment a.u sein du matériau lui-même. La température due à cette dernière peut atteindre les 80C°[90].

Cette différence en température augmente la contrainte de traction subie par le béton, ce qui conduit à la fissuration de ce dernier.

Dans le cas du retrait thermique, on peut remarquer deux types de fissuration différentes[90] :

- Fissuration de peau : due au gradient local de température, ces fissures sont peu ouvertes.
- Fissuration localisée : ce sont des fissures largement espacées. La distance entre deux fissures peut être de l'ordre ou supérieur à 50 millimètres .

Figure 14. Différents types de retraits

2.3 Retrait des BAP à long terme

Dans les conditions normales, la plupart des problèmes rencontrés lors d'utilisation des BAP sont associés à l'état durci et au retrait à long terme. Dans les structures en BAP où le comportement à long terme doit être surveillé et contrôlé, les effets de fluage et de retrait doivent être inclus précisément dans les procédures d'analyse et de conception. Le retrait varie avec les constituants et les proportions du mélange, et dépend des conditions de durcissement et de l'environnement de travail. Le béton autoplaçant contient des combinaisons de divers constituants, tels que l'agrégat, le ciment, le super plastifiant, l'agent réducteur d'eau et d'autres ingrédients qui donnent les propriétés d'autoplaçants, y compris le retrait. Par conséquent, la prédiction des contraintes réelles de retrait sont une exigence importante du processus de conception pour ce type de structures en béton. Persson a étudié le retrait des

BAP à long terme et a conclu que le retrait et le fluage des BAP sont plus élevées par rapport au béton ordinaire tandis que son module de la sucité devrait être baissé [29, 91]. Le béton auto-

plaçant est principalement constitué des mêmes composants que le béton ordinaire, mais la composition fina le du mélange et ses caractéristiques fraîches sont différentes. Ces modifications dans la composition du mélange influent sur le comportement du béton dans son état durci, y compris le fluage et les déformations de retrait[92]. Pour Hammer et a1[93], le volume de pâte de ciment est beaucoup plus élevé par rapport au béton ordinaire et le risque de fissuration due au retrait est très élevé. En uti isant les BAP avec beaucoup de prudence, cette situation peut être évitée, cette recommandation se met. d'accord avec les conclusions des travaux de Suksawang et a1[94] et Schindler et a1[95]. Aslani et Najadi[92] indiquent. qu'il n'est pas encore confirmé si les propriétés à long terme peuvent être prédites en se référant uniquement aux paramètres mécaniques et physiques conventionnels (tels que la résistance, E / C), ou l'adoption de nouveau paramètres concernant la conception du mélange. L'étude de ce type de retrait des BAP ne fait pas l'objectif de notre étude qui est limitée au retrait ajeune âge.

2.4 Retrait plastique

Le retrait plastique est un phénomène lié à la période plastique dans la vie d'un béton (durant les premières heures après le coulage). A cette phase, le béton est toujours mou et les hydrates ne sont pas encore développés à l'intérieur du matériau. Cette période cruciale est très importante dans l'évolution d'un béton, le matériau est très fragile et. il n'a pas encore la résistance à la traction minimale qui lui permet de résister aux forces et aux chargements extérieurs. Les bétons avec une grande surface d'exposition sont plus enclins à ce genre de retrait. Le taux de transfert d'humidité du béton vers l'extérieur est très sensible aux conditions ambiantes, plus l'évaporation est élevée, plus le retrait plastique est grand.

Les contraintes de traction sont plus importantes en raison de la pression capillaire très élevée, cette dernière est la résultante de la grande surface spécifique des particules des ajouts minéraux utilisés. La transformation du matériau de l'état liquide et granulat en suspension à l'état solide est lié à plusieurs phénomènes dont le retrait plastique qui est l'une des conséquences de ce changement. Trois paramètres peuvent indiquer si ce retrait est nuisible pour le béton ou non :

- L'amplitude du retrait lul-rnèrne
- Le taux d'empêchement. de ce retrait
- La résistance à la traction au sein du matériau.

2.4.1.1 Amplitude et cinétique du retrait plastique

Un retrait plastique est caractérisé par son amplitude mesuré sur le changement volumique du béton à la fin de la phase plastique. Cependant la cinétique du retrait plastique correspond à l'évolution de cette amplitude en fonction du temps. L'amplitude et la cinétique d'un retrait sont influencées par l'évaporation (facteur exogène)[96], la taille, la distribution des pores et la microstructure du mélange (Facteur endogène)[97]. Autrement dit, le retrait est influencé par les conditions climatiques dans lesquelles le béton est coulé ainsi qu'à la composition physique-chimique du liant, dont l'optimisation de la formulation joue un rôle très important et influe directement sur ce phénomène[16]. La mesure de l'amplitude du retrait plastique se fait généralement soit sur le changement du volume ou linéique sur le changement de longueur d'un échantillon de béton[98].

La première contraction du béton à l'état frais est dans le sens horizontal dû principalement au tassement et à la gravité dont les grandes particules descendent vers le bas tandis que les plus léger percolent vers le haut. Cette contraction verticale (tassement) peut être une source de fissuration[99]. La figure 15 illustre le rôle du tassement dans la création des fissures dues au retrait plastique.

Les fissures qui se produisent lors du tassement du béton durant la phase plastique sont une forme importante de fissuration qui influence la fissuration finale due au retrait plastique. Ce type de fissuration cesse lorsque le tassement maximal est atteint et coïncide typiquement avec le temps de prise initial du béton.

Les contraintes de traction induites par le tassement différentiel entre les limites des zones de tassement adjacentes et, en conséquence, favorisent la formation de fissures[25].

La fissuration due au tassement est créée quand il y a un obstacle vertical qui correspond généralement à la présence des armatures en acier dans le béton ou à un changement de la profondeur de la section transversale[100].

La fissuration due au tassement provient des armatures ou graviers (point obstacle) de ce tassement et remonte progressivement vers la surface du béton[51].

Figure 15 - Effet du tassement sur la fissuration due au retrait plastique[101].

Au fil du temps, ce tassement créé petit à petit un rétrécissement vertical. Lors du retrait plastique, l'angle de frottement interne du béton est très élevé et le taux de retrait augmente jusqu'à ce qu'il devienne presque constant. En raison de la prise, la contraction volumétrique est de plus en plus entravée et, par conséquent, la courbe de retrait s'aplatît.

Le module de retrait plastique augmente rapidement quelques heures après le coulage dû à une augmentation de la rigidité du squelette de mélange (début de prise)[102].

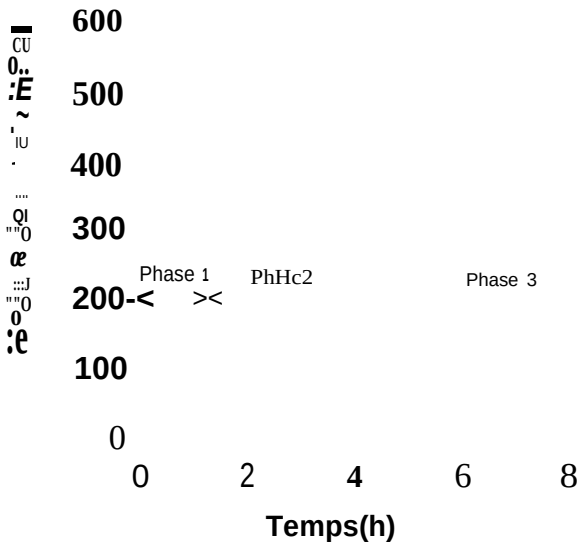


Figure 16 - Module de retrait pour le BAP dans les conditions de séchage sans ventilation[102]

Le phénomène de retrait plastique a été étudié auparavant par plusieurs chercheurs[103, 104], quelques temps plus tard les études sont orientées plus particulièrement vers l'effet de ce retrait sur le béton et sa durabilité (fissuration due au retrait plastique)[59, 105].

Plusieurs études ont été menéesdans ce cadre afin de mesurer l'amplitude du retrait plastique des BAP, les travaux de Turcry[13, 31, 102] sont les plus approfondis pour les bétons autoplaçants.

Bloom[103] mentionne que le retraie plastique augmente *avec* l'utilisation des fumés de silice. Une récente étude sur le comportement rhéologique du retrait plastique des BAP affirme que l'augmentation de la teneur en super plastifiant diminue la contrainte de cisaillement et la viscosité apparente des échantillons [71]. Ce comportement peut expliquer la diminution d'amplitude du tassement et du retrait plastique. L'utilisation des fines telles que les fumés de silice, fillers calcaire et cendre volante, augmente la prédisposition du béton au retrait plastique[106] du fait que ces matériaux diminuent le ressuage.L'uülisation des fines pour les SAP. représenterait leurs distinctions majeures avec les BO, par une grande capacité de déformation et une exhibition plus élevéeau retrait plastique.

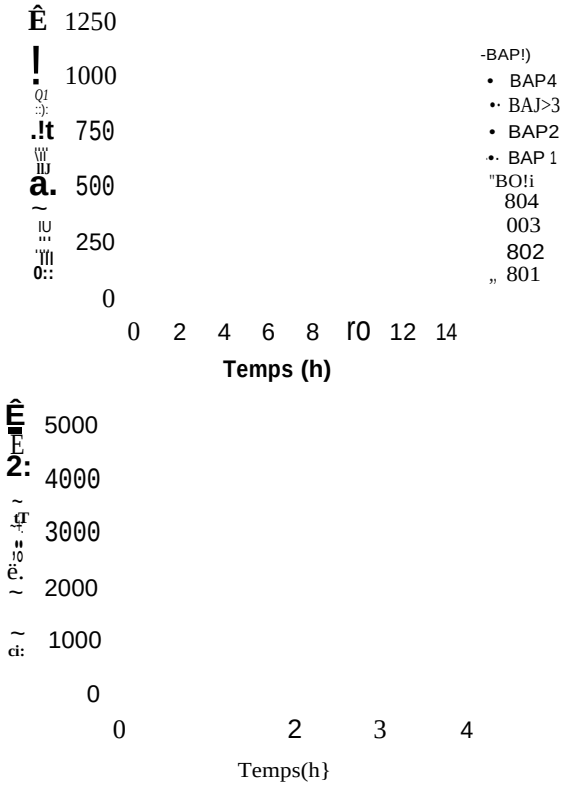


Figure 17 - Retrait plastique des BAP et BO dans les conditions de séchage((a)- sans vent et (b)-avec ventilation)[102]

2.4.1.2 Taux d'empêchement du retrait plastique

Les mélanges cimentaires (bétons. mortiers ou pâtes) se fissurent dans Je cas ou leur retrait libre est empêché par un obstacle interne ou externe. Les déformations empêchées peuvent trouver leur origine dans deux cas :

- Entrave extérieure qu'entraîne tout. encastrement ou frottement.
- Obstacle interne à l'intérieure du matériau lui-même.

Hansen et a1[107, 108] affirment que les gros granulats ont une influence sur le retrait qui pourrait. être freinée par des agrégats dans le mélange [H]. L'empêchement du retrait. par des agrégats peut conduire à des microfissures, qui influencent fortement les propriétés de matériaux et peut être des lieux de faiblesse à partir desquels les agents agressifs peuvent pénétrer et créer des dommages aux armatures au fil du temps[66], ainsi que des problèmes d'étanchéité ou eneore d'esthétisme. Wenyan Zhang[109] indique que le béton rétrécit moins que le mortier, et le mortier rétrécit moins que la pâte de ciment ce qui conduit au moins de fissuration.

Les armatures peuvent également être un facteur qui favorise la création des fissures et un élément. en béton avec trop d'armatures peut augmenter le risque de fissuration. Grâce à son adhérence au béton, l'armature reprend les contraintes de traction engendrées par le retrait. Une armature rond-lisse développe peu de fissures mais assez larges, alors qu'un béton armé avec des aciers à haute adhérence développe plus de fissures mais avec des largeurs moins importantes. À l'état frais cette adhérente n'est pas encore forte. ce qui explique l'ouverture des fissures plus grandes qu'à l'état durci.

Les contraintes dues aux obstacles ou à l'empêchement. de retrait sont fortement influencées par la géométrie de l'enceinte ou le béton est coulé. Au niveau du laboratoire, les tests et les techniques pour mesurer la fissuration du retrait empêché doivent surmonter le défi de produire des fissures de retrait plastique sur des échantillons relativement petits avec des conditions d'empêchement raisonnablement réalistes. Plusieurs auteurs ont affirmé qu'il est difficile de créer un taux d'empêchement égal à celui du chantier, Turcry et Girotte [13, 71] ont affirmé dans leurs travaux qu'ils ont rencontré quelques lacunes lors de la réalisation de ce

type de test. Les difficultés principales résident dans le manque de tests appropriés qui permettent d'obtenir la mesure de fissuration dans les conditions réelles où elles se produisent.

2.4.1.3 Traction du béton à jeune âge

Les fissures qui se manifestent dans les structures en béton sont généralement initiées au jeune âge. Il est donc nécessaire de mieux comprendre le comportement de ra résistance à la traction et de la rigidité du béton à cet âge. Grâce à des recherches sur la résistance à la traction du béton au début de la fissuration au jeune âge, on pourrait améliorer le contrôle de la fissuration, réduisant ainsi les fissurations du béton causées par le retrait plastique. Prévoir la résistance à ra traction du béton frais peut contribuer à optimiser les pratiques adéquates pour minimiser ra fissuration due au retrait plastique. Bien que la communauté scientifique soit consciente de l'importance de la. connaissance des propriétés de traction du béton aujeune âge , il existe très peu de travaux sur ce sujet[110], ceci étant principalement due aux difficultés pratiques de mesure.

Ravina et Shalon[18] étaient tes premiers à mesurer la traction du béton à jeune âge et précisément. à l'âge de 2 heures à 4 heures.

Dans un second temps, plusieurs études ont été menées sur ce sujet, Abel et Hover[l 11] ont mesuré ta résistance à la traction du béton entre 2 et 8 h après le coulage et ont pris comme variable le rapport E/C. Leurs principaux résultats indiquent qu'il y a une période dormante entre environ 2 à 4 h après le coulage. A cet instant, la résistance à la traction est trop faible et correspond probablement à la période où il y a le plus de fissuration due au retrait plastique. Le développement de la résistance à la traction accélère après cette période et est plus rapide dans les bétons à faible rapport E/C.

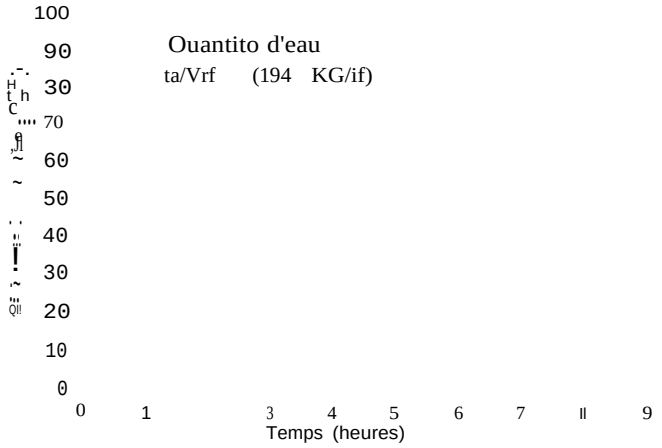


Figure 18 - Résistance à la traction de béton d'une teneur en eau de 194 kg/ m3[111].

Le développement de la résistance à la traction du béton peut dépendre de divers facteurs tels que le type de ciment, les proportions du mélange, le mode de cure et les conditions climatiques[112, 113].

De Schutter et Taerwe[114] affirment que le développement de la résistance à la traction au jeune âge est. plus rapide que la résistance à la. compression d'un béton. L'utillsation des cendres volantes peut améliorer la résistance à la traction aujeune âge du béton[115].

Le développement de la résistance à la traction au jeune âge est en fonction du degré cl'hvdra.tation[116].

La mesure de la traction au jeune âge d'un BAP avec la connaissancede l'amplitude du retrait et du taux d'empêchement de ce dernier peut indiquer l'instant auquel apparait la fissuration due au retrait plastique. Ces valeurs peuvent être obtenues à partir des courbes de contrainte-déformation en traction du béton au jeune âge. Malheureusement, les équations qui donnent des valeurs exactes sur la traction au jeune àqe sont actuellement très limitées, en particulier pendant les premières heures après le coulage. Il existe un manque de directives techniques appropriées pour la prédiction de ces propriétés dans les codes de pratique actuels. Nguyen et DA0[117] affirme qu'aucune équation n'est encore disponible pour les calculs des propriétés du béton aujeune âge jusqu'à présent,

2.5 Phénomènes en relation avec le retrait plastique

2.5.1 Pression capillaire

Les espaces entre les particules solides, les agrégats et les additifs forment un système de pores interconnectés presque complètement remplis d'eau. Le processus physique entraîne le retrait plastique des bétons et l'accumulation d'une pression hydraulique dans la phase liquide du matériau. La contrainte de cette pression est appelée la pression capillaire, elle se crée quand l'eau s'évapore de la surface du béton. L'air occlus el les réactions chimiques n'ont pas d'influence décisive sur ce processus au jeune âge. Au fil du temps et à cause de l'évaporation excessive et l'auto-dessiccation, les particules à la surface sont exposées aux forces adhésives et à la tension superficielle des ménisques cl'eau[21]. La courbure de la surface de l'eau provoque une pression négative dans l'eau capillaire. Cette pression négative pousse les particules dans la pâte de béton à se rapprocher, entraînant ainsi un rétrécissement total. La pression capillaire, cause du retrait plastique, est identifiée la première fois par Wittmann [20]. L'équation de Gauss-Laplace donne la pression *p* en fonction de la tension *r* et le rayon *R* de la surface de l'eau.

$$P = -\gamma\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right) \qquad (1)$$

Quelques heures après le coulage les pores deviennent plus petits ce qui pousse plus de quantité d'eau inertielle vers la surface. Si le retrait est empêché et les forces de cohésion entre les particules sont surmontées, des fissures vont alors se former.

Figure 19- Simulation deux D de la pression capillaire origine du retrait plastique (Fissuration) [118]

Hammer[119] démontre que la pression capillaire peut être un bon indice pour suivre l'évolution de certaines propriétés importantes de pâte, de mortier ou de béton à l'état frais pendant la période de la prise.

L'évolution de la pression capillaire varie non seulement en fonction de la vitesse d'évaporation de l'eau mais aussi de la distribution et de la taille des particules. Moins il y a d'espaces entre les particules plus la pression est grande.

Certaines compositions de béton comme les BAP se caractérisent par la petite taille des particules et par une teneur élevée en liant et un faible rapport eau-ciment ce qui renforce l'auto-desstccatton. Ces caractéristiques peuvent conduire à des valeurs absolues de pression capillaire et à une déformation de retrait très élevé, entraînant un risque accru de fissuration au jeune âge.

Leemanna[120] à mesurer la pression capillaire sur des BAP formulés avec (agents réducteurs de retraits, accélérateurs et retardateurs de prise, BAP avec cure, BAP avec Adjuvant réducteur de retrait, stabilisant et un béton témoin pour comparaison).

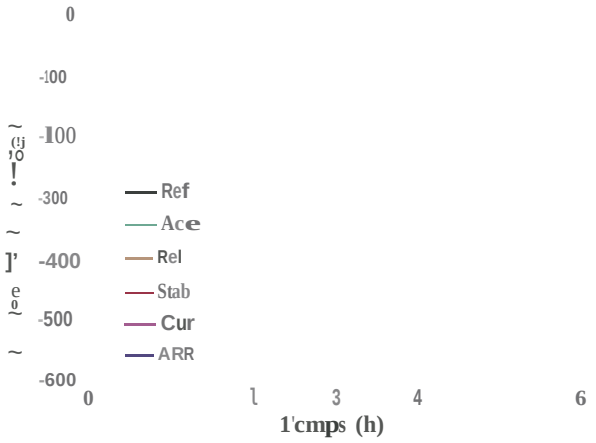


Figure 20- Pression capillaire des différents BAP en fonction du temps[120].

La pression capillaire du BAP avec le retardateur de prise diminue plus lentement par rapport à celle des autres BAP. Le risque de fissuration plastique est plus grand quand l'air commence à pénétrer dans les pores, à savoir lorsque la pression capillaire atteint la valeur minimale. La relation fissuration-pression capillaire est très importante dans le cas de climat sévère et elle peut indiquer quelle formulation est plus susceptible de fissurer l'une par rapport à l'autre.

En termes de comparaison entre la pression capillaire du BAP et BO, Turcry [102] a trouvé dans ses travaux que la pression capillaire d'un BAP diminue plus rapidement par rapport à celle du béton ordinaire.

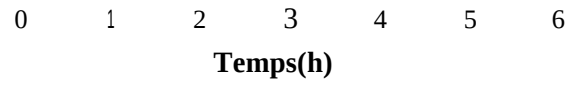


Figure 21- Pression capillaire des bétons autoplaçants et bétons ordinaires[102]

L'accumulation de pression capillaire dans le béton plastique dans les premières heures après le coulage peut conduire à des fissures qui affectent fortement la durabilité et la facilité d'entretien des structures. Ce type de dommage peut être évité par l'utilisation de cure appropriée. Il semble raisonnable de baser le concept de mûrissement sur le développement de la pression capillaire en fonction du temps qui peut être mesuré sur site. (Figure 22).

Figure 22- Pression capillaire des bétons autoplaçants et bétons ordinaires[121]

2.5.2 Hydratation et temps de prise

L'hydratation du ciment commence immédiatement dès le contact du ciment avec l'eau, une évolution rapide de la chaleur aura lîeu pendant les premières minutes de ce processus. Dans un second temps, cette chaleur baisse de manière significative, cette phase est appelée la période dormante. Les réactions d'hydratation ensuite s'accélèrent. à nouveau mais à une vitesse moins élevée par rapport à la première phase, ce nouveau pique dans la courbe de l'hydrataüon du ciment est dû principalement à l'effondrement des grains qui permet plus de contact avec- l'eau et par conséquent plus de réaction et de chaleur. Ces trois périodes peuvent prendre jusqu'à 9h tandis que l'hydratation complète peut aller jusqu'à un an [122, 123]. Le retrait chimique est un résultat direct de l'hydratation du ciment, appelé autrement: contraction le Chatelier, conséquence du dégagement de chaleur lors de la formation des hydrates. Le ret.rait chimique crée des contraintes de traction à l'intérieur du béton, dans la plupart du temps ces contraintes dépassent la résistance à la traction du matériau ce qui initie la fissuration.

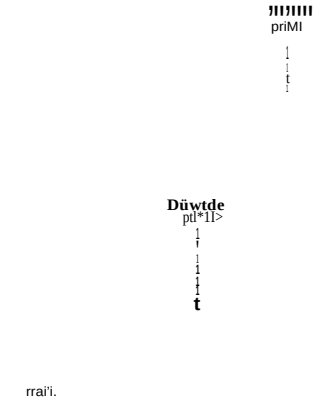


Figure 23- Coubre type de l'hydratation du ciment

Mounanga [124] dit que la relation entre le retrait chimique et le degré d'hydratation est presque linéaire dans le cas du ciment Portland. Connaitre les réactions chimiques du ciment et les éléments qui se produisent lors de ce processusnous permette de déterminer facilement ou d'estimer le retrait du béton. Le temps de prise du ciment à une grande influence sur le retrait plastique, ce durcissement du béton se manifeste dans un intervalle de temps appelé

début et fin de prise. En début de prise le matériau garde toujours sa forme initiale et sa fluidité mais en fin de prise il perd sa mise en œuvre et. ses fraiches propriétés.

t = 0

1 2 3

Gas

Figure 24- Formation des hydrates

Connaitre le début et la fin de prise est important pour prévenir le retrait plastique et prendre les précautions nécessairesafin d'éviter ou minimiser la. fissuration due à ce genre de retrait. Mehta [125] classe l'évolution de l'hvdratation du béton en trois périodes, appelées respectivement raidissage, solidification et durcissement. Le retrait de dessiccation constitue la partie principale de la déformation endogènedue au rétrécissement de la pâte de ciment dans un système fermé isotherme et à la formation d' ettringite au stade précocede l'hydratation du ciment[126]. Il existe aussi d'autres types de déformation due à l'hydratation appelés déformation thermique, la réaction aussi entre le CH du ciment et. l'eau avec- l'air conduit à une déformation appelé carbonatation.

Goboncan[127] trouve que le retrait se produit principalement après le temps de prise initiale. Hammer[128] dit que les deux retraits chimiques coïncident le retrait endogène pendant les premières heures après le coulage, et plus le ciment durcit plus les deux types de retrait divergent.

Une étude de corrélation de retrait chimique et de test de calorimétrie isotherme indique que le retrait chimique total cumulé est proportionnel à l'évolution de la chaleur[129].

Tazawa [130] a calculé Je rel rait d1imique à partir d'une équa t.ion chimique d'hydratation comparé avec l'empirique. Les résultats indiquent que la valeur théorique et empirique coïncide parfaitement.

Zhang et a1[131]ont étudié l'intérêt de mesurer l'humidité intérieur au murs du l'hydratation du béton pour prévenir la fissuration du au retrait.

La fissuration précoce peut être éventuellement évitée avec l'utilisation de ciments de gros grains, et la distribution de la granulométrie du ciment à une grande influence sur la distribution des pores, sa taille initiale et les propriétés endogènes au jeune âge de la pâte cimentaire[132J.

2.6 Relation retrait plastique- fissuration

Les fissures de structures en bétons sont principalement dues à des déformations (retrait) qui sont généralement liées à l'hydratation du ciment, séchage, tassement et pression capillaire démontrés dans les paragraphes précédents, alors qu'un petit nombre de cette fissuration est causé par des charges imposées. Cela peut expliquer la principale raison pour laquelle tant de structures ont des fissures au cours de la période de construction, et d'autre apparaissant même pendant la période de durcissement. Turcry [13] a essayé de déduire la relation entre le retrait et la fissuration d'un béton, cette relation est indirecte car les deux phénomènes ne sont pas immédiats. De plus, la fissuration dépend d'autres facteurs en plus du retrait. La figure 24 montre qu'il n y'a pas de corrélation directe entre la fissuration et le retrait plastique, un béton ou mortier qui subit une déformation dû au retrait libre peut ne pas se fissurer, on peut donc dire qu'il contribue à l'apparition des fissures, il y'a d'autres facteurs dans son mécanisme qui dépendent essentiellement des conditions climatiques et des propriétés physicochimiques du matériau lui-même.

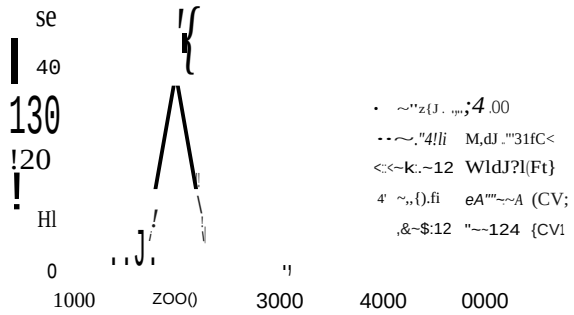


Figure 25- Relation aire fissurée-retrait plastique[13].

Dans les conditions climatiques extrêmes la fissuration due au retrait plastique est inévitable particulièrement pour certains types de béton comme les BAP. Dans la littérature les auteurs relient la fissuration à la déformation du matériau cimentaire mais d'autres la relie à la résistance à la traction du matériau lui-même vu que la déformation est inévitable (due au phénomène cité précédemment : hydratation, pression capillaire, évaporation tassement)[133].

La capacité de déformation est définie comme étant la déformation maximale qu'un béton frais capable de supporter et au-delà de cette déformation le matériau se fissure. Hannant et al[l 34] ont développé un équipement qui permet de déterminer la capacité de déformation du béton dans les premières heures après le coulage. Des essais peuvent être effectués dès la première heure après le malaxage et jusqu'à 6 ou 7 heures après, en fonction du taux d'hydratation du béton. La mesure de la capacité de déformation donne une nouvelle perspective sur la mécanique de la fissuration due au retrait plastique et le taux de gain de force due à l'hydratation du ciment.

Bayasi[l 35] affirme qu'une capacité de déformation d'un béton diminue avec le temps jusqu'au début de sa prise où elle augmente à nouveau mais sans atteindre la valeur initiale. Le début de fissuration théorique est défini comme étant le croisement de la courbe de cette capacité de déformation avec celle du retrait plastique Figure 26.

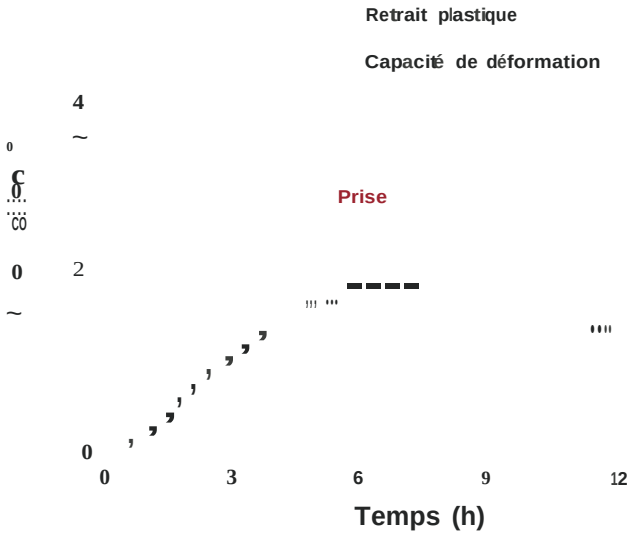


Figure 26- Fissuration à l'état frais en termes de retrait plastique et capacité de déformation du béton[135].

D'autres chercheurs [136] ont constaté que cette capacité de déformation est constante pour Lous les matériaux cimentaires et ce qui fait. la différence en termes de fissuration c'est. le développement de la résistance à la traction aujeune âge.

2.7 Ressuage

2.7. 1 Généra ités

Le ressuage est défini par l'accumulation d'eau à la surface du béton. Dans les conditions normales, l apparait sous forme d'une pellicule d'eau claire sur le béton. Ce phénomène trouve son origine dans le tassement des particules denses qui descendent vers le bas et la montée des fines et les goutes vers le haut[l 37].

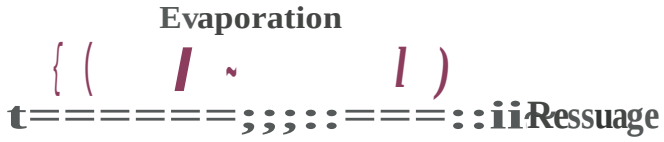


Figure 27~ Phénomène du ressuage dans un béton frais

Cette quantité d'eau peut servir comme cure pour le durcissement du béton surtout dans les conditions climatiques chaudes et severesj-l], mais par contre si elle dépasse une certaine limite, el le peut conduire à la ségrégation et la chute de résistance. La couche deau à la surface conserve la hauteur d'origine de l'échantillon du béton dans un moule, seulement en absence d'évaporation. Bien que le volume des ingrédients est le même, la hauteur finale du béton durci est inférieure à. celle à l'état plastique. Le ressuage se produit la plupart du temps en période dormante avant le début de prise du ciment. La perte d'eau à cet âge très précoce provoque la création cl'une surface d'eau courbée entre les particules solides et les faces limites ouvertes. L'accumulation d'eau à la surface se produit progressivement au fil du temps et l'eau libre dans les canaux capillaires trouve son chemin jusqu'à. la surface du béton, plus les hydrates se

forment plus le ressuage diminue. La disparition de l'eau de ressuage à la surface du béton indique que le taux d'évaporation dépasse le taux de ressuage ou que le matériau n'a pas un taux assezélevé pour apparaitre clairement à la surface. Un taux de ressuagetrès faible peut être un problème pour le béton et conduit au retrait plastique et à la fissuration. Sur chantier, une surface de béton très sèchepeut être difficile à finir et peut perdre son côté esthétique.

Figure 28-Aspeet. de la pellicule d'eau sur la surface du béton.

Dans un test de ressuage, deux valeurs caractérisent le processus lui-même ; le taux et la capacité de ressuage. Le taux de ressuage (*TR)* est défini comme étant le volume d'eau en ml *(VR)* collecté par surface (S) en cm^2 en fonction du temps (T), tandis que la capacité de ressuage *(CR)* est le volume total de l'eau ressuée *(VR)* sur le volume initial(V,) d'eau dans le béton.

$$T_R = \frac{VR}{(S*T)} \qquad (2)$$

$$C_R = \frac{(VR)}{V_t} \qquad (3)$$

Dans les conditions plus ou moins chaudes, la fissuration due au retrait plastique se produit particulièrement dans les bétons à faible taux de ressuage. Dans de telles conditions,

l'apparition des fissures est contrôlée par la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent, la température du béton et les propriétés du béton à l'état. frais.

Plusieurs chercheurs[138, 139] ont étudié le processus de ressuage en fonction du temps et Powers [140] était le premier a montré que le processus de ressuage passe par deux étapes, une première phase avec des taux constants et une deuxième phase où elle commence à décroitre. Figure 29.

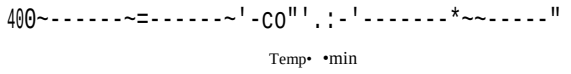


Figure 29-Courbe typique du phénomène de ressuage d'une pâte cimentaire

Depuis, beaucoup de travaux ont été menés afin de comprendre et de modéliser le ressuage depuis plusieurs années jusqu'à aujourd'hui [141-143].

Ce phénomène peut être classé en deux catégories, le premier est appelé ressuage local, il représente les gouttes d'eau qui restent sous les graviers ou sous les grandes particules. Le deuxième type correspond au ressuage visuel qui comme son nom l'indique, est la quantité

d'eau qui arrive jusqu'à la. surface. Le premier type assure la. protection du béton contre l'évaporation, tandis que le deuxième réduit la liaison entre les granulats et la pâte[141].

Almussalam[144] affirme que le phénomène de ressuage est directement lié au retrait plastique du béton. Son étude menée sur le retrait plastique et le ressuage des bétons formulés avec différents pourcentages et types de Fines confirment bien cette relation.

Les études consacrées au ressuage des bétons autoplaçants sont très rares vue leur taux est leurs capacité très faibles, ainsi que la difficultés à mesurer avec précision le ressuage de ce genre de béton[120, 145].

Le volume des fines est très important chez les BAP, cela représente une cause de son faible ressuage par rapport au béton ordinaire, Turcry [13] affirme qu'à cause de cette propriété, les BAP fissurent plus que les bétons ordinaires. particulièrement dans les climats chauds.

2.7.2 Effets du ressuage sur le béton

Le phénomène de ressuage a de nombreux effets sur le béton, quelques un de ces effets sont considérés comme des avantages et. d'autres comme des inconvénients.

L'eau de ressuage piégée dans un mélange de béton (capturée sous des agrégats angulaires) fragilise la zone inter-faciale entre les agrégats, les armatures et la pète, ce qui se traduit par une faiblesse en termes de résistance à la compression.

Le ressuage peut avoir un effet négatif sur l'hydratation car il dissocie les éléments du ciment. Le clinker proportionnellement. dense descend vers le bas et les gouttes deau entrainent avec elles les particules de la chaux moins denses. Cette situation conduit à l'absence des ettringites (éléments résultant de l'hydratation du ciment) dans la partie supérieure du béton. Cette modification défavorable des produits d'hydratation et de la porosité le long de la direction du ressuage peut altérer de manière significative la propriété mécanique du béton[146].

Parmi les effets du ressuage connu figurent le retrait et le changement de volume dû au tassement. Ce dernier se manifeste après le malaxage des ingrédients qui crée un ensemble de parti eu les suspendues. Cet. état. de suspension n'est pas stable à cause des différences en poids des particules et sous force de gravité, les particules les plus lourdes descendent vers le bas, ce qui provoque le tassement et le volume total diminue, ce qui provoque la fissuration.

Dans certains mélanges de béton avec des rapports E/C très élevés, la porosité de la pâte dans la partie supérieure est très élevée, ce qui conduit par conséquent à une différence de résistance entre la partie supérieure et inférieure du béton[147].

Le ressuage est connu pour être un avantage et servir de bonne cure pour le béton surtout dans le climat sévère.

Le ressuage permet également d'éviter les problèmes dus à la dessiccation et assure le bon déroulement du processus d'hydratation.

Josserand[148] affirme que le ressuage peut mener une bonne portance au béton à court terme, Surtout dans le cas des bétons de remblayage (bétons à faible dosage en ciment utilisé pour le remblayage de tranchées). Dans ce cas, il permet un remplissage en béton avec une très grande vitesse de circulation.

L'importance du ressuage réside dans la relation existante avec le retrait et la Fissuration du béton. Sa maitrise et sa compréhension permettent de déduire les meilleurs taux et les capacités permettant la protection de la surface le temps nécessaire, pour que le béton développe une résistance à la traction capable de résister aux déformations dues au retrait plastique. Cette solution est envisageable particulièrement dans les climats sévères, sujet de notre travail expérimental.

2.7.3 Facteurs influant le ressuage

Beaucoup de facteurs influent le taux, la capacité et la durée de manifestation du ressuage. Ces facteurs sont classés en deux catégories : endogènes et exogènes.

2.7.3.1 Facteurs endogènes

La durée de manifestation de ressuage dépend du type de béton et des propriétés de prise du matériau, la formulation et les constituants utilisés dans un béton influent fortement le taux de ressuage et sa capacité.

La quantité d'eau initiale utilisée dans le mélange et le rapport E/C sont les facteurs prédominants qui contrôlent le ressuage. toute augmentation de la quantité d'eau ou du rapport eau-ciment du matériau conduit à une augmentation d'eau réservée au ressuage. Les deux paramètres taux et capacité diminuent avec la diminution de l'eau totale. Une

augmentation de la teneur en eau d'un mélange de béton normal de 20 % de la quantité initiale peut augmenter le taux de ressuagede deux fois et demi de sa valeur normale[149].

Le type, la quantité, la composition chimique et la finesse du ciment peuvent influencer les propriétés du ressuage. Les propriétés chimiques des composants du ciment se diffèrent l'un de l'autre et par conséquent influent le ressuagede manière différente. Il est difficile d'isoler l'effet d'une propriété particulière ou d'un composé chimique. Seules les réactions qui se produisent au cours de la période de malaxage ou de la période de ressuageauront une influence sur le taux de ressuage[150]. La quantité de SQ3 qui peut être lixiviée à partir d'un ciment dans un court laps de temps à une bonne corrélation avec le ressuage. Une augmentation de S03 réduit le ressuage, cette réduction est liée aussi à la surface de blaine, la réactivité hydraulique du ciment, et la contenance en (3A (élément en ciment qui donne sa capacité de rétention des particules d'eau) [151]. La corrélation entre le ressuageet le dégagement de chaleur montre que le premier peut être réduit dans le cas d'un degré plus élevé de réactivité chimique initiale, qui se produit au ciment peu de temps après le malaxage. Les aluminates tricalciques ont un haut degré de réactivité et une capacité de production de chaleur très élevée. Les cendres volantes, les laitiers, les fumées de silice sont des pouzzolanes naturelles qui peuvent réduire le ressuage par Jeurs propriétés inhérentes. Cependant, chaque matériau et chaque source différente ont des effets variables [137, 152, 153].

La qualité des agrégats à peu d'effet sur le ressuage du béton. Powers [149] affirme que la surface spécifique du sable ou sa finesse, a peu d'effet sur le taux de ressuage du mortier. Cependant, les agrégats qui contiennent une grande quantité de limon, d'argile ou autres matériaux passant peuvent avoir un effet significatif dans la réduction du ressuagedu béton. La surface spécifique totale des agrégats est seulement de 5% de la surface totale du mélange du béton. La surface spécifique des graviers est essentiellement négligeable. Des résultats similaires ont été trouvés par d'autres chercheurs [154]. Les granulats qui augmentent la demande en eau, tels que la pierre concassée,ont tendance à augmenter le ressuageen raison de la forte teneur en eau dans le mélange[155).

Pour les adjuvants, il a été observé que les entraîneurs d'air réduisent le ressuage non seulement en induisant un système d'air-vide dans le béton, mais aussi l'ajout d'entraîneur d'air lui-même peut réduire légèrement les taux de ressuage[156]. Etant donné que les adjuvants réducteurs d'eau réduisent la teneur en eau d'un mélange de béton, il est prévu qu'ils réduisent également le ressuage[148,157].

Leeman et al [120] ont étudié l'influence des différents adjuvants sur le ressuage des BAP, le retardateur de prise a donné le grand taux de ressuage tandis que l'utilisation d'un accélérateur de prise réduit considérablement ce ressuage.

L'addition de fibres conduit à une réduction de la quantité cumulée de ressuage. La présence de fibres dans un mélange de béton augmente la rigidité et la cohésion de la matière, ce qui à son tour réduit le tassement et. par conséquent. le ressuage. L'augmentation de la surface spécifique des fibres augmente également la capacité de ressuage[96]. Dans certains cas, l'ajout de fibres peut augmenter le ressuage dû au fait que les fibres agissent comme des canaux, grâce auxquels l'eau peut être transférée à la surface du béton[110].

2.7.3.2 Facteurs exogènes

Le ressuage est influencé par le facteur exogène comme les conditions météorologiques, ses propriétés change d'un climat à l'autre. Le principal facteur qui modifie le ressuage est le séchage. Dans le cas d'évaporation excessive, l'apparition de la pellicule d'eau à la surface est rare (seulement dans les cas des murs éléments de grande hauteur et des bétons avec taux et capacité de ressuage très élevé). Powers[158] affirme que dans ce cas l'auractlon des grains par la pression capillaire très élevée accélère le départ d'eau par évaporation. La température influence la vitesse initiale du ressuage qui augmente de 15% et diminue sa quantité finale de 5 % , ce qui est principalement dû au changement de viscosité de l'eau et l'état de défloculation de la pâte [158, 159].

La hauteur du moule ou le béton est coulé influe la quantité global d'eau ressué ce fait est expliqué par le tassement plus grand et la consolidation plus grande qui par conséquent pousse plus de gouttes d'eau à remonter vers la surface[96, 148].

La vibration du béton et les secousses peuvent augmenter le taux de ressuage et peuvent même conduire à la ségrégation si elle est prolongée[51].

2.7.4 Principales méthodes de mesure

Plusieurs méthodes et essais ont été proposés pour quantifier et mesurer le ressuage des bétons, mortiers ou pâtes. Chaque méthode défend son exactitude dans la mesure et le prélèvement cl'eau ressué.

Le principe global de la plupart des méthodes se base sur l'idée du prélèvement direct. de la quantité d'eau qui apparait à la surface du béton. La méthode la plus connue et utilisée dans la ittérature est celle de la ASTM[160], cette méthode (Norme Américaine des tests et des matériaux) a été proposée la première fois en 1971. Son principe consiste à prélever l'eau qui apparait sur la surface avec une pipette ou une seringue toutes les 10 minutes puis toutes les demi-heures. Lorsque la. quantité d'eau ressuée diminue, le prélèvement est effectué toutes les 40 minutes. Pour chaque prélèvement, on incline le moule et on place une cale pour pouvoir collecter l'eau facilement. Cette méthode est très avantageuse car elle est simple et pratique, son seul inconvénient réside dans la quantité de béton utilisée qui est proportionnellement grande (égale à 14 litres pour chaque test) et l'inclinaison du moule dans chaque prélèvement qui peut faire vibrer le matériau et par conséquent fausser les valeurs du ressuage.

Une autre méthode connue pour mesurer ce phénomène est la méthode suédoise, le béton est mis dans un moule de forme tronconique renversé, à l'intérieur de ce moule se trouve un cylindre qui permet à l'eau ressué de se collecter automatiquement sous l'effet. de la. gravité{161]. L'avantage de cette méthode réside dans le Fait qu'elle permet de collecter l'eau ressuée sans intervention manuelle pendant l'essai. Cependant, elle ne permet pas de collecter toute la quantité d'eau ressuée dans les cas de ressuage très importants.

Une autre méthode plus développée a comme principe la séparation de l'eau ressuée du béton ou mortier par un liquide plus dense (tétrachlorure de carbone). cette méthode était utilisée dans les travaux de Sawaide et lketani [162], après la mise en place du béton ou mortier, l'eau ressuée est séparée par ce produit et sa couche est clairement visible et isolée au-dessus du moule. Cette méthode permet de mesurer le ressuage avec précision mais les produits utilisés sont quai ifié de toxiques.

Josserand et de Larrard [163] ont aussi proposé une méthode qui consiste à mettre dans un moule cylindrique un échantillon du matériau, et sur sa surface on trace deux lignes

perpendiculaires qui permettent de collecter l'eau ressuée avec une pipette. Cette méthode peut être difficile à utiliser avec les bétons ou mortiers autoplaçant très fluides.

2.8 Intérêt de l'estimation du taux d'évaporation

Physiquement, l'évaporation représente la transformation de l'eau existante dans un matériau en un gaz libéré dans J'air[96]. Elle se manifeste lorsque la pression de vapeur au-dessus de la surface du liquide est inférieure à celle du liquide lui-même. Son taux est défini comme étant la quantité d'eau évaporée à partir d'une surface unitaire du béton par unité de temps.

Dans des conditions climatiques avec des températures élevées, une faible humidité relative (HR), vitesse du vent élevée et rayonnement solaire, l'évaporation de l'eau de la surface du béton accélère.

L'évaporation de l'eau est également accélérée à des températures du béton élevé. D'une manière générale, la fissuration due au retrait plastique se produit suite à ces conditions sévères. Le taux d'évaporation estimatif est déduit à partir de l'abaque d'ACJ cité précédemment. Il est prévu que lorsque le taux d'évaporation est égal à 1,0 kg / m2/ h. la fissuration due au retrait plastique est susceptible de se produire. Les recommandations indiquent que le taux d'évaporation sécuriralre pour éviter la fissuration est de l'ordre de 0,5 kg / m2 h. Donc l'estimation et la mesure préalable du taux d'évaporation est très important surtout dans les conditions sévères.

Il est très utile de distinguer la situation ou l'eau libre est présente sur la surface du béton (eau de ressuage) et celle oil il n v'a pas d'eau (eau interstitielle), deux situations différentes qui influent le processus de transfert des gou[Jes d'eau à l'air libre et par conséquent influe sur l'évaporation.

2.9 Effet des facteurs météorologiques sur l'évaporation

2.9.1 Effet du vent

Le vent est considéré comme un facteur important qui influe fortement la fissuration due au retrait plastique. Une augmentation de la vitesse du vent à la surface du béton augmente considérablement le taux d'évaporation. Cette influence est due à sa capacité à remplacer continuellement l'air saturé par de l'air non saturé[51]. La vitesse du vent est mesurée par un ventimètre, ou un anémomètre.

2.9.2 Effet de la température

La température de l'air ambiant influence l'humidité relative et la température du béton, cette dernière est un facteur très influent sur le taux d'évaporation. Une augmentation de la température de l'air augmente la capacité de rétention d'humidité de l'air et par conséquent, réduit l'humidité relative[164].

Une diminution de température ambiante diminue la température intérieure du béton, cette baisse ne posera pas de problème tant que le gradient de température entre le béton est l'air amblent n'est pas très grancl[96].

La température du béton influe la différence de pression de vapeur entre la surface de l'eau et l'air environnant.

La pression de vapeur de l'eau dans les pores du béton est directement liée a la température du béton, car une augmentation de la température du béton provoque une augmentation de la pression de vapeur.

Dans le cas de température du béton très élevé, l'eau interstitielle quitte les pores sous forme de vapeur sans passer par le processus de ressuage[96].

2.9.3 **Effet** de l'humidité relative

L'humidité relative représente le rapport entre l'humidité existante (réelle) dans l'air et l'humidité (théorique) nécessaire pour la saturation de l'air et cela dans les mêmes conditions de température. L'évaporation augmente avec la baisse d'humidité relative. Dans le cas où la température et la venti ration sont très faibles et quand]'humidité de !'air approche celle de la saturation, l'évaporation devient. presque nulle. Ce facteur météorologique peut être mesuré par un psychromètre[96].

2.10 Retrait empêché et dispositifs de mesure

Dans la littérature, on trouve toute une série de tests de différentes formes et de géométries, pour mesurer le retrait empêché, les plus utilisés sont le test de l'anneau ou le test de forme rectangulaire.

Les dispositifs (Fig. 30 [a] et [b]) sont réalisés respectivement pour mesurer le retrait empêché du mortier et celui du béton. L'enceinte a la forme d'un rectangle avec des nervures permettant de créer des contraintes de traction pour favoriser la formation de fissures[13, 165].

Pour étudier la fissuration, le test de la figure Fig. 30 [c] utilise un dispositif de forme circulaire placé dans un moule rectangulaire où le matériau occupe l'espace entre les deux. L'anneau limite le retrait plastique du matériau et provoque la fissuration [166].

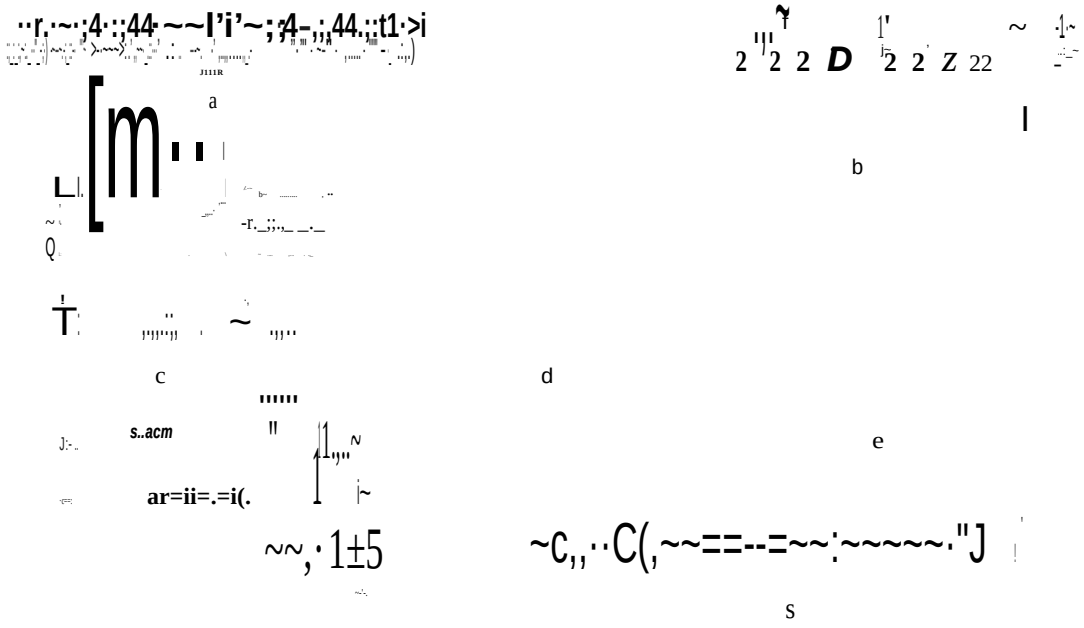


Figure 30-Différents dispositifs de retrait empêchés.

La Fig. 10 [d] représente le test de l'anneau, formé de deux cylindres annulaires de 8 cm de hauteur et de diamètres différents (28 et 58 cm), il permet de couler le béton dans l'espace vide entre les deux cylindres. L'anneau au grand diamètre contient. 12 dents ou nervures métalliques soudéessur la face intérieure et permettent de créer un empêchement du retrait.

Un autre dispositif du test du retrait empêché est réalisé avec un moule rectangulaire, des plaques ou platines métalliques 12x25 mm perpendiculaires clouées à proximité du périmètre pour fournir une contrainte à l'extrémité permettant de retenir le retrait Fig. 10 [e]. Les dimensions du moule de ce test sont d'environ 19x600x900 mm; il a été utilisé avec succès avec des mortiers mais il est moins utilisable pour les bétons [167].

Le test avec l'enceinte rectangulaire de la Fig. 10 [f] contient des platines métalliques ancrées sur les parois intérieures de sa hauteur et sont parallèles à sa base. Le moule est de dimensions 5x60x90cm. Ces platines permettent de gêner le mouvement du matériau lors de son rétrécissement et de créer par conséquent des fissures.

A la fin, le dispositif de dimensions de 10x10x100cm présenté dans la Fig. 10 [g] est un moule avec des poignées assurant la rétention des extrémités du matériau et muni d'une cellule de charge mesurant les forces et les contraintes de cet empêchement.

2.11 Analyse critique des dispositifs de mesure du retrait empêché

Deux facteurs peuvent. déterminer l'elflcacité d'un disposiüf de retrait empêché :

- Taux d'empêchement de ret.rait dans l'enceinte et sa capacité à créer des fissures
- Facilité d'utilisation durant le coulage et l'enlèvement du matériau après chaque test.

Certains chercheurs[133] ont recours à la calibration du dispositif afin de vérifier les conditions d'empêchement de la déformation due au retrait plastique et d'assurer l'unilormité de la valeur des contraintes dans le moule.

Les essais de la dalle sont utilisés dans l'étude de la fissuration due au retrait. plastique au jeune age sous conditions de séchage extrême, ces tests durent généralement entre Sh et fih.

Généralement, le test de l'anneau est utilisé pour mesurer la fissuration due au retrait endogène dont les déformations peuvent être enregistrées automatiquement par desjauges.

Dans notre cas l'utilisation du premier dispositif est plus approprié vue sa simplicité de manipulation pour les tests de la fissuration due au retrait plastique.

2.12 Conclusion

Dans ce chapitre, les connaissancesqui permettent de comprendre la fissuration due au retrait plastique ont été rapportées, les définitions des différents phénomènes en relation avec la fissuration ont été présentées. Le retrait plastique est attribué en général a des contraintes de traction qui s'appliquent à l'intérieur du béton quand il est encore Frais ou quand il est récemment coulé. La résistance à la traction développéeau sein du matériau diffère d'un béton à l'autre. L'intensité de la Iorce de traction qui s'exerce sur le béton est définie par le séchage, le tassement et la pression capillaire. La fissuration due à ce retrait se manifeste quand le béton est retenu par des armatures ou par des obstacles à l'intérieur du coffrage lui-même.

Dans ce chapitre, nous avons montré la relation existante entre la fissuration et les variations volumiques du béton {fissuration qui peut apparaitre au jeune àge), particulièrement la fissuration due au retrait plastique.

La relation entre la variation volumétrique et. la fissuration reste partielle et. l'état de l'art ne fournit pas assez dinformation sur le mécanisme et. le développement de la fissuration due au retrait plastique.

Nous avons également consacré une partie au phénomène de ressuagequi est sujet de notre thèse. Les différentes méthodes de calculs ont été discutées. Ce phénomènejoue un rôle très important dans le cas des climats sévères. Le but est de trouver la relation que peut avoir ce phénomène avec la fissuration due au retrait plastique des BAP dans les pays chaud.

Une analyse bibliographique des tests et dispositifs utilisés dans les travaux précédents a été présentés. L'importance du taux d'empêchement dans la création des fissures nous a poussésà faire une analyse critique pour déduire les différences entre ces dispositifs et de bien choisir le dispositif de mesure de retrait empêché (fissuration) adéquat.

Les matériaux et les outils expérimentaux choisis pour notre étude seront détaillés et présentés dans le prochain chapitre.

62 Thèse de doctorat - L. YAKOUBI

Chapitre 3

Méthodes et outils expérimentaux

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, les matériaux, les formulations, les dispositifs, les outils, et les procédures utilisés pour étudier la relation du ressuageavec la fissuration due au retrait plastique dans le climat sévèreont été présentés.

Dans notre étude deux types de bétons ont été utilisés (béton autoplaçant et béton ordinaire) pour étudier la fissuration et le ressuage. Les mortiers de béton équivalents sont utilisés afin d'approfondir notre compréhensionde la propagation des fissuresen fonction du temps.

Assurer une certaine équivalence en termes de résistance et rhéologie entre les deux types de formulations permet une meilleure interprétation des résultats de la fissuration et du ressuage des deux types de béton.

Comme il a été montré précédemment dans l'introduction générale, il y a un intérêt principal pour le phénomène de ressuage et son effet sur la fissuration due au retrait plastique, particulièrement dans le climat sévère. Par conséquent, la variation dans la composition dans ce travail concerne principalement le rapport E/C, la quantité d'eau libre el le dosage en super plastifiant.

Les calculs de marges d'autoplaçabilité ont été effectués et un récapitulatif de tous les pourcentagespour les différentes formulations a été fourni.

Ce chapitre contient également une description détaillée du protocole et des géométries de la plupart des tests effectués.

3.2 Matériaux utilisés

Les tests de ce travail ont été effectués sur des bétons et des mortiers, composésde matériaux locaux provenant de l'Algérie. Ses propriétés sont décrites dans les sous-sectionsqui suivent.

3.2.1 Ciment

Le ciment utilisé pour toutes les formulations de nos tests est de type CEM 11/A 42.5 de la cimenterie Hamma Bouziane de Constantine, fabriqué à partir du clinker, dont la composition chimique et physique est donnée au tableau 2.

Oxvde	%	Les tests		Valeurs
SiOz	27.83		Début	2h 50min
CaO	55,22		Fin	4h 6min
AL?O~	6.21	Temps de prise Expansion le	à Chaud	2.9
Fe2Ü3	3.83	Chatelier	à Froid	1.65
MaO	0.94	Surface soécifiaue (cm2/a)		3891
Na,o	/	Poids soécifiaue		3.1
K?O	/	Essais de	2iours	143.2
SO.	2.02	compression (MPa)	7iours	266.4
chlorures	0.00		28iours	433.1
CaO libre	0.88	Essais de	Ziours	35.7
Résidus	2.02	Flexion(MPa)	7iours	58.3
PFA	1.05		28iours	77.9

Tableau 2 Propriétés physiques et chimiques du ciment.

3.2.2 Granulats

Nous avons utilisé deux classes de graviers 3/8 et 8/15 de la carrière de Chelqhourn-Lald de Mila, et un sable 0/3 cl'Oued-zhor de Jijel. Le module de finesse du sable ainsi que le coefficient <l'aplatissement du gravier sont rassemblés dans le tableau 3 et les courbes granulométriques sont représentées sur la figure 31.

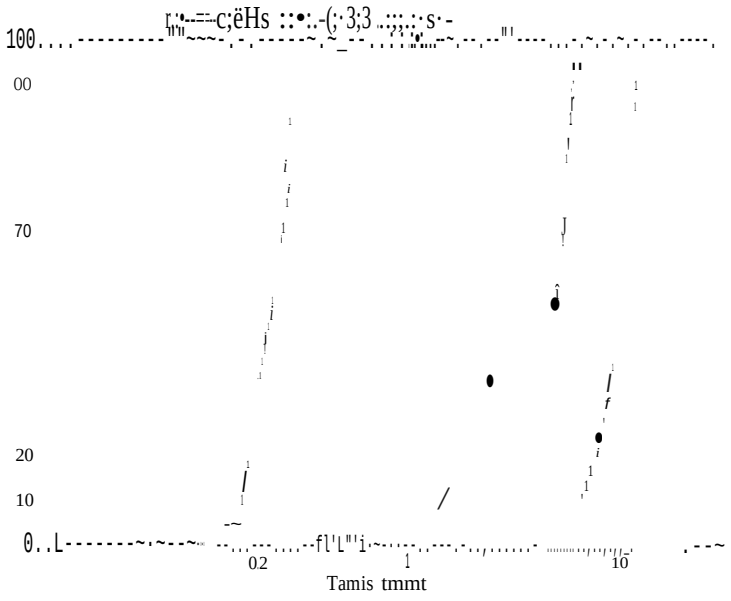


Figure 31-Courbes granulométrique du sable et des graviers.

	Sable 0/3	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Masse volumique apparentes	1500	1531	1544
Masse volumique absolue	2.58	2.64	2.65
Equivalent de Sable ES (%)	78	/	/
Valeur au bleu de méthylène	0.2	/	/
Coefficient d'absorption (%)	0.9	1.45	1.5

Tableau 3 Propriétés des granulats.

3.2.3 Super plastifiant

Nous avons utilisé le super plastifiant Granitex MEDAPLAST SP 40 de type poly Naphtalène sulfonâtes (Haut réducteur d'eau) de densité de 1.2, permettant d'augmenter la fluidité des bétons et des mortiers. En plus de sa fonction principale de super plastifiant, il permet aussi de diminuer considérablement la teneur en eau du béton. Il est ajouté dans le béton après que ï0% de l'eau de gâchage ait été introduite. Ses caractéristiques et propriétés sont indiquées dans la fiche fournie par le fournisseur (Annexe A).

3.2.4 Les ajouts minéraux

Nous avons utilisé dans notre étude, des fillers calcaire de dimensions inférieures à 80µm, de provenance de l'ENG d'El Khroub, dont les principales caractéristiques sont présentées dans la fiche techniques élaborée au niveau des laboratoires de l'ENG et fournie dans l'Annexe B.

3.2.5 Eau de gâchage

L'eau douce du robinet a été utilisée pour toutes nos formulations.

3.3 Formulations

Pour étudier expérimentalement l'influence du ressuage sur la fissuration de retrait plastique des BAP dans un climat chaud, une conception de mélange approprié pour les propriétés ciblées doivent être préparées. Les mélanges utilisés peuvent être classés en deux groupes ;

Formulations béton pour étudier des largeurs de fissuration (nous avons formulé dix mélanges de béton entre béton autoplaçant et béton ordinaire ; cinq pour chacun avec des rapports E/C équivalent qui varie de 0,41 à 0,55 et des résistances à la compression avoisinante) ainsi que des mortiers équivalents pour étudier les longueurs de fissuration avec les même rapports E/C. Cette sélection de mélange estjustifiée par le fait que le béton et le mortier équivalent peuvent engendrer des cinétiques de déformations identiques[168]. En outre, les mélanges de mortier ont été utilisés pour réduire le nombre des essais sur les bétons. Ce choix de mortiers équivalents dans cette étude est également lié à la géométrie de leur dispositif de fissuration avec plusieurs nervures qui permettent d'étudier la propagation de longueur des fissures au fil du temps. Les mélanges ordinaires sont considérés comme des bétons / mortiers témoin. Tous les mélanges ont été caractérisés par les tests rhéologiques à l'état frais et la résistance à la compression à l'état durci.

3.3.1 Bétons autoplaçants

Les spécifications pour les propriétés d'auto-plaçabtütës publiées dans la littérature sont respectées dans nos formulations de BAP[169], dont les valeurs d'étalement dans nos tests varient entre 65 et 75 cm. Les résultats d'essai de la boite en L, appelé autrement test du milieu confiné ont donné des valeurs h1/h2 supérieures ou égales à 0.8. Le test qui caractérise la stabilité des mélanges vis-à-vis de la ségrégation a donné un pourcentage en poids de laitance inférieur à 15%. Les proportions des mélanges des BAP sont données dans le tableau 4.

3.3.2 Bétons ordinaires

Les formulations des bétons ordinaires sont conçues avec les mêmes constituants utilisés pour les SAP mais sans constituants du fillers calcaire qui sera écarté de la formulation.

Ces bétons ordinaires sont formulés de manière à avoir des résistances voisines à celle des bétons autoplaçants pour chaque rapport E/C, en terme de rhéologie, le béton ordinaire est également formulé d'une façon à avoir l'aspect fluide avec un affaissement allant de 15 à 20 cm, la méthode utilisée pour la formulation est celle de Dreux-Gorisse[170]. En premier lieu, on fixe le rapport E/C et la résistance à la compression sur des valeurs plus ou moins égales à celles du béton autoplaçant déduites auparavant, ensuite on déduit les pourcentages des constituants. L'ordre des proportions des ingrédients du béton courant dans le m3 est indiqué

au Tableau 4.

	E/C	V.: m3	Eau L	Ciment Kg/m3	Fillers Kg/m3	Sable Kg/m3	G31s Kg/m3	Ga11s Kg/m3	Sp Kg/m3
BAP1	0.41	446	228	550	110	790	450	300	12.4
BAP 2	0.44	439	220	500	157	790	455	302	11.5
BAP 3	0.46	415	211	450	160	790	460	300	10.3
BAP 4	0.51	396	200	392	190	816	463	308	9.5
BAP 5	0.55	376	190	350	200	765	463	308	8.5
B01	0.41	366	205	500	/	670	560	541	4
BO 2	0.44	305	176	400	/	670	560	541	3.5
BO 3	0.46	296	174	380	/	678	556	537	3
BO 4	0.51	307	188	370	/	678	556	537	2
80 5	0.55	304	192	350	/	688	551	532	1.2

Tableau 4 Proportions des mélanges des bétons.

3.3.3 Mortier de béton équivalent « MBE »

La méthode MBE est un outil pour les chercheurs, son but est de minimiser les Gâchées des bétons dans les tests répétés. Comme son nom l'indique, elle considère les granulats comme des sphères et a comme principe l'élimination des graviers d'un béton et leurs remplacements par la quantité de sable équivalente occupant la même surface en m2 [171]. Les compositions des formules sont déduites à partir des bétons en respectant les conditions suivantes :

- Même rapport E elfrcace / Ciment
- Même rapport Addition/Ciment
- Même rapport surface granulaire /Ctrnent

La quantité de sable du MBE égale à la quantité de sable initiale du béton plus le sable équivalent à la surface spécifique des gravillons retirés du béton.

$$M_{III}(sable)MBE = Mh(sable)Béton + \frac{LM;xSS,}{SS} \quad (4)$$

Mm: masse du sable du mortier de béton équivalent

Mb : masse du sable du béton (kg)

M,: masse des gravi l Ions

SS, : surface spécifique du gravillon

SS : surface spécifique du sable

La surface spécifique des granulats est calculée à partir des tranches granulaires des graviers. Le calcul des surfaces spécifiques du sable et des graviers utilisés est donnés avec la méthode de calcul des MBE dans J'annexe C . Les compositions des mortiers des bétons équivalents mBAPe et mBOe sont donnés au tableau5.

	E/C	V.: m3	Eau L	Ciment Kg/m3	Fillers Kg/m3	Sable Kg/m3	G31a Kg/m3	Ga11s Kg/m3	Sp Kg/m3
mBAPe1	0.41	571	292	704.51	141	1075.5	/	/	12.4
mBAPe2	0.44	567	284	646.5	203	1086.3	/	/	11.5
mBAPe3	0.46	555	282	601.1	213.7	1122.8			10.3
mBAPe4	0.51	536	270	530	257	1172	/	/	9.6
mBAPe5	0.55	538	271	500.6	286	1167	/	/	8.5
mBOe1	0.41	559	313	763	/	1127	/	/	4
m80e2	0.44	514	297	674.6	/	1244.7	/	/	3.5
m80e3	0.46	458	296	647.3	/	1270.3	/	/	3
mBOe4	0.51	514	315	619.8	/	1249.2	/	/	2
mBOe5	0.55	510	321	585.9	/	1263.8	/	/	1.2

Tableau 5 Proportions des mélanges des mortiers de bétons équivalents

3.4 Caractérisations des bétons et des mortiers

Dans cette partie les tests rhéologiques (écoulement et étalement au cône d'abrams, écoulement à la boite en L et stabilité au tamis) ont été effectués. Dans un second temps, les essais de compression à l'état durci ont été réalisés sur toutes les formulations des bétons et des mortiers.

Afin de préparer les échantillons de la deuxième partie expérimentale qui est l'étude de l'influence de l'ajout d'une quantités d'eau et de super plastifiants sur la fissuration des BAP , le calcul de la marge d'autoplaçabilité est nécessaire pour déduire le pourcentage d'eau et de superplastifiant à ajouter à une formulation BAP sans perdre les propriétés rhéologique d'autoplaçabilitées.

3.4.1 Tests à l'état frais

3.4.1.1 Essai d'écoulement et étalement au cône d'Abrams

Cet essai permet de caractériser la consistance des bétons ordinaires en mesurant l'écoulement et la fluidité des BAP en mesurant son étalement. Ce test donne une idée sur la mobilité du béton dans un milieu non confiné. Sa valeur correspond à la hauteur pour le béton ordinaire et au diamètre de la galette pour le béton autoplaçant. Dans nos essais, nous avons utilisé le même cône et la même procédure pour les deux types de béton (Figure 32).

a

b

Figure 32–Essais au cône d'Abrams pour le BAP et BO.

3.4.1.2 Essai de la boite en L

Cet essai caractérise la mobilité du BAP en milieu confiné. On remplit la partie verticale de cette boite puis on ouvre la trappe et le béton s'écoule à travers un ferraillage standard formé de 3 barres d'armature de 16 diamètre et de 5 cm d'espacement. On mesure la hauteur atteinte par le béton aux deux extrémités de la partie horizontale (h1 et h2) afin de qualifier sa capacité de remplissage. Le rapport h2/h1 doit être supérieur à 0.8. Toutes nos formulations BAP ont donné des résultats supérieurs à cette valeur (Figure 33).

a b

Figure 33–Essais de la boite en L pour nos formulations BAP.

3.4.1.3 Essai de la stabilité au tamis

Cet essai indique l'homogénéité et la stabilité du mélange du BAP vis-à-vis de la ségrégation après sa mise en place jusqu'au début de prise. L'essai consiste à prélever une quantité de béton frais égale à 4.8kg d'un échantillon de 10 litres de béton mis au repos pendant 15 minutes. Le mélange est ensuite versé sur un tamis de 5mm d'une hauteur de 50cm. Après deux minutes, on pèse la laitance qui a traversé le tamis. La valeur idéale de ce test est comprise entre 0 et 15 %, ce qui était le cas pour toutes nos formulations. Les résultats de tous les bétons autoplaçants sont indiqués au tableau 6.

b

a

Figure 34–Essais de stabilités au tamis pour formulations BAP

3.4.2 Tests à l'état durci

Dans cette partie, les essais de caractérisation des formulations à l'état durci sont limités à la mesure de la résistance à la compression et la résistance à la traction à 28jours, à partir des formulations présentées au tableau 4 et 5 des bétons et de leurs mortiers équivalents. Des éprouvettes cylindriques (Ø16 x 32 cm ont été confectionnées. Les résistances à la compression pour les bétons autoplaçants sont. effectuées avant celle des bétons ordinaire afin d'utiliser les résultats pour le calcul des formulations ordinaires pour but. d'avoir des résistances avoisinantes à celle des BAP.

Dans une deuxième partie, des gâchés de mortiers de bétons équivalents ont été malaxés afin de préparer les éprouvettes (même dimension que celle de leurs bétons) pour mesurer les résistances à la compression et la traction à 28jours.

Pour les formulations ordinaires, la confection des éprouvettes est préparée par le versement progressif du béton en trois parties, en utilisant à chaque fois une tige ou une barre de piquage pour homogénéiser le mélange. Pour le cas desformulations autoplaçantes, on peut se dispenser de piquage. La surface du mélange qui est en contact. avec l'air doit. être arasée à l'aide d'une truelle ou d'une taloche afin de la lisser pour assurer la perpendicularité des forces lors de l'écrasement.

Les échantillons ont été démoulés 1 jour après la coulée puis conservés dans l'eau à environ 20C ° pendant 28jours. Le test a été effectué selon la norme NF EN 12390/3[172], la

même procédure est appliquée pour le test de résistance à la traction[173] Les résultats sont indiqués au tableau 6.

BAP1	36	7.2	65	3.5	0.87	8
BAP2	32	5.54	67	2.9	0.84	10
BAP3	30	4.9	68	2.5	0.82	12
BAP4	27	4	70	2.2	0.81	13
BAP5	25	3.8	73	2.4	0.8	15
B01	35	7.4	16	/	/	/
B02	32	5.2	15	/	/	/
803	30	5	14	/	/	/
804	26	4.5	14	/	/	/
805	24	3.9	13.5	/	/	/
mBAPe1	40	8	/	/	/	/
mBAPe2	38	7.6	/	/	/	/
mBAPe3	35	7.3	/	/	/	/
mBAPe4	32	6.8	/	/	/	/
mBAPeS	28	5	/	/	/	/
mBOe1	38	7.7	/	/	/	/
MBOe2	35	7.3	/	/	/	/
MBOe3	31	6.5	/	/	/	/
MBOe4	29	5.1	/	/	/	/
MBOe5	27	4.8	/	/	/	/

Tableau 6 Résultats de résistance à la compression et à la traction des bétons et leurs mortiers équivalents.

3.5 Marge d'autoplaçabilité pour un surplus en eau et en superplastifiant

La marge d'autoplaçabillté caractérise l'intervalle dans lequel on peut varier les pourcentages

des constituants d'une formulation d'un béton autoplaçant. sans que ce dernier ne perde ses caractéristiques dautoplaçabilitè. Dans notre cas, définir une marge d'autoplaçabilité consiste à déterminer les limites d'un intervalle dans lequel une quantité d'eau ou de superplastifiant supplémentaire peut étre ajoutée à une formulation béton ou mortier, de sorte qu'elle ne provoque pas l'instabilité de ces derniers. Cet intervalle ou cette marge diffère d'une

formulation à une autre. Dans le cas d'un supplément en eau et pour chacun des cinq mortiers autoplaçants formulés précédemment, deux mortiers dits "mortiers autoplaçants limites" seraient déduits, dont le premier contient une quantité d'eau minimale qui donne un étalement au mini cône égal à 24+ou-1cm et un deuxième avec une quantité maximale qui donne un étalement égale à 26+ou-1. Un exemple de la détermination de la marge d'autoplaçabilité du mBAPe4 est donné dans les sections qui suivent. Les mortiers autoplaçants seront testés au mini cône est au mini-vfunnel. Ces deux tests rhéologiques indiquent la fluidité et la viscosité du mortier. Pour le premier test, le diamètre final de l'étalement est enregistré 2 minutes après la levée du mini-cône. La valeur acceptable du diamètre d'étalement est dans l'intervalle de 240 à 260mm. Quant à l'essai du mini-vfunnel, la valeur acceptable du temps d'écoulement pour le mortier autoplaçant doit être dans l'intervalle de 7s-11s[174].

Figure 35–Dimensions du mini cône et mini vfunnel.

3.5.1 Intérêt de la marge d'autoplaçabité dans les climats chauds

Les effets du climat chaud sur les propriétés rhéologiques d'un BAP sont connus, et son utilisation pour les dalles ou pour des éléments à grande surface d'expositions diminue sa fluidité et sa maniabilité. Contrairement au béton ordinaire, les BAP ont un cahier des charges très exigent à l'état frais, et il est très difficile de préserver ses propriétés dans de telles conditions, ceci requiert sûrement une correction dans sa formulation. Sans la détermination de la marge dautoptacabutt on risque de perdre l'ouvrabilité d'un BAP, donc afin d'assurer les caractéristiques rhéologiques des BAP dans les conditions sévères, la détermination de la marge

d'autoplaçabilité est plus que nécessaire pour calculer la compensation et le pourcentage à ajouter. La figure 36 résume les principaux points d'action pour un BAP dans le climat sévère.

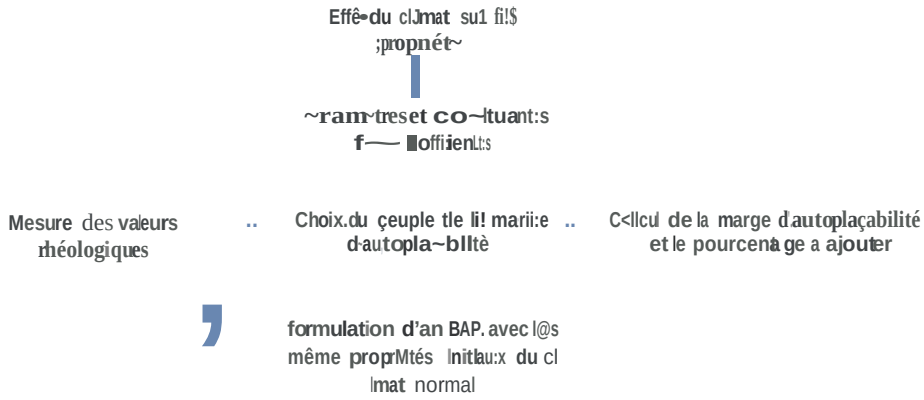


Figure 36- Points d'action pour un BAP dans le climat sévère.

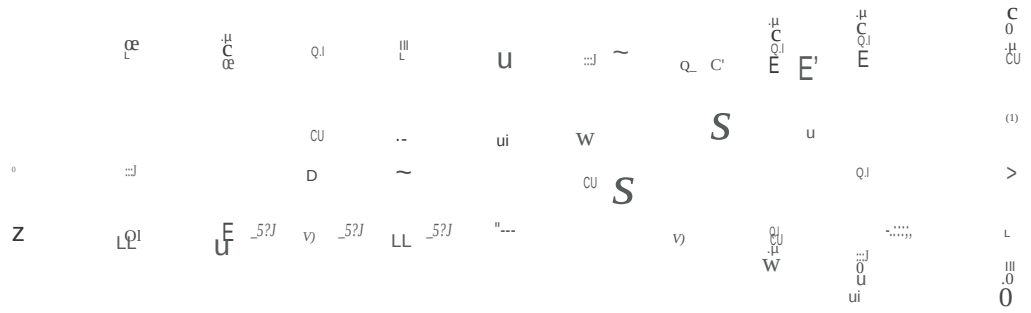
3.5.2 Calcul de la **marge d'autoplaçabilité**

3.5.2.1 Cas du couple (Eau constante, Sp variable)

Afin de mesurer la marge d'autoplaçabilité par les tests rhéologiques lors de l'ajout d'une quantité d'eau ou de superplastifiant, les mortiers déduits des MBE calculés auparavant et présentés au tableau 5 sont utilisés comme un point de départ, à partir de leurs valeurs rhéologiques initiales, on peut déterminer le pourcentage d'eau ou de superplastifiant qu'il faut rajouter ou déduire et combien de tests sont nécessaires pour déduire les quantités à rajouter pour atteindre les limites d'autoplaçabilitées. Un exemple de calcul de la marge d'autoplaçabilité pour mBAPe4 est donné dans le tableau 7.

La quantité d'eau, dans ce cas, est constante avec une valeur de 536,6 ml pour un volume de 2L de mortier, et la quantité de superplastifiant varie entre 11.7 ml et 14 ml avec une quantité supplémentaire moyenne de 3,5% ajoutée dans chaque essai, les tests rhéologiques seraient effectués jusqu'à ce que le mortier perde ses caractéristiques d'autoplaçant (Tableau 7). Les

proportions des mélanges est le pourcentage d'eau et de superplastifnat rajoutés sont données pour un volume de 2L de mortier.



1052	2356	510	0.51	536.6	11. 7	20	13	Ferme
1052	2356	510	0.51	536.6	12	22.2	11	Ferme
1052	2356	510	0.51	536.6	12.3	24	10.4	Mortier autoplaçant
1052	2356	510	0.51	536.6	12.8	25.8	9.55	Mortier autoplaçant
1052	2356	510	0.51	536.6	13.2	27.5	9.7	Ségrégation
1052	2356	510	0.51	536.6	13.6	28.4	6.8	Ségrégation
1052	2356	510	0.51	536.6	14	30	4.9	Ségrégation

Tableau 7 Ma.rge d'a.ut.oplaçabilité du mBAPe4 cas de (eau constant/ Sp variable)

35.2.2 Cas du couple (Eauvariable Spcanstame)

De la même manière, le deuxième exemple du couple (Eauvariable Sp,onstante) de calcul donne les valeurs des tests rhéologique et les valeurs des quantités deau à rajouter toujours pour l'exemple du mortiers mBA Pe4 dont la quantité de superplastifiant est constante à une valeur de 12 ml pour un volume de 2L du mortier, et la quantité d'eau varie entre 1180ml et 58.1ml

avec une quantité supplémentaire de 3.5% ajouter dans chaque test. Les tests rhéologiques seront effectués jusqu'a que le mortier perde ses caractéristiques des mélanges et les pourcentages d'eau rajoutés sont données au Tableau 8.

		1052	2356	510	0.45	480	12	20.2	14.5	Ferme
		1052	2356	510	0.51	537	12	23	11.7	Ferme
		1052	2356	510	0.53	560	12	24.2	10.5	Mortier autoplaçant
		1052	2356	510	0.55	580	12	25	9.8	Mortier autoplaçant
		1052	2356	510	0.57	600	12	26.7	8.8	Mortier autoplaçant
		1052	2356	510	0.6	631	12	28	6	Ségrégation
		1052	2356	510	0.63	662	12	29.9	5.2	Ségrégation

Tableau 8 Marge d'autoplaçabilité du mBAPe4 cas de (eau variable / Sp constant).

3.5.3 Récapitulatif de la marge d'autoplaçabilité

Comme montré précédemment, la marge d'autoplaçabilité calculée dans le cas des mortiers autoplaçants est déduite par les essais rhéologiques (diamètre d'étalement et temps d'écoulement). Dans le cas des mélanges des bétons autoplaçants, cette marge a été calculée

par l'inverse de la méthode de mortiers de béton équivalent. Le tableau 9 représente les

quantités d'eau et de super plastifiant ajoutées au béton et à leurs mortiers équivalents pour les deux cas de figure (eau constante / Spvoriobl• et eau vcnebre / Sp co"""""").

	(mBAPe1 /BAP1)-E	-3.36	-2.48	12.49	9.23	282	222	12.2	12.25
	(mBAPe1/BAP1)+E	+9.13	6.75			318	243	12.2	12.25
	(mBAPe2/BAP2)-E	-2.7	-2	11.3	8.36	276	215	11.3	11.4
	(mBAPe2/BAP2) + E	+8.6	+6.36			308	233	11.3	11.4
	(mBAPe3/BAP3)-E	-1.1	-0.81	9.79	7.24	278	209	10.15	10.2
	(mBAPe3/BAP3) + E	+8.69	+6.43			306	224	10.15	10.2
	(mBAPe4/BAP4)-E	0	0	9	6.66	270	200	9.5	9.4
	(mBAPe4/SCC4) + E	+9	+6.66			294	213	9.5	9.4
	(mBAPe5/BAP5)-E	0	0	8.5	6.29	271	190	8.3	8.4
	(mBAPe5/BAP5)+ E	+8.5	+6.29			294	201	8.3	8.4
	(mBAPe1 /BAP1)-sp	-4.03	-2.98	6.44	4.76	291	227	11.9	12.03
	(mBAPe 1 /BAP1) +sp	+2.41	+ 1.78			291	227	12.69	12.62
	(mBAPe2/BAP2)-sp	-2.6	-1.95	5.2	3.9	282	219	11.2	11.27
	(mBAPe2/BAP2) +sp	+2.6	+ 1.95			282	219	11.8	11.72
	(mBAPe3/BAP3)-sp	-0.97	-0.72	7.76	5.81	279	208	10.2	10.2
	(mBAPe3/BAP3) +sp	+6.79	+5.09			279	208	11	10.82
	(mBAPe4/BAP4)-sp	-4.16	-3.12	6.24	4.68	269	118	9.2	9.2
	(mBAPe4/BAP4) +sp	+2.08	+ 1.56			269	118	9.8	9.64
	(mBAPe5/BAP5)-sp	-2.35	-1.76	5.87	4.4	270	189	8.3	8.3
	(mBAPe5/BAP5) +sp	+3.52	+2.64			270	189	8.8	8.72

Tableau 9 Marge d'autoplaçabllte pour toutes les formulations des bétons et leurs mortiers équivalents.

3.6 Essais et conditions climatiques

3.6.1 Essais

3.6.1.1 Ressuage

Le test de ressuage a pour objet la détermination de la quantité relative d'eau de gâchage qui va ressuer d'un échantillon de béton ou de mortier frais. Dans nos essais nous avons suivi la norme ASTM C232, cette méthode assez simple consiste à prélever l'eau ressuée par le matériau à laide d'une pipette ou d'une seringue, en inclinant légèrement le moule (un container à fond plat d'une hauteur de 275mm et de diamètre inférieur de 250mm). Ce moule doit être étanche et d'une rigidité suffisante pour que sa forme subsiste lors de la manipulation et du placement du matériau, l'intérieur doit être lisse et sans corrosion, revêtement ou lubrifiant. Deux minutes avant chaque prélèvement, on place une cale de 5mm de hauteur sous un côté du moule, ce qui permet l'accumulation d'eau de l'autre côté. On découvre celui-ci puis on effectue alors le prélèvement. Enfin, on ôte la cale pour redonner au moule sa position verticale. Le prélèvement est quant à lui mesuré dans un tube gradué.

Le prélèvement d'eau de surface se fait chaque 10 minutes jusqu'à la 40iéme minutes. Après cet instant le prélèvement s'effectue chaque 30 minutes jusqu'à la fin du test ou la cessation du ressuage. Cette augmentation en temps d'intervalle pour le prélèvement correspond au moment de la diminution de quantité d'eau de ressuage, ce dernier nécessite plus de temps pour pouvoir être collecté à la surface du matériau.

Figure 37– Essai de ressuage

3.6. 1.2 Retrait empêché

Pour le retrait empêché le test sera effectué sur toutes les formulations mais dans deux dispositifs différents : un pour étudier la largeur de la fissuration du béton et un autre pour la propagation des fissures du mortier en fonction du temps. Les deux tests seront exposésaux différentes conditions climatiques. Le dispositif d'essai de fissuration des bétons est un moule rectangulaire de dimensions intérieures de 355x560x114 mm3, son fond est pourvu de trois dents ou surélévations triangulaires de 63.5 mm de hauteur pour celle du milieu, et de 32mm pour les deux des côtés. Le rôle de ces nervures est de retenir le béton est d'empêcher le retrait plastique de se faire librement, ce qui initie les fissures et les localise au milieu, et permet donc de les étudier et de les enregistrer clairement. La largeur maximale des fissures sera notée à la fin de l'essai avant l'enlèvement du béton.

Pour étudier la propagation des fissures en fonction du temps, les essaisseront effectués sur les mortiers équivalents dont le dispositif de cet essai est une plaque carrée de 20 cm de côté et de 1 cm d'épaisseur. Pour empêcher le retrait plastique, le fond du moule est pourvu de dents de 0,5 cm de hauteur, les fissures seront orientées le long de ces nervures. Le schéma des deux dispositifs est montré par la Figure38.

a b

Figure 38-Dispositif de retrait empêché (a) béton (b) mortier

3.6.1.3 Evolution et mesure de fissuration

Les fissures dues au retrait plastique se propagent en longueur ou en largeur. On a choisi d'étudier sa largeur dans le cas de la fissuration du béton et la longueur dans le cas du mortier. Notre choix est fondé sur le fait que le test à béton ne donne qu'une seul fissure au milieu qui

ne dépasse pas quelques centimètres en longueur dans la plupart des cas, ce qui n'est pas important. Cette fissure peut varier entre des microns jusqu'à des millimètres en largeur. Dans le cas du test de fissuration à mortier, ces fissures peuvent atteindre plusieurs centimètre en longueur tandis qu'elles sont limitées en largeur (Figure 40).

Les longueurs de fissures seront mesurées chaque demi-heure à l'aide d'une règle et d'une loupe (grossissement 100 mm) pour pouvoir détecter et observer les micros fissures.

A la fin de l'essai de fissuration du béton le dispositif sera analysé par un microscope afin d'enregistrer la largeur. Le microscope dispose d'une caméra de haute résolution au bout d'un tuyau orienté pour bien localiser les fissures, un deuxième tuyau très flexible, dispose à son extrémité une lampe afin de bien éclairer la zone fissurée. L'image acquise est transmise directement à un écran numérique qui permet de la traiter et de mesurer les dimensions des fissures.

Figure 39–Loupes et microscope utilisé dans la mesure des fissures.

a b

Figure 40- Apparition des fissures (a) Image photographique (b) Image microscopique

3.6.14 Temps de prise

Le temps de prise donne une indication approximative sur l'état de durcissement actuel de la pâte de béton et permet de connaitre le début et la fin d'une phase d'un mélange à base cimentaire. En d'autres termes, le temps de prise donne une mesure de la résistance et la rigidité de la pâte de béton ou de mortier. Il est déterminé par la pénétration d'une aiguille dans le matériau béton ou mortier. L'essai de pénétration normalisé avec un appareil Vicat (moules et aiguilles de pénétration) a été utilisés pour déterminer le début et la fin de prise conformément à la norme [175].

a b

Figure 41–Mesure de la prise (a) appareil Vicat (b) échantillon du MBE.

La figure 41 montre l'appareil Vicat utilisé dans nos tests avec les moules ou les pâtes des bétons et de leurs mortiers équivalents ont été mis. Les pâtes sont préparées à partir des formulations citées dans le tableau 4 et 5 en enlevant les graviers et le sable avec les quantités d'eau absorbées par ces deux constituants. Les moules ont été placés sur une plaque de verre et ensuite collés avec de la résine pour empêcher premièrement la laitance de la pâte autoplaçante de s'échapper en dessous et deuxièmement de fixer les moules sur la plaque de verre. Pour chaque essai, on lance les tests des trois formulations simultanément afin de faire le suivi de la prise en même temps. Après l'introduction de la pâte dans le moule, le remplissage s'effectue sans tassement. ni vibration, ensuite on enlève l'excès de pâte avec un outil présentant un bord droit, de manière à laisser la pâte remplir le moule avec une surface supérieur lisse. En premier lieu on règle l'appareil Vicat muni de la sonde par abaissement de celle-ci jusqu'à la plaque de verre et on ajuste le repère au zéro puis on met la sonde en position d'attente. On dispose les

moules muni des échantillons de pâte sous l'aiguille, ensuite on baisse doucement cette dernière jusqu'à qu'elle sou au même niveau et en léger contact avec la surface de la pâte. Une fois

l'aiguille fixée, on la garde quelques seconde dans cette position pour éviter une vitesse initiale de se créer, on lâche rapidement la partie mobile et on laisse 1'aiguille pénétrer verticalement au centre de la pâte. On enregistre la lec(ure de l'échelle (indique la distance entre l'extrémité de l'aiguille et la plaque de verre). On repère l'opération sur des intervalles de 10 minutes, le temps du début. de prise est l'intervalle du temps entre l'instant du début de test au moment où la lecture sur l'échelle indique une valeur de 4mm. Pour la mesure du temps de prise finale, on retourne le moule remplie de pâte et on effectue la même procédure de pénétration mais sur la deuxième face de la pâte qui été en contact avec la plaque de verre. Le temps de prise finale correspond au temps entre le début du test et l'instant auquel l'aiguille ne pénètre qu'à 0.5 mm à la pâte.

3.6.2 Conditions climatiques

Dans notre étude, 011 a choisi trois types de climats pour suivre nos essais, chaque condition climatique représente un taux de séchage diffèrent et définit par son facteur météorologique le plus influant. Ces conditions sont assurées par une chambre climatique.

3.6.2.1 Chambre climatique

Cette chambre qui dispose d'un ventilateur et une source de chaleur, possède les caractéristiques d'un environnement sévère, la ventilation a trois vitesses de vent, et la source de chaleur peut atteindre une tempérai.ure de 20 jusqu'à 70 cc.

a b

Figure 42–Chambre climatique (a) prise (b) retrait empêché

Un thermomètre indique la température, un densimètre et un anémomètre indiquant respectivement l'humidité et la vitesse du vent à l'intérieur de la chambre. La première vitesse du vent de ventilateur est égale à 3m/s. La chambre climatique est allumée deux heures avant de mettre en place les échantillons pour Je séchage afin d'assurer la stabilisation des conditions de séchagesur les valeurs souhaités.

3.6.2.1.1 Conditions de laboratoire

Les conditions de laboratoire sont réalisées aux 25°C de température, 70%d'humidité et Omis de vent.

3.6.2.1.2 Conditions de températures élevées

Dans le cas du séchageà température élevée, il y a deux cas de séchage,les conditions de 30C° et le cas de la température à SOC° ; dans les deux cas l'humidité est fixée à 50% est la ventilation est égale à Okrn/h.

3.6.2.1.3 Conditions de températures élevées avec ventilation

Dans le cas du séchage à température élevée avec ventilation, les mêmes conditions du cas de séchage à température élevée seront répétées avec une ventilation de 'l Skrn/tt qui accompagne chaque test.

3.7 Plan expérimental

Le plan expérimental de notre étude est divisé en parties suivantes :

- Etude comparative du ressuage des bétons et de leurs mortiers équivalents
- Etude de longueur de fissuration des mortiers de béton équivalent
- Etude de largeur de fissuration des bétons
- Etude comparative du temps de prise des bétons et de leurs mortiers équivalents
- Etude de l'effet. d'un supplément en eau et en superplastifiant sur la longueur de fissuration des mortiers autoplaçants équivalents

- Etude de l'effet d'un supplément en eau et en superplastifiant sur la largeur des bétons autoplacants.

Pour chaque étude, les conditions de séchage sont définies dans les chapitres qui suivent.

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, les matériaux et les formulations utilisées dans nos essais ont été présentés dans des tableaux avec leurs caractéristiques et leurs propriétés à l'état frais et à l'état durci.

La première série des tests dans ce chapitre a été consacrée à fa définition et la caractérisation des bétons autoplaçants, bétons ordinaires et leurs mortiers équivalents.

La deuxième partie a été consacrée à la détermlnar.ion de la. marge d'autoplacabllitè pour déduire le supplément en eau et en superplastlfiant à ajouter. dans le cas des mortiers autoplaçants et bétons autoplaçants.

La dernière partie de ce chapitre a été consacrée à la présentation des dispositifs, des appareils et méthodes utilisées dans notre travail expérimental, ainsi qu'une description des caractéristiques de la chambre climatique et des conditions de séchage où les essais vont se dérouler. La procédure de mesure du ressuage, fissuration due au retrait plastiques et d'autres tests complémentaires tels que le temps de prise ont été présentés en détail. La plupart des mesures vont être effectuées dans la chambre climatique.

Enfin, un plan de travail pour la partie expérimentale a été présentée pour les chapitres expérimentaux qui suivent.

Chapitre 4

Etude comparative de ressuage, fissuration et prise des bétons et des MBE

Thèse de doctorat - I. YAKOUBI
Thèse de doctorat - I. YAKOUBI

4.1 Introduction

Un intérêt particulier sera porté dans ce chapitre au comportement ou à la tenue du béton autoplaçant et ordinaire aujeune âge, particulièrement vis-à-vis de la fissuration due au retrait plastique et au phénomène de ressuage, dont le but est de chercher l'Influence et l'impact de ce dernier sur la portée des fissures. Dans cette partie expérimentale, nous avons mis au point des protocoles expérimentaux et prévu les adaptations nécessaires aux BAP pour comprendre leur ressuage et la relation qu'ils peuvent avoir avec la Fissuration due au retrait plastique. Il nous est apparu important de réaliser cette étude complémentaire du temps de prise des bétons et de leurs mortiers équivalents afin de bien interpréter les résultats du ressuage et de fissuration et de bien déduire la relation entre les deux.

En première partie, notre travail expérimental est consacré à une comparaison entre le ressuage des bétons autoplaçants, bétons ordinaires et de leurs mortiers équivalents, ensuite pour l'étude de fissuration, l'échantillon des bétons et des mortiers seront exposés aux mêmes conditions climatiques afin d'èl.udier la fissuration. Cette partie expérimentale se termine par la mesure du début et de fin de prise des bétons et de leurs MBE.

Dans les sections suivantes, les résultats du ressuage, fissuration et temps de prise sont résumées dans des graphiques séparés. Cela inclut tous les tests effectués sur les mélanges des bétons, ainsi que les mélanges de mortiers équivalents testés dans différentes conditions climatiques. Le nom, la définition et !es caractéristiques de chaque mélange utilisé ont été résumés dans le chapitre précèdent.

4.2 Etude du ressuage des bétons et des MBE

Cette première partie expérimentale est consacrée d'une part à la comparaison du ressuage des bétons autoplaçants avec celui des bétons ordinaires et celle de leurs mortiers équivalents d'une autre part. L'utilisation des formulations de mortiers équivalents clans les tests de fissuration exige la détermination de différences avec les bétons vis-à-vis du ressuage.

Le ressuage des bétons et de Jeurs mortiers équivalents sera effectué dans les conditions climatiques de laboratoire.

Bien que la hauteur du moule du ressuage est différente de celles des tests de fissuration, les profondeurs dans le ressuage du béton et de leurs MBE est égale à 26 cm et sont les mêmes

87 Thèse de doctorat - 1. YAKOUBI

pour toutes les formulations. Il est supposé que la faible différence des ressuagesen raison de la différence en hauteur a une influence minimale sur les mesuresde fissuration.

Le ressuage des bétons et des MBE a été mesuré dans la chambre à environnement contrôlé avec une température constante comprise entre 20 et 25 C°, une humidité relative comprise entre 50 et 60% et sans ventilation (conditions de laboratoire). Bien que le ressuage soit effectué dans un seul climat différent du climat utilisé dans le cas de la mesure de la fissuration, les résultats restent comparables, car les ressuagessont causéspar le tassement des particules en raison de la force gravitationnelle. Le ressuage est donc principalement influencé par la composition de la pate de béton ou du mortier et non pas par les conditions climatiques. La différence de ressuage pour les mêmes formulations dans des climats différents est seulement dü à l'évaporation.

4.2.1 Ressuage des bétons

Dix mélanges de bétons ont été formulés dans la première partie expérimenta le : cinq pour chaque type afin de tester la différence de ressuage entre le béton autoplaçant et le béton courant, avec un rapport E/C identique pour chaque valeur de résistance visée. Les gammes de résistances visées sont 25 27 30 32 35 MPA. La norme ASTM C232 est appliquée sur les 10 formulations de béton afin de mesurer leur ressuage,dans cette partie, les tests ont été mesurés qu'une seule fois. Ce test nous permet de mesurer la quantité d'eau ressuée des échantillons de béton mis en place. En outre, la méthode proposée de mesure de ressuage nécessite des conditions environnementales plus stables et moins extrêmes afin de garantir la précision et !a collecte de l'eau totale ressuée. En plus de la température plus basse et l'humidité relative élevée, le moule de ressuage a été également couvert avec une plaque de verre afin de minimiser l'évaporation de l'eau de ressuage pendant les intervalles de mesure. La température influence le taux d'hydratation qui peut influencer le ressuage, mais puisque la majorité des ressuages se produisent avant l'hydratation du béton, il est censé se traduire par des différences relativement faibles. En outre, la mesure de ressuage avec la méthode proposée ne représente que des ressuagesdus au tassement des particules et néglige le ressuage qui résulte de la pression capillaire. Notre étude porte son intérêt sur la quantité d'eau qui ressue lors des premières heures avant la prise finale.

88 Thèse de doctorat - 1. YAKOUBI

4.2.2 Ressuage des MBE

Dans une deuxième partie, les ressuages des mortiers équivalents sont mesurés avec la même méthode ASTM C232, qui est également appliquée pour mesurer la quantité d'eau ressuée des mortiers équivalents au lieu de l'ASTM C 243 (norme de mesure de ressuage des mortiers).

En général, la norme ASTM C 243 est utilisée pour mesurer le ressuage des mortiers, mais elle n'était pas favorite dans notre cas pour les raison suivantes :

- Difficultés de mesure avec l'appareil du mortier.
- Volume initial de mortier pour la norme ASTM C243 très petit par rapport à celui du béton et de la norme ASTM C232.
- Surface de ressuage réduite par rapport à la norme ASTM C232.
- Différence de hauteur entre les deux enceintes.
- Mode opératoire différent et plus compliqué par rapport. à l'ASTM C 232.

Choisir la même norme que celle du ressuage des bétons a pour but de comparer les résultats de ressuage des bétons et celle de leurs mortiers équivalents.

4.3 Résultats et discutions

4.3.1 Différences de ressuage entre BAP et BO

La figure 43 représente le processus de ressuage des BO et des BAP ayant respectivement, les rapports E/C égaux à 0.41, 0.44, 0.46, 0.51, 0.55 avec des résistances à la compression plus ou moins égaux respectivement à 25, 27, 30, 32, 35 Mpa. Les résultats expérimentaux de la capacité et du taux de ressuage sont présentés au tableau 10. Cette figure montre que le ressuage augmente avec le rapport E/C, le même résultat est remarqué pour les deux types du béton. Le 805 a marqué la plus grande quantité d'eau collectée qui est égale à 200ml, mais pour les BAP cette quantité ne dépasse pas 40ml enregistrée avec le BAPS. La plus grande différence en quantité de ressuage entre le béton autoplaçant et le béton ordinaires qui ont le même Rapport E/C est égale à 70% enregistrée avec les bétons du rapport E/C =0,55.

Les bétons avec les résistances à la compression les plus faibles ont marqué les taux et la capacité de ressuage les plus élevé pour les deux types du béton. La figure 45 donne le taux et la capacité de ressuage des deux types de béton en fonction de leurs résistances à la compression, d'après la figure on peut voir que le taux de ressuage diminue avec l'augmentation de la résistance à la compression.

89 Thèse de doctorat - 1. YAKOUBI

Le même résultat est enregistré pour la capacité à l'exception du B02 et B03 qui ont donnés deux valeurs très proches.

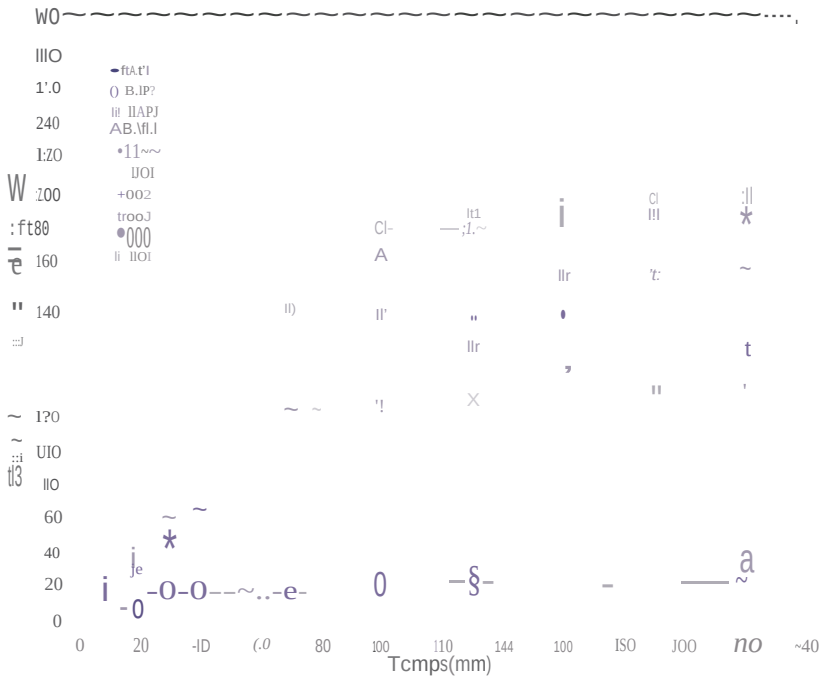


Figure 43- Courbe du ressuage des BAP et BO

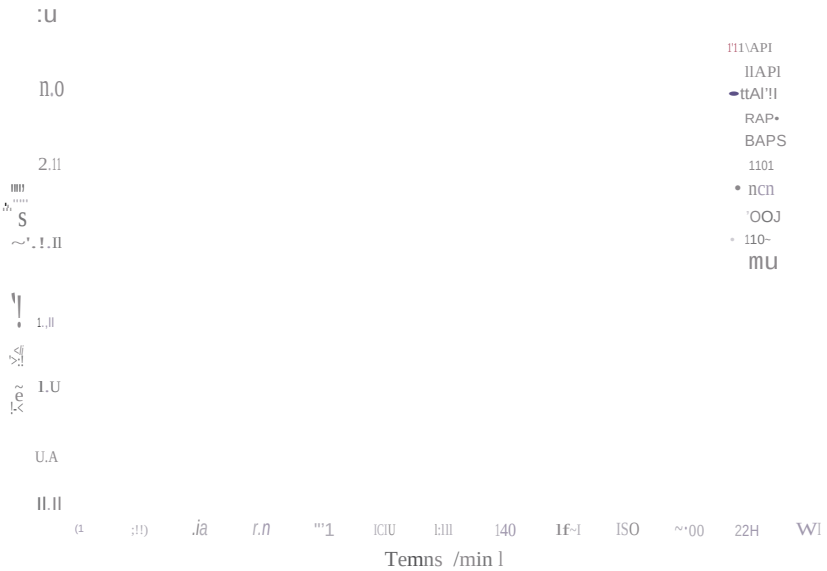


Figure 44- Taux de ressuage des BAP et BO en fonction du temps

Dé ignation	Taux de ressuage Kg/m2/h	Capacité ressuage Kg/ Kg	Temps de ressuage min
BAPl	0.104	0.00357	220
BAP2	0.118	0.00733	220
BAP3	0.139	0.00901	220
BAP4	0.178	0.01247	220
BAP5	0.206	0.01481	220
B01	0.767	0.05116	220
BO 2	0.814	0.06855	220
BO 3	0.863	0.06798	220
BO 4	1.041	0.07570	220
BO 5	1.100	0.07841	220

Tableau 10 Résultats du taux, capacité de ressuage pour BAP, et BO

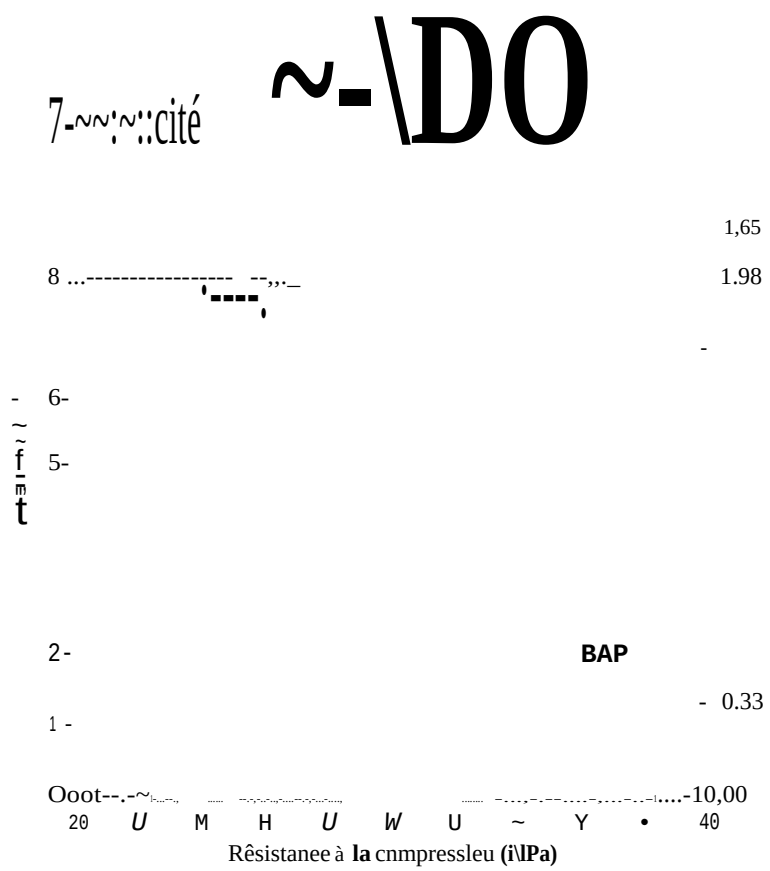


Figure 45- Taux et Capacité du ressuage du BAP et BO en fonction de résistance à la compression

Les faibles capacités et taux de ressuage enregistrés pour les bétons autoplaçants peuvent être

attribués à la présence de fillers calcaire. En général, les fines absorbent une grande quantité d'eau et en raison de leurs grains très fins, ils créent des canaux capillaires de petits diamètres. Ce faitjustifie le taux de ressuage beaucoup plus faible par rapport aux bétons ordinaires qui ne contiennent pas de fines et qui ont par la suite des canaux capillaire très accessibles, permettant aux gouttes d'eau de trouver facilement la surface. La figure 44 montre le taux de ressuage des bétons autoplaçants et des bétons ordinaires en fonction du temps. D'après la figure, l'allure des courbes de toutes les formulations est décroissante avec le temps et le taux de ressuage est très élevé dans les premières minutes, il commence ensuite à décroitre avec le temps. Le taux de ressuage des bétons ordinaire dans les premières minutes est très élevé tandis que celui du béton autoplaçants est très faible. A l'instant. de 2h et. 40 minutes, le taux de ressuage de toutes les formulations des deux types de béton tend vers zéro. Cet arrêt du ressuage peut. être dû d'une part à la fin du tassement des grosses particules, ce qui ne permet plus à l'eau interstitielle de percoler a la surface ou d'autre part à la prise et l'hydratation qui solidifié le mélange est rend le cheminemen l des part.leu les d'eau vers la surface plus difficile.

Le taux de ressuage le plus élevée dans les premières minutes pour le cas des bétons ordinaires est dû à la différence de formulations avec les bétons autoplaçants dont on peut citer :

- La. quantité d'eau libre dans un mélange de BO est plus élevée par rapport. à celle des BAP.
- La présence des gros granulats créent plus d'espace entre les particules ce qui facilite le passage des gouttes d'eau.
- Le volume de pate chez les BO est moins élevée par rapport à celui des BAP ce qui minimise la consommation d'eau libre.
- Les pores dans le cas des bétons ordinaires sont plus grands que ceux des BAP ce qui permet aux gouttes d'eau de ressuer en grande quantité surtout dans la première heure.

4.3.2 Différences de ressuage entre mBAPe et mBOe

La figure 46 représente le processus de ressuage des mortiers de bétons équivalents mBOe et des mBAPe ayant respectivement, les rapport E/C égaux à 0.41, 0.44, 0.46, 0.51, 0.55 avec des résistances à la compression plus ou moins égales respectivement à 28, 32, 35, 38,40 Mpa. Les résultats expérimentaux de la capacité et du taux de ressuage sont présentés au tableau11.

Cette figure montre que le ressuage des mortiers augmente avec le rapport E/C, le même résultat est remarqué pour les deux types du mortier.

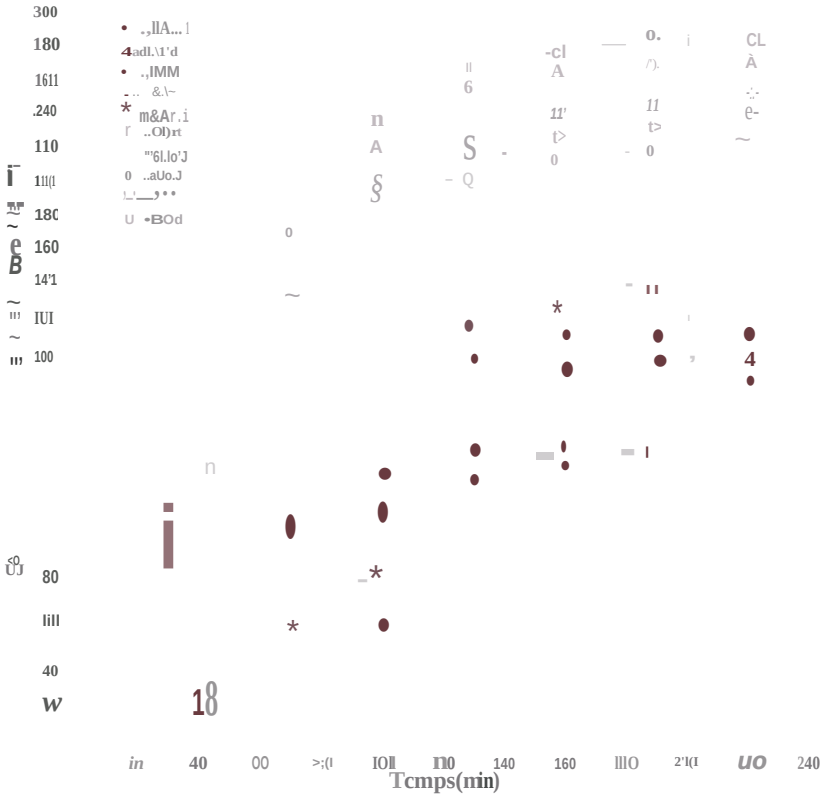


Figure 46- Courbe du ressuage des mortiers de béton équivalent mBAPe et mBOe

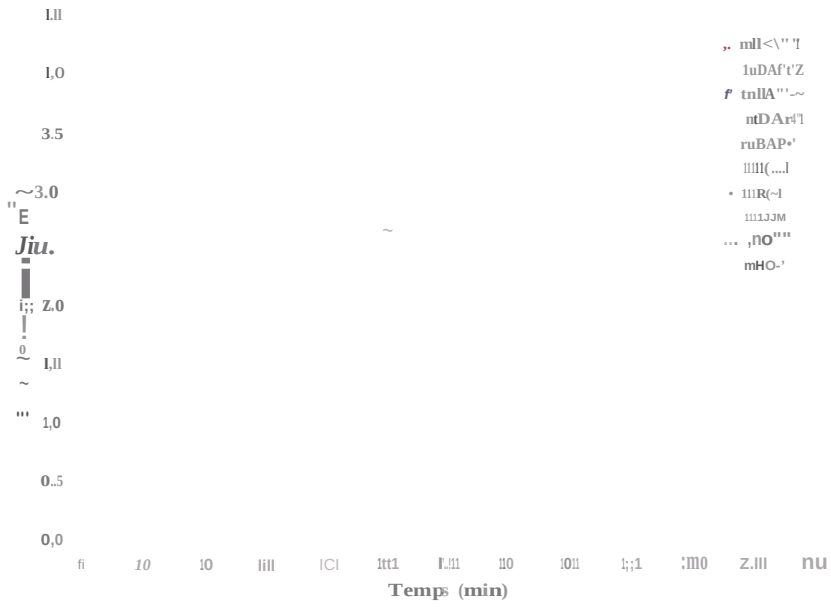


Figure 47- Taux de ressuage des mBAPe et mBOe en fonction du temps

Désignation	Taux de ressuage Kg/m2/h	Capacité ressuage Kg/ Kg	Temps de ressuage min
mBAPe1	0,501	0.0237	220
mBAPe2	0,568	0.0276	220
mBAPe3	0,618	0.0302	220
mBAPe4	0,679	0.0317	220
mBAPeS	0,770	0.0397	220
mBOe1	1, 19	0.0528	220
mBOe2	1,33	0.0621	220
mBOe 3	1,39	0.0772	220
mBOe4	1,49	0.0656	220
mBOe 5	1,57	0.0678	220

Tableau 11 Résultats du taux, capacité de ressuage pour mBAPe, et mBOe

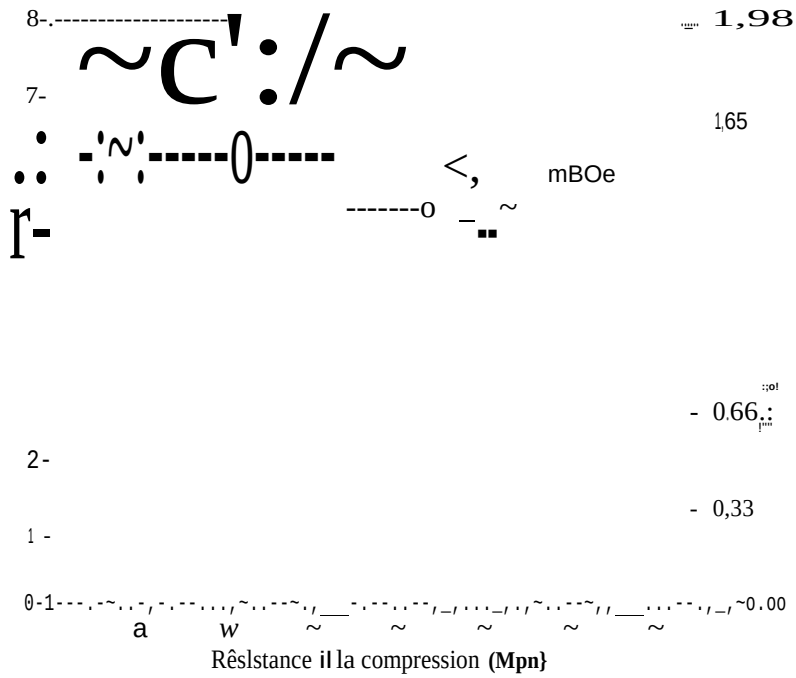


Figure 48- Taux et Capacité du ressuage des mBAPe et mBOe en fonction de résistance à la compression

Le plus grand taux et capacité de ressuage est enregistré par le mBOe5 (quantité de ressuage totale égale à 283 ml), tandis que pour les mortiers autoplaçants cette quantité ne dépasse pas 140ml enregistrée avec le mBAPeS.

La plus grande différence en quantité de ressuage entre les formulations autoplaçantes et celles ordinaires avec le même Rapport E/C est égale à 70% enregistrée avec les mortiers du rapport E/C =0,55. Les mortiers avec les résistances à la compression les plus faibles ont marqué les taux et la capacité de ressuage les plus élevés pour les deux types des mortiers.

La figure 48 donne le taux et la capacité de ressuage des deux types de mortiers équivalents en fonction de leurs résistances à la compression, d'après la figure, on peut voir que le taux de ressuage diminue avec l'augmentation de la résistance, le même résultat est enregistré pour la capacité de ressuage à l'exception du mBOe3 qui donne une valeur de capacité proportionnellement très élevée , cette capacité diminue à partir de la résistance de 31 Mpa . La figure 47 montre le taux de ressuage des mortiers équivalents aux bétons autoplaçants et aux bétons ordinaires en fonction du temps. Contrairement au cas des bétons les taux de ressuage des deux types de mortier débutent avec des valeurs très faibles dans les 20 premières minutes. Ensuite le taux de ressuage de mortier ordinaire croit rapidement, précisément à partir de la 40iémme minute, jusqu'à ce qu'il at.teint un pie à la 80iéme minute ou il décroit jusqu'à la fin du test. Pour le cas du mortier autoplaçant, l'allure de la courbe du taux de ressuage en fonction du temps est presque semblable à celle du cas de son béton ou il décroit jusqu'à la fin du teste.

Le taux de ressuage plus faible au début de l'essai est dû aux formulations des mortiers qui contiennent que du sable comme granulats ce qui rend la percolation des gouttes d'eau vers la surface plus difficile. Avec le temps, des canaux capillaires vont se créer et permettront de former un réseau qui facilite Je ressuage.

Les mortiers ordinaires contiennent une grande quantité d'eau libre, plus grande que celle de leurs bétons équivalents, cela explique le pique du taux de ressuage croissant, dont une grande quantité d'eau commence à trouver son chemin vers la surface avec la création d'autres réseaux de canaux capillaire qui atteignent la surface du mortier.

Une grande quantité d'eau ressue rapidement est excessivement, dans un intervalle de temps très court, (en presque 30 minutes) cette quantité d'eau très élevée qui ressue est suivie par une chute du taux de ressuage et l'eau libre ne remplace pas la quantité qui a déjà ressué, cela explique la très forte chute dans le taux de ressuage à partir de la 80iémme minute.

Pour les formulations autoplaçantes cette similitude dans l'allure des courbes du taux de ressuage en fonction du temps est due au fil lers calcaires qui bloquent l'itinéraire de l'eau de ressuage d'un côté et. qui absorbent une très grande quantité d'eau libre ce qui minimise la quantité de ressuage finale.

Dans le cas des mortiers, le ressuage ne tend vers zéro qu'après 3h et 40 minutes de temps, une heure de plus par rapport au cas du béton. Cette différence est due à la pâte très élevée dans le cas des mortiers équivalents par rapport au béton et le remplacement des graviers par du sable dont une particule de gravier équivaux à un grand nombre de grain de sable, ce qui rend le tassement de toutes les particules plus grand.

D'une autre part, l'hydratation d'un mélange qui a un grand volume comme le cas des mortiers équivalents, retarde la prise et par conséquent permet plus de ressuage.

Dans les prochaines sections, l'étude de temps de prise peut confirmer cette différence.

4.3.3 Différences de ressuage entre Béton et leurs mortiers équivalents

En comparant les deux figures 43 et 46, on peut voir que la quantité d'eau de ressuage est plus élevée dans le cas des mortiers par rapport aux mélanges des bétons pour les deux types de formulations autoplaçantes et ordinaires. La figure 49 illustre et explique cette différence. Le rapport entre le taux de ressuage du béton et celui du mortier équivalent est presque le même pour tous les rapports E/C (TR mBOe / TR BO= ±1.5) et (TR mBAPe / TR BAP = ±4). Cette proportionnalité du taux de ressuage peut être attribué à :

- Ëquivalence dans la surface spécifique des agrégats.
- Même rapport E / C.
- Même rapport E/ L.

Cependant, la différence entre le béton et le mortier en termes du taux de ressuage peut être lié à la présence des gros granulats dans les bétons. La géométrie interne et la forme des canaux capi!laires peut justifier aussi cette différence de ressuage entre le béton et le mortier. L'infiltration de l'eau dans le mortier suit une ligne presque droite, tandis que pour le béton, il suit une trajectoire irrégulière, par conséquent, il prend plus de temps pour trouver la surface, et une grande quantité d'eau reste piégée dans le matériau, *ce* qui minimise la quantité d'eau

ressuée par rapport à celle du mortier. Certaines gouttes d'eau restent piégéessous les gros agrégats, ce qui peut conduire à un affaiblissement de la liaison entre la pâte et les autres éléments du béton. Les essais de ressuage de Sawaid and Iketani[162] sur le mortier et le béton supporte fortement cette hypothèse.

La microstructure joue donc un rôle non négligeable dans le phénomène du ressuage. La distribution des pores dans le cas du béton et leurs dimensions à l'état frais est complètement différente par rapport à celle du mortier. Dans le cas des bétons, le taux de ressuage initial est proportionnellement élevé dans les quarante premières minutes, mais il diminue au bout d'une heure jusqu'à qu'il devienne nul après deux heures. Cependant, les mortiers présentent un faible taux de ressuage au début mais sa vitesse s'accélère après les quarante premières minutes. Sa croissance reste constante dans les 3 premières heures suivantes, jusqu'à ce qu'elle tende vers zéro au bout de la 4iéme heure. En termes de comparaison, le béton a le taux de ressuage le plus élevé mais en terme de capacité, il enregistre la plus petite valeur par rapport à celle du mortier. Autrement dit, le béton peut ressuer plus rapidement par rapport au mortier, mais en termes de quantité il ressue moins que le mortier. Les grains de sable dans le cas du mortier occupent tout l'espace, Ce fait justifie le Laux de ressuage lent dans les premières minutes, alors que ces canaux sont plus larges pour les échantillons du béton, permettant un ressuage libre et rapide. Le taux de ressuage est lié à la taille des pores tandis que la capacité est directement liée à la quantité totale d'eau libre dans ces pores.

Figure 49- Différence de ressuage entre le béton et le mortier

4.4 Fissuration due au retrait plastique des bétons et MBE

Dans cette partie expérimentale, les bétons et leurs mortiers équivalents sont mis en test pour étudier la fissuration due au retrait plastique. Contrairement à l'étude de ressuage, le but de l'utilisation des mortiers de bétons équivalents n'est. pas de faire la comparaison avec les bétons mais de compléter notre compréhension du phénomène de fissuration, vu que les deux dispositifs sont complètement différents en géométrie, en volume du matériau et en dimension des nervures, les résultats sont incomparables. Comme cité précédemment, notre choix des îvlBE a pour but d'étudier la longueur des fissures et comparer les deux types de formulations.

Dans chaque essai. les deux dispositifs seront exposés aux mémés conditions de séchage et introduits en rnèrne temps dans la chambre climatique.

Les tests seront effectués dans les conditions climatiques suivantes :

- C L (25C° Ton1p, Ü km/h Vont, 50 % Hr)
- C T E (30C° r.; 0 km/h V."" 50 % Hr) et (SOC° T.mr· 0 km/h V."" 50 % Hr)
- C T E+V (30C° Tomp, 15 km/h v.: 50 % Hr) et (SOC° r.; 15 km/h Vont, 50 % Hr)

4.4.1 Fissuration des bétons

La largeur de la fissuration due au retrait plastique des deux types de béton a été mesurée dans les conditions climatiques citées précédemment. La mesure de la largeur des fissures est enregistrée à la fin de chaque test.

Le choix de l'étude de la variation de la largeur des fissures dans le cas des bétons est basé sur le principe qu'un test de retrait empëché du béton ne permet. d'init.ier qu'une seule fissure au milieu du moule, cette fissure a la rnèrne longueur pour la plupart des essais mais elle est différente en termes de largeur. Ce dispositif est donc approprié pour enregistrer la largeur des fissurations.

4.4.2 Fissuration des MBE

Dans cette partie expérimentale, la différence de longueur de fissuration entre les deux types de mortiers équivalents a été mesurée dans les conditions climatiques citées précédemment. La

mesure de la longueur des fissures est enregistrée chaque demi-heure en utilisant ta règle et la loupe pour mieux voir les micros fissures, puis on inscrit les résultats dans un tableau. On

répète l'essai deux fois pour donner la validité aux résultats obtenus. En applique la même procédure pour les deux mortiers équivalents, le test dure 5 heures.

Nous avons choisi d'étudier la longueur des fissures dans le cas des mortiers sur le principe que le dispositif de retrait empêché du mortier (géométrie à plusieurs nervures) donne de multiples fissures très fines et longues, avec des largeurs négligeables ou très étroites. Cette caractéristique dans ce dispositif permet de bien comparer et enregistrer l'évolution de la longueur en fonction du temps. Cette dernière est clairement vue à l'œil nu et peut être enregistrée à l'aide d'une règle chaque demi-heure. Les essais seront répétés pour les conditions climatiques citées précédemment.

4.5 Résu tats et discutions

4.5. l Longueur de fissuration des M BE

4.5.1.1 Longueur de fissuration aux conditions de laboratoire

La Figure. 50 montre la longueur des fissures pour mBAPe et mBOe dans des conditions de laboratoire. Selon la figure, on voit clairement que la propagation des fissures au fil du temps est lente et faible. La fissuration au jeune âge commence une heure après le début du test pour le mBOe, et au bout de deux heures pour le mBAPe. Ensuite, après une demi-heure, nous observons un développement modeste des fissures pour les deux types de mortier qui diminuera au fil du temps jusqu'à ce qu'elles s'arrêtent. En général dans ces conditions, nous pouvons dire que les fissures prennent beaucoup de temps à apparaitre et leur évolution dans le temps est très faible.

L'amplitude du ret.rait plastique d'une Iormulat.ion autoplaçant.e es(. beaucoup plus élevée par rapport à celle d'une formulation ordinaire. En outre, vu leur capacité de ressuage extrêmement basse, les BAP ont sans aucun doute une prédisposition à la fissuration prématurée. Cependant, dans les conditions favorables du laboratoire, il est très difficile de distinguer la proportion critique de cette fissuration. Le peu de fissurations observées ne peut être attribué qu'à l'effet. de tassement causé par la gravité. Le taux d'évaporation dans ce cas est très faible ou presque nul, le retrait de séchage est un facteur négligeable dans cette situation. Par conséquent, la fissuration enregistrée est due au retrait endogène, et au tassement dû au ressuage très fort pour les mBOe. Les résultats obtenus justifient cette hypothèse car les mortiers ordinaires ont enregistré les plus longues fissures dans ce test.

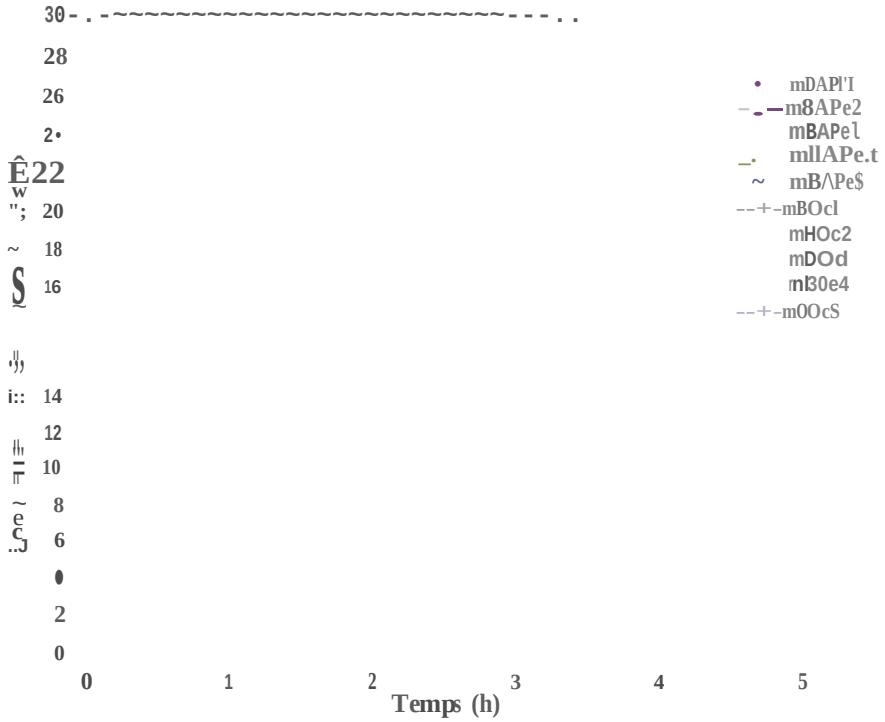
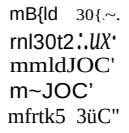


Figure 50- Courbes de longueurs de fissuration de mBAPe et mBOe en fonction du temps dans les conditions de laboratoire

4.5.1.2 Longueur de fissuration aux 30 C° de températures

Les résultats de la fissuration due au retrait plastiques du mortier autoplaçant et ordinaire dans les conditions climatique de (30C° Temp, 0 km/h Vent, 50 % Hr) sont représentés dans la figure 51. Le mBAPel a enregistré la plus longue fissure dans ces conditions. Au bout de 5 heures, il a atteint une longueur de 54cm tandis que la formulation mBOe a enregistré la plus courte fissure à la fin du test, qui est égale à 0,2 cm. Le temps d'apparition des premières fissures pour les mortiers autoplaçants est compris entre une demi-heure et une heure et demie, tandis que l'apparition des premières fissures pour les mortiers ordinaires n'aura lieu qu'à partir de la deuxième heure. Les mortiers mBOe ont commencé à se fissurer après 3 heures après le début du test, cela ne peut êtrejustifié que par la couche de ressuage qui prend plus de temps pour disparaître dans le cas des mortiers ordinaires, et qui protège la surface plus longtemps. Après l'évaporation de cette dernière, la fissuration de notre mortier se produit en raison de la différence de température au sein du matériau et en raison du contact directe des pores avec l'air de l'environnement. La différence de température amène la partie froide à se contracter plus vite que la partie la plus chaude, cette différence restreint la contraction. Les fissures thermiques qui apparaissent lorsque le taux d'empêchement de ce rétrécissement créé par la température dépasse la résistance à la traction aujeune âge du béton.



LO

Figure 51- Courbes de longueurs de fissuration de mBAPe et mBOe en fonction du temps dans les conditions de (30C ° Temp).

4.5.1.3 Longueur de fissuration à 50 C₀ de température

La Figure. 52 représente les courbes des longueurs des lignes de fissuration observées sur des mortiers équivalents en fonction du temps, dans des conditions de 50 C° de température, 0 km/h Vent el. 50 % d'humidité relative. Le mBAPe1 (avec rapport E / C = 0.41 avec le taux de ressuage le plus faible) a enregistré la plus grande longueur de fissuration dans ces conditions climatiques. Le mBAPe5 (avec le rapport E / C = 0,55 avec le taux de ressuage le plus élevé) a enregistré la plus courte fissure dans de telles conditions de séchage. En comparant les essais de fissuration à 30C ° et SOC ° Tcmp. l'influence de ra température est importante. Ce résultat a été enregistré pour les deux types de mortiers. Au-delà de 40 C₀ de température, 0 km/h Vent et 50 % d'humidité, le climat peut être considéré comme sévère : le retrait plastique dans ces conditions est élevé, ce qui provoque de nombreuses fissures dans toutes les parties du mortier avec des amplitudes considérables. On constate leur apparition dans les coins qui ne résistent pas à la force de traction causée par le rétrécissement due à l'évaporation. Ces fissures apparaissent en début de test pour les mortiers autoplaçants tandis que l'apparition des fissures dans le cas des mortiers ordinaire se situe entre une demi-heure pour les formulations à faible rapport E/C jusqu'à 3h pour le rapport de 0.5.5.

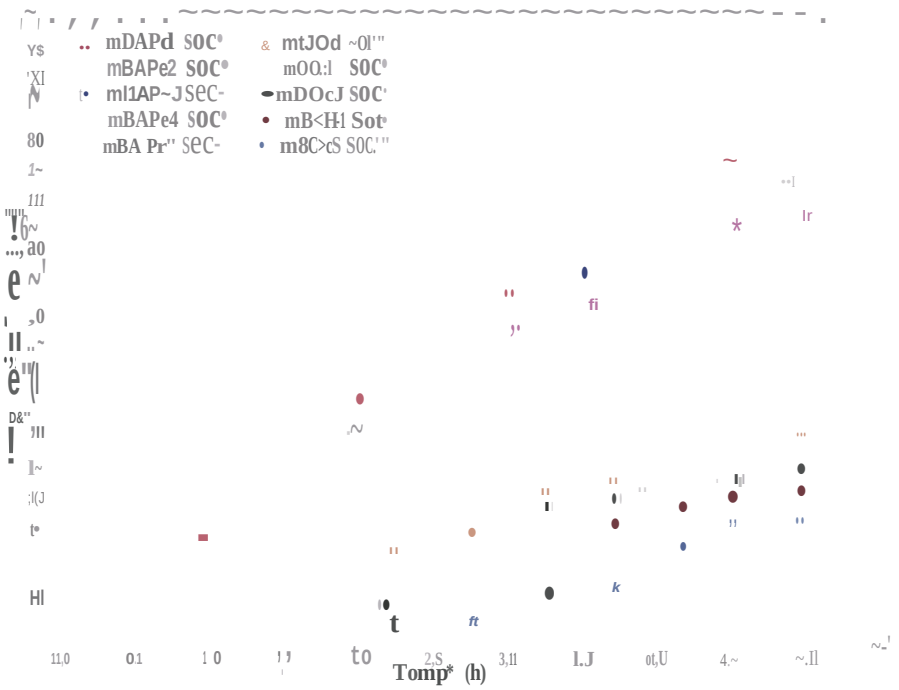


Figure 52- Courbes de longueurs de fissuration de mBAPe et mBOe en fonction du temps dans les conditions de (SOC ° Temp)

4.5.14 Longueur de fissuration à 30 C° +V 15 km/h du vent

La Figure 53 représente les courbes des longueurs des fissures de fissuration observées sur des mortiers équivalents en fonction du temps dans des conditions de 30 C° de température, 15 km/h du vent et 50 % d'humidité. Nous avons observé une amplification des fissurations en passant des conditions sans ventilation aux conditions avec ventilation pour toutes les formulations mis en test. Le taux d'évaporation est passé de 0.16 kg/m2/h pour les conditions sans ventilation à 0.77 kg/m2/h avec ventilation, cette dernière est donc le facteur météorologique qui a une grande influence sur l'évaporation et sur le séchage: cela explique l'augmentation des longueurs de fissures.

Un taux de ressuage proportionnellement faible par rapport au béton ordinaire ne permet pas au mBAPe de résister et de commencer à se fissurer dès les premières minutes après le début du test, tandis qu'un taux de ressuage qui atteint 1.57 Kg/m2/h pour le mBOe a permis de retarder la fissuration jusqu'à 3h et diminue la fissuration finale.

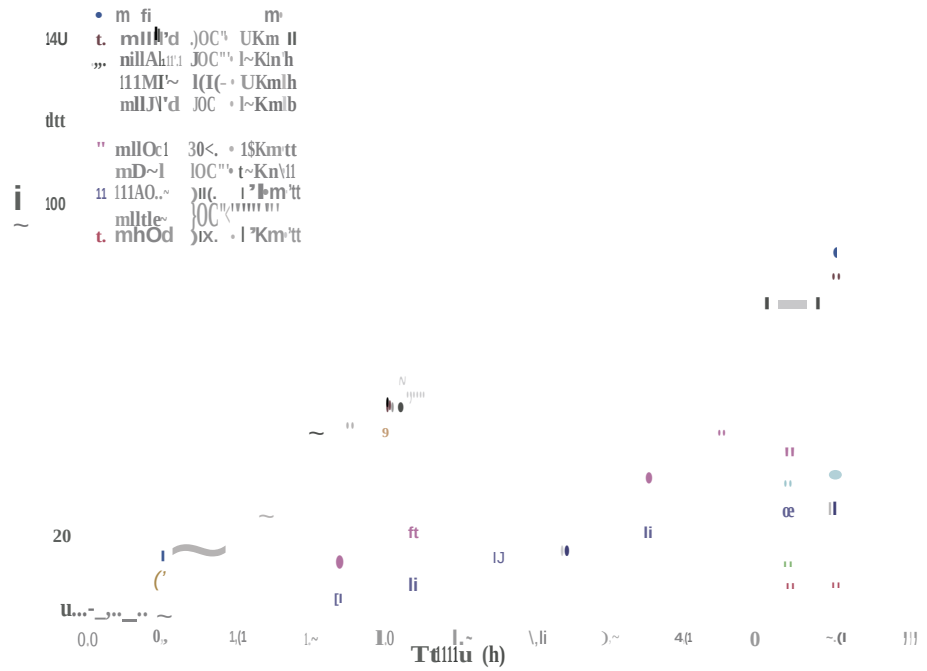


Figure 53- Courbes de longueurs de fissuration de mBAPe et mBOe en fonction du temps dans les conditions de (30C °Temperoture+15km / h V.n,).

4.5.15 Longueur de fissuration à 50 C° + V 15 km/h du vent

La Figure 52 représente les courbes des longueurs des fignes de fissuration observées sur des mortiers équivalents en fonction du temps, dans des conditions de 50 C° de température, 15 km/h du vent el 50 % d'humidité. Nous avons observé une amplification de fissuration lorsque les conditions climatiques deviennent extrêmes, surtout en présence du vent, dans lequel l'évaporation atteint un taux égal à 2,23 kg / m2 / h. Par conséquent, le ressuage ne peut protéger la surface du mortier indéfiniment, et sa surface finit par sécher et se fissurer dès la première heure et cela pour les deux types de mortiers. Avec le temps, les fissures se propagent rapidement et atteignent des valeurs très élevées pou varu allez jusqu'à 145 cm dans une surface de 0.04 m2 (cas du mBAPe1)

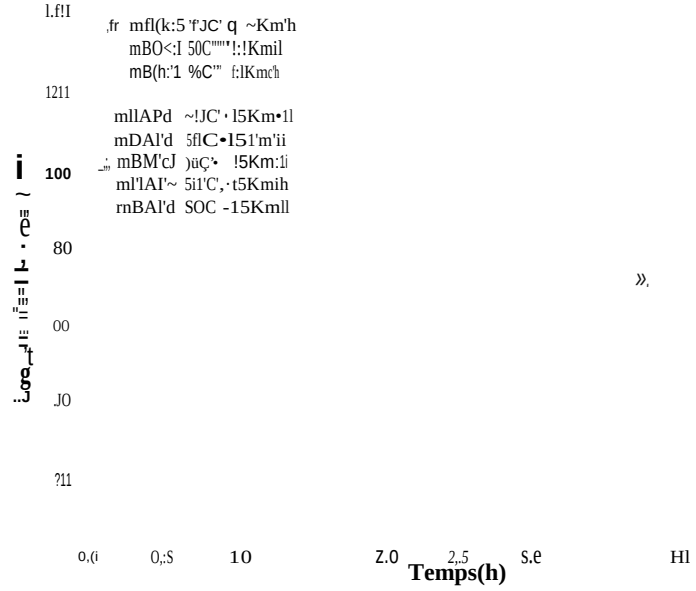


Figure 54- Courbes de longueurs de fissuration de mBAPe et mBOe en fonction du temps dans les conditions de (SOC ° Tempernture+ 15km / h V.n,}.

4. 5. 2 Largeur de fissuration des bétons

4. 5. 2.1 Largeur de fissuration aux conditions de laboratoire

Dans le cas de la largeur des fissures de bétons, la plupart des formulations n'ont montré aucune fissuration ou micros fissures avec des largeurs négligeables (Figure 55).

Dans les mêmes conditions climatiques, le test de longueur de fissuration a montré plus de fissuration par rapport à ce cas, cela peut être dû aux raisons suivantes :

- Différence du taux d'empêchement. de retrait pour les deux cas
- matériau lui-même (mortier et béton)

La présence de plusieurs nervures peut augmenter le risque de fissuration pour les mortiers tandis que pour le cas du béton, il nécessite plus d'obstacle pour qu'il se fissure. La différence de granularité entre le mortier et le béton peut être également une raison de cette différence en fissuration. Cela reste à confirmer avec l'étude comparative entre la fissuration due au retrait plastique d'un béton et celui du mortier dans les mêmes dispositifs. En outre, les conditions climatiques dans ce cas ne sont pas suffisantes pour initier des fissures.

Figure 55- Largeur de fissuration des BAP et BO dans les conditions de laboratoire

4.5.2.2 Largeur de fissuration à 30 C°

La Figure 56 représente la largeur des fissures observées sur le béton dans des conditions de température de (30C° Temp, 0 km/h Vent, 50 % Hr). Les deux types du béton se fissurent à la fin de l'essai. Dans ces conditions, les fissures commencent à apparaitre dès la 4ième heure, tous les bétons se sont fissurés à la fin des tests, la largeur des fissures dans le cas des bétons ordinaires est plus importante par rapport à celle des BAP. On remarque que la largeur des fissures augmente avec le rapport E/C pour les deux types de béton. La différence en largeur de fissuration entre les deux types de béton de même rapport E/C augmente avec l'augrnentation de ce dernier. La différence en termes de largeur de fissuration entre le BAP1 et 801 est égale 0.02mm, tandis que cette différence entre 8AP 5 et 805 est égale à 0.1 mm.

Dans ces conditions climatiques, la plus large des fissures est égale à 0.27 mm enregistrée par BOS et la plus petite des fissures est égale à 0.12 mm enregistrée par le 8AP1, donc l'augmentation rapport E/C augmente la fissuration pour les deux types de formulation. Malgré que les bétons autoplaçants aient des taux des ressuages très élevés, il a montré des largeurs de fissuration plus petites. La présence des fines et du superplastifiant peuvent être un facteur qui justifie cette différence, deux constituants qui caractérisent une formulation autoplaçante d'une autre ordinaire.

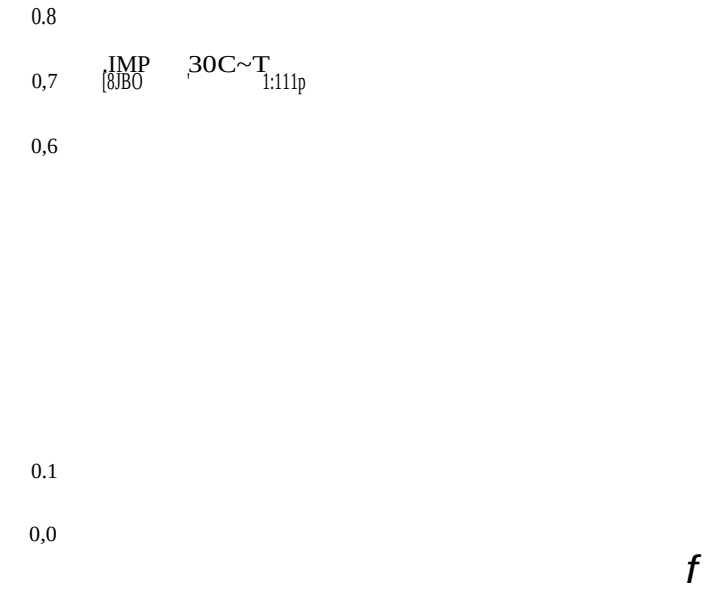


Figure 56- Largeur de fissuration des BAP et BO dans les conditions de (30C ° T.rnp)

4.5.2.3 Largeur de fissuration à 50 C₀

La température a un effet négatif sur la largeur de fissuration ; qui augmente en passant de 30 C₀ à 50 C ° Tornp. ce résultat a beaucoup plus été observé dans le cas des bétons ordinaires et moins pour les bétons autoplaçants. La figure 57 a montré les mèrnes observations du cas de 30 C ₀.

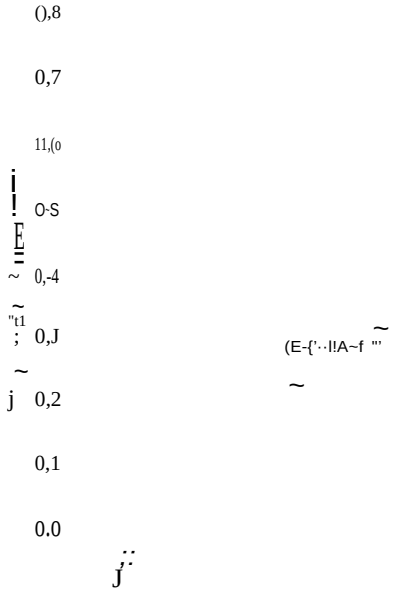


Figure 57- Largeur de fissuration des BAP et BO dans les conditions de (SOC° T.mp)

4.5.2.4 Largeur de fissuration à 30 C° + V 15 km/h

La figure 58 représente les largeurs des fissures observéessur les bétons ordinaires et les bétons autoplaçants ayant les mêmes rapports E/C. A partir de cette figure, on remarque que l'implication du vent augmente la largeur pour les deux types de béton. Cette largeur augmente également avec l'augmentation du rapport E / C contrairement à sa longueur, qui diminue avec r'auqrnentatron du rapport E / C. La plus grande largeur de fissuration dans les conditions de (30C° T.mp et 1 Sm /n Vent) est égale à 0,68 mm enregistrés pour le BOS.

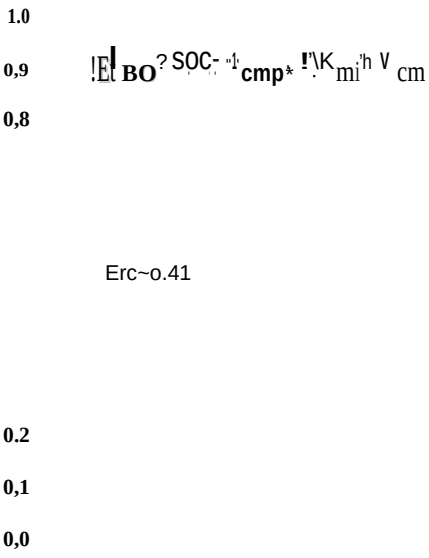


Figure 58- Largeur de fissuration des BAP et BO dans les conditions de (30C° Temperature+ 15km / h Vent)

4.5.2.5 Largeur de fissuration à 50 C° + V 15 km/h

La figure 59 représente les largeurs des fissures des bétons autoplaçants et des bétons ordinaires pour les différents rapports E/C dans les climats de (SOC° Ternp. 15 km/h Vent, 50 % Hr). En comparant les formulations vis à vis de la fissuration, on observe les mêmes remarques enregistrées dans les autres climats, sauf que ta valeur des fissures augmente en passant d'un climat moins sévère à un autre plus sévère. D'autre part, les bétons ayant les plus grandes résistances à la compression, présentent les plus petites largeurs de fissuration. Ce résultat nous amène à penser une autre fois que dans telles conditions, le ressuage ne peut pas contribuer longtemps à la protection de la surface. et il disparait très tôt de la surface. La

différence de largeur en fissuration enregistrée entre les deux types de bétons ne peut être attribuée qu'à la consistance, la fluidité et la rhéologie du matériau, facteurs qui représente la différence entre les deux types de béton à l'état frais.

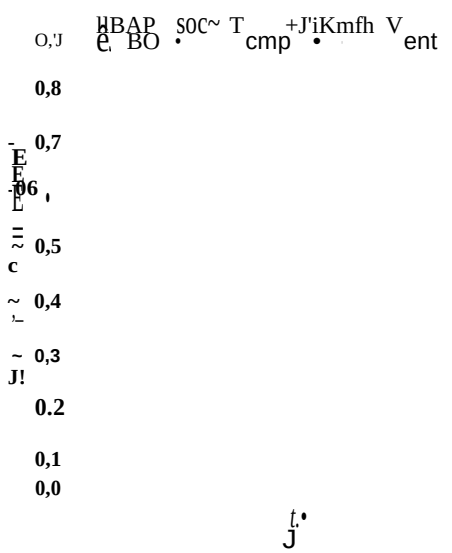


Figure 59- Largeur de fissuration des BAP et BO dans les conditions de (SOC °
Temperature+ 15km / h Vent)

4.6 Relation entre le ressuage et la fissuration due au retrait plastique

L'excessive évaporation de l'eau conduit inévitablement. à la dessiccation de la surface du béton, comme il a été constamment vu dans les tests du retrait empêché. Il n'y a pas de ressuage qui peut protéger interminablement la surface du béton ou du mortier, et la fissuration est inévitable avec les taux d'évaporation très élevés. Cependant, le contrôle du ressuagepeut aider à réduire la croissance des fissures, en particulier en termes de longueur. Par conséquent, le ressuageest bénéfique et il a une grande importance dans ces conditions. Le taux de ressuagedu BAP est très faible par rapport à un béton ordinaire, mais il diffère d'une formulation autoplaçante à une autre. L'abaque de !'AC] permet de déterminer le taux d'évaporation en fonction des paramètres météorologiques et la température du béton, tandis que le ressuageest déterminé par la méthode ASTM C 232 ou par des modèles décrits dans la

littérature. Une augmentation du rapport E / C peut fournir une certaine protection aujeune âge. Cependant, cette augmentation peul affecter l'homogénéité du matériel et affaiblir l'adhérence entre la pâte et les granulats. Une connaissance préalable des conditions de coulage de béton associéeau contrôle du ressuage peut aider à établir la meilleure formulation pour de tel les situations.

A l'échelle microscopique, el. sous l'effet de la force de la gravité, l'eau monte vers le haut et ra couche d'eau de ressuage apparaît dans les premières minutes. À ce moment, la capacité de ressuage est supérieure à la vitesse d'évaporation et le matériau est entièrement protégé. Cette situation ne va pas durer longtemps après l'évaporation des dernières gouttes d'eau de surface et une autre phase complètement différente commence. À cet instant, la tension superficielle est très élevée et les pores sont en contact direct avec l'air, la quantité d'eau évaporée dans cette deuxième phase est beaucoup plus importante. La force motrice dans ce cas est la pression capillaire, qui diminue progressivement avec la montée de l'eau interst.itielle, À ce moment, le matériau est dans sa contraction maximale, et il se fissure lorsque ce rétrécissement est empêché ou retenu par un obstacle. L'apparition de la première fissure dans nos tests dépend du matériau lui-même, les conditions climatiques et la quantité d'eau de ressuage. Les formulations autoplaçantes commencent toujours à se fissurer plus tôt que les mélanges ordinaires, sauf dans le cas des conditions de laboratoire. Dans les des conditions de 30 C_0 de température, le taux d'évaporation est égal à 0,16 kg / m2 / h, la plupart des formulations autoplaçantes commencent à se fissurer dès 1 h 30 min, tandis que la première fissure dans les formulations ordinaires apparaît après plus de 3 heures. Cet exemple illustre clairement 1' importance du ressuagedans le prolongement de la première phase décrite précédemment. La majorité des fissures se produisent dans la période dormante, mais continuent quelque temps après jusqu'à ce qu'elles tendent vers zéro. Cette diminution peut être expliquée par le temps de prise qui joue un rôle de stoppeur de fissuration. Les essais du temps de prise de la prochaine partie expérimentale peuvent montrer si il v'a une différence entre les formulations ordinaires et autoplaçant ainsi que le béton et leurs mortiers équivalents en termes d'hydratation et montrer l'influence de cette dernière sur la fissuration. L'augmentation de la capacité de ressuage réduira la perte d'eau de la pâte de béton et plus important encore, réduira le risque de fissuration dû au retrait plastique. Ces résultats rajoignent en quelque sorte les travaux de Le Roux[51]

4.7 Etude de la prlse des bétons et des MBE

Cette partie expérimentale est consacrée à l'étude de temps de prise initiale el finale des bétons ordinaires, bétons autoplaçants comparés avec la prise de leurs mortiers équivalents dans des conditions climatiques choisies pour étudier l'influence de certains paramètres météorologiques sur la prise. Les temps de prise sont mesurés sur les pâtes des deux types de béton et de la pate de leurs mortiers équivalents pour les conditions climatiques suivantes :

- Conditions de laboratoire (25C° Temp, 0 km/h Vent, 50 % Hr).
- Conditions de SOC° Temp, 0 km/h Vent, 50 % Hr.
- Conditions de SOC° T emp, 15 km/h Vent, 50 % Hr.

Par rapport au cas du test de la fissuration, l'étude de la prise est limitée à ces conditions climatiques pour les raisons suivantes:

- Le premier climat pour faire la comparaison entre les bétons et leurs mortiers dans les conditions normaux.
- Le deuxième climat pour étudier l'influence de la température sur la prise.
- Le troisième climat pour étudier l'influence de la. ventilation et le climat sévère sur le temps de prise.

4.8 Résultats et discutions

4.8.1 Temps de prise dans les conditions de laboratoire

Les figures 60 et 61 représentent respectivement le temps de prise initiale et finale des bétons autoplaçants, des bétons ordinaires et de leurs mortiers équivalents dans les conditions de laboratoire. À partir des deux figures on remarque que :

- Le temps de début de prise chez les bétons est plus rapide par rapport au MBE.
- La prise totale chez les bétons est plus rapide par rapport au MBE
- L'intervalle entre le temps début et la fin de prise est plus grand chez les bétons par rapport à leurs mortiers équivalents.
- Le temps de prise augmente avec le rapport E/C pour les deux types de bétons
- Le temps de prise augmente avec le rapport E/C pour les deux types de mortiers
- L'intervalle entre le début. el la fin de prise augmente avec le rapport E/C dans le cas des formulations autoplaçantes (bétons et mortiers).

- L'intervalle entre le début. et. la fin de prise diminue avec le rapport. E/C clans le cas des formulations ordinaires {bétons et mortier).

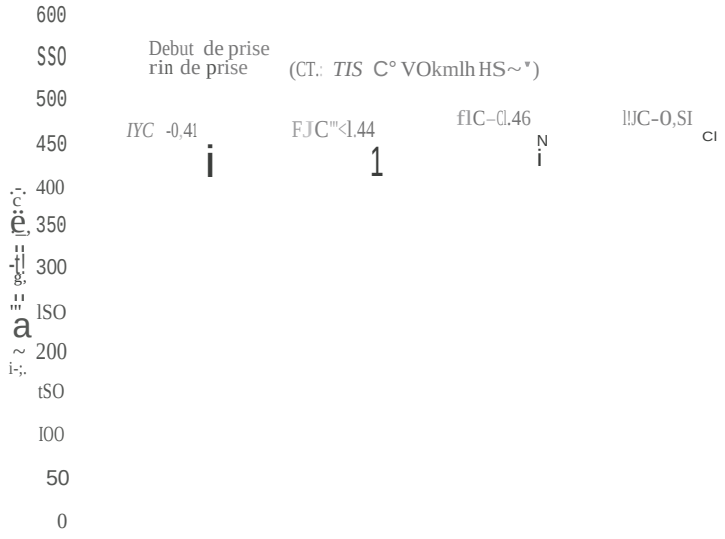


Figure 60- Temps de prise des BAP et BO dans les conditions de laboratoire

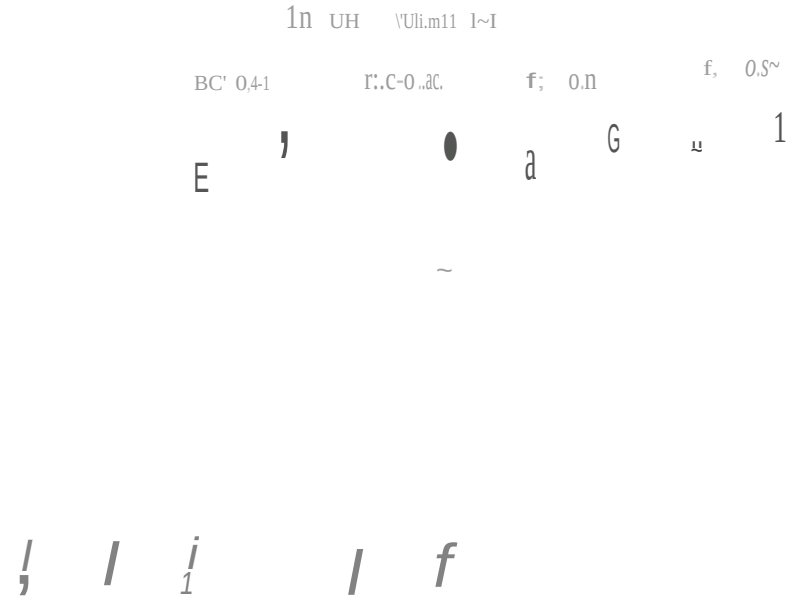


Figure 61- Temps de prise des mBAPe et mBOe dans les conditions de laboratoire

La différence entre les bétons et leurs mortiers d'une part et les formulations autoplaçantes et ordinaires d'autre part en terme d'hydral.atlon peut. être attribuée aux éléments suivants:

- La quantité d'eau de gâchage
- L'espace entre les particules dans un mélange
- Le dosage en adjuvant
- La granularîté
- La présence des fines

La quantité de la pate et du ciment est plus importante chez les mortiers de bétons équivalents par rapport à leurs bétons. Cela explique l'intervalle du début et de fin de prise plus étendu par rapport à celui du mortier.

L'espace entre les grains est la raison pour laquelle le début de prise est plus rapide dans le cas du béton. Autrement dit, l'eau interstitielle dans le cas du béton a plus de liberté à trouver les éléments nécessaires pour former les hydrates par rapport au cas du mortier. Dans le cas de ce dernier, cette disponibilité d'eau libre est limitée due à sa granularité très fine.

L'augmentation du temps avec le rapport E/C pour les bétons et pour leurs mortiers équivalents ne peut se justifier que par la quantité d'eau initiale utilisée dans le gachage qui joue aussi un rôle dans la retardation de la prise, plus le rapport E/C est grand, plus le début de prise est retardé. Un béton avec un faible rapport E/C a une cinétique d'hydrataüon plus rapide du fait que les hydrates peuvent se former dans un mélange où il y'a moins d'eau et permet au mélange de se transformer en matière sol ide dans une courte durée. Par contre dans les mélanges avec des rapports E/C les plus élevés, la quantité d'eau initiale très élevée ne permet pas aux hydrates de dominer dans un volume qui reste encore fluide. Les travaux de Krum1[3] et Bentz[176] ont montré que dans un mélange de pâte avec faible rapport E/C, l'espace entre les particules du ciment est petit, et par conséquent la connexion entre les hydrates sera plus facile, permettant la transformation rapide au mélange solide.

L'augmentation de l'intervalle entre le début. et la fin de prise avec l'augmentation du rapport. E/C dans le cas des formulations autoplaçantes est due à la diminution de la quantité de super plastifiant avec l'augmentation du rapport E/C. Le superplastifiant utilisé dans notre cas a un rôle d'accélérateur de prise, donc plus sa quantité diminue plus le temps de prise augmente.

Pierre Mounanga[89] affirme que l'utilisation des adjuvants dans des BAP conduit à une modification de la chimie de la prise, ce qui explique la différence entre les formulations ordinaires et autoplaçantes.

4.8.2 Temps de prise dans le cas de température élevée

Les figures 62 et 63 représentent respectivement le temps de prise initiale et finale des bétons autoplaçants, bétons ordinaires et leurs MBE dans les conditions de (50 C ° Temp+ 0krn/n vent + 50% Hr).

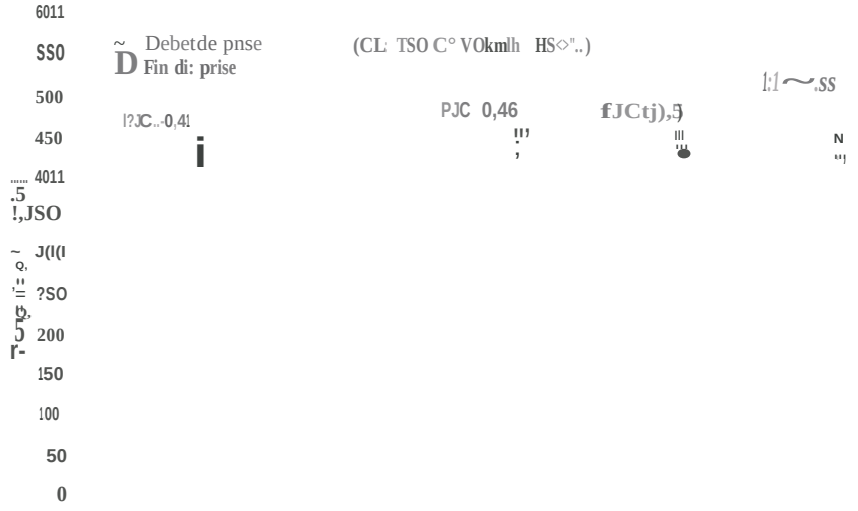


Figure 62- Temps de prise des BAP et BO dans les conditions de 50 C ° Temp

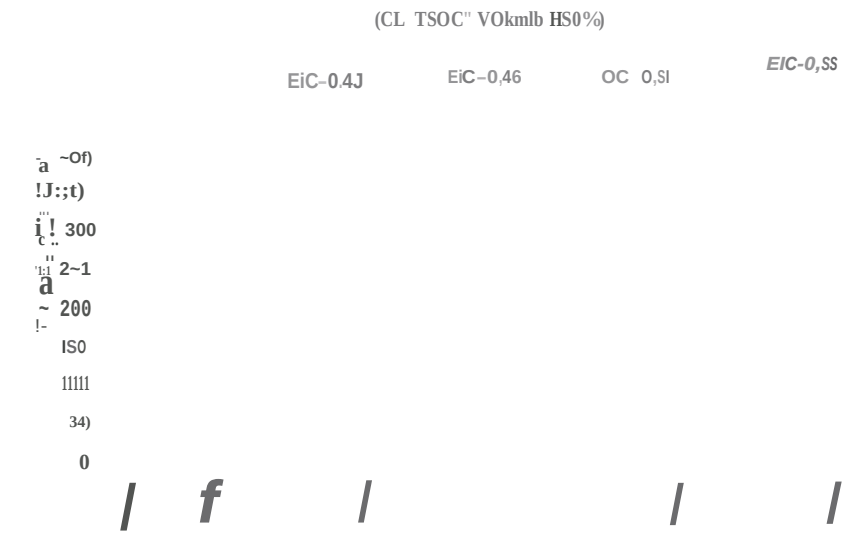


Figure 63- Temps de prise des mBAPe et mBOe dans les conditions de 50 C ° Temp

4.8.3 Temps de prise dans le cas de température élevée et ventilation

Les figures 64 et 65 représentent respectivement le temps de prise initiale et finale des bétons

Dans ces conditions, la plupart des remarques observéesdans les conditions de laboratoire ont été également remarquées en comparant le temps de prise des bétons avec leurs mortiers équivalents.

En comparant les temps de prise dans les deux cas climatiques, on voit clairement que la température est un accélérateur de prise. L'effet de la température sur la prise du béton est confirmée dans la littérature[177], il est connu que la prise ou le durcissement sera plus rapide si des bétons avec des grandes températures sont utilisés sur chantier. Par contre cette température peut avoir un effet néfaste sur la résistance et les propriétés du béton ou mortier à long terme, ainsi que la diminution de la maniabilité et certaines propriétés rhéologiques.

Dans notre étude cette accélération de prise varie selon le :

- Le rapport E/C
- Le type de formulation
- La nature du matériau (béton ou mortier).

En comparant les bétons pour le même rapport E/C dans les deux conditions climatiques de température élevée et de CL, la plus grande accélération de début de prise est enregistrée par le BAP1 qui est égale à 20 minutes tandis que la plus faible accélération du temps prise est égale à 12 minutes enregistrée par le BAPS.

La plus grande accélération de fin de prise est enregistrée par le BAP2 qui est égale à 19 minutes tandis que la plus faible accélération du temps de prise est égale à 3 minutes enregistrées par le 804, à l'exception du BOS qui a marqué un retardement de prise de 2 minutes.

En comparant les mortiers pour le même rapport E/C dans les deux conditions climatiques de température élevée et de CL, la plus grande accélération de début de prise est enregistrée par le BAPS qui est égale à 30 minutes tandis que la plus faible accélération du temps de début de prise est égale à 9 minutes enregistrée par le BAP4.

La plus grande accélération de fin de prise est enregistrée par le BOS qui est égale à 23 minutes tandis que la plus Faible accélération du temps prise est égale à 1 minute enregistrée par le BAP1. A l'exception du BAP2, BAP4, 802 et 803 qui ont marqué un retardement de prise égal respectivement à 6, 3, 2 et S minutes.

4.8.3 Temps de prise dans le cas de température élevée et ventilation

Les figures 64 et 65 représentent respectivement le temps de prise initiale et finale des bétons autoplaçants, bétons ordinaires et leurs mortiers équivalents dans les conditions de 50 C ° Temp+ 15 km/h Vent.

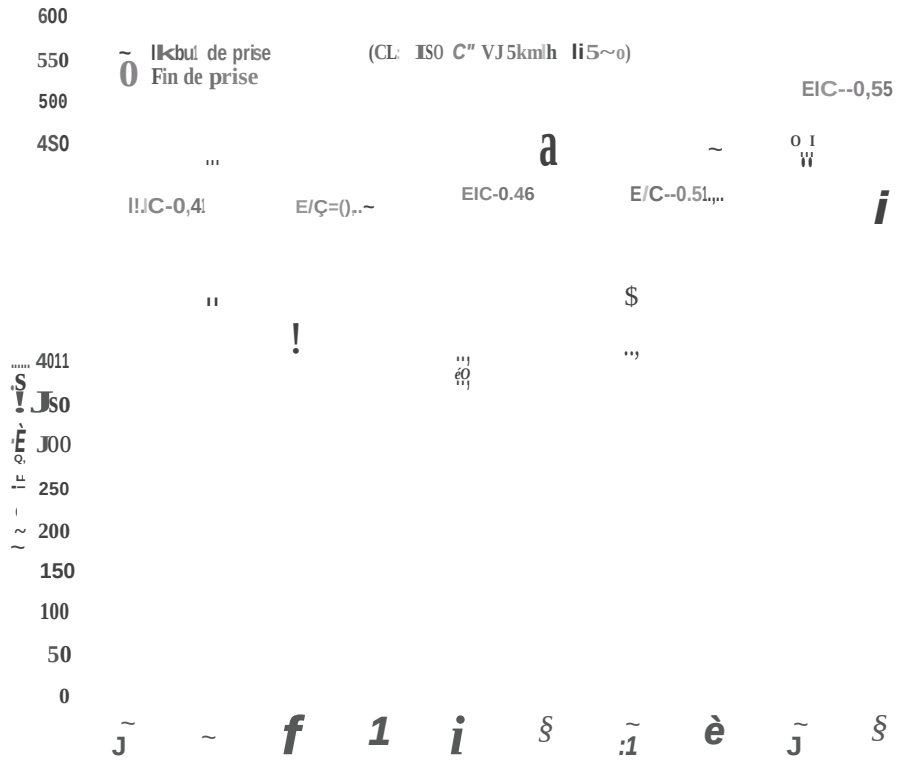


Figure 64- Temps de prise des BAP et BO aux conditions de 50 C ° Temp+ 15 km/h Vent

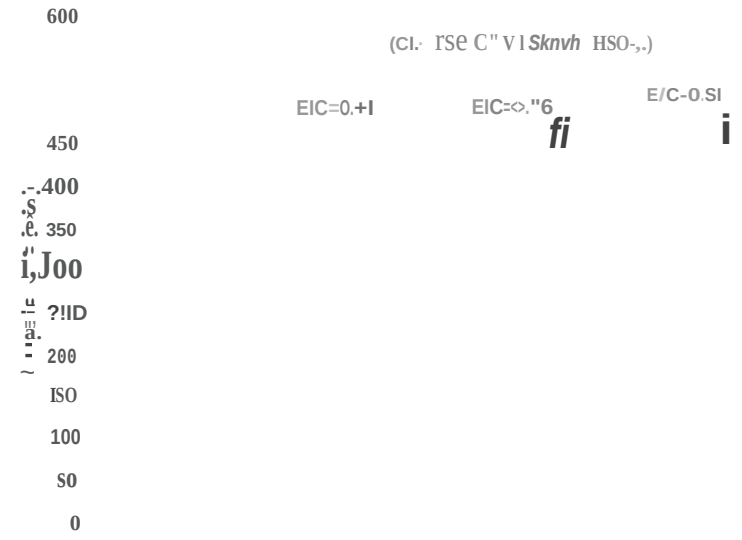


Figure 65- Temps de prise des mBAPe et mBOe aux conditions de 50 C° T + 15 km/h V

4.8.3 Temps de prise dans le cas de température élevée et ventilation

Les figures 64 et 65 représentent respectivement le temps de prise initiale et finale des bétons

On remarque clairement l'effet de la ventilation d'eau sur le temps de prise en passant du climat aux conditions de 50 C ° Temp+ 0 km/h Vent à 50 C ° Temp+ 15 km/h Vent.

On comparant les deux figures 64 et 65 avec les figures 62 et 63, on remarque que :

- Je début de prise est accéléré pour la plus part des formulations
- le temps de la fin de prise est retardé pour la plus part des formulations.
- l'intervalle entre le début et. la fin de prise augmente.

L'accélération du temps de début de prise est due à la température qui reste toujours élevée dans ces conditions tandis que le taux de séchage très élevé (égal à 2.23 kg/m2/h) ce qui conduit à un manque d'humidité et. de quantités d'eau nécessaire pour la formation des hydrates. Ce qui rend sa formation plus lente. Donc· un Caux d'évaporation élevée ou excessif peut conduire à la dessiccation et par la suite, l'intervalle entre le début et la fin de prise augmente.

En comparant les formulations ordinaires avec celle autoplaçantes pour le même rapport E/C, les bétons autoplaçants commencent à durcir avant les bétons ordinaires, cela est dü à plusieurs facteurs dont la différence en constituants et la quantité de pâte de ciment qui est plus élevée dans les formulations autoplaçantes. Le temps de prise est significativement affecté par la contenance en matière fine dont l'utilisatlon des fillers calcaires diminue le temps de prise[178]. Le calcaire remplit les pores entre les particules dues à la formation de carbo-aluminates de ciment, ce qui peut accélérer la prise de la pâte du ciment.

Bien que le superplastifiant[179] retarde la prise du béton dans les conditions de laboratoire ou dans des température modérées, à cause de la charge répulsive qui libère plus de quantité d'eau, Yamada[180] affirme que le temps de prise est plus court dans le cas où le béton adjuvanté est exposé à une grande chaleur, ce qui correspond à notre cas. Plus sa quantité augmente, plus le temps de prise initial diminue particulièrement dans le cas des formulations autoplaçantes. L'influence du filler calcaire avec l'effet accélérateur de prise du superplastifiant sont dominants. Dans les conditions sévère le temps de prise initiale est donc accéléré tandis que le temps de prise finale est retardé et par conséquent l'intervalle et le temps de durcissement est plus long.

4.9 Influence du temps de prise sur la fissuration et le ressuage

En partant du principe que les fissures apparaissent dès le départ de l'eau de ressuage par évaporation, il est clair que dans les cas d'évaporation excessive, l'existence de cette pellicule d'eau ne durera pas longtemps et le séchageaccélère son évaporation dès les premières heures ou minutes. La durée d'existence de cette couche d'eau est liée aux taux et quantité de ressuage. Ce dernier avec le temps de prise finale sont deux facteurs peuvent déterminer l'instant de la diminution de fissuration.

Dans la plupart des cas, le temps de prise initiale a peu d'influence sur la fissuration et à cet instant (temps de prise initiale) le béton ou le mortier développe une certaine résistance à la traction mais elle n'est pas suffisante pour résister aux déformations dans ces conditions climatîques, avec le temps, cette traction augmente, ce qui conduit à la diminution du taux de fissuration en fonction du temps. Le taux de fissuration est très élevé en début de prise tandis qu'il diminue on s'approchant du temps de fin de prise. Les résultats des courbes de la propagation de fissuration en fonction du temps et ceux des temps de prise montrent la relation étroite entre les deux, particulièrement la prise Finale du matériau.

Dans le climat moins sévère (30C° Ternp. 0 km/h Vent, 50 % Hr). le temps d'apparition des fissurations des BAP est proche du début de prise initiale tandis que dans les climats sévères (autres cas climatiques) les fissures apparaissent bien avant le début de prise.

Pour le béton ordinaire l'apparition des fissures est toujours très proche du temps de début de prise quelques soit les conditions climatiques.

Le temps de prise initiale peut être un indice de la diminution du taux de ressuage, quelques minutes après la prise initiale, ce dernier s'arrête en raison de l'hydratation du ciment. Dans nos essais, la plupart des temps de prise initiaux coïncident plus au moins avec le moment de la diminution de ressuage.Ces résultats concordent avec ceux déduits par Combrinck[181].

Quand la prise est accélérée, la propagation des fissures en fonction du temps tend vers zéro plus rapidement. Dans certains cas, la prise initiale des matériaux permet de diminuer le taux de fissuration. Cela est le cas pour certains mélanges qui développent une résistance à la traction au jeune âge suffisante pour résister aux déformation dues au séchage modéré, cependant, dans les climats sévèrescette idée n'est pas valide.

4.10 Conclusion

Les bétons coulés sous les conditions climatiques chaudes rencontrent de nombreux problèmes qui peuvent affecter négativement ses propriétés à long terme et plus particulièrement les bétons spéciaux, comme les bétons autoplaçants. Dans ce chapitre nous avons étudié l'influence de ces différentes conditions climatiques sur la fissuration des BAP, comparées avec les bétons ordinaires.

L'influence négative de la température élevée, l'humidité et le vent sur le béton a été clairement observé dans cette expérimentation.

La propagation des fissurations en fonction du temps est plus importante pour les BAP à cause de leur ressuagetrès faible.

La largeur des fissures des BAP est plus faible par rapport au béton classique, cela est principalement dû à sa formulation plus fluide et ses caractéristiques rhéologiques complètement différentes par rapport au béton ordinaire.

Un taux de ressuagetrès élevé est la seule protection naturelle du béton dans ces conditions

Une étude consacréeà ce phénomène nous a permis de comparer et de comprendre la différence entre les deux types de béton en termes de ressuage. La principale raison de cette différence est la contenance en matière fines et la différence en microstructure.

Une comparaison avec leurs mortiers équivalents nous a aussi permis de confirmer nos hypothèses et de bien comprendre l'influence du diamètre, la. forme des canaux capillaires et la quantité d'eau initiale sur le taux et la capacité du ressuage.

Par la suite, l'étude de fissuration dans les différentes conditions climatiques a permis de montrer l'importance de ce phénomène (ressuage) dans la protection de la surface du béton dans les premières heures. La période la plus critique est celle comprise entre le coulage du béton et sa fin de prise. Pour cela, une étude du temps de prise était nécessairede mener afin de compléter notre compréhension de la manifestation de la fissuration dans les climats chauds.

Toutefois, dans des conditions météorologiques indésirables, le ressuage excessif ne peut étre une solution ultime en particulier pour des projets en béton qui exigent une résistance à la compression très élevée.

Chapitre 4 Etude comparative de ressuage, Fissuration et prise des bétons et des MBE

Une partie de l'étude du temps de prise des bétons et de leurs mortiers équivalents dans les conditions de laboratoire et les conditions sévères nous a permis de conclure :

La propagation des fissures diminue lorsque la fin de prise est accélérée. La Fin de prise permet de développer la résistance à la traction qui stoppe la propagation de ces Fissures.

119
Thèse de doctorat - 1. YAKOUBI

Chapitre 5

Effet d'un surplus en eau et en super-plastifiant sur la fissuration des BAP

Thèse de doctorat - I. YAKOUBI
Thèse de doctorat - I. YAKOUBI

Chapitre 5 Effet d'un surplus en eau et. en superplastifiant sur la fissuration des BAP

5.1 Introduction

Ce chapitre contient les résultats de l'effet d'un supplément en eau ou en superplastifiant sur la fissuration due au retrait plastique des BAP.

Les cinq précédentes formulations autoplaçantes ont été préparées avec des pourcentages rajoutés ou réduits d'eau et du superplastifiant. Ces suppléments ont été ajoutés on assurant une seule condition qui est l'autoplaçabilité (mortiers ou bétons autoplaçant limite).

Les mêmes tests de fîssuration ont été répétés dans cette étude et les mêmes dispositifs des mortiers et des bétons ont été utilisés.

Les quantités d'eau et de superplastifiant rajouté ont été fournies au tableau 9 du troisième chapitre.

La fissuration a été suivie dans les conditions climatiques suivantes :

La propagation des longueurs des fissures des mortiers équivalents en fonction du temps dans les conditions de :

- C L (25C° Tomp. Ü km/h Vent, SQ % Hr)
- C T E (30C° T.mp. 0 km/h V.: SO % Hr) et (SOC°Temp. 0 km/h V.: SO % Hr)
- C T E+V (30C° T.mp. 1S km/h V.: SO % Hr) et (SOC° T.mp. 1S km/h V.: 50 % Hr)

La largeur des fissures du béton autoplaçants et bétons ordinaires dans les conditions de :

- C L (2SC° Temp, Ü km/h Vent, SO % Hr)
- C T E (30C° Tcmp. 0 km/h V.; 50 % Hr) et (SOC°T.mp, 0 km/h Vont. SO % Hr)
- C T E+V (30C° r,; 1S km/h V.: SO % Hr) et (SOC° T.'"P' 1S km/h V.; SO % Hr)

Un récapitulatif qui résume les différents résultats de fissuration des mortiers et béton limites avec le pourcentage de réduction de fissuration a été donné, et les résultats ont été discutés dans la partie qui suit.

52 Effet de leau et du superplastifiant sur la longueur de fissuration des BAP

521 Effet d'un supplément en eau sur la longueur de fissuration

5.2.1.1 Cas de température de 30C₀

La Figure 66 représente les courbes des longueurs des fissures en fonction du temps observé sur des mortiers autoplaçants avec ou sans quantité supplémentaire d'eau dans des conditions de 30 C° Temp, Okm/h du vent et 50 % d'humidité Pour les mortiers formulés sans quantités d'eau supplémentaire, l'apparition des fissures a été observée dès la première heure tandis que pour les mortiers autoplaçants formulés avec une quantité d'eau supplémentaire, les fissures n'apparaissent qu'à partir de la 3iéme heure. Le supplément d'eau diminue relativement la longueur de fissuration (réduction maximale de la longueur de fissuration égale à 96% enregistrée entre mBAPe5-E et mBAPe5+ E pour une quantité d'eau supplémentaire de 8.5%). (Réduction minimale de la longueur de fissuration égale à 89% enregistrée entre mBAPe1-E et mBAPe1 +E pour une quantité d'eau supplémentaire de 12.69%).

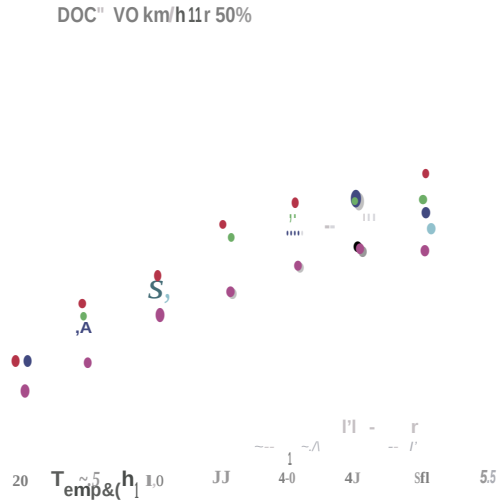


Figure 66- Effet d'un supplément. d'eau sur la. longueur de fissure de mBAPe en 30 C °

5.2. 12 Cas de température 30C₀ Temp + 15 km/h Vent

La figure 67 montre les courbes des longueurs des fissures observées sur des mortiers autoplaçants limites avec ou sans quantité supplémentaire d'eau dans des conditions de 30C₀

Temp +15 km/h Vent. Les fissures dans le cas des mélanges sans aucune quantité d'eau supplémentaire apparaissent avant la première heure après le coulage et cela pour les 5 mortiers autoplaçants, tandis qu'avec le supplément d'eau cette apparition est retardée d'une heure pour le mBAPe1 jusqu'à 3h pour le mBAPe5. En comparant les mortiers autoplaçants du même rapport E/C, sans quantité et avec quantité d'eau supplémentaire, ce surplus en eau diminue relativement la longueur de la fissuration (réduction maximale de la longueur de fissuration égale à 91% enregistrée entre mBAPe5-E et mBAPe5+E; Réduction minimale de la longueur de fissuration égale à 64% enregistrée entre mBAPe1-E et mBAPe1 +E). On comparant les dix formulations sans et avec supplément d'eau la plus longue des fissures est enregistrée par le mBAPe1-E égale à 90 cm. La plus courte des fissures dans ces conditions est enregistrée par le mBAPe5+E qui est égale à 6cm.

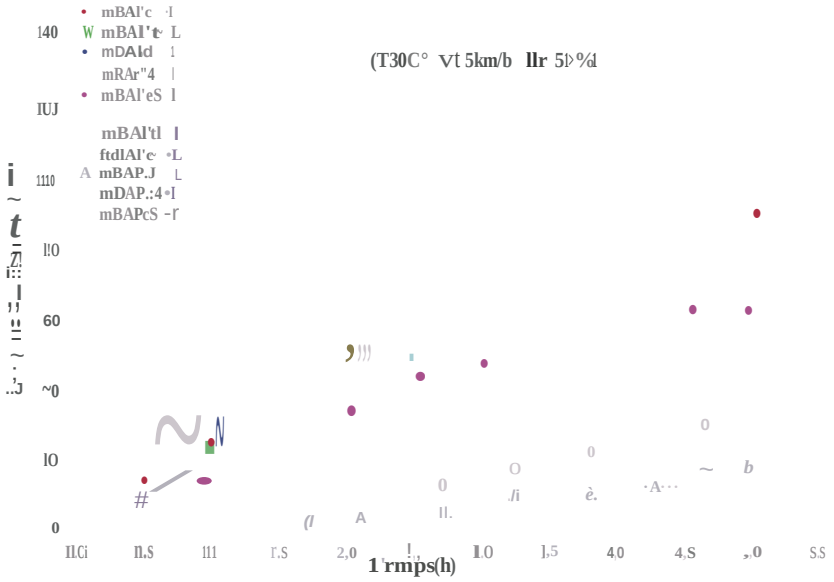


Figure 67- Effet du supplément. d'eau sur la longueur de fissure de mBAPe en (30 C ° Temp+ 15 km/h Vent)

52. 1.3 Cas de température de SOC₀

La figure 68 montre la longueur des fissures observées sur des mortiers autoplaçants limites de différents rapports E/C avec ou sans quantité d'eau supplémentaire dans les conditions de 50C₀ Temp +0 km/h Vent+50 % Hr. Dans ces conditions climatiques cette quantité d'eau supplémentaire a réduit considérablement la longueur des fissurations des 5mortiers autoplaçants (Réduction de la longueur de fissuration est égale respectivement à 50%, 55%,

61 %, 69%, 94% enregistrée respectivement entre mBAPel-E et mBAPel + E, mBAPe2-E et mBAPe2+ E, mBAPe3-E et mBAPe3+E, mBAPe4-E et mBAPe4+ E, mBAPe5-E et mBAPe5+ E).

La différence du temps d'apparition des fissures dans ces conditions entre les cieux groupes de mortiers autoplaçants (avec et sans quantité d'eau) est égale en moyenne à une demi-heure. La plus courte des fissures dans ces conditions est égale à 13cm enregistrée par le mBAPe5+ E, tandis que la plus longue des fissures est égale à 91cm enregistrée par le mBAPel-E.

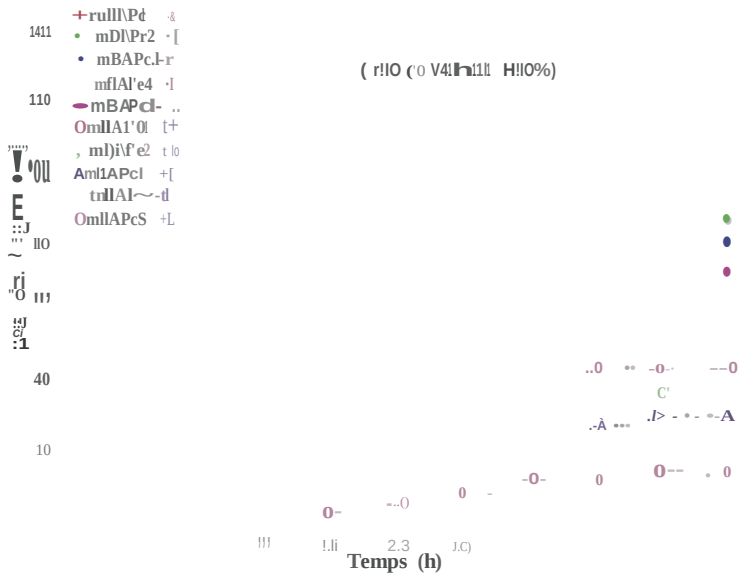


Figure 68- Effet du supplément d'eau sur la longueur de fissure de mBAPe en (50 C ° Temp)

5.2.14 Cas de température élevée 50C° Temp + 15km/h Vent

La figure 69 montre la longueur des fissures observées sur des mortiers autoplaçants limites avec ou sans quantité d'eau supplémentaire dans des conditions de 50 C ° Temp+ 15 km/h Vent+ 50% Hr. Dans ces conditions l'apparition des fissures est très rapide pour les deux groupes de mortiers (en début de test pour les mortiers sans supplément et après une demi-heure pour les mortiers avec supplément d'eau). On remarque aussi que la cinétique de la propagation des fissures en fonction du temps est très grande chez les mortiers sans quantité d'eau tandis qu'elle est proportionnellement faible pour les mortiers avec un surplus en eau, surtout dans les premières heures, mais cette cinétique s'accélère une heure après le début du test. La réduction maximale de la longueur de fissuration dans ce climat est égale à 33% enregistrée entre mBAPe5-E et mBAPe5+E), tandis que la réduction minimale est égale à 17%

 Effet d'un surplus en eau et en superpla.stifiant sur la fissuration des BAP

enregistrée entre mBAPe2-E et mBAPe2+E). La plus courte des fissures dans ces conditions est égale à 82cm enregistrée par le mBAPe5+E, tandis que la plus longue des fissures est égale à 142 cm enregistrée par le mBAPe1-E.

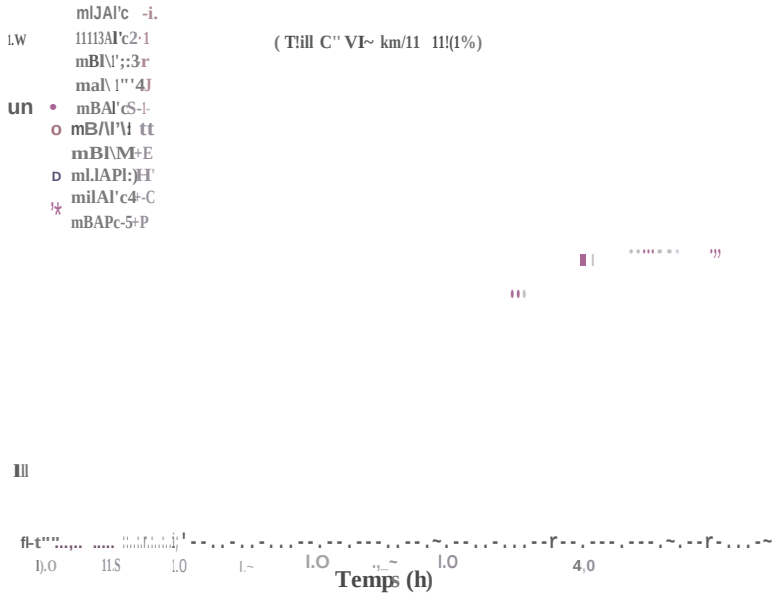


Figure 69- Effet d'un supplément d'eau sur la longueur de fissuration de mBAPe en (50 C ° r.,» 15 km/h V.nr)

5.22 Effet **d'un supplément en superplastifiant sur** la longueur de fissuration

5.2.2.1 Cas de température 30C° Temp

La figure 70 montre l'évolution des longueurs des fissures observées sur des mortiers autoplaçants limites formulés avec ou sans quantités supplémentaires de superplastifiant déduits à partir des mortiers autoplaçants équivalents.

Ces mortiers coulés dans le dispositif de retrait empêché sont exposés aux conditions de 30 C° Temp+ Okm/h vent + 50% Hr. Par rapport au cas du supplément en eau dans les mêmes conditions de séchage, le superplastifiant diminue légèrement la longueur de fissuration

Chapitre 5 Effet d'un surplus en eau et en superplastifiant sur la fissuration des BAP

(La réduction maximale de la longueur de fissuration ne dépasse pas une valeur de 38% enregistrée entre mBAPe5-Sp et mBAPe5+SP). Cette réduction est trois fois moins importante que celle par rapport au cas d'un supplément en eau.

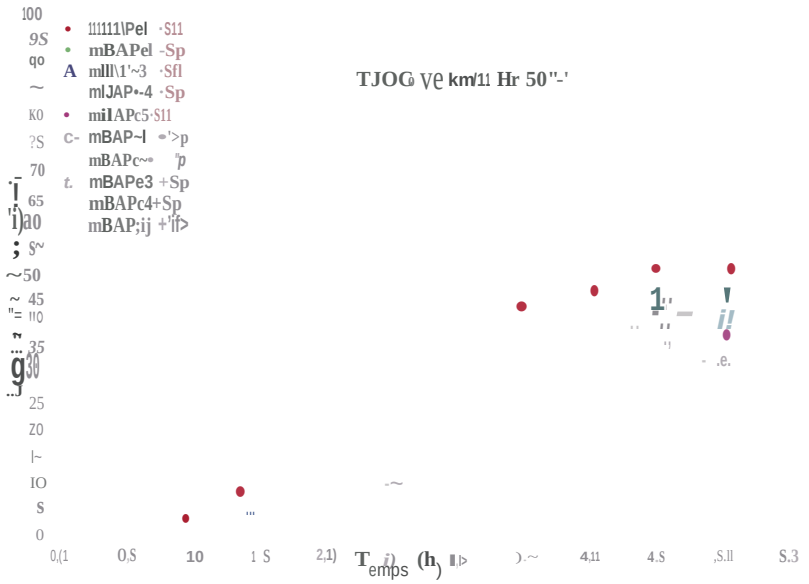


Figure 70–Effet d'un surplus en superplastifiant sur la longueur de fissure de mBAPe en 30 C °

5.2.2.2 Cas de température élevée 30C° Temp + 15km/h Vent

La figure 71 montre les courbes des longueurs des fissures observées sur des mortiers autoplaçants limites avec ou sans quantité supplémentaire de superplastifiant dans des conditions de 30C° Temp +15 km/h Vent +50% Hr. L'apparition des fissures est beaucoup plus rapide par rapport au cas de la température sans ventilation, et cela pour les deux groupes de mortiers avec ou sans surplus en superplastifiant. Des pourcentages supplémentaires de superplastifiant respectivement égaux à 6.44%, 5.2%, 7.76%, 6.24%, et 5.58% rajoutés respectivement au mBAPe1, mBAPe2, mBAPe3, mBAPe4, mBAPe5 réduisent la longueur des fissures respectivement de 18%, 21 %, 24%, 30%, 23%. Cette réduction est beaucoup plus faible par rapport à celle dans le cas d'un supplément en eau.

La plus longue des fissures dans ce cas est égale à 92cm enregistrée par mBAPe1-sp, tandis que la longueur la plus courte est égale à 45cm enregistrée par mBAPe5+sp. D'après les courbes, on remarque également que la réduction des fissures augmente avec le temps, résultats observés pour les 5 mortiers autoplaçants.

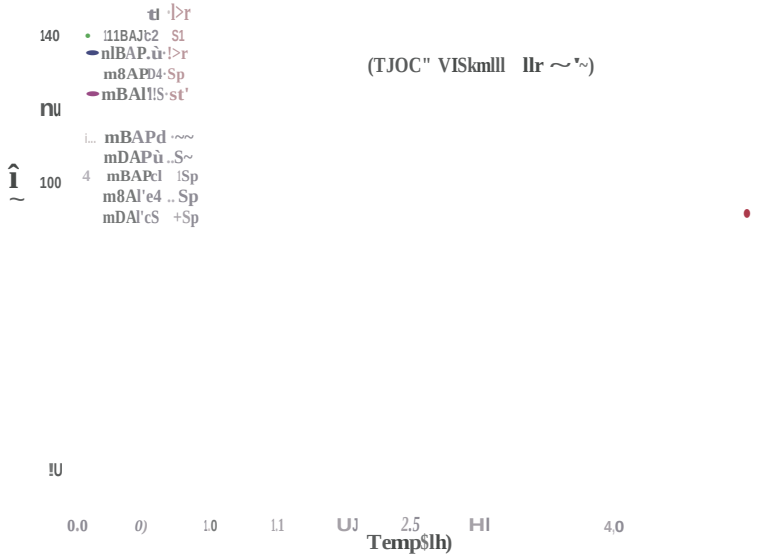


Figure 71- Effet d'un surplus en superplastifiant sur la longueur de fissure de mBAPe en (30 C ° Temp+ 15 km/h Vent)

5.2.2.3 Cas de température de 50C₀ Temp

La figure 72 montre la longueur des fissures observées sur les mortiers autoplaçants limites avec ou sans quantité supplémentaires de superplastifiant dans des conditions de 50C₀ Temp +0 km/h Vent +50% Hr. Semblablement aux climats précédents, le supplément en super plastifiant diminue également la longueur de fissuration par une légère diminution en pourcentage par rapport au cas précèdent. (Réduction maximale de la longueur de fissuration égale à 20% enregistrée entre mBAPe4-Sp et mBAPe4+Sp et entre mBAPe5-Sp et mBAPe5+Sp). La figure montre que l'apparition des fissures et marquée dès le début du test pour les mortiers autoplaçants sans surplus en superperplastifiant.

Pour les mortiers avec la quantité supplémentaire de superplastifiant, l'apparition des fissures varie entre le début du test pour le (mBAPe1 +Sp, mBAPe2+Sp, mBAPe3+Sp), une demi-heure après pour (mBAPe4+Sp) et une heure pour (mBAPe5+Sp).

Dans ces conditions, le séchage est égal à 0.5 kg/m2/h, parmi les dix mortiers autoplaçants mise en test, la plus longue des fissures est égale à 93 cm enregistrée par mBAPe1-Sp, tandis que la plus courte est égale à 47 cm enregistrée par mBAPe5-Sp.

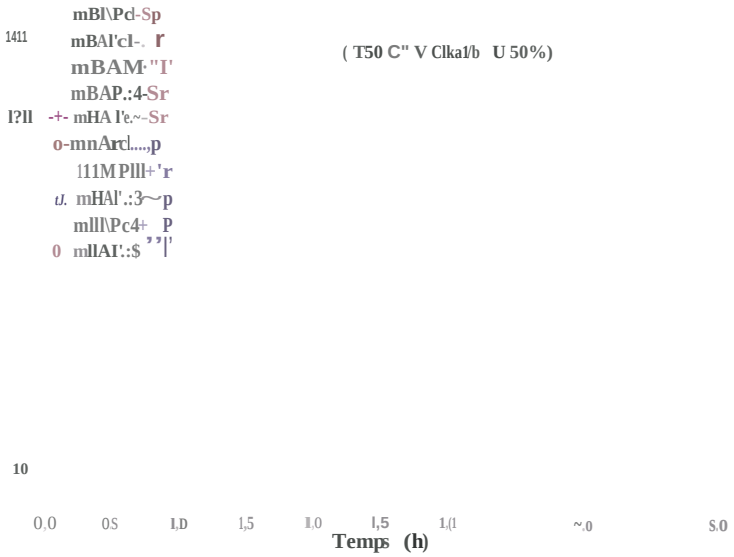


Figure 72- Effet du surplus en superplastifiant sur la longueur de fissure de mBAPe en 50 C °

5.2.2.4 Cas de température élevée SOC₀ Temp + 15km/h Vent

La figure 73 montre les courbes des longueurs des fissures observées sur des mortiers autoplaçants limites avec ou sans quantité supplémentaire de superplastifiant dans les conditions de 50 C ° Temp+ 15 km/h Vent. Semblablement au cas du séchage sans ventilation, le supplément en superplastifiant diminue légèrement la longueur de fissuration (réduction maximale de la longueur de fissuration égale à 11% enregistrée entre mBAPe2-Sp et mBAPe2+Sp), tandis que la plus petite réduction en termes de fissuration est égale à 3% enregistrée entre mBAPe5-Sp et mBAPe5+Sp).

Dans ces conditions de séchage, l'évaporation est égale à 2.23 kg/m2/h, la différence de longueur de fissuration au fil du temps entre les mortiers avec ou sans quantité supplémentaire de superplastifiant est presque la même jusqu'à la fin du test. La plus longue des fissures est égale à 150 cm enregistrée par mBAPel-Sp, tandis que la plus courte des fissures est égale à 120 cm enregistré par mBAPe5+Sp.

Ces fissures apparaissent de manière précoce dans ce genre de climat, la figure 73 montre que le super plastifiant n'a aucune influence sur le temps d'apparition des fissures quand l'évaporation est très élevée et les mortiers commencent à se fissurer dès son exposition au séchage excessif.

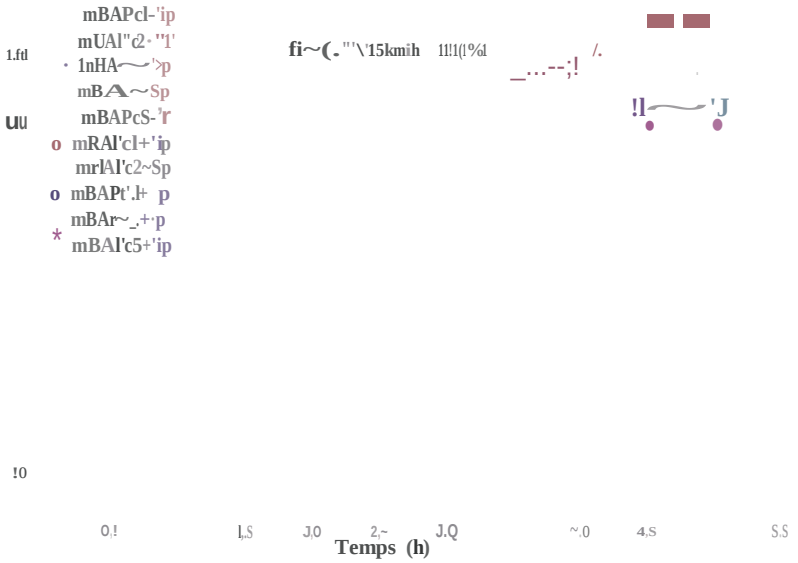


Figure 73- Effet d'un supplément de superplastifiant sur la longueur de fissuration de mBAPe en (50 C ° T.mp+ 15 km/h V.n,)

53 Effet de l'eau et du superplastifiant sur la largeur de fissuration des BAP

5.3.1 Effet d'un supplément en eau sur la largeur de fissuration

5.3. 1. 1 Cas de température de 30C°

La figure 74 montre l'effet d'un excédent en eau sur la largeur des fissures pour les cinq bétons autoplaçant avec et sans quantité supplémentaire en eau dans les conditions climatiques de 30 C ° Temp, 0 km/h vent, 0 Hr%.

La quantité supplémentaire en eau n'a. aucun effet significatif sur la largeur des fissurations des bétons autoplaçants.

Les formulations du BAP1 et BAP4 avec un pourcentage d'eau supplémentaire égale respectivement à 9.23% et 6.66% présentent proportionnellement une faible baisse en largeur des fissures (égales respectivement à 8 % et 6%) tandis qu'une quantité supplémentaire de 8.36% et 6.29% rajoutée respectivement aux mBAPe2 et mBAPe5 augmente la fissuration de 14% à 11 %. Pour le BAP3 une quantité supplémentaire en eau de 7.24% n'a apportée aucun effet à la largeur de fissuration.

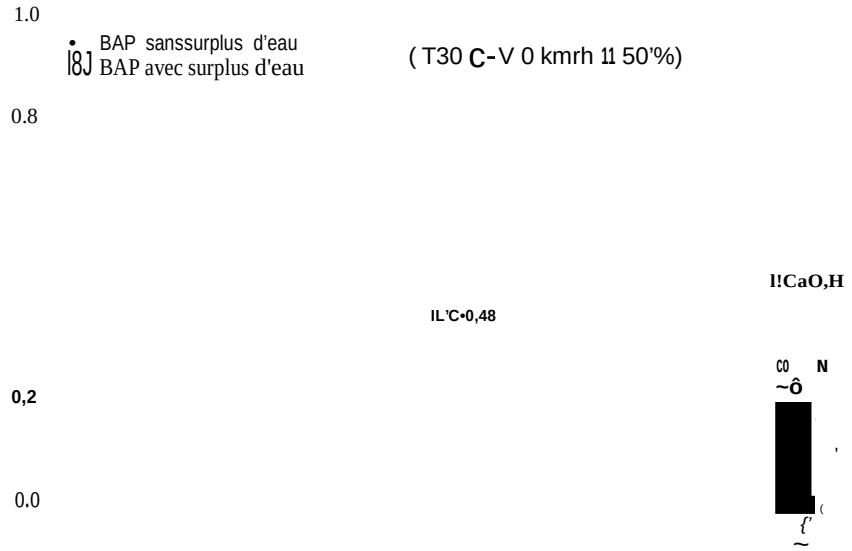


Figure 74- Effet du supplément d'eau sur la largeur de fissure des BAP en (30 C ⁰ Temp)

5.3.1.2 Cas de température 30C₀ Temp + 15km/h Vem

La figure 75 montre l'effet d'un excédent en eau sur la largeur des fissures pour les cinq bétons autoplaçants dans les conditions climatiques de 30 C ⁰ Temp+ 15 km/h Vent +50% Hr.

En comparant le cas de 30C₀ sans ventilation avec ce cas, l'implication clu vent augmente le taux de séchage et augmente la largeur de fissuration, l'ajout d'une quantité supplémentaire en eau n'a aucun effet. significatif sur la largeur des fissurations des bétons autoplaçants dans ces conditions.

Les résultats de fissurations des BAP1 + E et BAP5+ E comparables avec ceux des BAP1-E et BAP5-E présentent proportionnellement une faible baisse en termes de leurs largeurs (respectivement égales à 10 % et 3%).

Pour le BAP4 une quantité supplémentaire en eau égale à 6.66% n'a apporté aucun effet sur la largeur de la fissuration. Dans ces conditions, la plus grande largeur des fissures est égale à 0.35 mm enregistrée par BAP5-E, tandis que la plus petite largeur de fissuration est égale à 0.18 mm enregistrée par BAP1 + E.

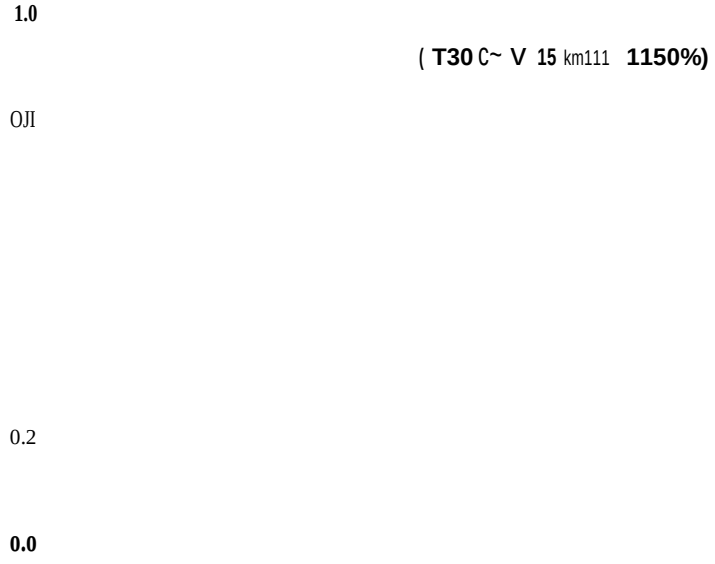


Figure 75- Effet. du supplément d'eau sur la. largeur de fissure des BAP en (30 C ° Temp+ 15 km/h Vent)

5.3. 1.3 Cas de température élevée 50Co Temp

La figure 76 représente l'effet d'un excédent en eau sur la largeur des fissures pour les cinq bétons autoplaçants dans les conditions climatiques de 50 C ° Temp+ 0 km/h vent+ 50% Hr. L'augmentation de température augmente la. largeur de fissuration des mortiers autoplaçants. Cette largeur diffère d'une formulation à une autre. D'autre part, la quantité supplémentaire en eau n'a aucun effet. significatif sur la. largeur de fissuration. Dans ce cas climatique, il n'y a. que le BAP3 qui présente une faible baisse en largeur de fissures (égale à 7 %) : tandis qu'une quantité supplémentaire en eau pour les BAP1, BAP2, BAP5 a augmenté respectivement la largeur des fissures de 6%, 5% et 9%. Pour le BAP4, le surplus en eau n'a apporté aucun effet dans ces conditions. La plus grande des fissures en termes de largeur dans ces conditions est égale à 0,36 mm enregistrée par le BAPS+ E, tandis que ra plus petite des fissures est égale à 0.17 mm enregistrée par BAP1 ·E. On peut remarquer à nouveau que la largeur des fissures augmente avec le rapport E/C, ces résultats confirment ce qui a dajà été trouvé dans le chapitre 4.

Figure 76- Effet. du supplément. <l'eau sur la largeur de fissure des BAP en (50 C ° Temp)

5.3.1.4 Cas de température élevée SOC₀ Temp +15km/h Vent

La figure 77 représente l'effet d'un excédent en eau sur la largeur des fissures pour les cinq bétons autoplaçants dans les conditions climatiques de 50 C ° Temp+ 15 km/h Vent+ 50% Hr. Comme les autres cas climatiques, la quantité supplémentaire en eau n'a. aucun effet. significatif sur la largeur de fissuration, le taux d'évaporation dans ces conditions atteint 2.23 kg/m2/h.

Le BAP5 présente proportionnellement une faible baisse en largeur de fissures (égale à 6 %) tandis qu'une quantité supplémentaire pour les autres formulations a augmenté la largeur de fissuration, à l'exception du B.AP2 qui n'a enregistré aucun effet sur la. largeur de Iissuration.

Dans ces conditions, la plus grande fissure en termes de largeur est égale à 0. 77 mm enregistrée par le BAP5-E tandis que la plus petite des fissures est égale 0.39 mm enregistrée par BAP1-E.

1.0

1,0

Figure 77- Effet du supplément d'eau sur la largeur de fissure des BAP en (50 C ° Temp+ 15 km/h Vent)

5.3.2 Effet Du Superplastifiant

5.3.2. 1 Cas de température 30C° Temp

La figure 78 montre l'effet d'un excédent en superplastifîant sur la largeur des fissures pour les cinq bétons autoplaçant dans les conditions climatiques de 30 C ° Temp + 0 km/h vent+50% Hr. Contrairement au cas d'un supplément. en eau, une quantité supplémentaire en super plastifiant réduit considérablement la largeur de fissuration et cela pour les 5 formu lat ions autoplaçantes.

Le BAP3 présente la plus forte baisse en largeur des fissures (égales respectivement à 92%).

Les BAP1, BAP2 et BAP4 présentent une baisse en largeur de fissures (égales respectivement à 83%, 76%, 78%). Le BAP5 présente la plus faible baisse en largeur de fissures (égale à 75%).

En comparant tous les mortiers avec et sans quantités supplémentaire, la plus large des fissures est égale à 0.16 mm enregistrée par le BAP5-Sp, tandis que la plus petite des fissures est égale à 0.01 enregistrée par BAP3+Sp.

1.0

Figure 78~ Effet d'un surplus en superplastifiant sur la largeur de fissures des SAP en 30 C °

5.3.2.2 Cas de température élevée 30C₀ Ternp + 1 Skm/h Vent

La figure 79 montre l'effet d'un excédent en superplastifiant sur la largeur des fissures pour les cinq bétons autoplaçants dans les conditions climatiques de 30 C ° T emp+ 15 km/h Vent.

La première observation indique que le climat a toujours une influence négative sur la fissuration, plus particulièrement, avec l'implication du vent. qui augmente la largeur des fissures. D'autre part, la quantité supplémentaire en superplastifiant a réduit considérablement la largeur de fissuration.

Le BAP3 présente proportionnellement la plus forte baisse en largeur de fissures {égale à 84%).

Les BAP2, BAP4 et BAP5 présentent une baisse en largeur de fissures (égales respectivement à 60%, 75%, 80%). Le BAP1 présente proportionnellement la plus faible baisse en largeur de fissures (égale à 55%).

En comparant tous les mortiers avec et sans quantités supplémentaires de superplastifiant, la plus large des fissures est égale à 0.3mm enregistrée par BAP5-Sp tandis que la plus petite des fissures est égale à 0.04 enregistrée par BAP3+Sp.

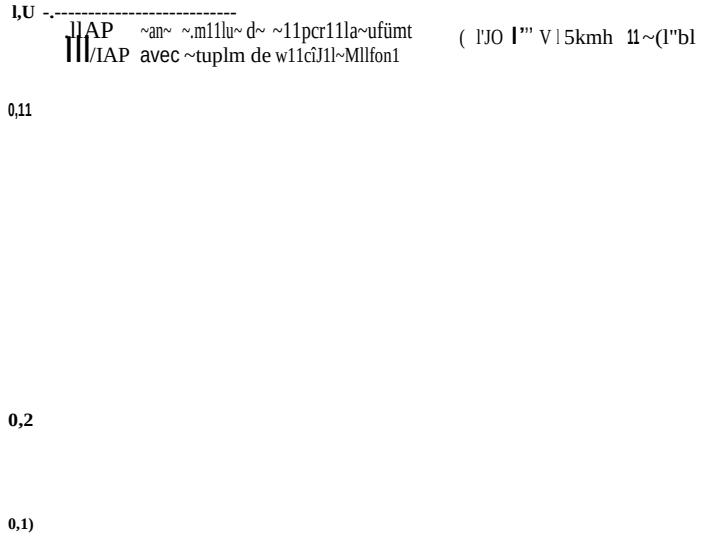


Figure 79- Effet du supplément en superplastifiant sur la largeur de fissures des BAP en (30 C ° T ernp+ 15 km/h Vent)

5.3.2.3 Cas de température élevée SOC₀ Temp

La figure 80 montre l'effet d'un excédent en superplastifiant sur la largeur des fissures pour les cinq bétons autoplaçants dans les conditions climatiques de 50 C ° Temp+ Okm/h vent+50% Hr. Le taux d'évaporation dans ces conditions est égal à 0.5 kg/m2/h. La quantité supplémentaire en superplastifîant a réduit considérablement la largeur de fissuration dans ces conditions, l'augmentation de la température diminue la réduction de la largeur de fissuration.

Le BAP1 présente la plus forte baisse en largeur des fissures (égale à 75%).

Le BAP2, BAP3 et BAP5 présentent une baisse en largeur de fissures (égales respectivement à 66%, 61%, 54%). Le BAP4 présente la plus faible baisse en largeur de fissures (égale à 53%).

En comparant tous tes mortiers avec et sans quantités supplémentaires, la plus large des fissures est égale à 0.31mm enregistrée par BAP5-Sp, tandis que la plus petite des fissures est égale à 0.05 enregistrée par BAP1 +Sp.

U/\ $.t!ï'I ◇Ufjî!U~ de Mi~!itllllfiiafit
DA!' avec nuplus de w~-rp!&mîmni

Figure 80- Effet du supplément en superplastifiant sur la largeur de fissures des BAP en (50 C ° Temp)

5.3.2.4 Cas de température élevée 50C° Temp + 15km/h Vent

La figure 81 montre l'effet d'un excédent en superplastifiant sur la largeur des fissures des deux groupes de mortiers autoplaçants avec et sans quantité supplémentaire en superplastifiants déduits des 5 mortiers autoplaçants {les suppléments en superplastifiants égaux respectivement à 4.76%, 3.9%, 5.81%, 4.68%, 4.4).

L'ensemble des mortiers avec: et sans quantités supplémentaires en superplastifiant sont exposées aux conditions climatiques de 50 C ° Temp+ 15 km/h Vent+ 50%Hr.

Le BAP4 présente la plus grande baisse en largeur des fissures (égale à 33%). Les BAP1, BAP2 et BAP3 présentent une baisse en largeur de fissures (égales respectivement à 29%, 30%, 31%). Le BAP5 présente la plus faible réduction de largeur des fissures égales à 22%. En comparant tous les mortiers avec et sans quantités supplémentaires, la plus large des fissures est égale à 0.75mm enregistrée par BAP5-Sp tandis que la plus petite des fissures est égale à 0.29 enregistrée par BAP1 +Sp.

Figure 81- Effet du supplément en superplastifiant sur la largeur de fissures des BAP en (50 C ° Temp+ 15 km/h Vent)

5.4 Bilan

Le climat sévère accélère l'apparition des fissures. Cela peut s'expliquer par la disparition de l'humidité avec les taux de séchage les plus élevés.

Dans la plupart des cas climatiques, la formulation qui a le moins de quantité d'eau supplémentaire a enregistré la plus grande réduction en longueur de fissuration. Cela peut s'expliquer par le grand rapport E/C (cas du mBAPeS) qui contribue à un ressuage plus élevé. Avec une quantité supplémentaire d'eau, l'humidité au sein du matériau est assurée plus que dans le cas d'une formulation autoplaçante qui ne contient pas cette réserve d'eau. Les mortiers avec les faibles rapports E/C ont enregistré les plus faibles réductions de longueur de fissuration.

La réduction de la longueur de fissuration diminue avec l'augmentation du séchage et du taux d'évaporation cela peut. s'expliquer par la vitesse de la perte de l'eau de surface dans le cas des climats sévères, ce qui accélère la rentrée d'air et le début de la dépression capillaire, phénomène qui conduit à la fissuration du matériau.

La réduction maximale de la longueur de fissuration est passée de 96% pour le climat de (30C°+O km/h+50% Hr) à 33% pour le climat de 50C°+15 km/h+50% Hr. Le taux de

ressuage avec la quantité supplémentaire d'eau dans le premier cas de séchage a contribué à la protection de la surface plus longtemps, contrairement au climat sévère à qui l'eau de ressuage n'a pas résisté longtemps à la surface.

Pour le cas de l'influence de la quantité du superplastifiant sur la longueur de la fissuration, ce surplus a réduit légèrement la longueur des fissures, de 3 fois moins que celle du cas d'un surplus en eau, les résultats montrent une réduction en fissuration très faible entre les mortiers autoplaçants avec et sans surplus en superplastifiant. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que le superplastifiant réduit le taux et. la quantité d'eau ressuée. L'effet du superplastifiant sur le ressuage n'est jusqu'à présent. pas encore confirmé dans la littérature. Bien que certains auteurs disent qu'il augmente légèrement le ressuage[157], d'autres affirment le contraire[148].

La plus grande baisse en longueur de fissuration des mortiers autoplaçants est enregistrée entre le couple de mortiers (avec et sans surplus de super plastifiant) qui a le plus grand rapport E/C. Dans la plupart des cas climatiques, cette réduction maximale est enregistrée par le couple mBAPe4-sp/ mBAPe4-sp ou le couple mBAPeS-sp/ mBAPeS cela estjustifié par leurs ressuage proportionnellement élevé.

Pour le cas de l'influence d'une quantité supplémentaire en superplastifiant sur la largeur des fissures des bétons autoplaçants, ce surplus a permis de diminuer fortement la largeur, cela peut s'expliquer par un autre facteur qui est la rhéologie, le mécanisme de propagation de la fissure en longueur est complètement diffèrent par rapport à sa largeur, parmi les effets du superplastifiant sur la formulation du béton a l'état frais à part la fluidification c'est. sa capacité de minimiser les interactions entre les particules, en induisant des forces répulsives, cette propriété est causé par l'augmentation du potentiel négatif zêta des particules de ciment[157]. ce qui les éloignent les unes des autres. La dispersion qui résulte de l'ajout du superplastifiant réduit la viscosité de la pâte de ciment et. augmente louvrabllitê et la fluidité, une des caractéristiques qui permet au matériau de réduire les ouvertures de fissuration. Cette réduction diminue avec l'augmentation du taux de séchage, cela peut s'expliquer par la perte d'ouvrabilité et. l'influence de la température négative sur la rhéologie.

Dans le cas de l'influence d'une quantité supplémentaire en eau sur la largeur des fissurations, ce surplus n'a apporté aucun effet significatif, les résultats basculent entre des baisses et des augmentations avec des pourcentages très faibles et dans certains cas ce surplus ne change pas la largeur finale de la fissuration. Cela peut s'expliquer par l'absence de l'effet défloculant avec

l'ajout d'eau comme fluidifiant. Donc l'ajout d'une quantité d'eau et de superplastiflant n'ont pas le rnème effet sur la rhéologie d'une pâte de ciment. Autrement dit, les forces répulsives

assurées par le superplastifiant ne sont pas présentes dans le cas d'eau, pour cela la largeur des fissurations donne des résultats insignifiants dans le cas d'un supplément en eau.

139 Thèse de doctorat - 1. YAKOUBI

5.5 Conclusion

Les conditions climatiques chaudes entraînent la perte d'eau par évaporation qui génère clairement une diminution de certaines propriétés telles que la maniabilité, la force et la microstructure interne. A cet effet, plusieurs solutions peuvent être proposées pour contrer ces déséquilibres: ce qui peut être réalisé grâce à des corrections dans la composition du béton ou du mortier.

Les effets de la quantité d'eau supplémentaire sur les propriétés du béton sont bien connus, la ségrégation, la diminution de la force et la porosité élevée sont quelques-unes de ces conséquences. En dépit de ces inconvénients, un excédent d'eau peut encore fournir certains avantages, en particulier dans un climat chaud. Cet excédent pourrait également fournir une réserve disponible pour l'évaporation. Il peut également être utilisé comme surface d'auto-cure pour le béton frais (eau de ressuage).

L'addition d'un supplément de superplastifiant est également bénéfique dans ces conditions car elle limite les interactions entre les grains et diminue donc la largeur des fissures.

140 Thèse de doctorat - I. YAKOUBI

Conclusion générale

Basé sur un travail expérimental, notre étude s'intéresse à l'influence du ressuage sur la fissuration des bétons autoplaçants dans les climats chauds, comparés avec des mélanges ordinaires; des mortiers équivalents également ont été formulés afin de réduire les tests du béton répétés d'une part et pour faciliter la manipulation expérimentale d'autre part, Le but principal était de fournir plus de résultats à la base de données existante sur la fissuration des BAP dans les climats sévèresavec les taux d'évaporaüon très élevés et de trouver une solution vis-à-vis de la formulation. Nous avons montré l'importance d'un supplément. en eau et en superplastifiant sur la fissuration des BAP formulés par temps chaud.

Dans l'étude bibliographique, nous avons synthétisé l'état de l'art du comportement du béton au jeune âge et présenté avec définitions, les différents mécanismes qui précédent et provoquent l'apparition de ces fissures. Ensuite, nous avons montré l'influence des paramètres endogèneset exogènes sur la fissuration et le retrait suivie d'un résumé et une discussion des travaux déjà effectués dans la littérature.

Les cannaissances bibliographiques nous ont permis de nous positionner vis avis de la problématique de notre thème et de mettre en place les dispositifs nécessaires pour la réalisation du protocole expérimental.

Les bétons autoplaçants choisis pour l'étude ont des rapports E/C qui varient de 0,·11 jusqu'au 0,55.

Pour chaque formulation BAP, on a formulé un béton ordinaire identique en rapport E/C, assez fluide en termes de rhéologie afin de garantir l'équivalence pour la. comparaison.

L'étude de fissuration a été réalisée dans une chambre climatique qui a permis de varier ra température de *20* à 50CC', le vent de 0 à 15km/b el de garder l'humidité constante a une valeur de 50 %.

Deux dispositifs de retrait empêché ont été développés pour d'étudier la fissuration clans le climat sévère, un pour les bétons et un autre pour les MBE. Ces derniers sont formulés pour étudier la longueur de fissuration en fonction du temps, tandis que celui du béton a permis d'étudier sa largeur dans les différentes conditions climatiques.

Pour chacune des formulations de bétons et de leurs mortiers équivalents, le phénomène de ressuageest calculé en fonction du temps. Les essais réalisés ont été effectués sur une durée de

6h.

Des essais complémentaires ont été effectués comme le temps de prise qui a été mené sur les pâtes des formulations de béton et des MBE.

Les principales conclusions de cette partie sont :

Le ressuage augmente avec le rapport E / C et les mortiers équivalent ressuent plus que leurs bétons.

Le taux et la capacité de ressuage diminuent avec l'augmentation de la résistance à la compression du béton ou du mortier.

Dans les conditions de laboratoire, le développement de fissurations est très faible pour les deux types de formulation.

Dans ces même conditions, les mBOe se fissurent plus que les mBAPe, cela est dü principalement au tassement et au ressuage, qui avec le retrait endogène représentent les causes principales de fissuration dans ces conditions.

En température élevée avec ou sans ventilation, les essaisde retrait empêché ont montré que les mortiers autoplaçants tendent à se fissurer plus que les mortiers ordinaires, ils ont enregistrées les plus longue fissures. En termes de largeur (test de retrait empêché du béton), les bétons ordinaires ont enregistré les plus larges des fissures pour tous les rapports E / C. Un ressuage relativement élevé diminue la longueur des fissures tandis qu'une grande fluidité diminue sa largeur.

Par temps chaud, le ressuage pourrait assurer l'humidité nécessairepour le durcissement du BAP, il peut être l'auto-cure naturelle de la surface qui minimise la longueur des fissures, en particulier pendant les premières heures. Cependant, le rapport supérieur E/C, peut affecter les propriétés d'adhérence du béton et augmenter la largeur de fissuration. Donc une position médiane peut minimiser la surface fissurée.

La prise initiale et finale est plus rapide chez les bétons par rapport à leurs mortiers équivalents pour les deux types de formulations

La prise finale diminue ou stoppe la propagation des longueurs des fissures pour les deux types de formulations.

Il est apparu intéressant par la suite d'effectuer des corrections dans les compositions des SAP de manière à réduire la sensibilité à la fissuration due au retrait plastique: en particulier par l'addition d'un excédent en eau ou en superplastifiant. La marge d'autoplacabllité a été déduite

pour chaque mélange autoplaçant et pour les deux cas (eau constante / Sp vartable et eau varluble / Sp const.:mte)'

Les principaux résultats indiquent que le superplastifiant réduit considérablement la largeur de fissuration des BAP tandis qu'une quantité supplémentaire en eau réduit sa longueur.

Contributions

Les travaux qui ont été menés se classent dans le cadre des études de retrait plastique et la fissuration des bétons autoplaçants. Dans ce travail nous avons essayé de résoudre cette problématique et de trouver des solutions pour la dégradation de ce type du béton dans le climat sévère. Même si le ressuage peut s'apparenter à un phénomène nuisible au béton, sa manifestation dans des proportions appropriées peut induire à des réductions de risque de fissuration précoce des BAP. Une analyse profonde du ressuage permettrait de trouver de nouvelles formulations des BAP, particulièrement en temps chaud. Il est apparu intéressant par la suite de faire des corrections vis-à-vis de la formulation, comme les suppléments en eau et en superplastifiant qui ont réduit considérablement la portée de cette fissuration. Le travail a complété la base de données déja existante sur la fissuration des BAP.

Perspective

Ce travail sera poursuivi dans les prochains programmes expérimentaux par une étude de ;

- L'influence des différents types de superplastifiants ou de tout autre ajout sur ta fissuration des BAP.
- L'élaboration d'un modèle complet du phénomène de ressuage des BAP en tenant compte tes facteurs endogèneset exogènes.
- L'établlssement d'une relation simple entre le ressuage et le retrait plastique qui pourrait être bénéfique pour cerner le phénomènede fissuration.

Résumé

Le Béton autoplaçant (BAP) est un matériau très fluide capable de se mettre en place sans aucun apport de vibration. Cependant, cet avantage est contrecarré par quelques inconvénients, tels que le retrait plastique, l'une des causes de la fissuration du béton. Par ailleurs le BAP est caractérisé par la présence de volume important des fines. Ces dernières absorbent une grande quantité d'eau et par conséquent, minimisent le ressuage. Or, celui-ci peut être considéré dans les climats chauds comme un avantage précieux, constituant une protection naturel le de la surface du béton.

Ce travail expérimental tente d'apporter une meilleure compréhension à t'apparltion de fissuration due au retrait plastique, et dejustifier sa relation avec le phénomène de ressuage. Pour cela, cinq formules BAP avec différents rapports E / C ont été formulées et comparées avec des bétons ordinaires de même gamme (BO) en termes de retrait empêché (largeur de fissuration). Dans le même contexte, une étude de la propagation de fissuration en fonction du temps (longueur de fissuration) a été menéesur des mortiers équivalents (mBAPe, mBOe). Ces différents mélanges ont été placés dans des différentes conditions environnementales similaires au climat chaud. Les résultats ont montré que le ressuage réduit de manière significative la longueur de fissuration mais il n'a aucun effet sur la largeur. D'autre part, un supplément en eau et en superplastifiant a été proposé comme solution pour éviter ou minimiser la fissuration des BAP. Ainsi, les résultats montrent que l'ajout. de 10% d'eau réduit. la longueur de fissuration et un léger supplément en superplastifiant réduit la largeur.

Abstract

Self-compacting concretes (SCC) is very fluid material can be put in place without vibration. However, this advantage is offset by some drawbacks, such as plastic shrinkage, one of the causesof cracking in concrete. Moreover, the SCC ls characterized by the presenceof a large volume of the fines. The latter absorb a large amount of water and consequently minimize bleeding. This one can be considered in hot climates as a valuable advantage, constituting a naturel protection of the surface of the concrete.

This experimental work endeavors to provide a better understanding of the appearance of plastic shrinkage cracking, and to justify his relation with bleeding phenomena. For that, five SCC with different W/C ratios were formulated and compared to the same range of ordinary concrete (OC) in terms of restrained shrinkage (cracking width). At the same time, a study of cracks' propagation over time (cracking length) was conducted on the equivalent mort ars (mOCe, mSCCe). These mixtures were placed in different environmental conditions similar to the hot climate. The results showed that bleeding significantly reducescracking length and has no effect on cracking width. On the other hand, extra water and superplasticizer was proposed as solution to prevent SCC cracking. Thus, findings show the addition of 10 % of water reduces cracking length and a slight superplasticizer supplement reducesSCC's crack width.

Bibliographie

[I] C. A. Menzel, "Causes and prevention of crack development in plastic concrete," *Proceedings of the Portland Cement Association,* vol. 130, p. 136, 1954.

[2] H. M. Z. Alabidien, J. H. Allred, R. Boudin, C. A. Carbonili, R. J. Ferrell, R. P. Furick, R. D. Gaynor, J. Gendrich, G. R. Burg, and C. K. F. Gibbe, "Hot weather concreting," *AC! Material J,* vol. 88, pp. 417-436, 1991.

[3] A. C. 305, "Hot Weather Concreting," *ACI Materials journal,* vol. 88, 1991.

[4] H. Ait-Aider, N. Hannachi, and M. Mouret, "Importance of W/C ratio on compressive strength of concrete in hot climate conditions," *Building and environment,* vol. 42, pp. 2461-2465, 2007.

[5] A. A. Almusallam, "Effect of environmental conditions on the properties of fresh and hardened concrete," *Cement and Concrete composites,* vol. 23, pp. 353-361, 2001.

[6] Z. Berhane, "Compressive strength of mortar in hot-hum id environment," *Cement and Concrete Research,* vol. 13, pp. 225-232, 1983.

[7] J.-Y. Petit, E. Wirquin, and B. Duthoit, "Influence of temperature on yield value of highly flowable micromortars made with sulfonate-based superplasticizers," *Cement and Concrete Research,* vol. 35, pp. 256-266, 2005.

[8] J.-Y. Petit, E. Wirquin, and K. H. Khayat, "Effect of temperature on the rheology of flowable mortars," *Cement and Concrete composites,* vol. 32, pp. 43-53, 201 O.

[9] M. Nehdi and S. Al-Martini, "Coupled effects of high temperature, prolonged mixing time, and chem ical admixtures on rheology of fresh concrete," *AC! niaterials journal,* vol. 106, pp. 231-240, 2009.

[1 0] J. Golaszewski and J. Szwabowski, "Influence of superplasticizers on rheological behaviour of fresh cernent mortars," *Cement and Concrete Research,* vol. 34, pp. 235-248, 2004.

[11] T. A. Samrnan, W. H. Mirza, and F. F. Wafa, "Plastic shrinkage cracking of normal and high-strength concrete: a comparative study," *Materials Journal,* vol. 93, pp. 36-40, 1996.

[12] A. Almusallam, M. Maslehuddin, M. Abdul-Waris, and M. Khan, "Effect of mix proportions on plastic shrinkage cracking of concrete in hot environments," *Construction and Building Materials,* vol. 12, pp. 353-358, 1998.

[13] P. Turcry, "Retrait et fissuration des bétons autoplaçants: Influence de la formulation," Nantes, 2003.

[14] E.-P. Mbemba-Kiele, "Influence du vent et de la cure sur le comportement des bétons au tres jeune âge," Université de Nantes; Ecole Centrale de Nantes (ECN)(ECN)(ECN)(ECN), 201 O.

[15] P. Fontana, S. Pirskawetz, and P. Lura, "Plastic Shrinkage Cracking Risk of Concrete-Evaluation of Test Methods," in *7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements,* 2012, pp. 591-600.

[I 6] A. Radocea, "A mode! of plastic shrinkage," *Magazine of concrete research,* vol. 46, pp. 125-132, 1994.

[17] P. Lura, B. Pease, G. B. Mazzotta, F. Rajabipour, and J. Weiss, "Influence of shrinkage-reducing admixtures on development of plastic shrlnkage cracks," *ACI materials journal,* vol. 104, p. 187, 2007.

[I 8] D. Ravina and R. Shalon, "Plastic shrinkage cracking," in *Journal Proceedings,* 1968, pp. 282-292.

[19] P. Turcry, A. Loukili, L. Barcelo, and J. M. Casabonne, "Can the maturity concept be used to separate the autogenous shrinkage and thermal déformation of a cement paste at early age?," *Cement and Concrete Research,* vol. 32, pp. 1443-1450, 2002.

[20] F. Wittmann, "On the action of capillary pressure in fresh concrete," *Cement and Concrete Research,* vol. 6, pp. 49-56, 1976.

[21] V. Slowik, M. Schmidt, and R. Fritzsch, "Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry value," *Cement and Concrete Composites,* vol. 30, pp. 557-565, 2008.

[22] V. Morin, F. Cohen-Tenoudji, A. Feylessoufi, and P. Richard, "Evolution of the capillary network in a reactive powder concrete during hydration process," *Cement and Concrete Research,* vol. 32, pp. 1907-1914, 2002.

[23] P. Ghoddousi and A. A. S. Javid, "Effect of reinforcement on plastic shrinkage and settlement of self-consolidating concrete as repair material," *Materials and structures,* vol. 45, pp. 41-52, 2012.

[24} B. Craeye, G. De Schutter, B. Desrnet, J. Vantomme, G. Heirman, L. Vandewalle, 0. Cizer, S. Aggoun, and E. Kadri, "Effect of minerai filier type on autogenous shrinkage of self-compacting concrete," *Cement and Concrete Research,* vol. 40, pp. 908-913, 2010.

[25] W. P. Boshoff and R. Combrinck, "Modelling the severity of plastic shrinkage cracking in concrete," *Cement and Concrete Research,* vol. 48, pp. 34-39, 2013.

[26] A. Sivakumar and M. Santhanam, "A quantitative study on the plastic shrlnkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete," *Cement and Concrete composites,* vol. 29, pp. 575-581, 2007.

[27] M. Nehdi, M. Pardhan, and S. Koshowski, "Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements," *Cément and Concrete Research,* vol. 34, pp. 2103-2112, 2004.

[28] P. Eyi-Assoumou, "Plastic shrinkage of Self-Compacting Concrete," *Travail de Fin d'Etude, Ecole Centrale de Nantes,* 2003.

[29] B. Persson, "A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete," *Cement and Concrete Research,* vol. 31, pp. 193-198, 2001.

[30] I. Lëfgren, O. Esping, O. Jensen, P. Lura, and K. Kovler, "Earl y age cracking of self-compacting concrete," in *International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation", Lyngby,* 2006, pp. 251-260.

[31] P. Turcry and A. Loukili, "A study of plastic shrinkage of self-compacting concrete," in *Proceedings of the 3rd international RILEM symposium on self-compacting concrete. Reykjavik: RILEM Publications SARL,* 2003, pp. 576-585.

[32] A. Leemann, P. Lura, and R. Laser, "Shrinkage and creep of SCC-The influence of paste volume and binder composition," *Construction and Building Materials,* vol. 25, pp. 2283-2289, 2011.

[33] A. Yasumoto, Edamatsu, Y., and Mizukoshi, "Study on the shrinkage crack resistance of SCC," *American Concrete Jnstitute,* 1998.
[34] P. Turcry, A. Loukili, K. Haidar, G. Pijaudier-Cabot, and A. Belarbi, "Cracking tendency of self-compacting concrete subjected to restrained shrinkage: expérimental study and modeling," *Journal of Materials in Civil Engineering,* vol. 18, pp. 46-54, 2006.
[35] K. Hover, "Hot Weather Concrete," *STRUCTURE,* vol. 27, 2005.
[36] P. J. Uno, "Plastic shrinkage cracking and evaporation formulas," *AC! materials journal,* vol. 95, pp. 365-375, 1998.
[37] A. H. Bushlaibi and A. M. Alshamsi, "Efficiency of curing on partially exposed high-strength concrete in hot climate," *Cement and Concrete Research,* vol. 32, pp. 949-953, 2002.
[38] N. Banthia and R. Gupta, "Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete," *Cément and Concrete Research,* vol. 36, pp. 1263-1267, 2006.
[39] J. Mora, M. Martin, R. Gettu, and A. Aguado, "Study of plastic shrinkage cracking in concrete and the influence of fibers and a shrinkage reducing admixture," *JNDUSTRIA ITALIANA DEL CEMENTO,* pp. 828-837, 2001.
[40] T. Rahmani, B. Kiani, M. Bakhshi, and M. Shekarchizadeh, "Application of different fibers to reduce plastic shrinkage cracking of concrete," in *7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements,* 2012, pp. 635-642.
[41] G. Barluenga and F. Hernàndez-Olivares, "Cracking control of concretes modified with short AR-glass fibers at early age. Experimental results on standard concrete and SCC," *Cement and Concrete Research,* vol. 37, pp. 1624-1638, 2007.
[42] P. P. Kraal, "A proposed test to determine the cracking potential due to drying shrinkage of concrete," *Concrete construction,* vol. 30, pp. 775- 778, 1985.
[43] V. Corinaldesi and G. Moriconi, "Characterization of self-cornpacting concretes prepared with different fibers and minerai additions," *Cement and Concrete composites,* vol. 33, pp. 596-601, 2011.
[44] J. Puentes, G. Barluenga, and 1. Palomar, "Effects of nano-components on early age cracking of self-compacting concretes," *Construction and Building Materials,* vol. 73, pp. 89-96, 2014.
[45] F. Rajabipour, G. Sant, and J. Weiss, "Interactions between shrinkage reducing admixtures (SRA) and cement paste's pore solution," *Cement and Concrete Research,* vol. 38, pp. 606-615, 2008.
[46] T. Goto, T. Sato, K. Sakai, and M. li, "Cement-shrinkage-reducing agent and cement composition," ed: Google Patents, 1985.
[47] J. Saliba, E. Rozière, F. Grondin, and A. Loukili, "Influence of shrinkage-reducing admixtures on plastic and long-term shrinkage," *Cement and Concrete composites,* vol. 33, pp. 209-217, 2011.
[48] J. Mora, A. Aguado, and R. Gettu, "The influence of shrinkage reducing admixtures on plastic shrinkage," *Materiales de construcciôn,* vol. 53, pp. 71-80, 2003.
[49] J. Mora-Ruacho, R. Gettu, and A. Aguado, "Influence of shrinkage-reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage cracking in concrete," *Cement and Concrete Research,* vol. 39, pp. 141-146, 2009.
[50] D. P. Bentz, M. R. Geiker, and K. K. Hansen, "Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement pastes and mortars," *Cément and Concrete Research,*

vol. 31, pp. 1075-1085, 2001.

[51] B. D. Le Roux, "Influence of admixtures on the plastic shrinkage cracking of concrete," 2016.

[52] O. Esping and 1. Lôfgren, "Cracking due to plastic and autogenous shrinkage-Investigation of early age deformation of self-compacting concrete-Experimental study," Chalmers University ofTechnology2005.

[53] A. Passuello, G. Moriconi, and S. P. Shah, "Cracking behavior of concrete with shrinkage reducing admixtures and PVA fibers," *Cement and Concrete composites,* vol. 31, pp. 699-704, 2009.

[54] V. Corinaldesi, "Combined effect of expansive, shrinkage reducing and hydrophobie admixtures for durable self compacting concrete," *Construction and Building Materials,* vol. 36, pp. 758-764, 2012.

[55] M. J. Oliveira, A. B. Ribeiro, and F. G. Branco, "Combined effect of expansive and shrlnkage reducing admixtures to contrai autogenous shrinkage in self-compacting concrete," *Construction and Building Materials,* vol. 52, pp. 267-275, 2014.

[56] J. Louw, "Influence of admixtures on the early age plastic cracking of concrete," ed: Stellenbosch: Final year project presented in fulfilment of the requirements for the degree Bachelor of Engineering at Stellenbosch University, 2014.

[57] R. Combrinck and W. P. Boshoff, "Typical plastic shrinkage cracking behaviour of concrete," *Magazine ofConcrete Research,* vol. 65, pp. 486-493, 2013.

[58] C. E. Retarder, "Apply evaporation retarder to concrete surfaces if hot, dry, or windy conditions cause moisture loss approaching 0.2 lb/sq. ft. xh before and during finishing operations," *Apply according to manufacturer's written instructions after placing, screeding, and bullfloating or darbying concrete, but beforefloat.finishing.*

[59] E. Holt and M. Leivo, "Cracking risks associated with early age shrinkage," *Cernent and Concrete composites,* vol. 26, pp. 521-530, 2004.

[60] A. C. Institute, "ACI manual of concrete practice," 2002.

[61] G. Barluenga, J. Puentes, and 1. Palomar, "Early age monitoring of self-compacting concrete with minerai additions," *Construction and Building Materials,* vol. 77, pp. 66-73, 2015.

[62] G. Barluenga, J. Puentes, I. Palomar, and O. Rio, "Early Age Drying Shrinkage Evaluation of Self-Cornpacting Concretes and Pastes with Minerai Additions," in *JOth International Conference on Mechanics and Physics of Creep, Shrinkage, and Durability of Concrete and Concrete Structures,* 2015.

[63] T. Fujiwara, "Effect of aggregate on drying shrinkage of concrete," *Journal of Advanced Concrete Technology,* vol. 6, pp. 31-44, 2008.

[64] W. Zhu, J. Wei, F. Li, T. Zhang, Y. Chen, J. Hu, and Q. Yu, "Understanding restraint effect of coarse aggregate on the drying shrinkage of self-cornpacting concrete," *Construction and Building Materials,* vol. 114, pp. 458-463, 2016.

[65] R. Cartas, E. Rozière, S. Staquet, A. Hamami, A. Loukili, and M.-P. Delplancke-Ogletree, "Effect of the water saturation of aggregates on the shrinkage induced cracking risk of concrete at early age," *Cement and Concrete composites,* vol. 50, pp. 1-9, 2014.

[66] J. Bisschop and J. Van Mier, "Effect of aggregates on drying shrinkage microcracking in cement-based composites," *Materials and structures,* vol. 35, pp. 453-461, 2002.

[67] I. Maruyama, H. Sasano, and M. Lin, "Impact of aggregate properties on the development of shrinkage-induced cracking in concrete under restraint conditions," *Cement and Concrete Research,* vol. 85, pp. 82-101, 2016.

[68] E. Rozière, S. Oranger, P. Turcry, and A. Loukili, "Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete," *Cement and Concrete composites*, vol. 29, pp. 626-636, 2007.

[69] B. t. Bissonnette, P. Pierre, and M. Pigeon, "Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials," *Cement and Concrete Research*, vol. 29, pp. 1655-1662, 1999.

[70] I. Papayianni, G. Tsohos, N. Oikonomou, and P. Mavria, "Influence of superplasticizer type and mix design parameters on the performance of them in concrete mixtures," *Cement and Concrete composites*, vol. 27, pp. 217-222, 2005.

[71] L. Girotto, M. Barbosa, and G. Maciel, "Rheological behavior study of plastic shrinkage and cracking of self-compacting concrete mortars," *Revista !BRACON de Estruturas e Materiais*, vol. 7, pp. 24-52, 2014.

[72] A. M. Neville, *Properties of concrete*, 1995.

[73] S.-T. Lin and R. Huang, "Effect of viscosity modifying agent on plastic shrinkage cracking of cementitious composites," *Materials and structures*, vol. 43, pp. 651-664, 2010.

[74] S.-T. Lin, R. Huang, and T.-L. Weng, "Effect of minerai admixtures and viscosity modifying admixtures on plastic shrinkage cracking of cementitious composites," *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, vol. 34, pp. 287-297, 2011.

[75] E.-i. Tazawa, *Autogenous shrinkage of concrete:* CRC Press, 1999.

[76] J. Zhang, Y. D. Han, and Y. Gao, "Effects of water-binder ratio and coarse aggregate content on interior humidity, autogenous shrinkage, and drying shrinkage of concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 26, pp. 184-189, 2013.

[77] T. Tioua, A. Kriker, A. Salhi, and G. Barluenga, "Effect of hot-dry environment on fiber-reinforced self-compacting concrete," in *TECHNOLOGIES AND MATERJALS FOR RENEWABLE ENERGY, ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY: TMREES*, 2016, p. 030024.

[78] J. Selih, A. C. Sousa, and T. W. Bremner, "Moisture transport in initially fully saturated concrete during drying," *Transport in porous media*, vol. 24, pp. 81-106, 1996.

[79] S. Beyea, B. Balcom, T. Bremner, P. Prado, D. Green, R. Armstrong, and P. Grattan-Bellew, "Magnetic resonance imaging and moisture content profiles of drying concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 28, pp. 453-463, 1998.

[80] S.-D. Hwang and K. H. Khayat, "Effect of mixture composition on restrained shrinkage cracking of self-consolidating concrete used in repair," *AC! materials journal*, vol. 105, p. 499, 2008.

[81] E. Güneyisi, M. Gesoglu, and E. Ôzbay, "Strength and drying shrinkage properties of self-compacting concretes incorporating multi-system blended minerai admixtures," *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp. 1878-1887, 2010.

[82] J. Bisschop, *Drying shrinkage microcracking in cement-based materials:* TU Delft, Delft University of Technology, 2002.

[83] E. E. Holt, *Early age autogenous shrinkage of concrete* vol. 446: Technical Research Centre of Finland, 2001.

[84] Q. Tian, W. Sun, and C.-w. Miao, "Study on the measurement of autogenous shrinkage of high performance concrète," *Journal of Building Materials*, vol. 8, pp. 82-89, 2005.

[85] J. Brooks, J. Cabrera, and M. M. Johari, "11 FACTORS AFFECTING THE AUTOGENOUS SHRINKAGE OF SILICA FUME HIGH-STRENGTH

CONCRETE," in *Autogenous shrinkage of concrete: proceedings of the international workshop, organised by JCJ (Japan Concrete lnstitute), Hiroshima, June 13-14, 1998,* 1999,p.195.

[86] P. Lura, O. M. Jensen, and K. van Breugel, "Autogenous shrinkage in high-performance cement paste: an evaluation of basic mechanisms," *Cement and Concrete Research,* vol. 33, pp. 223-232, 2003.

[87] C. Hua, P. Acker, and A. Ehrlacher, "Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste: I. Modelling at macro scopie scale," *Cement and Concrete Research,* vol. 25, pp. 1457-1468, 1995.

[88] Y. Li and J. Li, "Capillary tension theory for prediction of early autogenous shrinkage of self-consolidating concrete," *Construction and Building Materials,* vol. 53, pp. 511-516, 2014.

[89] P. Mounanga, "Etude expérimentale du comportement de pâtes de ciment au très jeune âge: hydratation, retraits, propriétés thermophysiques," Nantes, 2003.

[90] L. Divet, "Étude des Réactions Sulfatiques Internes au Béton," Thèse de doctorat, CNAM Paris, Paris, France, 2001.

[91] B. Persson, "Creep, shrinkage and elastic modulus of self-compacting concrete," in *lst International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete,* 1999, pp. 239-250.

[92] F. Aslani and S. Nejadi, "Shrinkage behavior of self-compacting concrete," *Journal of Zhejiang University SCIENCE A,* vol. 13, pp. 407-419, 2012.

[93] T. Hammer, O. Wallevik, and I. Nielsson, "Cracking susceptibility due to volume changes of self-compacting concrete (SCC)," in *Proceedings of the 3rd International RILEMSymposium on* SCC, *Reykjavik,* 2003, pp. 553-557.

[94] N. Suksawang, H. Nassif, and H. Najm, "Evaluation of mechanical properties for self-consolidating, normal, and high-performance concrete," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,* pp. 36-45, 2006.

[95] A. K. Schindler, R. W. Barnes, J. B. Roberts, and S. Rodriguez, "Properties of self-consolidating concrete for prestressed members," *ACI materials journal,* vol. 104, pp. 53-61, 2007.

[96] P. J. Uno, "Plastic shrinkage cracking and evaporation formulae," *AC! Materials journal,* vol. 95, 1998.

[97] M. O. Cohen, J. Olek, and W. L. Dolch, "Mechanism of plastic shrinkage cracking in portland cement and portland cement-silica fume paste and mortar," *Cement and Concrete Research,* vol. 20, pp. 103-119, 1990.

[98] H. Mitani, "Variations volumiques des matrices cimentaires aux très jeunes âges: approche expérimentale des aspects physiques et microstructuraux," Ecole des Ponts ParisTech, 2003.

[99] R. Weyers, J. Conway, and P. Cady, "Photoelastic analysis of rigid inclusions in fresh concrete," *Cement and Concrete Research,* vol. 12, pp. 475-484, 1982.

[100] H.-G. Kwak, S. Ha, and W. J. Weiss, "Experirnental and numerica\ quantification of plastic settlement in fresh cementitious systems," *Journal of materials in Civil Engineering,* vol. 22, pp. 951-966, 2010.

[101] C. Qi, "Quantitative assessment of plastic shrinkage cracking and its impact on the corrosion of steel reinforcement," Purdue University, 2003.

[102] P. Turcry and A. Loukili, "Evaluation of plastic shrinkage cracking of self-consolidating concrete," *AC! Materials journal,* vol. 103, 2006.

[103] R. Bloom and A. Bentur, "Free and restrained shrinkage of normal and high-strength concretes," *Materials Journal*, vol. 92, pp. 211-217, 1995.
[104] W. Lerch, "Plastic shrinkage," in *Journal Proceedings*, 1957, pp. 797-802.
[105] J. Branch, D. Hannant, and M. Mulheron, "Factors affecting the plastic shrinkage cracking ofhigh-strength concrete," *Magazine of Concrete Research*, vol. 54, pp. 347-354, 2002.
[106] S. O. Hait E, "Self-compacting concrete: early age shrinkage.," *VTT, Technical report RTE40-IR-21/2002*, Finland; 2002 2002.
[107] T. C. Hansen and K. E. C. Nielsen, *Influence of aggregate properties on concrete shrinkage:* Svenska Forskningsinstitutet für Cement och Betong, 1965.
[108] P. Grass!, H. S. Wong, and N. R. Buenfeld, "Influence of aggregate size and volume fraction on shrinkage induced micro-cracking of concrete and mortar," *Cement and Concrete Research*, vol. 40, pp. 85-93, 2010.
[109] W. Zhang, M. Zakaria, and Y. Hama, "Influence of aggregate materials characteristics on the drying shrinkage properties of mortar and concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 49, pp. 500-510, 2013.
[110] J. D. Dippenaar, "The tensile properties of early age concrete and the experimental apparatus required for its détermination," Stellenbosch: Stellenbosch University, 2015.
[111] J. Abel and K. Haver, "Effect of water/cement ratio on the early age tensile strength of concrete," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, pp. 33-38, 1998.
[112] P. Sarker, "Early-age tensile strength and calcium hydroxide content of concrete containing low-calcium tly-ash," *Australian Journal of Structural Engineering*, vol. 14, pp. 206-216, 2013.
[113] R. Ojdrovic, A. Stojimirovic, and H. Petroski, "Effect of age on splitting tensile strength and fracture resistance of concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 17, pp. 70-76, 1987.
[114] O. De Schutter and L. Taerwe, "Degree of hydration-based description of mechanical properties of early age concrete," *Materials and structures*, vol. 29, pp. 335-344, 1996.
[115] T. R. Naik, S. S. Singh, and M. Hossain, "Enhancement in mechanical properties of concrete due to b[ended ash," *Cement and Cancrete Research*, vol. 26, pp. 49-54, 1996.
[116] A. Gutch, "Properties of Early Age Concrete-Experiments and Modeling," *Materials & Structures*, vol. 35, pp. 76-79, 2002.
[117] D. Nguyen and V. T. Dao, "Tensile Properties of Early-Age Concrete," in *27th Biennial National Corference of the Concrete Institute of Australia in conjunction with the 69th RILEM Week*, 2015, pp. 1314-1324.
[118] M. S. B. V. V. Slowik, "Capillary shrinkage cracking - experiments and numerical simulation," *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, vol. Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures -Assessment, Durability, Monitoring and Retrofitting of Concrete Structures- B. H. Oh, et al. (eds) Korea Concrete lnstitute, Seoul, ISBN 978-89-5708-181-5, 2010.
[119] T. Hammer, "The use of pore water pressure to fo!low the evolution from fresh to hardened concrete," in *2nd International symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, Quebec City*, 2006.

[120] A. Leemann, P. Nygaard, and P. Lura, "Impact of admixtures on the plastic shrinkage cracking of self-compacting concrète," *Cement and Concrete Composites,* vol. 46, pp. 1-7, 2014.
[121] V. Slowik, M. Schmidt, and B. Villmann, "Capillary shrinkage cracking-Experiments and numerical simulation," in *Fracture mechanics of concrete and concrete structures. Proceedings of the 7th international conference on fracture mechanics of concrete and concrete structures (FraMCoS-7),* 2010, pp. 739-44.
[122] R. Dhir, P. Hewlett, and T. Dyer, "Mechanisms of water retention in cernent pastes containing a self-curing agent," *Magazine of concrete research,* vol. 50, pp. 85-90, 1998.
[123] P. Hewlett, *Lea's chemistry of cement and concrete:* Butterworth-Heinemann, 2003.
[124] P. Mounanga, A. Khelidj, A. Loukili, and V. Baroghel-Bouny, "Predicting Ca (OH) 2 content and chemical shrinkage of hydrating cernent pastes using analytical approach," *Cement and Concrete Research,* vol. 34, pp. 255-265, 2004.
[125] P. Mehta and P. Monteiro, "Concrete-Microstructure, Properties and Materials. 2006," *Utilization ofpalm oil fuel ash in concrete: a review.*
[126] F. Lin, "Modeling of hydration kinetics and shrinkage of Portland cement paste," Columbia University, 2006.
[127] V. C. Goboncan and R. L. Dillenbeck, "Real-Time Cement Expansion/Shrinkage Testîng Under Downhole Conditions for Enhanced Annular Isolation," in *SPEIIADC Drilling Conference,* 2003.
[128] T. Hammer, "Is there a relationship between pore water pressure and autogenous shrinkage before and during setting?," in *3 rd International Research Seminar,* 2002, pp. 27-38.
[129] X. Pang, D. P. Bentz, C. Meyer, G. P. Funkhouser, and R. Darbe, "A cornparison study of Portland cement hydration kinetics as measured by chemical shrinkage and isothermal calorimetry," *Cement and Concrete Composites,* vol. 39, pp. 23-32, 2013.
[130] E.-i. Tazawa, S. Miyazawa, and T. Kasaï, "Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste," *Cement and Concrete Research,* vol. 25, pp. 288-292, 1995.
[131] J. Zhang, D. Hou, and W. Sun, "Experimental study on the relationship between shrînkage and interior humidity of concrete at early age," *Mag Concr Res,* vol. 62, pp. 191-199, 2010.
[132] D. P. Bentz, O. M. Jensen, K. K. Hansen, J.F. Olesen, H. Stang, and C. J. Haecker, "Influence of Cernent Particle-Size Distribution on Earl y Age Autogenous Strains and Stresses in Cement-Based Materials," *Journal of the American Ceramic Society,* vol. 84, pp. 129-135, 2001.
[133] A. Messan, "Contribution à l'étude du comporternet au très jeune âge des structures minces en mortier," Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc, 2006.
[134] D. Hannant, J. Branch, and M. Mulheron, "Equipment for tensile testing of fresh concrete," *Magazine ofConcrete Research,* vol. 51, pp. 263-267, 1999.
[135] Z. Bayasi and M. Mclntyre, "Application of fibrillated polypropylene fibers for restraint of plastic shrinkage cracking in silica fume concrete," *Materials Journal,* vol. 99, pp. 337-344, 2002.
[136] A. Nonat, "Hydratation et prise des liants hydrauliques. Définition et Concept," *Ecole thématique CNSR-ATILH "Matériaux Cimentaires,* pp. 19-24, 2003.

[137] P. Wainwright and N. Rey, "The influence of ground granulated blastfurnace slag (GGBS) additions and time delay on the bleeding of concrete," *Cement and Concrete Composites,* vol. 22, pp. 253-257, 2000.
[138] C.-K. Loh, T.-S. Tan, T.-S. Yong, and T.-H. Wee, "An experimental study on bleeding and channelling of cernent paste and rnortar," *Advances in cement research,* vol. 10, pp. 1-16, 1998.
[139] O. Kaplan, "Pompage des bétons, Etudes et recherches des laboratoires des Ponts et Chaussées," ed: Rapp. LCPC, Paris, France, 2000.
[140] T. C. Powers, "The Bleeding Of Potland Cement Paste, Mortar, and Concrete," in *Journal Proceedings,* 1939, pp. 465-480.
[141] L. Josserand, O. Coussy, and F. de Larrard, "Bleeding of concrete as an ageing consolidation process," *Cement and Concrete Research,* vol. 36, pp. 1603-1608, 2006.
[142] T. Tan, T. Wee, S. Tan, C. Tarn, and S. Lee, "A consolidation mode] for bleeding of cernent paste," *Advances in Cement Research,* vol. 1, pp. 18-26, 1987.
[143] T.-S. Tan, C.-K. Loh, K.-Y. Yang, and T.-H. Wee, "Modelling ofbleeding of cernent paste and mortar," *Advances in Cement Research,* vol. 9, pp. 75-91, 1997.
[144] A. Almussalam, M. Maslehuddin, M. Abdul-Waris, F. Dakhil, and O. Al-Amoudi, "Plastic shrinkage cracking of blended cernent concretes in hot environments," *Magazine of concrete research,* vol. 51, pp. 241-246, 1999.
[145] J.H. Kim, H. J. Yim, and S. H. Kwon, "Quantitative measurement of the externat and internai bleeding of conventional concrete and SCC," *Cement and Concrete Composites,* vol. 54, pp. 34-39, 2014.
[146] J. Han and K. Wang, "Influence of bleeding on properties and microstructure of fresh and hydrated Portland cement paste," *Construction and Building Materials,* vol. 115, pp. 240-246, 2016.
[147] G. Giaccio and A. Giovambattista, "Bleeding: evaluation of its effects on concrete behaviour," *Materials and structures,* vol. 19, pp. 265-271, 1986.
[148] L. Josse rand, "Ressuage des bétons hydrauliques, [11] Ecole des Ponts ParisTech, 2002.
[149] T. C. Powers, "The Bleeding Of Potland Cement Paste, Mortar, and Concrete," in *AC! Journal Proceedings,* 1939.
[150] K. Kobayashi and Y. Uno, "Chemical Composition of Bleeding Water on Fresh Concrete," *Seisan Kenkyu,* pp. 128-130.
[151] P. Wainwright and H. Ait-Aider, "The influence of cernent source and slag additions on the bleeding of concrete," *Cement and Concrete Research,* vol. 25, pp. 1445-1456, 1995.
[152] O. Ravina and P. K. Mehta, "Properties of fresh concrete containing large arnounts of fly ash," *Cement and Concrete Research,* vol. 16, pp. 227-238, 1986.
[153] C.-L. Hwang and 0.-S. Wu, "Properties of cernent paste containing rice husk ash," *Special Publication,* vol. 114, pp. 733-762, 1989.
[154] M. Hoshino, "Relation between bleeding, coarse aggregate, and specirnen height of concrete," *MaterialsJournal,* vol. 86, pp. 185-190, 1989.
[155] H. Jârvenpââ, "Quality characteristics of fine aggregates and controlling their effects on concrete," *Actapolytechnicascandinavica. Ci,* vol. 122, pp. 1-194, 2001.
[156] L. Du and K. J. Fol liard, "Mechanisms of air entrainrnent in concrete," *Cement and Concrete Research,* vol. 35, pp. 1463-1471, 2005.
[157] N. Otis, *Influence de divers superplastifiants sur le ressuage et l'interface pâte/granulat dans les matériaux cimentaires:* Université de Sherbrooke, 2000.
[158] T. C. Powers, "The properties of fresh concrete," 1969.

[159] S. W. SUHR S., "Bleeding of cement paste.," *Colloque de Hannovre - properties of fresh concrete,* pp. pp 33 - 40, oct. 1990 1990.
[160] A. S. T. M. C232, "Standard test metod for bleeding of concrete," 1971.
[161] S. standard, "Method for measuring water-separation " 1965.
[162] M. Sawaide and J. Iketani, "Rheological analysis of the behavior of bleed water from freshly cast mortar and concrete," *ACI Materials journal,* vol. 89, 1992.
[163] L. Josserand and F. De Larrard, "A method for concrete bleeding measurement," *Materials and Structures,* vol. 37, pp. 666-670, 2004.
[164] S. Valsson and A. Bharat, "Impact of air temperature on relative humidity-a study," *J Architecture-Time Space & People,* pp. 38-41, 2011.
[165] A. Nanni, D. A. Ludwig, and M. T. McGillis, "Plastic shrinkage cracking of restrained fiber-reinforced concrete," *Transportation research record,* 1993.
[166] 1. Padron and R. F. Zollo, "Effect of synthetic fibers on volume stability and cracking of portland cement concrete and mortar," *Materials Journal,* vol. 87, pp. 327-332, 1990.
[167] P. Balaguru, "Contribution of fibers to crack reduction of cement composites during the initial and final setting period," *Materials Journal,* vol. 91, pp. 280-288, 1994.
[I 68] A. Alrifai, S. Aggoun, A. Kadri, S. Kenai, and E.-h. Kadri, "Paste and mortar studies on the influence of rnix design parameters on autogenous shrinkage of self-compacting concrete," *Construction and Building Materials,* vol. 47, pp. 969-976, 2013.
[169] H. Okamura and M. Ouchi, "Self-compacting concrete," *Journal of advanced concrete technology,* vol. 1, pp. 5-15, 2003.
[170] G. Dreux and J. Festa, *Nouveau guide du béton et de ses constituants* vol. 8: Eyrolles, 1998.
[171] A. Schwartzentruber and C. Catherine, "La méthode du mortier de béton équivalent (MBE)-Un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvantes," *Materials and Structures,* vol. 33, pp. 475-482, 2000.
[172] N. EN, "NF EN 196-1: Méthodes d'essais des ciments-Partie 1: détermination des résistances mécaniques (April)," *Comité Européen de Normalisation (CEN), AFNOR, Paris FRANCE,* 2006.
[173] N. Norme, "EN 206-1: Béton-," *Spécification, performances, production et conformité.*
[174] C. BIBM and E. ERMCO, "EFNARC (2005) The European guidelines for self-compacting concrete," ed.
[175] T. EN, "196-3," *Methods of Testing Cement-Part,* vol. 3, 2000.
[176] D. P. Bentz, "A review of early-age properties of cement-based materials," *Cement and Concrete Research,* vol. 38, pp. 196-204, 2008.
[177] J. Escalante-Garcra and J. Sharp, "Effect of temperature on the hydration of the main clinker phases in Portland cements: Part Il, blended cements," *Cement and Concrete Research,* vol. 28, pp. 1259-1274, 1998.
[178] P. Thongsanitgarn, W. Wongkeo, S. Sinthupinyo, and A. Chaipanich, "Effect of limestone powders on compressive strength and setting time of Portland-limestone cement pastes," in *Advanced Materials Research,* 2012, pp. 322-326.
[179] L. Senff, P. A. Barbetta, W. L. Repette, D. Hotza, H. Paiva, V. M. Ferreira, and J. A.

Labrincha, "Mortar composition defined according to rheometer and flow table tests using factorial designed experiments," *Construction and Building Materials,* vol. 23, pp.3107-3111,2009.

[180] K. Yamada, T. Yanagisawa, and S. Hanehara, "Influence of temperature on the dispersibility of polycarboxylate type superplasticizer for highly fluid concrete," in *International RILEM symposium on self-compacting concrete*, 1999, pp. 437-448.

[181] R. Combrinck, "Plastic shrinkage cracking in conventional and low volume fibre reinforced concrete," Stellenbosch: Stellenbosch University, 2012.

Annexe A

NOTICE TECHNIQUE 1 3 6

MEDAPLAST SP 40

Super plastifiant -haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le MEDAPLAST SP 40 est un superptasëüant haut réducteur d'eau permettant d"obtenir des bétons el mortiers de très haute qualité,
En plus de sa fonction principale de superptastlûant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons pompés
- Béions précontraints
- Bétons architecturaux
- Bétons extrudés
- Bétons BCR

ROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le MEDAPLAST SP 40 perme!

Sur béton frais :
- Améliorer la fluidité
- Augmenter la manlabiHté
- Réduire l'eau de gâchage
- Eviter la ségrêgallon
- faciliter la rnlso en œuvro du béton
- Sur béton durci :
- Augmenter les résistances mécaniques même à jaune âgo
- Dlmlnuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait

CARACTÉRISTIQUES

•Aspect	"	"" Liquide
·Couleur	"	Marron
•pH	,,	,, 8,2
•Densité	,.	.,.. 1,20 ± 0,01
·Teneur en chlore		< 1g/L
•Extrait sec	,,	40%

Rt!M?af

4(1
30
20
10

0 1

Evolution des réssstances en compresnon

MODE D'EMPLOI

Le MEOAPLAST SP 40 est introduit dans l'eau de gâchage.
Il est recommandé d'ajouler l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait été introduite.

DOSAGE
Plage de dosage recommandée :
0,6% à 2,5% du poids de ciment soit 0,5l â 2L pour 100 kg de ciment
La dosage opHrnal doit êlre déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le MEDAPLAST SP 40 est condltlormè en bidons de 12Kg, fù!s de 270 kg el cubllénaire de 1200 kg.
Délai de conservation :
Une année emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (S·C < t c 35•q.

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.
Se référer a la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granltex·dz.com
PV d'essais conforme aux normes, établi par ta CNERIB en Janvier 2007.

Les tr){ISQignQl'fl{l(l(sckmn{;s dans cCIW notice son/ basês sur nolro conna!SSll'lîCoe! nowe~lic:ojour /lest rocommimd6 00 proclldQr ll dflseSMis de C(){WQr.&JCC{xJıff d6tl}ITl'1im;r /.1 fourcllCllo d"Ulii!M.llion1Grnlrrl oomplo dos comtiiions rOO/fcs de chanlior

Granttex
Zone industrielle Oued Smar- BP8SOued Smar- 16270Af9er
Ttif: (213)021516681 & 82
Fax: (213) 021SI6422 & 0215165 23
www.gronltex·dz.com • E·ma/l: gronltex@9ranltex·dz.com

93

Annexe B

Fh;ho tftf:hnlqua

L~ Qœ'd1f1""D'l'l~ L.!·Jo::.hn."~ui' •")"1)~tpf! !if) (Hlf't!O Suj (\t~$~ *du* ma~u~rl Ot.m~S:OfüU}n'J S'utl·%1
;!(> C:1n-;;~"f;;Ji'tf:. a r@t ô"<.".".n~~lih·i <:}~ ("~~~ 1"M~i' n(Hitt~ OOtn:c!fHi~ par
ul'\-0 91TIH(l-O~)ulè!t'ifhimk.1\-îG ül ;,.<r\(ll l).!.-JJ)(hO\~ t;-~,.ijv

Caracttirlsllques çhlmiques	
ClICO,	Ill!%
C..0	$1;.n:!l%
SiO;	0,04%
Na,O	0,05%
MVo	0,17%.
Np,	0,03%
l'a,o,	11,0:1%
H,O	o.01~~il'
P,0.	U,OiHl%
11C,	ll,GUilo/.
Chlonn	0,0033%
SO, (eolub!o dlM'.:ll l'@ru.i!	0,0021%
:>O, (n0lut4'1 !100$ r~Hla)	0,1JN,
$QUft"(o1.:'i1Me-	o,on1~
R•h!Hru rnsolutuo	1,1!)%
S.-i!uNIHil !I&M !'1111u *(Ws)*	Q,Z4';,
f'lffl• IIU hm	4!î%
Ph	9

Carnctérfstiqu,l}s physiQIJ!JS	
Donlté (MOHS} l	I
Pol<lt. ~~lq.u. ;	2,_7
000111111 <'P'P_,,1n non tas* •	1.1ti
fttnncheur(EUU:PHQOnl):	L; !ilJ.!tT a+u~t bi4.:!2
P;l.:..a d"1tuU11 (W:;r 30.112l}.	t~100g d<I J14Wr•
Prtso 0 0 P { NF.T Jll.022~:	219"toot. ptitldff.
li\ll'tndfl.0'hn$~aqa z	0,.. 1'1t
Indic;>d~ tl!frtéban •	1.11

Rop.~rtltiongrnnulomo!nquc

Oün1~t1ù H~th1~+tJ} ' ffGp~!1
f;:..:i1ll,..ti>-==~ iF"'n"~""~'-'j:'""'.~ .r41"'-.;~

1()\)
$()
SO
40
20

0 1 io 100 \000 3000

ra111il ans P8fticu~s (Pm)

Slg·lag (11cnne)
Pn!ettna ho<on&n {411 seca de 25".g)

fabrl.,..tlon du vmm
Poutl"' cl crim11 il r*eutar
O•hl!TIJ"nt
Faùrnce

Annexe C

Exemple de calcul du mortier de béton équivalent

Après avoir calculé les surface spécifique des granulats : gravier3/8 =0.450m2/kg, gravierB/15=0, 194 m2/kg, sable0/3 = 5,09m2 lkg, (voir exemple de calcul aux tableaux dans les pages suivantes), les graviers seront remplacés avec du sable ayant la même surface spécifique, et ra quantité du sable équivalente est égale à 877,87kg/m3 calculée avec l'équation 2 du chapitre 3.

Dans une deuxième étape et après avoir calculé le supplément en sable, le volume des autres constituants (ciment, fillers, eau) reste inchangé et le volume total de la MBE calculé en première étape est inférieur à 1 m3 égal à 0.745 m3 dans notre cas. Pour la rendre égale à 1 m3, le volume de chaque ingrédient est multiplié par le rapport 1/0.745.

Calcul de la surface spécifique du sable

Opérations	Symboles	Valeurs					
Tranches granulaires	Tranches maximale	0	0.08	0.16	0.315	0.63	1.25
	Tranches minimale	0.08	0.16	0.315	0.63	1.25	2.5
Masse de la tranche par	Mui (kg) 10^{3}	0.5	1.5	52.5	913.5	1	13.5
Volume de la particule	vi (1ü'9m3)	0.000034	0.0009$	0.00701	0.0.5.5205	0.43467	3.45
Surface développée	si (10"5 m2)	0.00527	0.0'152/1	0.177	0.7	'2.77	11.03
Volume massique de	µi (10'3m3/kg)	0.3675					
Volume total des	Vi (10.6 m3)	0.193	0.581	20.34	353.98	5.231	0.387
Nombre de particules	Ni v1n6	5.69	0.64	2.9	6.41	0.012	0.00011
Surface développée	Si (1033m2)	30	30	513.3	4487	33.24	1.213
Surface développée	SD (m2)	5.09m2 /kg					

Calcul de la surface spécifique du Gravier

Opérations	Symboles	Valeurs								
Tranches granulaires	Tranches maximale	0.630	1.25	2.5	5	6.3	8	10	12.5	16
	Tranches minimale	1.25	2.5	5	6.3	8	10	12.5	16	20
Masse de la tranche	Mui (kg) 10^{-3}	8.44	6.78	269.45	171.27	208.77	120.69	100.82	85.75	25
Volume de la	vi no' $m^{3)}$	0.43	3.45	27.5	94.4	191.4	381.7	745.5	1515	3054
Surface développée	si ($10.^{6}$ $m^{2)}$	2.77	11.03	44.15	100.3	160.6	254.5	398	638	1018
Volume massique	µi (10	0.377								
Volume total des	Vi (10.s mJ)	3.18	2.55	101. 58	64.56	78.7	45.5	38	32.33	9.42
Nombre de	Ni x10_{6}	7.39	73.9	368	68.38	41. 11	11.92	5.09	2.13	0.308
Surface développée	Si ($10_{3}m_{2}$)	0.2048	8.15	162.47	68.02	66.02	30.33	20.28	13.6	3.13
Surface développée	SD (m2)	0.37276 m_{2}/kg								