

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



Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie Civil
Laboratoire de Matériaux de Génie Civil et
Environnement



Thèse de Doctorat en Science Génie Civil

Présentée par : Rim LARBI

Magister en Génie Civil, Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics

Intitulée :

Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des agrégats d'enrobés

Présentée et soutenue publiquement le 23/01/2020 devant le jury composé de :

Président :	Nour-Eddine BOURAHLA	Professeur ENP
Directeurs de thèse :	EI-Hadi BENYOUSSEF	Professeur ENP
	Meriem MORSLI	Professeur ENP
Examineurs :	Abdelmalek BERMAD	Professeur ENP
	Smail HADDADI	Professeur USTHB
	Mohamed BOUHICHA	Professeur U.Laghouat
	Mouloud ABDESSEMED	Maitre de conférence (A) U.Blida
Invité :	Abderrahim BALI	Professeur ENP

ENP 2020

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



Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie Civil
Laboratoire de Matériaux de Génie Civil et
Environnement



Thèse de Doctorat en Science Génie Civil

Présentée par : Rim LARBI

Magister en Génie Civil, Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics

Intitulée :

Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des agrégats d'enrobés

Présentée et soutenue publiquement le 23/01/2020 devant le jury composé de :

Président :	Nour-Eddine BOURAHLA	Professeur ENP
Directeurs de thèse :	EI-Hadi BENYOUSSEF	Professeur ENP
	Meriem MORSLI	Professeur ENP
Examineurs :	Abdelmalek BERMAD	Professeur ENP
	Smail HADDADI	Professeur USTHB
	Mohamed BOUHICHA	Professeur U.Laghouat
	Mouloud ABDESSEMED	Maitre de conférence (A) U.Blida
Invité :	Abderrahim BALI	Professeur ENP

ENP 2020

تحسين تكوين وتوصيف الخرسانة الإسمنتية التي تحتوي على الركام

ملخص

في سياق التنمية المستدامة ، تهدف هذه الدراسة إلى استعادة الركام الناتجة عن صيانة الطرق المعيدة الجزائرية واستخدامها في الخرسانة الإسمنتية المخصصة للطرق. وبالتالي، تم اعتبار نسب مئوية مختلفة من استبدال الحصى الطبيعي بحصى الركام إلى حد نسبة 50 ٪ واعتبار ثلاث نسب لكمية الماء/الإسمنت (0.50-0.60-0.70). النتائج التجريبية تتماشى و النتائج المستمدة من المنشورات مبينة انخفاضاً نسبياً في الخصائص الميكانيكية و الاستيكية للخرسانة الإسمنتية نتيجة ادراج الركام في الخليط. من أجل تحسين خصائص الخرسانة الإسمنتية التي تحتوي على الركام تم إضافة مكون عضوي: ألياف البروبيلان ثم مكون معدني: دخان السيليكا. النتائج التجريبية تظهر أولاً أن كلا المكونين يزيدان قوة تحمل الكبس الخاصة بالخرسانة حيث الارتفاع النسبي الناتج من إضافة ألياف البروبيلان مماثل لكل خليط الخرسانة بينما الارتفاع النسبي الناتج من إضافة دخان السيليكا يتناقص لما نسبة الركام تزداد في الخليط. إضافة ألياف البروبيلان سيكون مفضلاً لباقي الحملة التجريبية. النتائج التجريبية تبين ان إذا كانت ألياف البروبيلان تزيد في قوة تحمل الكبس للخرسانة فإنها تخفض في قوة تحمل السحب وكذلك معامل المرونة. في جزء وضع النماذج، قدم أولاً نموذج للخصائص الميكانيكية و الاستيكية للخرسانة الإسمنتية التي تحتوي على الركام باستعمال التصميم التجريبي حيث تمت متابعة تغيرات التأثير الفردي والمجتمع للعوامل الفعالة على الخصائص الميكانيكية للخرسانة الإسمنتية التي تحتوي على الركام مع الوقت. قدم نموذج ثاني باستعمال شبكة عصبية اصطناعية من نوع « back propagation » و خوارزمية تعليم من نوع « multilayered feed forward » لتوقع قوة تحمل الكبس الخاصة بالخرسانة التي تحتوي على الركام ببساطة وذلك باعتبار ستة مداخل مهما كان مصدر وطبيعة الركام إضافة الى دراسة تأثير حجم قاعدة المعلومات على النتائج المتوصل اليها باستعمال التصميم التجريبي .

كلمات مفتاحية: الخرسانة الإسمنتية التي تحتوي على الركام الناتجة عن صيانة الطرق المعيدة - استدامة - ألياف البروبيلان - دخان السيليكا - وضع نماذج - التصميم التجريبي - شبكة عصبية اصطناعية.

Optimisation in the composition and characterization of a reclaimed asphalt pavement concrete

Abstract

In a context of a sustainable development, the present study focuses on the valorization of large quantities of reclaimed asphalt pavement (RAP) aggregates resulting from Algerian roads maintenance, in cement concretes for road application. Thus, different substitution rates of natural aggregates with RAP aggregates, up to a maximum of 50% were considered and three W/C ratios (0.50, 0.60 and 0.70) were used. The obtained experimental results are in agreement with those reported in the literature showing a relative loss in mechanical and elastic properties due to the RAP aggregates incorporation. In order to improve the mechanical performances of RAP concretes, an organic reinforcement was added; polypropylene fibers, then a mineral reinforcement; silica fume. Experimental results show that both admixtures improve the compressive strength; relative gain due to polypropylene fibers is similar for all concrete compositions whereas relative gain due to silica fume, decrease when RAP content increases in the mix. Polypropylene fibers are preferred for the rest of the experimental study. Experimental results show that even if fibers increase the compressive strength of concretes, they produce a significant decrease in both splitting tensile strength and static modulus of elasticity. Concerning the modeling part of the study, a first modeling of mechanical properties of RAP concretes was proposed by using factorial designs where the evolution in time of individual and combined effects of influent parameters on mechanical properties of RAP concretes was shown. A second modeling was proposed by using a « multilayered feed forward » artificial neural network with a « back propagation » algorithm where the compressive strength of RAP concretes were predicted, with only six (06) input, whatever the source and nature of RAP aggregates, considering the influence of the data base size on obtained results, by using the factorial design technique.

Keywords: reclaimed asphalt pavement concretes, sustainability, polypropylene fibers, silica fume, modeling, factorial designs, artificial neural networks.

Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des agrégats d'enrobés

Résumé

Dans un contexte de développement durable, la présente étude vise à valoriser les agrégats de fraisâts issus de l'entretien des chaussées bitumineuses algériennes dans des bétons de ciment, destinés à une application routière. Ainsi, différents taux de substitution des granulats naturels par des agrégats de fraisât allant jusqu'à 50% ont été considérés et trois rapports de E/C (0.50-0.60-0.70) ont été utilisés. Les résultats expérimentaux obtenus sont en accord avec ceux rapportés dans la littérature montrant une baisse relative des propriétés mécaniques et élastiques des bétons dues à l'introduction des agrégats de fraisâts. Afin d'améliorer les performances mécaniques de ces bétons de fraisâts, un ajout organique a été considéré : les fibres de polypropylène puis un ajout minéral : la fumée de silice. Les résultats expérimentaux montrent, dans un premier temps, que les deux ajouts augmentent la résistance en compression; le gain relatif provoqué par les fibres est similaire pour toutes les formulations de bétons, tandis que le gain relatif provoqué par la fumée de silice diminue lorsque le pourcentage de fraisât augmente. L'ajout des fibres de polypropylène sera privilégié pour le reste de la campagne des essais. Les résultats montrent que si l'introduction des fibres augmente la résistance en compression, elle diminue cependant la résistance en traction par fendage et le module d'élasticité. Ensuite, une première modélisation moyennant les plans factoriels est proposée permettant de suivre l'évolution dans le temps, des effets individuels et combinés des paramètres influents sur les caractéristiques mécaniques des bétons de fraisât. Une seconde modélisation est proposée moyennant un réseau de neurones artificiel de type « multilayered feed forward » avec un algorithme de type « back propagation » permettant de prédire la résistance en compression des bétons de fraisâts, simplement en introduisant six (06) entrées indépendamment de la source et la nature des agrégats de fraisâts, tout en considérant l'influence de la taille de la base de données sur les résultats obtenus, en appliquant la technique des plans d'expérience.

Mots clé : bétons de fraisâts, durabilité, fibres de polypropylène, fumée de silice, modélisation, plans factoriels, réseaux de neurones artificiels.

Remerciements

Louange au Dieu Tout Puissant, Le Clément Miséricordieux, Qui m'a guidé et aidé durant toutes ces années, et grâce à Lui, ce travail a pu aboutir.

Je voudrais exprimer ma sincère gratitude à mes directeurs de thèse ; le professeur Morsli et le professeur Benyoussef, pour la confiance qu'ils ont bien voulu m'accorder en acceptant de diriger cette recherche, ainsi que le professeur Bensaïbi qui a donné une orientation décisive au travail effectué. Je les remercie pour leur disponibilité, leur patience, leur soutien et leurs conseils avisés et précieux. Je tiens à leur exprimer ma profonde reconnaissance pour leurs critiques constructives d'une rigueur absolue.

Je tiens à remercier les professeurs BOURAHLA, président du jury ainsi que chacun des membres du jury, les professeurs BERMAD, HADDADI, BOUHICHA, ABDESSEMED et BALI qui me font l'honneur d'examiner mon travail.

Mes remerciements les plus chaleureux s'adressent au directeur du laboratoire LTFC LARBI de Bouira, mon père, qui sans épargner aucun effort, a mis à ma disposition les moyens humains et matériels nécessaires à la réalisation de la quasi-totalité de la partie expérimentale. Je remercie aussi l'ensemble de l'équipe du laboratoire pour leur aide et leurs encouragements. Je remercie AFITEX Algérie, et plus particulièrement le directeur ; monsieur Tabti, pour son aide dans la fourniture des fibres organiques utilisés dans la partie expérimentale. Je remercie SIKAL Algérie pour la fourniture de l'adjuvant utilisé dans la partie expérimentale. Je remercie également Mr Missaoui du LCTP Hussen Dey pour son aide précieuse et ses conseils et orientations avisés. Je remercie l'entreprise CSCEC Algérie, d'avoir mis à ma disposition les moyens humains et matériels nécessaire à la réalisation d'une partie de mes essais dans leurs laboratoires du chantier « la grande mosquée d'Alger » ainsi que l'ingénieur Souad, mon amie. Je remercie le CNERIB d'avoir mis à ma disposition les moyens humains et matériels nécessaire à la réalisation d'une partie de mes essais dans leurs laboratoires, et particulièrement Mr Hakimi, Mr Benna, Mr El Hadj et Mr Bendaoud. Je remercie l'Ecole Militaire Polytechnique et particulièrement le commandant Boudiaf pour son aide dans la réalisation de l'analyse au Microscope électronique à balayage.

Enfin, je remercie le laboratoire LMGCE de m'avoir accueilli, à l'actif duquel est inscrit ce travail de recherche et dont le directeur a bénévolement et sans épargner aucun effort, contribué à la rédaction et la correction de mes articles et communications sans lesquels cette soutenance n'aurait pas eu lieu.

Je ne remercierai jamais assez toute ma famille, en particulier mes parents, mon mari et ma fille, ma sœur, mon petit frère et ma grand-mère pour leur soutien inestimable et pour leur patience infinie durant toutes ces années de travail.

Dédicaces

A la mémoire de mon grand-père BELFADEL Hacène.

A ma fille Meriem,

A mon père,

A ma mère,

A ma sœur Selma,

A mon frère Yacoub,

A ma nièce Sara,

A mon mari Djaffar,

A ma grand-mère,

Rim.

TABLE DES MATIERES

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale	14
Chapitre 1 : Revue bibliographique	
1. Introduction	18
2. Recyclage des matériaux issus de démolition	19
3. Recyclage des matériaux bitumineux	20
3.1. Retraitement en place	20
3.2. Recyclage en centrale	21
3.3. Expérience sur les bétons de fraisât	22
4. Etude à l'échelle du laboratoire sur les bétons de fraisât	24
5. Renforcements et ajouts divers	30
5.1. Ajout de fibres	30
5.2. Ajouts minéraux	31
Chapitre 2 : Identification des matériaux et formulations	
1. Introduction	36
2. Identification des constituants	36
2.1. Granulats naturels	36
2.2. Agrégats recyclés	37
2.3. Ciment	39
2.4. Adjuvants	42
2.5. Fibres de polypropylène	43
2.6. Fumée de silice	44
3. Procédure	45
3.1. Formulations	45
3.2. Préparations des spécimens	46
3.3. Tests et normes	47
Chapitre 3 : Effet du fraisât sur les caractéristiques mécanique d'un béton	
1. Introduction	49
2. Effet des fraisâts sur les propriétés des bétons	49
2.1. A l'état frais	49

2.2. A l'état durci	50
2.2.1. Masse volumique	51
2.2.2. Résistance en compression	53
2.2.3. Résistance en traction indirecte par fendage	60
2.2.4. Résistance en traction par flexion	66
• Relation expérimentale entre la résistance en compression et la résistance en traction	70
2.2.5. Module d'élasticité statique	71
2.2.6. Module d'élasticité dynamique	74
3. Conclusion	80

Chapitre 4 : Amélioration des propriétés mécaniques des bétons de fraisâts

1. Introduction	82
2. Amélioration de la résistance en compression des bétons de fraisâts	83
2.1 Par ajout des fibres de polypropylène	83
2.2 Par ajout de la fumée de silice	85
2.3 Choix du type d'ajout	91
3. Effet des fibres de polypropylène sur les autres propriétés mécaniques des bétons	94
3.1 Propriétés à l'état frais	94
3.2 Propriétés à l'état durci	96
3.2.1 Masse volumique des bétons durcis	96
3.2.2 Résistance en traction indirecte par fendage	98
3.2.3 Module d'élasticité statique	101
4. Indice de qualité élastique	103
5. Conclusion	105

Chapitre 5 : Modélisation

1. Planification factorielle des expériences.	107
1.1.Méthodologie	107
1.2.Interactions des paramètres	108
1.3.Application	110
1.3.1. Modélisation de la résistance en compression	111
1.3.2. Modélisation de la résistance en traction indirecte par fendage	114
1.3.3. Modélisation du module d'élasticité statique	117
1.4.Conclusion	118
2. Réseaux de neurones artificiels	

2.1.Introduction	118
2.2.Notions endamentales sur les réseaux de neurones artificiels	119
2.2.1. Le neurone formel	119
2.2.2. Les fonctions d'activation (transfert)	120
2.2.3. Architecture des RNA	121
2.2.3.1.Les RNA à fonctions radiales de base	121
2.2.3.2.Les RNA compétitifs (cartes auto organisatrices)	122
2.2.3.3.Les réseaux de neurones non bouclés (statiques)	123
2.2.3.4.Les réseaux de neurones bouclés (dynamiques)	123
2.2.4. L'apprentissage des réseaux de neurones	123
2.2.4.1.L'apprentissage supervisé	123
2.2.4.2.L'apprentissage non-supervisé	124
2.3.Application	124
2.3.1. Modèle utilisé	125
2.3.2. Base de données	126
2.4. Résultats et discussions	128
Conclusion générale et perspectives	133
Bibliographie	136

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Propriétés physiques et mécaniques des matériaux.	37
Tableau 2.2 Composition chimique du ciment.	39
Tableau 2.3 Résultats analyse de clinker- Décembre 2014.	40
Tableau 2.4 Résultats analyse de clinker- Décembre 2015.	41
Tableau 2.5 Résultats des analyses chimiques et physico-mécanique sur ciment-Décembre 2015	42
Tableau. 2.6 Propriétés du super plastifiant.	43
Tableau. 2.7 Propriétés des fibres de polypropylène.	44
Tableau 2.8. Propriétés de la fumée de silice.	44
Tableau 2.9 Formulations des bétons de fraisâts.	46
Tableau 3.1 Résistance en compression en fonction de l'introduction de fraisâts.	60
Tableau 3.2 Résistance en traction par fendage en fonction de l'introduction de fraisâts.	64
Tableau 3.3 Résistance en traction par flexion en fonction de l'introduction de fraisâts.	67
Tableau 3.4 Résultats des essais de détermination du module d'élasticité.	72
Tableau 3.5 Vitesse de propagation de l'onde ultrasonique en fonction du pourcentage de fraisâts.	77
Tableau 4.1. Résultats des essais de résistances en compression des bétons en fonction du taux de renforcement en fibres.	84
Tableau 4.2. Résultats des essais de résistances en compression des bétons en fonction du taux de fumée de silice.	86
Table 4.3. Equations traduisant la tendance linéaire entre le gain relatif de la résistance en compression et le pourcentage de fraisât.	91
Tableau 4.4. Résultats des essais de détermination de la masse volumique des bétons en fonction du taux de renforcement en fibres.	97
Tableau 4.5. Résultats des essais de résistances en fendage des bétons en fonction du taux de renforcement en fibres.	99
Tableau 5.1. Coefficients polynomiaux relatifs à la modélisation de la résistance en compression.	112
Tableau 5.2. Coefficients polynomiaux relatifs à la modélisation de la résistance en fendage.	115
Tableau 5.3. Coefficients polynomiaux relatifs à la modélisation du module d'élasticité.	117
Tableau 5.4. Fonctions de transfert.	120
Tableau 5.5. Paramètres du modèle.	126
Tableau 5.6. Modèles polynomiaux pour chaque étude.	127
Tableau 5.7. Résistance en compression en fonction de la taille de la base de données.	128

LISTE DES FIGURES

Fig. 1.1	Technique de thermo-recyclage a) schéma b) train de recyclage à chaud c) mise en œuvre sur une autoroute (Serfass, 2009).	21
Fig. 1.2	Matériel de recyclage courant a) granulateur à rouleaux b) crible à disques (SERFASS, 2009).	22
Fig. 1.3	Schéma des 8 structures testées sur le manège de fatigue LCPC (Revue Route, 2010).	23
Fig. 1.4	Mise en œuvre du béton de fraisâts sur l'aire des Châtaigniers (Revue RGRA, 2003).	24
Fig. 1.5	Raidissement des mortiers avec plastifiant (Mathias, 2005).	26
Fig. 1.6	Prise des mortiers témoins sans fraisâts et avec fraisâts (Mathias, 2005).	26
Fig. 1.7	Courbes isothermes (de -10°C à 40°C) béton de ciment témoin (Mathias, 2005).	27
Fig. 1.8	Courbes isothermes (de -10°C à 40°C) béton de ciment avec 90% de fraisâts (Mathias, 2005).	27
Fig. 1.9	Courbes isothermes (de -10°C à 40°C) grave bitume (Mathias, 2005).	28
Fig. 1.10	Comparaison des trois matériaux avec la représentation de Black (Mathias, 2005).	28
Fig. 2.1	Courbes granulométriques des granulats a) Gravier 15/25 b) Gravier 8/15 c) Sable.	37
Fig. 2.2	Agrégats de fraisât avant criblage.	38
Fig. 2.3	Courbe granulométrique du fraisât.	38
Fig. 2.4	Fibres de polypropylène utilisées.	43
Fig. 3.1	Masse volumique à l'état frais en fonction du pourcentage de fraisâts.	49
Fig. 3.2	Quantité d'adjuvant super plastifiant utilisée en fonction du pourcentage de fraisât.	50
Fig. 3.3	Masse volumique en fonction du pourcentage de fraisât a) E/C=0.50 b) E/C=0.60 c) E/C=0.70.	52
Fig. 3.4	Essai de compression a) Début de l'essai b) Fin de l'essai sur spécimen sans fraisât c) Fin de l'essai sur spécimen avec fraisât.	54
Fig. 3.5	Résistance en compression à 28j en fonction du pourcentage de fraisât.	55
Fig. 3.6	Image MEB a) zone de transition dans un béton témoin b) zone de transition dans un béton de fraisât.	56
Fig. 3.7	Image MEB a) matrice d'un béton témoin b) matrice d'un béton de fraisât.	57
Fig. 3.8	Evolution de la résistance en compression en fonction de l'âge du béton a) E/C=0.50 b) E/C=0.60 c) E/C=0.70.	58

Fig. 3.9 Schéma de l'essai de traction indirecte par fendage.	61
Fig. 3.10 Essai de traction indirecte par fendage.	61
Fig. 3.11 Résistance en traction par fendage à 28 jours en fonction du pourcentage de fraisât.	62
Fig. 3.12 Evolution de la résistance en traction en fonction de la durée de cure a) E/C=0.50 b) E/C=0.60 c) E/C=0.70.	65
Fig. 3.13 Essai de flexion à trois points.	66
Fig. 3.14 Résistance en traction par flexion à 28 jours en fonction du pourcentage de fraisât.	67
Fig. 3.15 Evolution de la résistance en traction par flexion en fonction de la durée de cure a) E/C=0.50 b) E/C=0.60 c) E/C=0.70.	69
Fig. 3.16 Relation entre la résistance en compression et la résistance en traction par fendage.	71
Fig. 3.17 Relation entre la résistance en compression et la résistance en flexion.	71
Fig. 3.18 Dispositif de l'essai de détermination du module d'élasticité.	72
Fig. 3.19 Résultats des essais de module d'élasticité à 28 jours en fonction du pourcentage de fraisât.	73
Fig. 3.20 Détermination du temps de propagation de l'onde ultra sonore.	75
Fig. 3.21 Vitesse de propagation de l'onde ultrasonique en fonction du pourcentage de fraisât à 28 jours.	76
Fig. 3.22 Relation expérimentale estimant la résistance en compression à partir de la vitesse de propagation de l'onde ultrasonique.	78
Fig. 3.23 Evolution du module d'élasticité dynamique en fonction de la durée de cure a) E/C=0.50 b) E/C=0.60 c) E/C=0.70.	79
Fig. 4.1 Effet des fibres de polypropylène sur la résistance en compression à 28 jours a) E/C=0.50 b) E/C=0.60 c) E/C=0.70.	85
Fig. 4.2 Résultats des essais de compression.	87
Fig. 4.3 Analyse MEB de l'interface a) granulats naturels-pâte de ciment sans FS b) granulats naturels-pâte de ciment avec FS c) agrégats de fraisât-pâte de ciment sans FS d) agrégats de fraisât-pâte de ciment avec FS.	89
Fig. 4.4 Gain relatif en résistance en compression en fonction du pourcentage de fraisât a) pour E/C=0.50 b) pour E/C=0.60 c) pour E/C=0.70	90
Fig. 4.5 Gain relatif en résistance en compression du aux ajouts à a) E/C=0.50 b) E/C=0.60 c) E/C=0.70	93

Fig. 4.6 Masse volumique à l'état frais en fonction du pourcentage de fraisâts a) sans fibres b) avec 0.1% de fibres c) avec 1% de fibres.	95
Fig. 4.7 Effet des fibres de polypropylène sur la masse volumique des bétons durcis à 28 jours.	96
Fig. 4.8 Effet des fibres de polypropylène sur la résistance en traction par fendage à a) E/C=0.50 E/C=0.60 c) E/C=0.70.	100
Fig. 4.9 Essai de module d'élasticité statique.	101
Fig. 4.10 Effet des fibres de polypropylène sur le module d'élasticité statique à a) E/C=0.50 b) E/C=0.60 c) E/C=0.70.	102
Fig. 4.11 Evolution de l'IQE en fonction du pourcentage de fraisât et du pourcentage de fibres.	104
Fig. 5.1 Evolution dans le temps des coefficients polynomiaux pour les domaines de I à V.	113
Fig. 5.2 Evolution dans le temps des coefficients polynomiaux pour les domaines de I à V.	116
Fig. 5.3 Schéma d'un neurone artificiel (Bouzidi, 2006).	119
Fig. 5.4 Schéma d'un neurone à fonction radiale de base.	121
Fig. 5.5 Architecture d'un réseau de neurones compétitifs (réseau de Kohonen).	122
Fig. 5.6 Schéma d'un réseau de carte auto organisatrice.	122
Fig. 5.7 Architecture du modèle.	125
Fig. 5.8 Performance de l'entraînement, de la validation et du test a) base de données initiale de 104 données b) base de données de 123 données c) Base de données de 315 données d) base de données de 1467 données e) base de données de 5307 données.	131

Introduction générale

L'Algérie compte un réseau routier important qui connaît un développement sans précédent. Le projet de l'autoroute Est-Ouest en est la preuve. Les chaussées en Algérie sont principalement de chaussées flexibles bitumineuses comportant une ou plusieurs couches de matériaux hydrocarbonés (type de chaussée culturellement ancré dans les mentalités Algériennes).

L'entretien des chaussées bitumineuses dégradées ou arrivées en fin de vie, passe généralement par un fraisage des couches supérieures ne répondant plus aux exigences en termes de résistances et déformations. Cette opération produit d'énormes quantités de fraisâts ; morceaux décohésionnés de grave bitume, de béton bitumineux semi grenu ou de béton bitumineux à module élevé, annuellement.

Les fraisâts ont longtemps été considérés comme déchet entreposés dans des aires de décharges. Plus récemment et dans les pays développés, les fraisâts sont quasi-systématiquement réutilisés pour la production de nouveaux matériaux. Cependant, dans les pays en voie de développement, seule une petite partie de ces fraisâts est réutilisée, selon des techniques de recyclage traditionnelles, pour la confection de nouveaux bétons bitumineux.

Durant la dernière décennie, les fraisâts ont été valorisés dans des bétons de ciment, donnant naissance aux bétons de fraisâts, dans une approche écologique respectueuse de l'environnement. En effet, les bétons de fraisâts sont des matériaux écologiques ; contribuant à la réduction de la demande en termes de granulats naturels de l'industrie du béton qui ne cesse de croître, le facteur écologique ayant désormais un poids aussi important que les facteurs économique, pratique et esthétique.

Les bétons de fraisâts sont constitués partiellement ou totalement d'agrégats de fraisâts. Ils sont généralement utilisés dans la construction de chaussées rigides. Plusieurs études et investigations ont été menées sur ces bétons de fraisâts. Les principaux résultats expérimentaux montrent que les bétons de fraisâts présentent un comportement rhéologique semblable à celui des bétons conventionnels et que les performances et les propriétés mécaniques des bétons de fraisâts en sont réduites et la faible interface entre l'agrégat de fraisât et la pâte de ciment en est la principale cause.

Les travaux inscrits dans cette thèse, constituent une contribution à la recherche sur les bétons de fraisâts destinés à la construction de chaussées rigide. Il s'agit de caractériser les propriétés mécaniques statiques et élastiques de bétons de fraisâts constitués d'une substitution partielle des granulats naturels par des fraisâts à 20%, 30%, 40% et 50%, à l'état frais et à l'état durci, tout en montrant l'effet de variation du rapport eau sur ciment. Deux ajouts ont été choisis, afin d'améliorer les propriétés des bétons de fraisâts ; l'un organique : les fibres de polypropylène, l'autre minéral : la fumée de silice.

Les deux ajouts sont envisageables et conviennent. Cependant, l'ajout des fibres de polypropylène sera privilégié car ces dernières ont la capacité de réduire le retrait des dalles en bétons de grandes surfaces directement exposées aux intempéries.

Afin de répondre aux objectifs fixés, nous avons structuré la thèse en six chapitres :

Le premier chapitre regroupe principalement l'état de connaissance sur le recyclage des fraisâts dans les applications les plus courantes puis dans les bétons de fraisâts. Les principaux résultats expérimentaux relatifs aux propriétés physiques, mécaniques et élastiques des bétons de fraisâts sont présentés. Le chapitre regroupe également les principaux résultats d'études de renforcement des bétons par divers ajouts ; organiques et minéraux.

Le deuxième chapitre présente les propriétés physiques et mécaniques des matériaux utilisés (agrégats, granulats, ciment, fibres de polypropylène, fumée de silice, adjuvant) ainsi que les formulations de bétons, la procédure suivie et la description des essais standards réalisés dans le cadre de la caractérisation à l'état frais puis à l'état durci ainsi que les essais au microscope électronique à balayage, réalisés dans le cadre de la caractérisation de la zone de l'interface critique.

Le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux de la caractérisation des bétons de fraisâts considérés accompagnés de commentaires, interprétations et conclusions diverses, dans le but de contribuer à mettre à la disposition des chercheurs plus d'informations sur les caractéristiques et propriétés de ces matériaux peu conventionnels.

Le quatrième chapitre présente les résultats expérimentaux de la caractérisation des bétons de fraisâts renforcés aux fibres de polypropylène, et à la fumée de silice, accompagnés de commentaires, interprétations et conclusions diverses. Puis, à la fin du chapitre, une estimation rapide de la qualité des matériaux étudiés pour une utilisation en route, est présentée à partir de l'indice de qualité élastique.

Le cinquième chapitre est consacré à la modélisation des propriétés mécaniques considérées en utilisant les plans factoriels et en utilisant les réseaux de neurones. Dans un premier temps, en utilisant les plans factoriels, l'effet des paramètres : pourcentage de fraisat et variation du rapport E/C sur les propriétés mécaniques des bétons, sera quantifié. Puis, il sera montré l'évolution dans le temps des effets des paramètres considérés sur la résistance en compression et la résistance en traction par fendage.

En développant un réseau de neurones de type « multilayered feed forward » avec un algorithme de type « back propagation », il a été possible de prédire la résistance en compression des bétons de fraisâts (sortie unique) des bétons de fraisâts, en introduisant six paramètres (06) en entrée. En appliquant la technique des plans factoriels, il a été possible de générer des données afin de construire des bases de données de taille différentes. Ainsi il a été montré l'influence de la taille de la base de données sur les résultats obtenus par le réseau de neurones.

Finalement, les principales conclusions sont présentées accompagnées de recommandations d'ordre général ainsi que les perspectives et les recommandations pour éventuellement des travaux futurs.

Chapitre 1 – Revue bibliographique

1. Introduction

Le béton est sans nul doute, le matériau le plus populaire et le plus utilisé de nos jours. Ses principes sont maîtrisés depuis l'Antiquité. Dès le II^{ème} siècle, les romains faisaient cuire le calcaire en le transformant en chaux vive, qu'ils mélangeaient avec des minéraux siliceux comme la brique et poudre de roche volcanique (pouzzolane). Ces matériaux sont réputés pour leur durabilité ; ils ont défié des siècles. Il est possible que les égyptiens aient utilisés une technique semblable pour « mouler » certains blocs des célèbres pyramides de Giseh en pierres artificielles, comme tente de le prouver une analyse publiée en 2011.

Le ciment fut associé aux armatures en 1848 par Joseph Lambot, ingénieur français, inventeur du ciment armé, qui donnera naissance au béton armé, avec son essai concluant de la barque (première structure en ciment armé) breveté en 1855. Même si Joseph Monier, jardinier de génie cherchant un moyen de produire des pots à orangers moins chers et plus résistants, est lui aussi considéré comme l'inventeur du béton armé. Il a déposé plusieurs brevets : notamment, en 1867, un brevet sur des caisses en ciment armé de fer pour l'horticulture.

A partir du 19^{ème} siècle, le béton et le béton armé n'ont cessé d'évoluer et de se développer. Il y a eu la grande étape des bétons à haute performance, ciblant des résistances de plus en plus élevées, puis les bétons à ultra haute performance et les bétons fibrés à ultra haute performance, répondant aux exigences architecturales les plus spectaculaires. Actuellement, ce sont les bétons autoplaçants qui sont les plus prisés, de par leur mise en œuvre sans aucun serrage, sous l'effet de leur propre poids et de leurs caractéristiques rhéologiques.

Le principal inconvénient de ce développement spectaculaire réside dans la consommation excessive et continue de matériaux naturels qui, à long termes, a eu un impact écologique négatif sur l'environnement. D'ailleurs, la production annuelle des bétons est estimée à 25 billions de tonnes soit l'équivalent de 3.8 tonnes par habitant (World Business Council for Sustainable Development). A partir de là, la nécessité de trouver un compromis entre la demande croissante en matériaux et matières premières et l'urgence de protéger un environnement a engendré de nouvelles techniques dites écologiques, basées sur la durabilité des matériaux.

2. Recyclage des matériaux issus de démolition

Afin de réduire la demande en termes de granulats naturels, leur substitution par des matériaux issus de la démolition constitue une piste intéressante à condition de résoudre les problèmes liés à l'hétérogénéité du matériau recyclé et étudier le comportement des matériaux résultants à long termes.

Des techniques de recyclages, plus innovantes les unes que les autres ont vu le jour, et n'ont cessé depuis de se développer. Réutiliser les matériaux et leur donner une seconde vie devient une pratique de plus en plus populaire, et de plus en plus courante dans un souci de préserver les matériaux naturels, et s'inscrire dans une démarche respectueuse de l'environnement. En effet, d'après Jones et son équipe (Jones et al., 2010) la quantité de granulats naturels consommée uniquement en Angleterre s'élève à plus de 270 millions de tonnes chaque année, 90% de cette quantité est destiné au domaine de la construction.

Cependant, un contrôle strict de la qualité peut contribuer à améliorer les propriétés de ces matériaux. Le BRMCA (British Ready Mixed Concrete Association) suggère que la réutilisation des agrégats issus de démolition augmenterait le dosage en ciment des nouveaux matériaux et diminuait leur durabilité et leur ouvrabilité. Ce dernier problème peut être corrigé à l'aide d'adjuvants super plastifiants (British Ready-Mixed Concrete Association, 2008).

Richardson et son équipe (Richardson et al., 2010 ; Richardson et Coventry, 2010) ont étudié entre autres, l'effet du lavage des agrégats issus de la démolition sur les performances des bétons obtenus. Ainsi, ils ont montré que ce prétraitement améliorerait les performances des bétons recyclés. Cependant, pour que ces derniers aient une qualité satisfaisante, des coûts supplémentaires doivent être envisagés ce qui n'est pas économiquement viable surtout dans le cas où les granulats naturels sont cédés à faible coût (Martin-Morales et al., 2011).

Selon « Design manual for roads and bridges » (Design manual for roads and bridges, 2007) trois classes d'agrégats recyclés peuvent être définis :

Matériaux recyclés de classe I : définissant les matériaux de qualité médiocre. Les matériaux de cette classe peuvent présenter des résistances relativement faibles et des taux élevés d'impuretés. Cette classe peut contenir jusqu'à 100% de briques ou de maçonnerie ou encore des bétons avec des taux élevés d'impuretés.

Matériaux recyclés de classe II : définissant des matériaux de meilleure qualité relativement, comprenant des bétons concassés avec un maximum de 10% de briques (pourcentage massique) mais

des taux d'impuretés plus faibles (moins de 1.5%). Dans certains cas, cette classe peut contenir un taux appréciable de granulats naturels.

Matériaux recyclés de classe III : définissant un mélange de matériaux avec au plus 50% de briques et des taux élevés d'impuretés.

3. Recyclage des matériaux bitumineux

Dans le paragraphe précédent, il a été abordé la question de réutilisation des matériaux de démolition, dans ce qui suit, nous allons nous intéresser à la réutilisation des matériaux de chaussées. En fait, tous les matériaux routiers sont recyclables (Serfass, 2009). Il existe plusieurs techniques de recyclage selon la nature du matériau à réutiliser, de son mode de traitement, et de la destination finale du produit résultant. Quel que soit le pays, le recyclage s'est développé plus tôt et plus vite dans les zones fortement urbanisées, confrontées à l'éloignement croissant des carrières et à la difficulté d'accès aux sites de décharge (Serfass, 2009).

3.1. Retraitement en place

Dans cette catégorie, nous retrouvons les diverses techniques de recyclage à chaud, où les étapes suivies sont le chauffage progressif des enrobés à traiter, la scarification et enfin la remise en place. Les principales techniques de recyclage sont: thermo reprofilage, thermo régénération, thermo recyclage, dites techniques thermo-R de recyclage (Fig. 1.1). Il y a aussi le recyclage à froid faisant généralement appel à l'émulsion de bitume, et sous les trois principales conditions : une épaisseur minimale de 5 cm, l'existence de tronçons homogènes assez longs et enfin l'absence d'obstacles dans la couche (regards, bouches à clés,...etc.). Les premiers chantiers remontent aux années 1970 aux États-Unis et 1980 en France (Serfass, 2009).

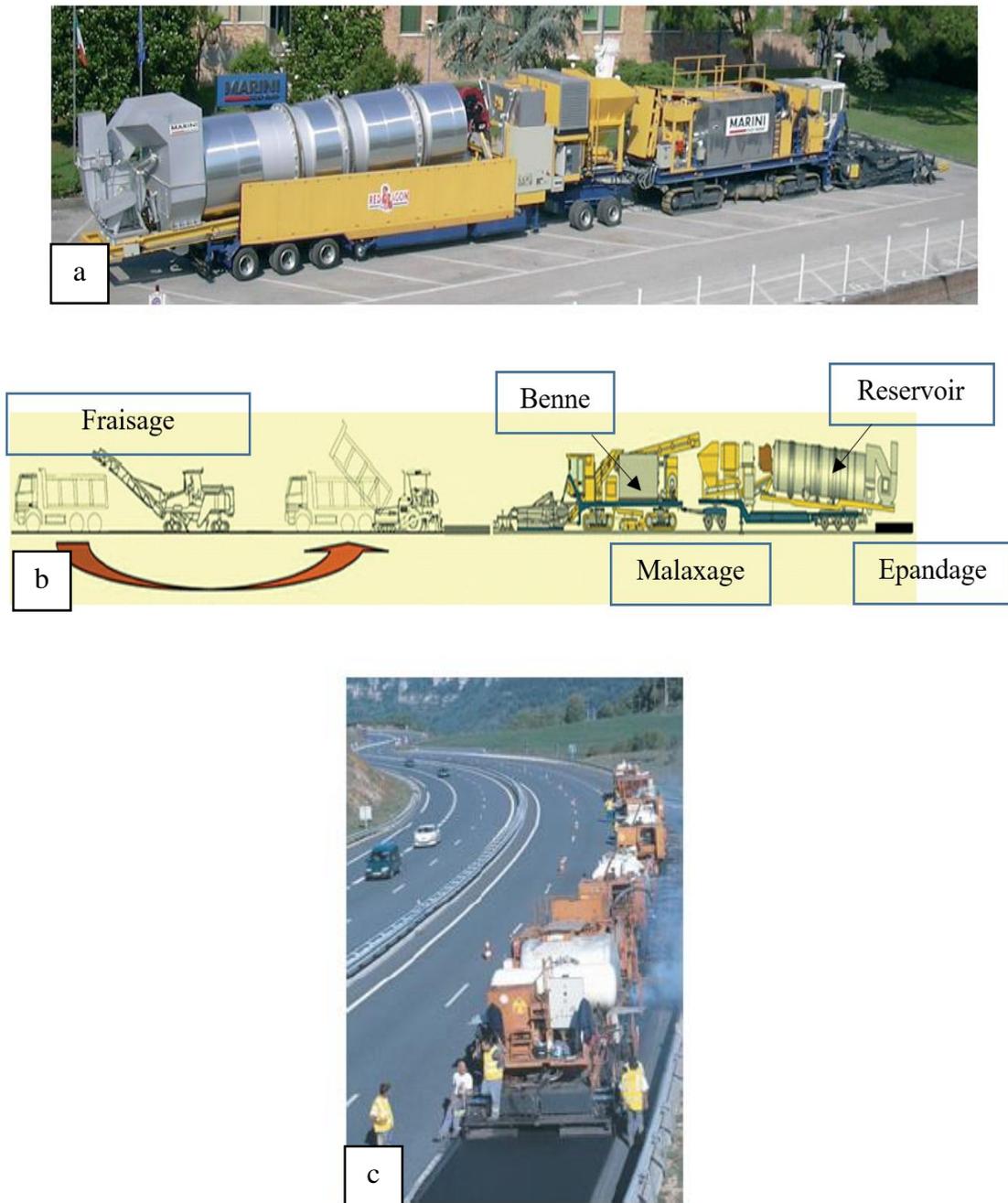


Fig. 1.1 Technique de thermo-recyclage a) schéma b) train de recyclage à chaud c) mise en œuvre sur une autoroute (Serfass, 2009).

3.2. Recyclage en centrale

Afin de retenir un ordre de grandeur sur les quantités d'enrobés réutilisés pour produire de nouveaux enrobés, nous présentons quelques chiffres : En France, la quantité d'enrobés produite chaque année est de 40 à 45 millions de tonnes. Chaque année, environ 6 millions de tonnes sont enlevées des chaussées, soit par fraisage, soit par relevage. En 2001, environ 40 % de cette quantité étaient réutilisés sans traitement, en accotements, sous-couches et chemins ruraux. Seulement 10 %

étaient recyclés dans de nouveaux enrobés. Aux Pays bas, les enrobés sont recyclés quasiment à 100 %, pays à peu près totalement dépourvu de granulats naturels. Aux États-Unis, la quantité totale d'enrobés enlevés annuellement des chaussées est d'environ 90 millions de tonnes. Un tiers, soit 30 millions de tonnes, est recyclé en enrobés (Serfass, 2009).

Deux types d'enrobés recyclés peuvent être obtenus :

– Les grandes opérations de fraisage où le « gisement » d'enrobés à recycler est bien identifié et homogène.

– Le recyclage « courant » (Fig.1.2) où les enrobés à recycler proviennent essentiellement de petits chantiers, soit après fraisage, soit après relevage de plaques d'enrobés, soit encore des surplus de production du poste.

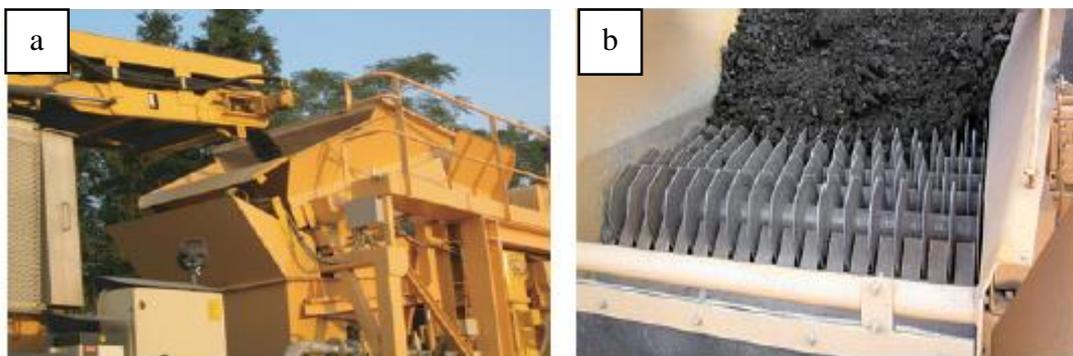


Fig. 1.2 Matériel de recyclage courant a) granulateur à rouleaux b) crible à disques (SERFASS, 2009).

3.3. Expérience sur les bétons de fraisât

Les canadiens ont depuis plusieurs années déjà, adoptés les diverses techniques de recyclage. La technique la plus courante est d'enlever la couche de roulement avec une partie de matériau blanc non lié de la couche au-dessous de la couche de roulement, malaxée puis mise en place en couche de fondation. Vient s'ajouter par-dessus la nouvelle couche d'enrobé. Le principal inconvénient de cette pratique est bien entendu une limitation des caractéristiques mécaniques de la chaussée. D'où la nécessité d'un traitement au liant hydraulique pour la stabilisation des couches.

Le recyclage des matériaux de chaussée est une pratique courante aux Etas Unis. Le comportement du béton de fraisât étant similaire au béton hydraulique en termes d'effet de température et humidité, la perte des performances de ces nouveaux matériaux est corrigée par l'utilisation d'adjuvant tels les fluidifiants pour augmenter la résistance ou encore les entraîneurs d'air ou cendres volantes pour la durabilité et la maniabilité.

Chapitre 1 – Revue bibliographique

En Autriche, seule l'autoroute entre Salzbourg et Vienne a fait objet de d'un chantier illustrant le recyclage de matériaux. En effet, il a été constaté que le béton de ciment d'origine, une fois fraisé et concassé, contenait jusqu'à 10 % de matériaux bitumineux. Or, il se trouve que le béton réalisé avec ces granulats présentait de bonnes résistance et de durabilité. Une étude a alors été menée dans ce sens, les résultats montrent bien sûr que plus le taux de recyclage est élevé et plus la résistance flexionnelle du béton est faible. Pour y remédier, les ingénieurs Autrichiens préfèrent baisser le rapport E/C jusqu'à 0,35 puis utilisent des plastifiants. Avec 100% de fraisât recyclé, le même niveau de résistance a pu être gardé (Mathias, 2005).

En France, un chantier expérimental a vu le jour, dans un cadre de projet de recherche « RECYROUTE » où il est question d'étudier les BFRCC (bétons de fraisât compacté fibré) et la grave ERTALH-enrobés recyclés traité au liant hydraulique- (Revue Travaux, 2011). Le schéma des huit (08) structures testées sur le manège de fatigue LCPC est montrée sur la Fig. 1.3. Outre la maintenance des chaussées et les mécanismes de dégradation, cette étude vise la durabilité des solutions à base de matériaux recyclés, la réparation des nouvelles chaussées urbaines et tous les équipements qui seront testés dans le cadre du projet Route de 5e génération (IFSTTAR,2013).

Un autre a été réalisé dans le cadre de l'aménagement du parc d'activités à Chanteloup-les-Vignes dans les Yvelines en 2010 (Revue Route, 2010) sur une route de 800 ml de largeur 7,5 mètres de largeur en trois tronçons différents : en béton classique de 18 cm d'épaisseur, en béton de fraisât de 18 cm et encore en béton de fraisât de 22 cm. Les formulations contenaient jusqu'à 40% de matériau recyclé. La Fig. 1.4 montre un autre chantier expérimental de l'aire des Châtaigniers (Revue RGRA, 2003).



Fig. 1.3 Schéma des 8 structures testées sur le manège de fatigue LCPC (Revue Route, 2010).



Fig. 1.4 Mise en œuvre du béton de fraisâts sur l'aire des Châtaigniers (Revue RGRA, 2003).

4. Etude à l'échelle du laboratoire sur les bétons de fraisât

L'intérêt des chercheurs pour les bétons confectionnés à partir d'agrégats recyclés en général et des agrégats de fraisâts en particulier ne cessent de croître, car ces matériaux sont économiques et écologiques (Sani et al., 2005). Beaucoup d'investigations et d'études ont été menées dans ce sens durant la dernière décennie afin de mieux comprendre le comportement de ces matériaux, et les caractériser pour arriver à utiliser un taux maximum de fraisât en substitution des granulats naturels avec un minimum d'impact sur les performances des bétons obtenus en termes de résistances mécaniques et élastiques.

Seulement, l'idée d'associer dans une même matrice, le bitume des fraisâts et les hydrates de ciments semble assez étrange. Pourtant, il y a bien interaction polymère - hydrates de ciment ; Jansen et son équipe (Jansen et al., 2013) ont démontré l'interaction entre le polymère ajouté et les ions Ca^{2+} , SO_4^{2-} et OH^- , ions dégagés lors de l'hydratation du ciment. Il a été remarqué moins de formation d'étringite (résultat de l'hydratation des aluminates) dû à la consommation du Ca^{2+} par le polymère. En fait, le polymère influe même sur la cinétique de précipitation de l'étringite. Les ions OH^- contenus dans le polymère et les ions SO_4^{2-} de la solution du mélange vont s'échanger. La diminution de la concentration des ions SO_4^{2-} dans la solution va accélérer la dissolution des sulfates de calcium, d'où l'augmentation de la concentration des ions de Ca^{2+} (ce qui accélère la réaction des silicates). L'augmentation de la concentration des ions SO_4^{2-} dans la solution va conduire à la dissolution de C_3A , alite et anhydre, et donc précipitation de l'étringite, CSH et portlandite. L'augmentation de la concentration des ions SO_4^{2-} conduit à une diminution de la concentration des ions de Ca^{2+} (ce qui retarde la réaction des silicates).

Erdem et Blankson (Erdem et Blankson, 2014) ont comparé les propriétés mécaniques des bétons confectionnés à partir de granulats naturels anguleux puis arrondis, à partir d'agrégats issus de la démolition et à partir de fraisât. Les résultats expérimentaux montrent tout d'abord, qu'à l'état frais l'ouvrabilité est fortement affectée par l'introduction d'agrégats recyclés. A l'état durci, une baisse considérable des résistances mécaniques lorsque les agrégats recyclés sont introduits est observée et la baisse la plus importante est observée sur les bétons confectionnés à partir de fraisât. Aussi, les auteurs indiquent que dans le cas où les graviers naturels sont utilisés, la rupture se produit dans les granulats, et lorsque les fraisâts sont introduits, la rupture se produit dans l'interface mortier-agrégat. Ces bétons sont indiqués pour des applications non structurelles.

Les auteurs rapportent que la faible interface entre l'agrégat de fraisât et la pâte de ciment est à l'origine de la réduction des performances et que le film bitumineux entre l'agrégat de fraisât et la pâte de ciment constitue une ligne de faiblesse privilégiant la rupture. Une analyse au microscope électronique à balayage (MEB) a été réalisée sur un échantillon de béton confectionné avec des fraisâts, mettant en avant cette zone de faiblesse.

Huang et son équipe (Huang et al., 2005) d'un autre côté, ont étudié quatre variantes différentes de béton de fraisât. La première variante représentant un béton témoin, la deuxième représentant le remplacement de la fraction grossière par la fraction grossière de fraisâts, la troisième représentant le remplacement de la fraction fine par la fraction fine de fraisât et la dernière représentant le remplacement total des granulats naturels par des fraisâts. Les principales conclusions sont telles que la résistance en compression et en traction par fendage ainsi que le module d'élasticité diminuait considérablement dans des bétons incorporant fraisâts et que plus le pourcentage de fraisât introduit est important, plus les résistances diminuaient mais plus l'indice de dureté augmentait. Aussi, les réductions sont minimales lorsque la fraction grossière des granulats naturels est remplacée par la fraction grossière de fraisâts.

Mathias (Mathias, 2005) a contribué à la recherche sur les bétons de fraisât en montrant tout d'abord la similitude entre les propriétés à l'état frais des bétons de fraisâts et des bétons conventionnels. Des essais de raidissement dans le temps et le temps de prise ont été réalisés et les résultats ont montré que les bétons de fraisâts présentent les mêmes caractéristiques rhéologiques que les bétons conventionnels. Les résultats sont montrés sur les Fig.1.5 et 1.6.

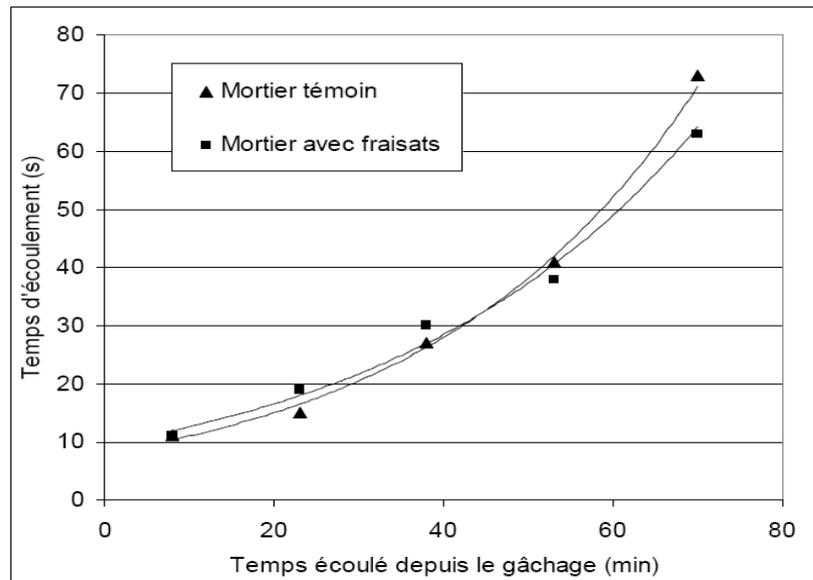


Fig. 1.5 Raidissement des mortiers avec plastifiant (Mathias, 2005).

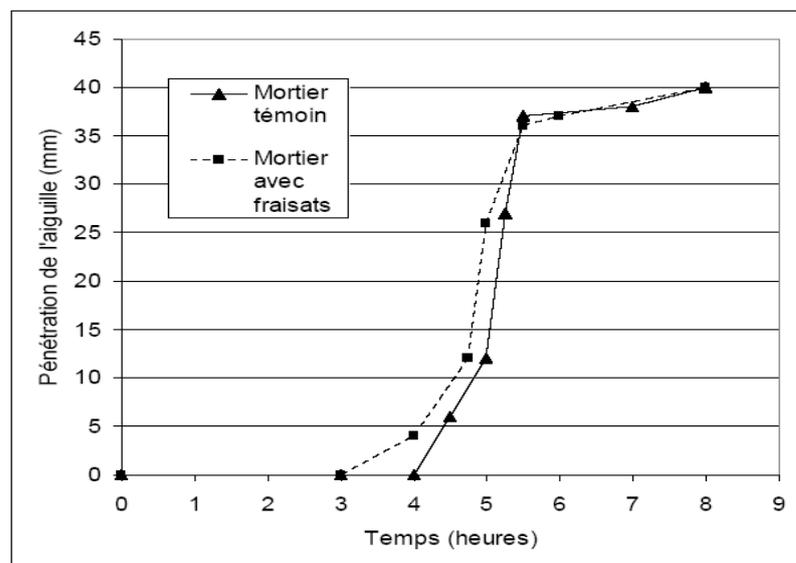


Fig. 1.6 Prise des mortiers témoins sans fraisats et avec fraisats (Mathias, 2005).

Ensuite, il a déterminé le comportement rhéologique des bétons de fraisats à l'état durci. A priori, ce matériau regroupe deux matériaux de familles distinctes et de comportement totalement différents ; le béton de ciment hydraulique au module d'élasticité élevé, élastique et à la grande rigidité, et au mode de rupture fragile et le matériau bitumineux recyclé (fraisât) au module d'élasticité complexe, souple, viscoélastique et au mode de rupture préventif. Des essais de module complexe ont été réalisés sur des bétons témoins, sur des bétons de fraisats (à un taux de 90%) et sur des graves bitumineuses. Les résultats obtenus sont repris par les figures suivantes (Fig. 1.7 à 1.10) et la conclusion est telle que le comportement élastique du béton de fraisât prime sur le comportement

Chapitre 1 – Revue bibliographique

visqueux et que les bétons de fraisâts présentent une thermo susceptibilité supérieure aux bétons conventionnels et inférieure aux enrobés bitumineux. De ce fait, les essais standards relatifs aux bétons conventionnels peuvent être envisagés afin de caractériser un tel matériau.

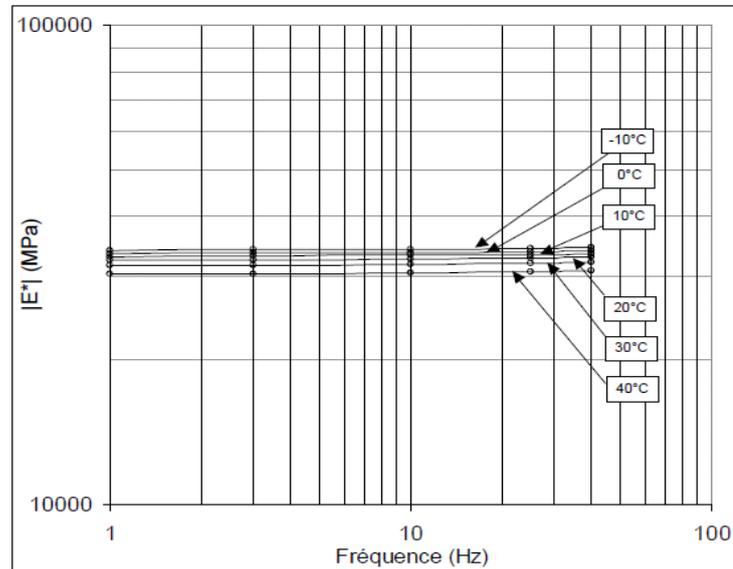


Fig. 1.7 Courbes isothermes (de -10°C à 40°C) béton de ciment témoin (Mathias, 2005).

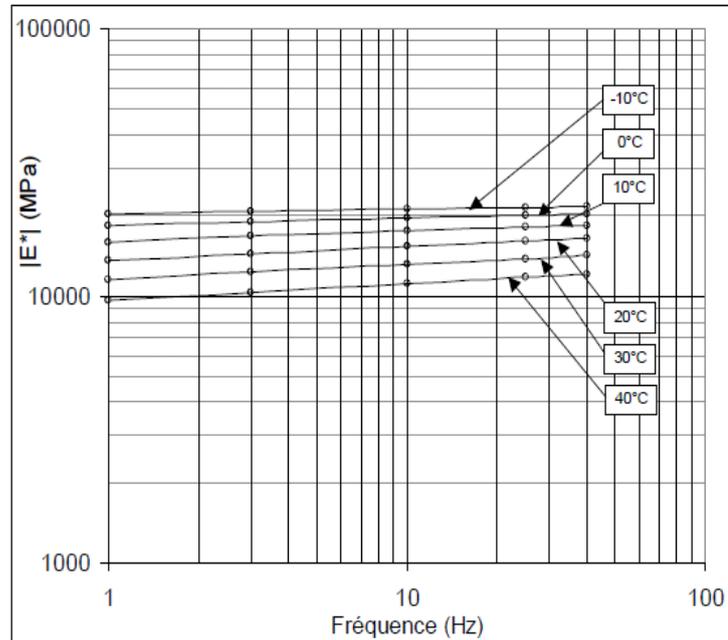


Fig. 1.8 Courbes isothermes (de -10°C à 40°C) béton de ciment avec 90% de fraisâts (Mathias, 2005).

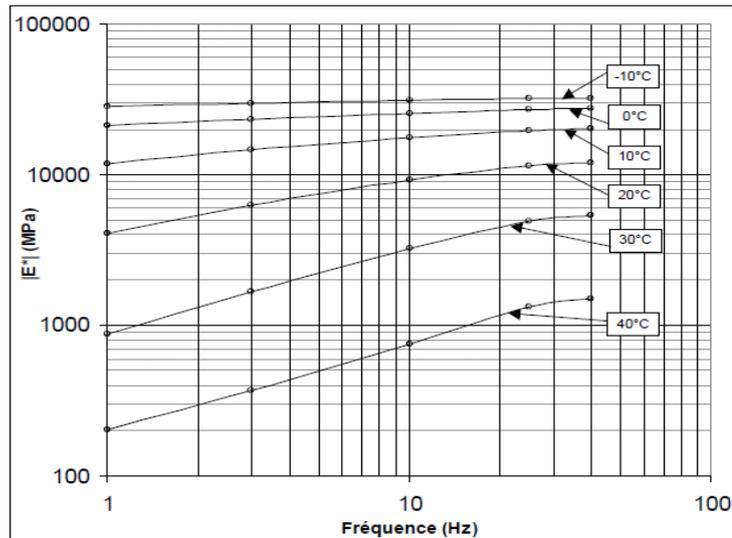


Fig. 1.9 Courbes isothermes (de -10°C à 40°C) grave bitume (Mathias, 2005).

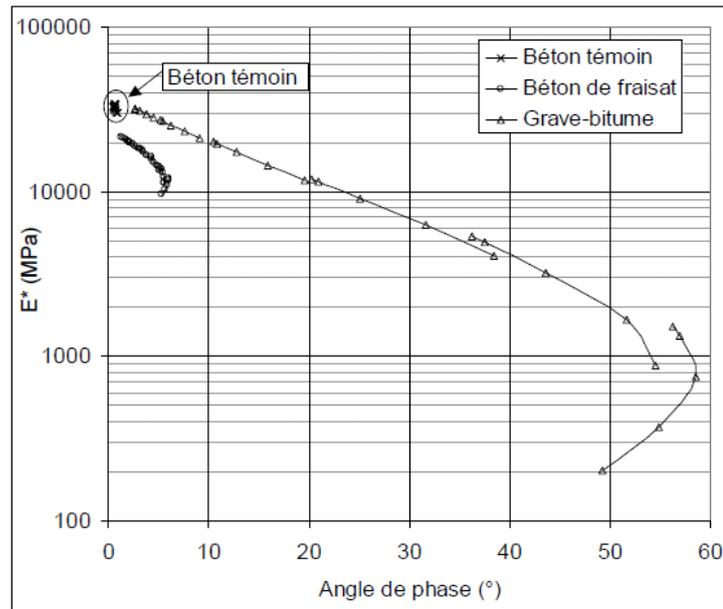


Fig. 1.10 Comparaison des trois matériaux avec la représentation de Black (Mathias, 2005).

Dans sa deuxième partie, Mathias a entrepris une campagne d'essai portant essentiellement sur la détermination des caractéristiques mécaniques statiques de bétons incorporant différents taux de fraisât (avec une légère correction de la granulométrie en sable fin) à savoir 0-15-30-60 et 100%. L'auteur a démontré que la granulométrie du fraisage ne change pas lors du malaxage, puis établi les formulations afférentes aux différents taux d'ajouts fixés.

Le dosage en ciment considéré est de 220 kg/m^3 (pour une utilisation en béton maigre de couche de fondation) et 330 kg/m^3 (pour une utilisation en couche de base ou de roulement).

Chapitre 1 – Revue bibliographique

Les essais entrepris sont réalisés à trois températures différentes (2°C, 20°C et 40°C) afin de mesurer la thermo-susceptibilité d'un tel matériau.

Les principales conclusions rapportées par l'auteur sont la baisse évidente des propriétés mécaniques statiques lorsque le taux de fraisât introduit augmente ; il y a baisse de la résistance en compression, en traction indirecte par fendage et une baisse du module d'élasticité statique. Aussi, les résultats montrent que cette baisse est en relation directe avec la température. En effet, chutes des résistances mécaniques sont observées aux températures les plus élevées et aux mélanges contenant les taux les plus élevés de fraisâts. Des résultats comparables ont pu être observés sur les spécimens de béton dosés à 220 kg/m³.

Une modélisation des propriétés mécaniques est proposée en considérant deux approches distinctes : l'une en considérant le modèle « bitume autour des granulats » puis l'autre, en considérant le modèle « bitume dispersé dans la matrice cimentaire ». La deuxième méthode étant celle qui traduit le mieux les propriétés mécaniques d'un béton de fraisât. Physiquement, ce modèle considère donc le bitume d'une manière analogue à l'eau ou à l'air ; c'est-à-dire que le béton de fraisât présente des propriétés statiques et mécaniques proche d'un béton de ciment classique de même formulation avec un volume d'eau supplémentaire $\beta' \cdot V_b$.

Dans la troisième partie, l'auteur aborde le comportement en fatigue du béton de fraisât, ainsi que le comportement vis-à-vis de la fissuration. Tout d'abord, l'augmentation du taux de fraisât implique une baisse de l'endurance du matériau ; la pente de fatigue est plus marquée, sa valeur à 90 % de fraisâts pouvant être considérée comme intermédiaire entre celle des matériaux cimentaires classiques et celle des enrobés bitumineux. Ensuite, l'incorporation de fraisât n'a pas d'influence notable sur le coefficient de dilatation des bétons étudiés et l'introduction de fraisât à un taux de 50 % ne modifie pas de façon notable le type de fissuration d'une couche de béton armé continu, il permet de considérer le béton de fraisât comme un béton classique.

Enfin, Mathias rapporte dans le cadre de sa thèse que Koliass (Koliass, 1996) a mis en avant la résistance de l'interface agrégat-pâte de ciment, qui dépend très fortement des propriétés du fraisât introduit, et a démontré une diminution certaine du module d'élasticité avec l'augmentation du pourcentage d'introduction du fraisât. Avec un ajout de 5% de ciment, sa valeur en est divisée par 4 entre 0 et 100% de fraisât introduit et que Pouliot et son équipe (Pouliot et al. 2002) ont voulu ramener l'influence des fraisâts introduits au pourcentage de bitume présent. Ils ont alors réalisé des essais sur deux groupes de matériaux différents : Groupe 1 : ajouts de pourcentage de fraisâts recyclés (gravillons

entourés de vieux bitume) à des taux 0-25-50-75-100% en masses. Groupe 2 : ajout de pourcentage de bitume vieilli à des agrégats secs (1-2-2,9-4,8-9,1%) en masses. Les résultats obtenus pour les deux groupes sont globalement les mêmes, mise à part une baisse moindre de la résistance en compression pour le Groupe 2 pour les bétons de jeune âge (7 jours) expliquée par le fait que le bitume pouvait accélérer le processus d'hydratation des ciments.

5. Renforcements et ajouts divers

Afin d'améliorer les performances des bétons en général, des ajouts peuvent être envisagés.

5.1. Ajout de fibres

Afin d'augmenter la durabilité et les performances des bétons d'une manière générale, qui restent des matériaux fragiles et peu résistants aux ouvertures et propagation de fissures, plusieurs ajouts sont possibles. Les fibres sont les ajouts les plus anciens et leur utilisation remonte aux temps bibliques (Brandt, 2008) citons les cheveux de chevaux, les paille et diverses fibres végétales. Plus récemment, dès les années 1900s, les fibres d'amiante ont été très utilisées. Ensuite, il y a eu les fibres de verre, proposées par les Biryukovichs (Biryukovich et al. 1965). L'ajout de fibres d'acier a été proposé pour la première fois dans des publications par Romualdi et son équipe (Romualdi et Mandel, 1964).

De nos jours, plusieurs types de fibres sont disponibles et sont très couramment utilisées : les fibres d'acier de différentes formes et différentes dimensions y compris les microfibrilles, les fibres de verre comme alkali-résistant, les fibres synthétiques en polypropylène, en polyéthylène ou en polyoléfine, les fibres de carbone...etc. (Brandt, 2008). Cependant, les fibres de polypropylène se démarquent des autres types de fibres de par leur non toxicité, leur facilité d'utilisation et de dispersion dans les mixes, leur caractère inerte à des pH élevés ; les fibres de polypropylène n'interagissent pas physico-chimiquement avec la pâte de ciment, mais présentent une excellente adhérence mécanique et très bonne durabilité (Abtahi et al., 2010 ; Tapin, 2008 ; Hannant, 1998) ainsi qu'un coût peu élevé.

Leur ajout dans les matériaux à matrice cimentaire, permet d'améliorer la résistance aux fissures de retrait au jeune âge des bétons courants (Alhozaimy et al., 1996 ; Grilli et al., 2013 ; Choi et Yuan, 2005). Cependant, les résultats rapportés dans la littérature, concernant l'effet de l'ajout des fibres de polypropylène sur les propriétés mécaniques des bétons divergent. Certains auteurs ont montré que l'introduction de ces fibres augmente les résistances en compression, d'autres auteurs ont rapporté qu'il n'y a pas d'effet significatif sur la résistance en compression ou sur la dureté, ou encore sur la résistance en flexion (Alhozaimy et al. 1996 ; Grilli et al., 2013).

Aussi, d'autres auteurs ont montré la diminution de la résistance en compression et en flexion, tandis que d'autres auteurs rapportent que ces fibres augmentent la résistance en traction et diminuent la résistance en compression (Alhozaimy et al., 1996 ; Choi et Yuan, 2005 ; Manolis et al., 1997).

Concernant la résistance aux chocs des dalles en bétons, les fibres de polypropylène l'augmentent d'une manière considérable, sans affecter les fréquences naturelles de la structure (Manolis et al., 1997).

L'ajout des fibres de polypropylène peut être combiné à d'autres ajouts afin d'en augmenter l'efficacité, tels que les cendres volantes, la fumée de silice, laitiers des hauts fourneaux où l'ajout combiné de fibres de polypropylène (à un pourcentage allant de 0,2 à 0,5%) et de la fumée de silice dans les bétons, augmente la capacité du matériau renforcé à absorber l'énergie cinétique, et un plus grand pourcentage de fibres de polypropylène introduit à de faibles taux de E/C, conduit à une augmentation de la résistance en compression, traction indirecte et traction par flexion (probablement dû à l'effet pozzolanique de la fumée de silice et à la capacité des fibres de réduire les fissures) et à une diminution de la conductivité électrique (Nili et Afroughsabet, 2010 ; Nili et Afroughsabet, 2012).

L'effet des fibres de polypropylène dépend du type de fibres, si mono filament ou fibrillé, de la longueur, du diamètre et de la formulation du béton. En effet, Banthia et Gupta (Banthia et Gupta, 2006) ont étudié l'effet du type de fibres sur le retrait. Les auteurs recommandent les fibres longues au diamètre petit pour une réduction optimale de la surface fissurée et de l'ouverture de fissure et les fibres fibrillés pour réduction optimale des fissures de retrait.

Remarque

Les résultats expérimentaux présentés dans cette partie restent valables pour le type de fibres utilisées dans les différentes études, car en effet il existe plusieurs types de fibres de polypropylène, de différentes longueurs, de différents diamètres, de différents modules d'élasticité et de différentes ténacités.

5.2. Ajouts minéraux

Afin d'améliorer les propriétés mécaniques des bétons, plusieurs ajouts sont possibles. Les cendres volantes, les laitiers des hauts fourneaux et la fumée de silice sont les ajouts minéraux, initialement sous-produits industriels, les plus utilisés.

La fumée de silice est obtenue pendant la production du silicium et des alliages de ferrosilicium sous forme de sphères de 50 à 200 nanomètres. Ces sphères contiennent principalement du SiO_2 et des quantités variables de Ca, Al, Na ainsi que des oxydes de K (considéré comme des pollutions).

Selon Toutanji et El Korchi (Toutanji et El Korchi, 1995), la première utilisation de la fumée de silice remonte à l'année 1963 en Norvège, ensuite son utilisation est devenue quasi systématique aux Amériques et en Europe au début des années 1980. L'auteur ayant étudié l'effet de la fumée de silice sur la résistance en compression des mortiers (en fonction du rapport E/C et de la quantité de super plastifiant). Les résultats expérimentaux des auteurs montrent que la résistance en compression augmente lorsque le rapport E/C diminue et que pour un rapport de E/C considéré, elle augmente lorsque le pourcentage de fumée de silice augmente.

Plusieurs autres recherches ont été menées afin de déterminer l'effet de la fumée de silice sur les propriétés des matériaux cimentaires d'une manière générale et sur les bétons d'une manière particulière. Concernant les propriétés à l'état frais des bétons, les résultats expérimentaux indiquent que la fumée de silice réduit l'ouvrabilité des bétons courant (Chung, 2002) mais n'affecte pas l'ouvrabilité des bétons haute performance (Duval et Kadri, 1998). Ainsi, une plus grande quantité d'adjuvant est nécessaire lorsque la fumée de silice est ajoutée. Ceci est dû à l'extrême finesse des particules dont la surface absorbe une quantité de l'adjuvant (Mazloom et al., 2004).

Les propriétés des bétons durcis sont aussi affectées par l'introduction de la fumée de silice. En effet, la fumée de silice augmente la résistance en compression ainsi que la résistance en flexion grâce à ses propriétés pozzolaniques qui améliore la résistance de la pâte de ciment (Duval et Kadri, 1998 ; Mazloom et al., 2004).

D'une manière générale, la fumée de silice améliore l'adhérence entre les différents constituants du béton, grâce à ses propriétés pozzolaniques par conséquent la résistance en compression entre 7 et 91 jours est significativement augmentée ; le gain relative en termes de résistance en compression due à l'introduction de la fumée de silice à environ 10% en remplacement du poids du ciment peut atteindre les 17% (Wong et Razak, 2005), ce qui est non négligeable. Cependant, la fumée de silice affecte moins la résistance en traction.

Aussi, la fumée de silice augmente la densité des bétons car elle occupe les vides (pores) présents entre la pâte de ciment et les granulats. La zone de transition étant plus dense, avec une épaisseur réduite, le module d'élasticité est amélioré (Siddique, 2011). D'un autre côté, la fumée de silice est efficace pour augmenter la capacité d'amortissement des matériaux ainsi que la capacité

d'absorption du son. Cette propriété est intéressante et pratique pour les chaussées rigides et les barrières anti bruit (Siddique, 2011).

La durabilité des bétons contenant de la fumée de silice est plus importante que celle des bétons conventionnels ; la perméabilité est réduite, la résistance au gel-dégel ainsi que la résistance au sulfate, sont améliorées (Khan et Siddique, 2001). Cependant, certains effets indésirables sont observés lorsque la fumée de silice est introduite dans les bétons ; à savoir, l'augmentation du retrait autogène et le retrait plastique à cause de la pression capillaire importante (Chung, 2002).

Durant ces dernières années, la fumée de silice a aussi été introduite comme ajout dans les bétons confectionnés à partir d'agrégats recyclés, dans le but d'en améliorer les propriétés fortement et négativement affectées par l'introduction des agrégats recyclés (agrégats issus de la démolition des constructions ou du fraisage des chaussées bitumineuses). Parmi les résultats expérimentaux rapportés dans la littérature, les résultats de Dilbas et son équipe (Dilbas et al. 2014) montrent que la résistance en compression au jeune âge (<7 jours), aussi bien des bétons conventionnels que des bétons confectionnés à partir d'agrégats recyclés issus de la démolition, diminue légèrement lorsque la fumée de silice est introduite et qu'en fait, l'effet pozzolanique de la fumée de silice n'agit qu'après 7 jours, et par conséquent la fumée de silice augmente la résistance en compression des bétons durcis après 7 jours. Cet effet est d'autant plus marqué dans les bétons contenant la fraction 4/12 mm (fraction fine) d'agrégats recyclés pour un même taux de fumée de silice. Concernant l'effet de la fumée de silice sur la résistance en traction, une augmentation continue et significative est observée pour les bétons confectionnés à partir d'agrégats recyclés, particulièrement ceux contenant la fraction 4/12 mm d'agrégats recyclés avec 10% de fumée de silice. Aussi, l'absorption en eau des bétons confectionnés à partir d'agrégats recyclés a significativement diminuée lorsque la fumée de silice a été ajoutée. Cet effet est d'autant plus marqué à 10% de fumée de silice plutôt qu'à 5% de fumée de silice (Dilbas et al., 2014).

Les résultats de Corinaldesi et Moriconi (Corinaldesi et Moriconi, 2009) montrent l'effet de l'ajout de la fumée de silice et l'effet de l'ajout des cendres volantes sur la résistance en compression des bétons confectionnés à partir d'agrégats recyclés (issus de la démolition), et comparé aux bétons de référence, confectionnés à partir de granulats naturels et sans ajout minéral. La fumée de silice augmente la résistance en compression à long termes des bétons confectionnés à partir d'agrégats recyclés tels que la résistance en compression des bétons conventionnels étant de 30 Mpa, la résistance en compression des bétons avec agrégats recyclé plus cendres volantes est de 30 Mpa aussi, la

résistance en compression des bétons avec agrégats recyclé sans ajout est de 25 Mpa et la résistance en compression des bétons avec agrégats recyclé plus fumée de silice est de 40 Mpa.

Aussi, certains chercheurs ont étudié l'effet combiné de divers ajouts. Nous rapporterons dans la partie suivante les principaux résultats expérimentaux relatifs à l'effet combiné de l'ajout des fibres de polypropylène et de la fumée de silice sur les propriétés mécaniques des bétons conventionnels et des bétons confectionnés à partir d'agrégats recyclés issus de la démolition des constructions.

L'ajout de la fumée de silice à des bétons conventionnels renforcés aux fibres de polypropylène permet une meilleure dispersion et d'une manière homogène, de ces fibres dans le mix. Nili et Afroughsabet (Nili et Afroughsabet, 2010) montrent à travers leurs travaux, que lorsque les fibres de polypropylène sont ajoutées à des bétons conventionnels à des taux de 0.2% à 0.5%, la résistance en compression augmente en général, et lorsque la fumée de silice est ajoutée à ces bétons fibrés, l'augmentation de la résistance en compression atteint 23 à 30% à 91 jours. Les auteurs expliquent que ceci est dû à l'effet pozzolanique de la fumée de silice et à l'effet des fibres dans la réduction des microfissures. Il en est de même de la résistance en traction par fendage et en flexion des bétons renforcés aux fibres de polypropylène à 0.5% avec ajout de fumée de silice. D'autres propriétés des bétons ont été étudiées par ces mêmes auteurs, et les résultats obtenus montrent que les bétons renforcés aux fibres de polypropylène et à la fumée de silice avaient une plus grande capacité à absorber l'énergie cinétique (Nili et Afroughsabet, 2010) et une résistance électrique plus faible (Nili et Afroughsabet, 2012).

Alhozaimy et son équipe (Alhozaimy et al., 1996) ont démontré que l'effet des fibres de polypropylène est d'autant plus important dans l'augmentation de la dureté en flexion et la résistance aux impacts lorsqu'elles sont combinées à des produits pozzolaniques (tels que la fumée de silice, les cendres volantes...).

Sur la base de cette revue bibliographique, il ressort qu'aucune étude ne s'est intéressée à l'influence des ajouts sur les propriétés des bétons de fraisâts. En effet, notre étude, s'inscrivant dans une démarche de développement durable inspirée du principe de donner une seconde vie aux choses, s'est intéressée à la réutilisation des agrégats de fraisâts dans les bétons de fraisâts, deux types d'ajouts ont été considérés ; l'un organique (fibres de polypropylène), l'autre minéral (fumée de silice) pour trois différents rapports de E/C et pour différents temps de cure (Larbi et al., 2019).

Chapitre 2 – Identification des matériaux et formulations

Chapitre 2 – Identification des matériaux et formulations

1. Introduction

Comme cité précédemment, l'intérêt des chercheurs pour les bétons de fraisât ne cesse de croître. Ces matériaux visant à réduire la demande en termes de granulats naturels de l'industrie des bétons en remplaçant totalement ou du moins partiellement les granulats naturels par des fraisâts. Les bétons de fraisâts sont utilisés pour la construction des chaussées rigides. Cependant, les performances des bétons de fraisâts sont moindres comparées aux performances des bétons conventionnels.

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats des essais d'identification des gravillons, sable et fraisât utilisés pour la confection des bétons, la composition chimique du ciment ainsi que les propriétés de l'adjuvant ajouté, des fibres de polypropylène et la fumée de silice utilisées. Les différentes formulations considérées, à partir de plusieurs taux de remplacement des granulats naturels par les fraisâts, avec un maximum de 50% pour trois rapports de E/C sont aussi présentées. La méthode de malaxage puis la mise en moule des spécimens et les conditions de cure sont aussi présentés et discutés.

Puis un ajout en fibres de polypropylène puis un ajout en fumée de silice est effectué dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques des bétons de fraisât.

2. Identification des constituants

2.1. Granulats naturels

Des graviers calcaires et entièrement concassés de deux classes granulaires 8/15 et 15/25 provenant de la région de El Hachimia (wilaya de Bouira) ont été utilisés. Les graviers sont denses selon les masses volumiques absolues obtenues (norme NF EN 1097-6), et présentent de bonnes caractéristiques mécaniques ; le coefficient de Micro Deval avec Eau (MDE-selon norme NA 457-1989) étant de l'ordre de 24% et le coefficient Los Angeles (LA- selon norme NA 458-1989) entre 22% et 27% ce qui acceptable pour une utilisation dans des bétons hydrauliques. Le coefficient d'absorption (norme NF EN 1097-6) est faible et donc conforme. Le sable utilisé est un sable concassé de classe granulaire 0/3 provenant de la même carrière de la région de El Hachimia (W.Bouira), présentant un Equivalent de Sable (ES-norme NF P 18-598) satisfaisant et indiquant un matériau propre. Son module de finesse de 3,07 est à la limite supérieure mais reste acceptable pour garantir des ségrégations limitées à la mise en œuvre et ne nécessite pas de correction en sable fin. Le coefficient d'absorption est aussi conforme. La teneur en liant du fraisât (déterminé selon NF EN 12697-1). Les caractéristiques physiques et mécaniques de tous les granulats sont rapportées sur le tableau 2.1. Aussi, la courbe granulométrique (selon norme NF P 18-560) des granulats concassés est montrée par la Fig. 2.1.

Chapitre 2 – Identification des matériaux et formulations

Tableau 2.1 Propriétés physiques et mécaniques des matériaux.

Désignation	Sable	G 8/15	G 15/25	Fraisât
Masse volumique apparente (t/m ³)	1.45	1.38	1.36	/
Masse volumique absolue (t/m ³)	2.64	2.64	2.65	2.40
Module de finesse	3.07	/	/	/
Equivalent de sable (%)	80	/	/	/
Pourcentage de fines (%)	7.5	/	/	/
Coefficient d'uniformité (Cu)	17.67	2.14	4.63	6.12
MDE (%)	/	24	/	37
LA (%)	/	27	22	25
Absorption (%)	1,65	1,13	1,23	/
Teneur en liant (%)	/	/	/	4.12

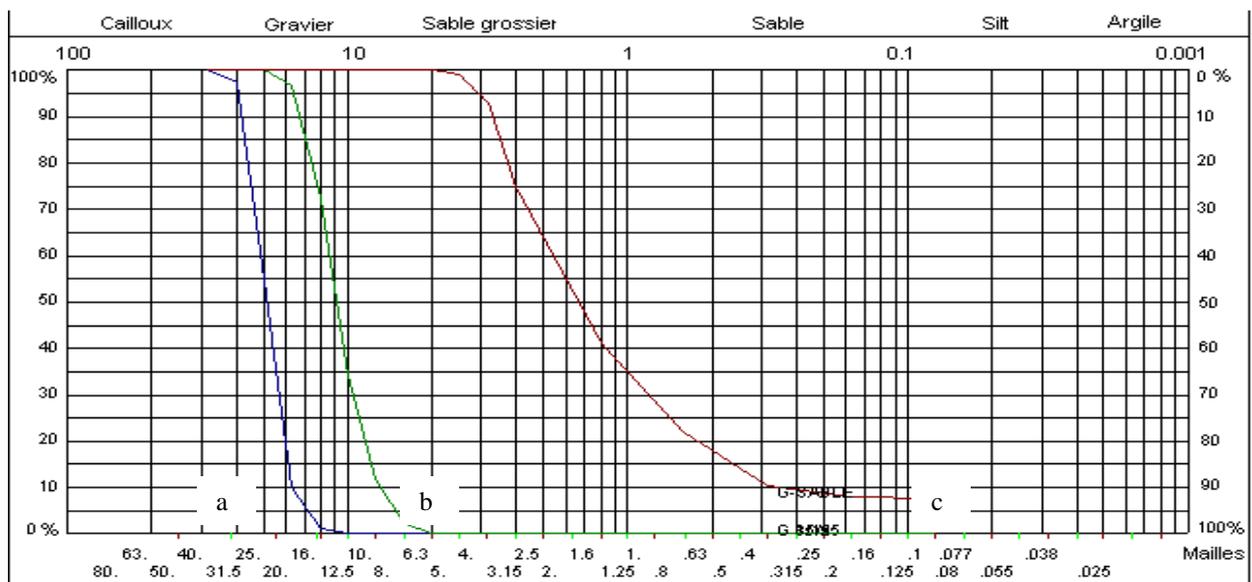


Fig. 2.1 Courbes granulométriques des granulats a) Gravier 15/25 b) Gravier 8/15 c) Sable.

2.2. Agrégats recyclés

Le fraisât utilisé est obtenu de l'entretien de la route de la nationale N°05 section de Beni Amrane (wilaya de Boumerdes). Cette route en fin de vie, a plus de trente (30) ans et n'a subi aucun entretien avant celui-ci. Le fraisât récupéré a été stocké et n'a subi aucun remaniement, ni aucun traitement mis à part un criblage à 20mm dans le seul but d'éliminer les éléments agglomérés de grandes dimensions pour éviter d'éventuels ségrégations (Fig. 2.2). La courbe granulométrique est montrée par la Fig. 2.3 Certains auteurs étudient le remplacement partiel de la fraction grossière ou de

Chapitre 2 – Identification des matériaux et formulations

la fraction fine par la fraction grossière ou fine de matériaux recyclés (Huang et al., 2005). Dans la présente étude, nous garderons la fraction grossière et la fraction fine, avec une granulométrie s'étalant de la maille 20mm à la plus petite maille de 0,08mm. Le fraisât utilisé est certes dense mais moins dense que les granulats naturels. Le coefficient MDE est de l'ordre de 37% et le coefficient LA est de l'ordre de 25%. Des essais complémentaires sur la nature des fines, la nature des pollutions ainsi que la minéralogie des agrégats de fraisat pourront éventuellement être considérés dans des études plus poussées.



Fig. 2.2 Agrégats de fraisât avant criblage.

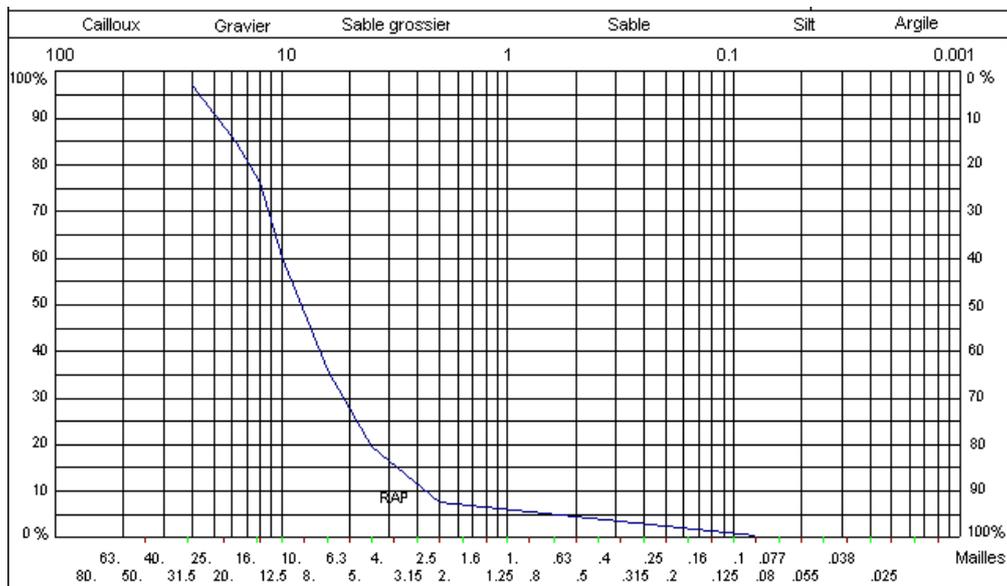


Fig.2.3 Courbe granulométrique du fraisât.

Chapitre 2 – Identification des matériaux et formulations

2.3.Ciment

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment CPJ CEM II/A de classe 42,5 provenant de la cimenterie de la région de Sour El Ghozlane du groupe GICA, répondant aux exigences de la norme NA 442 édition 2000. La composition chimique du ciment est donnée par le tableau 2.2.

Tableau 2.2 Composition chimique du ciment.

Ciment	Masse volumique (g/cm ³)	Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	CaO libre (%)	C ₃ S clinker (%)
CPJ CEM II/A 42.5	3.14	3997	19.38	4.18	3.28	60.55	2.14	0.57	0.18	1.06	59.70

La partie expérimentale ayant duré plus d'une année, la composition chimique ainsi que caractéristiques physico mécaniques du produit ont été régulièrement vérifiés ainsi que la composition du clinker. Les résultats du contrôle fourni par les laboratoires de la cimenterie de Sour El Ghozlane (W.Bouira) du groupe GICA sont rapportés sur les tableaux de 2.3 à 2.5. Les résultats montrent que le ciment présentent une composition stable et ce sur toute la période des essais.

Chapitre 2 – Identification des matériaux et formulations

Tableau 2.3 Résultats analyse de clinker- Décembre 2014.

Date de Prélèvement	Propriétés Chimiques							Composition Minéralogiques							Paramètres de Cuisson			
	SIO2	AL2O3	FE2O3	CAO	PAfeu	CaO libre	TOTAL	LSF	MS	MAF	C3S	C2S	C3A	C4AF	Poids au litre	IAC	TCM	AW
01/12/14	21.54	4.75	3.28	67.44	0.22	0.99	98.22	99.11	2.68	1.45	70.17	8.87	7.04	9.97	1259	4.13	1464	25.34
02/12/14	21.87	4.66	3.13	67.02	0.23	1.01	97.92	97.46	2.81	1.49	66.69	12.44	7.05	9.52	1206	4.03	1454	25.32
03/12/14	21.74	4.94	2.98	64.21	0.30	1.27	95.44	93.55	2.74	1.66	53.51	22.00	8.05	9.06	1262	3.13	1397	27.47
04/12/14	21.73	4.75	3.13	65.25	0.20	0.93	95.99	95.28	2.76	1.52	60.27	16.88	7.29	9.52	1287	3.59	1424	26.44
05/12/14	21.46	4.90	3.28	66.82	0.19	1.34	97.99	98.26	2.62	1.49	65.82	11.92	7.44	9.97	1220	3.78	1443	26.35
06/12/14	21.64	4.66	3.43	66.29	0.15	1.35	97.52	97.03	2.67	1.36	63.65	14.07	6.55	10.43	1211	3.75	1431	26.65
07/12/14	22.00	4.75	3.28	64.83	0.28	1.02	96.16	93.50	2.74	1.45	55.93	20.93	7.04	9.97	1207	3.29	1400	27.75
08/12/14	21.98	4.75	3.28	66.29	0.21	0.92	97.43	95.68	2.74	1.45	62.43	15.97	7.04	9.97	1264	3.67	1429	26.76
09/12/14	21.56	4.75	3.28	64.62	0.40	0.92	95.53	94.88	2.68	1.45	58.82	17.48	7.04	9.97	1258	3.46	1413	27.07
10/12/14	21.82	4.75	3.13	65.25	0.66	1.24	96.85	94.93	2.77	1.52	58.32	18.60	7.29	9.52	1305	3.47	1415	26.79
11/12/14	21.03	4.75	3.13	65.77	0.30	1.06	96.04	98.87	2.67	1.52	67.18	9.66	7.29	9.52	1235	4.00	1455	25.00
12/12/14	21.41	4.73	3.28	64.94	0.53	1.35	96.24	95.98	2.67	1.44	59.65	16.43	6.98	9.97	1202	3.52	1417	26.80
13/12/14	21.72	4.73	2.98	64.25	0.37	1.27	95.32	94.02	2.82	1.59	55.24	20.64	7.49	9.06	1204	3.34	1407	26.64
14/12/14	22.41	4.75	3.13	64.00	0.42	0.98	95.69	90.93	2.84	1.52	49.81	26.72	7.29	9.52	1441	2.96	1377	28.41
15/12/14	22.38	4.85	3.13	64.21	0.15	1.17	95.89	91.18	2.80	1.55	49.44	26.90	7.56	9.52	1330	2.90	1374	28.71
16/12/14	21.97	4.85	3.28	65.56	0.67	1.41	97.74	94.51	2.70	1.48	56.87	20.13	7.30	9.97	1210	3.29	1403	27.86
17/12/14	22.23	4.75	3.58	64.21	0.45	0.81	96.03	91.50	2.67	1.33	52.08	24.49	6.53	10.88	1394	2.99	1373	29.47
18/12/14	21.65	4.75	3.58	65.35	0.50	1.06	96.89	95.33	2.60	1.33	60.11	16.77	6.53	10.88	1210	3.45	1409	27.93
19/12/14	21.86	4.75	3.13	64.21	0.54	1.10	95.59	93.26	2.77	1.52	54.35	21.71	7.29	9.52	1254	3.23	1398	27.41
20/12/14	21.68	4.94	3.73	65.46	0.27	1.34	97.42	94.93	2.50	1.32	57.70	18.67	6.78	11.34	1286	3.18	1392	29.31
21/12/14	21.30	4.75	3.43	64.73	0.10	1.06	95.37	95.93	2.60	1.38	60.46	15.50	6.78	10.43	1313	3.51	1416	27.17

Chapitre 2 – Identification des matériaux et formulations

22/12/14	22.05	4.66	3.43	66.82	0.18	1.26	98.40	96.19	2.73	1.36	63.06	15.69	6.55	10.43	1305	3.72	1428	26.97
23/12/14	21.47	4.75	2.98	63.68	0.35	1.02	94.25	94.12	2.78	1.59	55.70	19.58	7.55	9.06	1304	3.35	1408	26.48
24/12/14	21.89	4.85	3.28	64.73	0.32	1.34	96.41	93.61	2.69	1.48	54.38	21.78	7.30	9.97	1325	3.15	1392	28.19
25/12/14	22.00	4.75	3.13	64.94	0.30	1.13	96.25	93.79	2.79	1.52	56.14	20.77	7.29	9.52	-	3.34	1406	27.22
26/12/14	21.81	4.66	3.88	65.25	0.26	1.18	97.04	94.44	2.55	1.20	58.18	18.69	5.78	11.80	-	3.3	1391.6	29.1

Tableau 2.4 Résultats analyse de clinker- Décembre 2015.

	Propriétés Chimiques							Composition Minéralogiques							Paramètres de Cuisson			
	SIO2	AL2O3	FE2O3	CAO	PAfeu	TOTAL	LSF	MS	MAF	CaO libre	C3S	C2S	C3A	C4AF	Poids au litre	IAC	TCM	AW
01/12/2015	21.15	5.33	3.52	66.04	0.33	96.37	97.41	2.39	1.51	1.31	61.89	13.99	8.17	10.70	1235	3.28	1413	28.71
02/12/2015	21.46	5.14	3.67	64.91	0.30	95.48	94.71	2.44	1.40	1.15	56.65	18.83	7.41	11.16	1214	3.05	1387	29.67
06/12/2015	21.37	5.33	3.67	65.21	0.48	96.06	95.18	2.37	1.45	1.05	57.69	17.79	7.91	11.16	1225	3.02	1390	29.97
07/12/2015	21.05	5.24	3.81	65.73	0.30	96.13	97.23	2.33	1.38	1.16	62.19	13.48	7.44	11.58	1220	3.27	1406	29.34
08/12/2015	21.46	5.05	3.67	65.21	0.33	95.72	95.29	2.46	1.38	1.18	58.35	17.55	7.17	11.16	1169	3.18	1395	29.18
09/12/2015	21.77	4.96	3.67	64.70	0.95	96.05	93.50	2.52	1.35	1.35	53.83	21.85	6.93	11.16	1138	2.98	1376	29.80
10/12/2015	21.35	5.14	3.67	65.73	0.29	96.18	96.33	2.42	1.40	1.09	61.07	15.19	7.41	11.16	1179	3.29	1407	28.95
11/12/2015	21.33	5.14	3.52	65.32	0.31	95.62	95.95	2.46	1.46	0.98	60.21	15.77	7.67	10.70	1162	3.28	1408	28.56
12/12/2015	21.74	5.05	3.52	64.80	0.33	95.44	93.75	2.54	1.43	1.83	52.12	23.05	7.43	10.70	1133	2.88	1372	29.78

Chapitre 2 – Identification des matériaux et formulations

Tableau 2.5 Résultats des analyses chimiques et physico-mécanique sur ciment-Décembre 2015

Résultats des essais chimiques		
Oxydes	Pourcentage (%)	Tolérance
SiO ₂	19.16	---
Fe ₂ O ₃	3.06	---
Al ₂ O ₃	4.46	----
CaO	62.26	----
CaO libre	0.43	< 01
MgO	2.19	---
Résidu insoluble	1.17	< 10
SO ₃	2.24	< 3.50
P.A.F	6.02	-----
Résultats des essais physico mécaniques		
Consistance normale (%)	25	/
Début de prise (mm)	170	60
Fin de prise (mm)	255	/
Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)	3995	/
Refus à 45µm (%)	30.10	/
Expansion (mm)	1.00	<10

2.4.Adjuvants

Les bétons confectionnés à partir de matériaux recyclés nécessitent une correction de l'ouvrabilité qui est affectée par l'introduction de ces matériaux recyclés. D'où la nécessité d'utiliser un adjuvant correcteur de l'ouvrabilité. Le produit utilisé est « viscotempocrete 12 » fourni par l'entreprise SIKA Algérie. C'est un adjuvant super plastifiant avec maintien de la rhéologie sur plusieurs heures. Les propriétés du super plastifiant sont mentionnées sur le tableau 2.6. Les quantités nécessaires sont déterminées par une suite d'essais successifs visant à obtenir une ouvrabilité satisfaisante. Un béton plastique de classe S3 est visé afin de garantir une mise en œuvre facile des dalles en béton de grandes surfaces.

Chapitre 2 – Identification des matériaux et formulations

Tableau. 2.6 Propriétés du super plastifiant.

Désignation	Super plastifiant
Couleur	Brun
Densité	1.06±0.01
PH	6±1
Teneur en Na ₂ O Eq. (%)	≤1
Extrait sec (%)	30.2±1.3
Teneur en ions Cl ⁻ (%)	≤0.1
Dosage recommandé (%)	0,2 à 3 % du poids du liant

2.5.Fibres de polypropylène

Des fibres de polypropylène (FP) ont été ajoutées dans un but de renforcement. Les fibres utilisées sont de type BELMIX fournis par l'entreprise AFITEX Algérie (Fig. 2.4). Ces fibres sont destinées à être incorporées à une matrice de béton afin de constituer un matériau homogène et de maîtriser le retrait. De par leur diamètre de 34µm permet de se disperser facilement dans la matrice pour former un réseau multidirectionnel dans le but de maîtriser le retrait et d'améliorer la cohérence du matériau. Ces fibres de polypropylène sont recommandées pour la construction de dallages industriels, pour les éléments préfabriqués et les travaux routiers. Les propriétés physiques et mécaniques de ces fibres sont rapportées dans le tableau 2.7. Les dosages recommandés par le fournisseur sont 900 ou 600 g/m³.



Fig. 2.4 Fibres de polypropylène utilisées.

Chapitre 2 – Identification des matériaux et formulations

Tableau. 2.7 Propriétés des fibres de polypropylène.

Désignation	Valeurs
Diamètre (μm)	34
Longueur (mm)	12
Elongation (%)	200
Masse volumique (g/cm^3)	0.91
Module de Young (MPa)	3750
Ensimage (%)	1
Point de fusion ($^{\circ}\text{C}$)	>164
Humidité max (%)	3
Ténacité (Cn/Tex)	30

2.6.Fumée de silice

La fumée de silice (FS) utilisée est de type ultra fine S95DM Sika El Djazair, dont les propriétés sont rapportées sur le Tableau 2.8.

Tableau 2.8. Propriétés de la fumée de silice.

Désignation	Fumée de silice
Densité	0.40 à 0.45
Densité réelle (hélium)	2.24
Teneur en SiO_2	95%
Teneur en Na_2O	0.60%
Teneur en SiC	1.50%
Teneur en C libre	1.50%
Teneur en S total	0.10%
Teneur en oxydes (Fe ,Al, Mg ,Ca)	1.00%
Teneur en Cl^-	0.06%
Surface spécifique (m^2/g)	23
Dosage recommandé	5 à 10 % Poids du ciment

Chapitre 2 – Identification des matériaux et formulations

3. Procédure

3.1. Formulations

La composition granulaire des bétons témoins a été réalisée selon la méthode classique de Dreux Goriss. Ces bétons témoins seront notés BF 0% où uniquement des granulats naturels sont utilisés. Les pourcentages retenus sont 45% sable concassé, 25% de gravier 8/15 et 30% de gravier 15/25. La résistance en compression ciblée pour cette formulation est de 20 MPa. Le dosage en ciment est de 330 kg/m^3 , c'est le dosage usuel pour les couches supérieures de chaussées rigides.

Les formules intermédiaires comporteront un remplacement partiel des granulats naturels par des fraisâts à 20-30-40 et 50% où la méthode de l'interpolation volumique a été appliquée. Ces formules seront appelées BF 20%- BF30%- BF 40% et BF 50%. Etant donné que les propriétés mécaniques et physiques des bétons de fraisâts baissent lorsque le pourcentage de fraisât augmente dans le mix, de ce fait, il ne nous a pas semblé nécessaire d'étudier les bétons contenant de forts taux de fraisâts (c'est-à-dire, limiter le pourcentage de substitution partielle des granulats naturels à la moitié soit 50%).

Afin de démontrer l'importance de l'influence du rapport E/C, trois valeurs (E/C) sont considérés : 0,50-0,60 et 0,70, valeurs usuellement utilisées. Le rapport de gravier sur sable (G/S) est maintenu constant est égal à 1.69. Le détail des quantités utilisées par mètre cube est rapportée sur le tableau 2.9.

Les fibres de polypropylène (FP) sont introduites à deux dosages ; l'un de 0.1% ce qui représente un dosage usuel recommandé par le fournisseur, l'autre de 1% ce qui est un dosage élevé utilisé à des fins de recherche. Elles sont introduites avec les granulats et agrégats ainsi que le ciment à sec. Ces ingrédients étant malaxés, l'eau est introduite ainsi que l'adjuvant. Concernant l'ajout de la fumée de silice (FS), elle est introduite à deux dosages ; l'un de 10% ce qui représente un dosage usuel, l'autre de 15% ce qui est un dosage élevé utilisé à des fins de recherche. Elle est introduite en même temps que le ciment.

Remarque : Dans un premier temps, les FP sont ajoutées comme renforcement. Dans un second temps, la FS est ajoutée en renforcement mais à part et non en même temps que les FP.

Chapitre 2 – Identification des matériaux et formulations

Tableau 2.9 Formulations des bétons de fraisâts.

Désignation		BF 0%	BF20%	BF 30%	BF 40%	BF 50%
Ciment (Kg)		330	330	330	330	330
Graviers (Kg)		1192	952	832	716	596
Sable (Kg)		704	564	492	424	352
Rapport G/S		1.69	1.69	1.69	1.69	1.69
Fraisât introduit (%)		0	20	30	40	50
E/C=0.50	Eau (Kg)	168	168	168	168	168
	Adjuvant (Kg)	5.8	9.6	10.2	11.6	14
E/C=0.60	Eau (Kg)	200	200	200	200	200
	Adjuvant (Kg)	2.0	2.8	3.4	4.4	7.8
E/C=0.70	Eau (Kg)	231	231	231	231	231
	Adjuvant (Kg)	1.2	2.0	2.0	2.4	3.4
FP (%)				0-0.1-1		
FS (%)				0-10-15		

3.2. Préparations des spécimens

Pour le malaxage des ingrédients, la méthode « two steps mixing approach » a été adoptée (Vivian, 2005). Elle consiste à introduire tous les agrégats dans le malaxeur puis à les mélanger à sec pendant soixante (60) secondes. La moitié de la quantité d'eau est ajoutée (avec l'adjuvant) et le tout est mélangé pendant soixante (60) autres secondes. Ensuite le ciment est ajouté et l'ensemble est de nouveau mélangé pendant trente (30) secondes. Enfin le reste de l'eau est ajouté et le tout est encore une fois mélangé pendant cent vingt (120) secondes.

Après le malaxe, le béton est mis en place dans des moules cylindriques de dimensions 16cm x 32cm en trois (03) couches, puis serré par piquage à raison de vingt-cinq (25) coups par couche pour les essais de compression, de traction par fendage et de module d'élasticité. Pour les besoins des essais de flexion, des spécimens prismatiques ont aussi été confectionnés de dimension 60cmx15cmx15cm, serré également par piquage en deux couches de faibles épaisseurs. Les spécimens sont laissés dans leurs moules pendant quarante-huit heures, puis laissés pour une cure sous l'eau dans des conditions de laboratoire à 20°C. Les éprouvettes sont écrasées à 3-7-14-28 et 91 jours pour tous les essais sauf les pour le module d'élasticité où les éprouvettes sont écrasées à 28 jours seulement.

Chapitre 2 – Identification des matériaux et formulations

3.3. Tests et normes

La rhéologie des bétons de fraisâts étant similaire à la rhéologie des bétons conventionnels (Mathias, 2005), les tests standards relatifs aux bétons conventionnels ont été appliqués.

Essais pour la détermination des propriétés à l'état frais

- Essai d'affaissement au cône d'Abrams selon la norme NF EN 12350-2 (1999)
- Essai de détermination de la masse volumique à l'état frais selon la norme NF EN 12350-6 (1999)

Essais Pour la détermination des propriétés à l'état durci

- Essai de détermination de la masse volumique des bétons durcis selon la norme NF EN 12390-7 (2001)
- Essai de détermination de la résistance en compression selon la norme NF EN 12390-3 (2003)
- Essai de détermination de la résistance en traction indirecte par fendage selon la norme NF EN 12390-6 (2001)
- Essai de détermination du module d'élasticité statique selon la norme ISO 1920 (2010)
- Essai de détermination de la résistance en flexion selon la norme NF EN 12390-5 (2001)
- Essai de détermination du module dynamique par la méthode des ultrasons basée sur la théorie des propagations des ondes P, selon NF P 18-418 (1999) pour le temps de mesure des ondes, et NF EN 12504-4 (2005) pour la mesure de la vitesse de propagation de l'onde puis la détermination du module d'élasticité dynamique en appliquant l'équation 2.1 où V_{p1} est la vitesse de propagation de l'onde longitudinale à une dimension, E_d est le module dynamique et ρ la densité.
- La confection des éprouvettes a été réalisée conformément à la norme NF EN 12390-2 (2001).

$$V_{p1} = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (2.1)$$

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

1. Introduction

Dans ce qui suit, nous allons déterminer l'effet de la substitution partielle des granulats naturels par des agrégats de fraisâts, sur les propriétés mécaniques des bétons, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

2. Effet des fraisâts sur les propriétés des bétons

L'effet de l'introduction des fraisâts sur les propriétés des bétons est montré dans ce qui suit :

2.1.A l'état frais

Les essais réalisés sont : la détermination de la masse volumique à l'état frais et l'affaissement au cône d'Abrams.

La Fig. 3.1 montre la variation de la masse volumique à l'état frais en fonction du pourcentage de fraisât et ce pour les trois rapports de E/C. Elle varie de 2422.85 kg/m³ pour les BF 0% à 2305.75 kg/m³ pour les BF 50%, et ce lorsque le rapport de E/C est de 0.50, ce qui représente une baisse relative de 4.8% seulement. Le même ordre de grandeur est obtenu pour les autres rapports de E/C. Cette faible réduction est probablement due au fait que la masse volumique absolue des fraisât est inférieure à la masse volumique des graviers naturels.

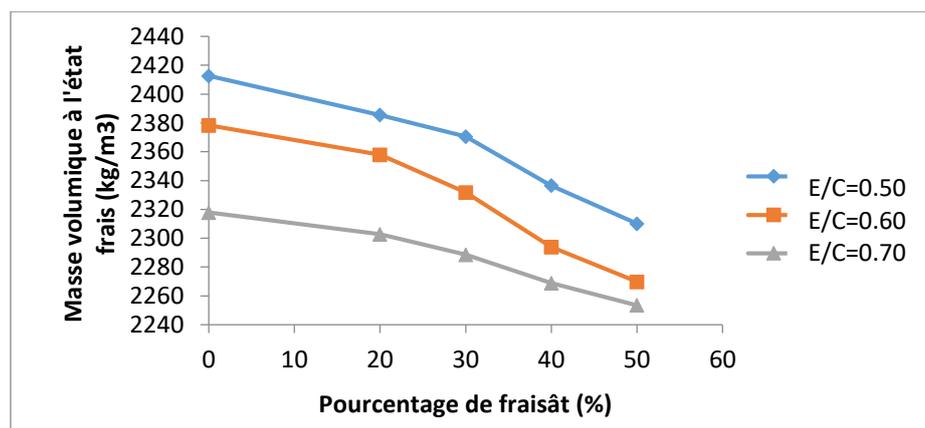


Fig. 3.1 Masse volumique à l'état frais en fonction du pourcentage de fraisâts.

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

Concernant l'ouvrabilité, des bétons plastiques de classe S3 sont ciblés afin de garantir une mise en œuvre facile (grandes surfaces dans le cas d'une application routière). Aussi, un affaissement contrôlé de 90 à 150mm est considéré.

Les résultats expérimentaux montrent que l'ouvrabilité des bétons est fortement affectée par l'introduction des fraisâts ; plus le pourcentage de fraisât augmente dans le mix, plus l'ouvrabilité diminue. Pour obtenir à chaque fois des bétons plastiques de classe S3, un adjuvant super plastifiant avec maintien de la rhéologie sur plusieurs heures est ajouté à des quantités variables, selon le pourcentage de fraisât et selon le rapport de E/C.

La Fig.3.2 montre la quantité d'adjuvant utilisée pour obtenir un affaissement contrôlé en fonction du pourcentage de fraisât. En effet, plus le pourcentage de fraisât augmente, plus la quantité d'adjuvant nécessaire augmente. La quantité d'adjuvant nécessaire diminue lorsque le rapport de E/C augmente.

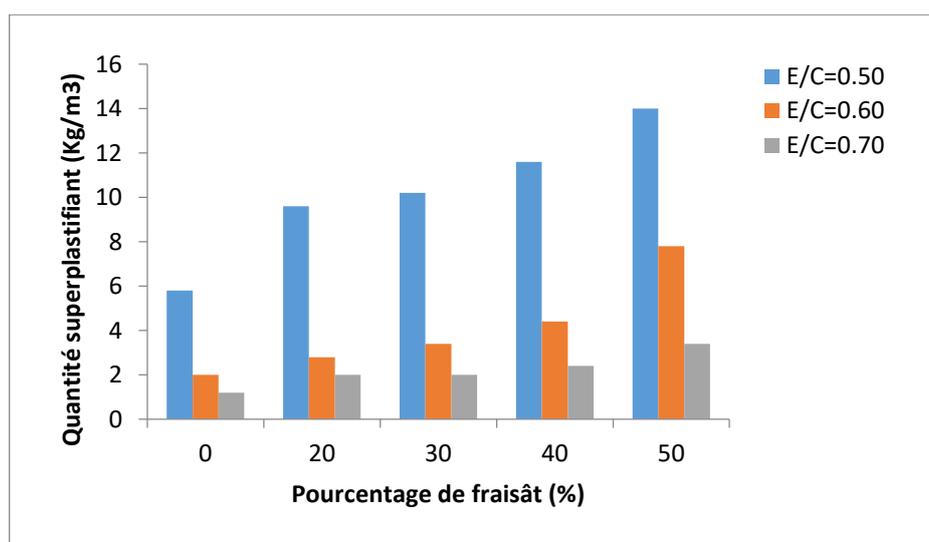


Fig. 3.2 Quantité d'adjuvant super plastifiant utilisée en fonction du pourcentage de fraisât.

2.2.A l'état durci

Les propriétés considérées des bétons à l'état durci sont : la masse volumique, la résistance en compression, la résistance en traction indirecte par fendage, la résistance en traction par flexion, le module d'élasticité statique, le module d'élasticité dynamique et ce à 3-7-14-28 et 91 jours.

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

2.2.1. Masse volumique

Les résultats expérimentaux sont rapportés sur la Fig.3.3. Ils montrent que la masse volumique diminue lorsque le pourcentage de fraisâts augmente. A 28 jours, la masse volumique passe de 2440.7 kg/m³ pour les bétons témoins à 2322.76 kg/m³ pour les BF 50% à E/C=0.50, de 2377.11 kg/m³ pour les bétons témoins à 2267.50 kg/m³ pour les BF 50% à E/C=0.60 et de 2336.74 kg/m³ pour les bétons témoins à 2236.52 kg/m³ pour les BF 50% à E/C=0.70. Soit une réduction de l'ordre de 4 à 5% car la masse volumique absolue des fraisâts est inférieure à la masse volumique des graviers. Aussi, la masse volumique diminue lorsque le rapport E/C augmente, due à l'augmentation de la quantité d'eau dans le mix.

Les résultats expérimentaux montrent aussi que pour une même formulation de béton, les masses volumiques augmentent avec l'âge du béton, résultat du processus d'hydratation et de la production des silicates de calcium hydratés CSH aussi bien pour les bétons témoins que pour les bétons de fraisâts.

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisât sur les caractéristiques mécaniques des bétons

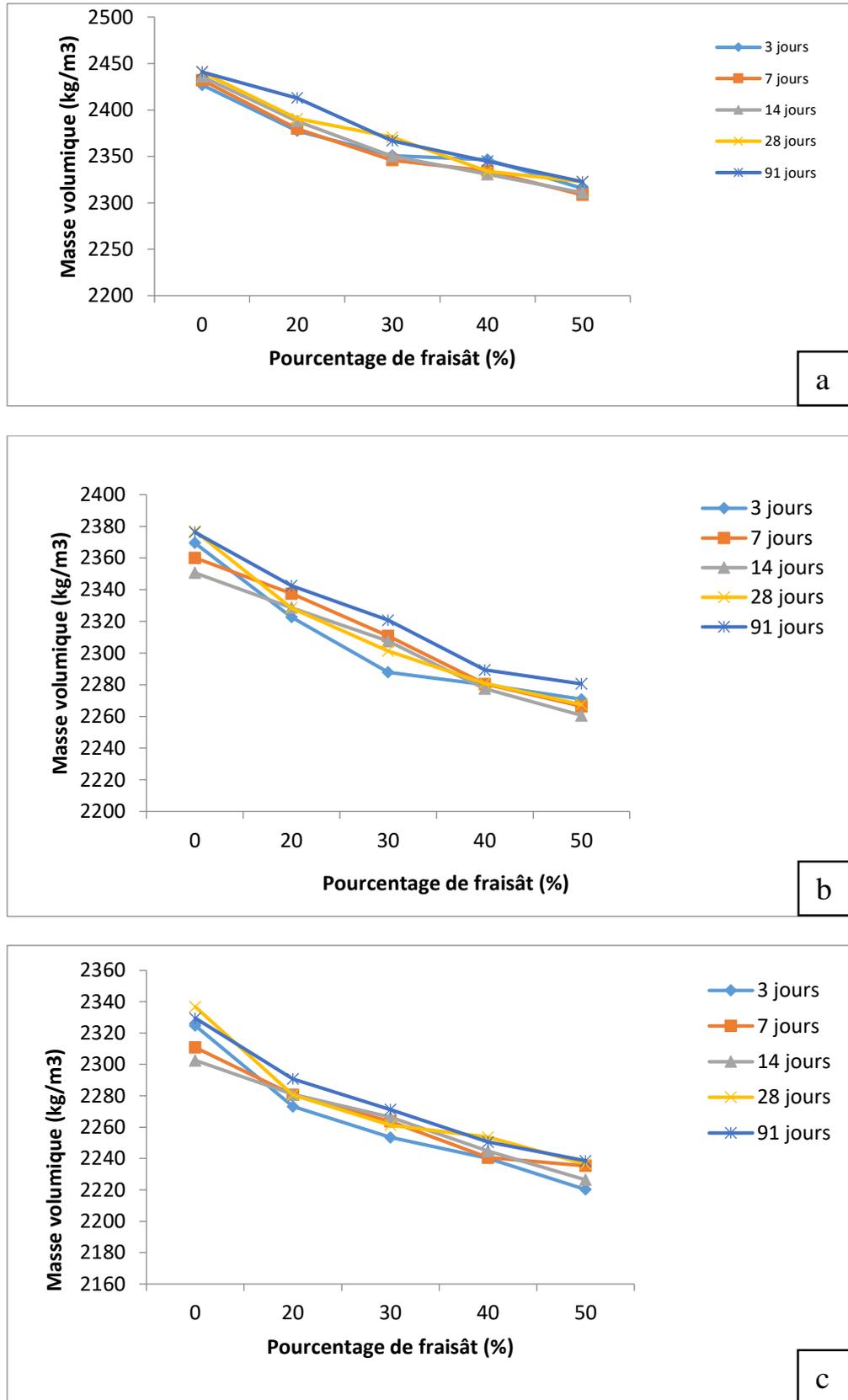


Fig. 3.3 Masse volumique en fonction du pourcentage de fraisât a) E/C=0.50 b) E/C=0.60 c) E/C=0.70.

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

2.2.2. Résistance en compression

L'essai de compression simple est réalisé sur des spécimens cylindriques de dimensions 16 cm de diamètre et 32 cm de hauteur, où un effort de compression est appliqué sur une section transversale jusqu'à fissuration ou rupture de l'éprouvette. La contrainte à la rupture est déterminée à partir de l'équation Eq. 3.1.

Avec :

σ_{rupt} : la résistance en compression

F max : l'effort maximal conduisant à la rupture

S : la surface de l'éprouvette.

$$\sigma_{rupt} = \frac{F_{max}}{S} \quad (3.1)$$

Les surfaces des éprouvettes ont été lissées au préalable et des disques en néoprène ont été placés entre la presse et l'éprouvette afin de minimiser les défauts résiduels et d'absorber les déformations parasites dues aux imperfections des surfaces.

La rupture des éprouvettes doit suivre des schémas de rupture corrects, conformément à la norme NF EN 12390-3.

Lors du déroulement des essais d'écrasement, nous avons observés « la manière » dont les éprouvettes se rompaient. Les éprouvettes témoins présentent une rupture brutale et non préventive, tandis que les éprouvettes de bétons de fraisâts présentent une rupture préventive avec développement de fissures avant de rompre d'une manière moins brutale, comme montré par la Fig. 3.4.

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons



Fig. 3.4 Essai de compression a) Début de l'essai b) Fin de l'essai sur spécimen sans fraisât
c) Fin de l'essai sur spécimen avec fraisât.

La Fig. 3.5 montre les résultats des essais de compression à 28 jours. Les résultats obtenus rejoignent ceux rapportés dans la littérature concernant les bétons confectionnés à partir de fraisât, à savoir ; une baisse de la résistance en compression lorsque le taux de fraisât augmente (Mathias, 2005 ; Erdem et Blankson, 2014 ; Huang et al., 2005). Ainsi, la baisse

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

relative de la résistance en compression, définie par l'Eq. 3.2 due à l'introduction de fraisât, est de l'ordre de 10% à 12% pour les BF 20%, entre les différents rapports de E/C considérés. Ce qui est très intéressant ; car d'ores et déjà nous pouvons recommander un taux minimal de fraisât de 20% tout en ayant une baisse minimale de la résistance en compression. La baisse relative de la résistance en compression est de l'ordre de 18 à 20% pour les BF 30% entre les différents rapports de E/C, de 32 à 36% pour les BF 40% et enfin de 46 à 47% pour les BF 50%. Nous pouvons retenir l'ordre de grandeur suivant ; lorsque la moitié des granulats naturels sont substitués par des fraisâts, la résistance en compression diminue de moitié.

$$\Delta R_c (\%) = \frac{R_c (BF=0) - R_c (BF)}{R_c (BF=0)} * 100 \quad (3.2)$$

Avec :

ΔR_c : baisse relative en termes de résistance en compression, exprimée en (%).

$R_c (BF)$: résistance en compression des bétons de fraisâts.

$R_c (BF=0)$: résistance en compression des bétons de référence (100% granulats naturels).

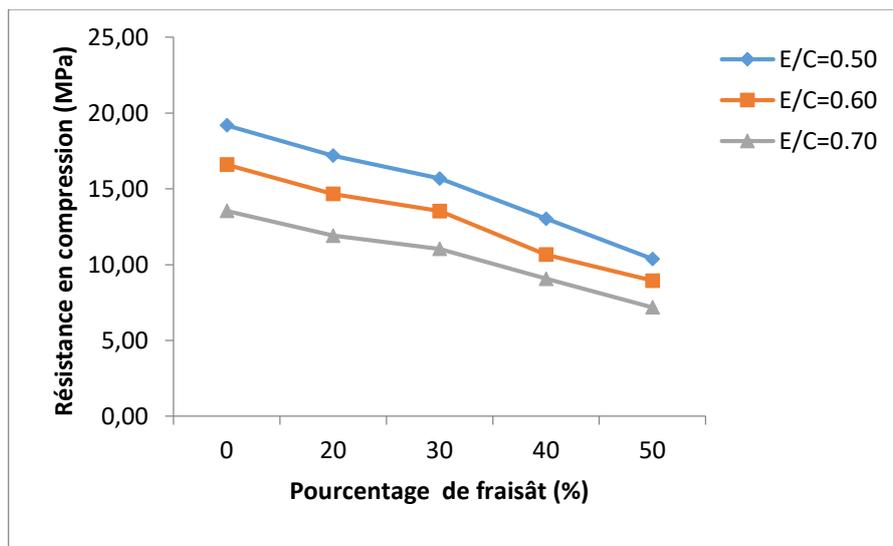


Fig. 3.5 Résistance en compression à 28j en fonction du pourcentage de fraisât.

La baisse de la résistance en compression est essentiellement due à la faible adhérence entre les agrégats de fraisât vieillis et pollués, et la pâte de ciment. Cette zone de faiblesse se situe à l'interface dite critique (Mathias, 2005 ; Erdem et Blankson, 2014 ; Huang et al., 2005).

Afin de confirmer ce qui a été avancé, une analyse au microscope électronique à balayage (MEB) a été réalisée sur nos échantillons. Les résultats expérimentaux sont montrés sur la Fig.3.6.

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

La microscopie électronique à balayage (MEB) apporte des informations importantes sur la microstructure et la texture des hydrates de la pâte de ciment. Cependant, ces informations restent d'un ordre qualitatif et l'interprétation des résultats repose sur l'expérience, l'objectivité de l'observateur et le nombre de tests. Le but de l'analyse MEB réalisée n'étant pas de montrer dans le détail les phases d'hydratation du ciment en présence du film bitumineux mais de contribuer à soutenir l'explication selon laquelle la faible interface entre l'agrégat de fraisât-pâte de ciment est principalement la cause de la réduction de la résistance en compression. Elle est l'endroit où la rupture des bétons est privilégiée.

Ainsi la Fig. 3.8 montre la différence entre l'interface granulât-pâte de ciment et agrégat de fraisât-pâte de ciment. La faible interface entre le fraisât et la pâte de ciment comparé à l'interface entre le granulât naturel et la pâte de ciment forme une ligne de faiblesse où la rupture des bétons y est privilégiée.

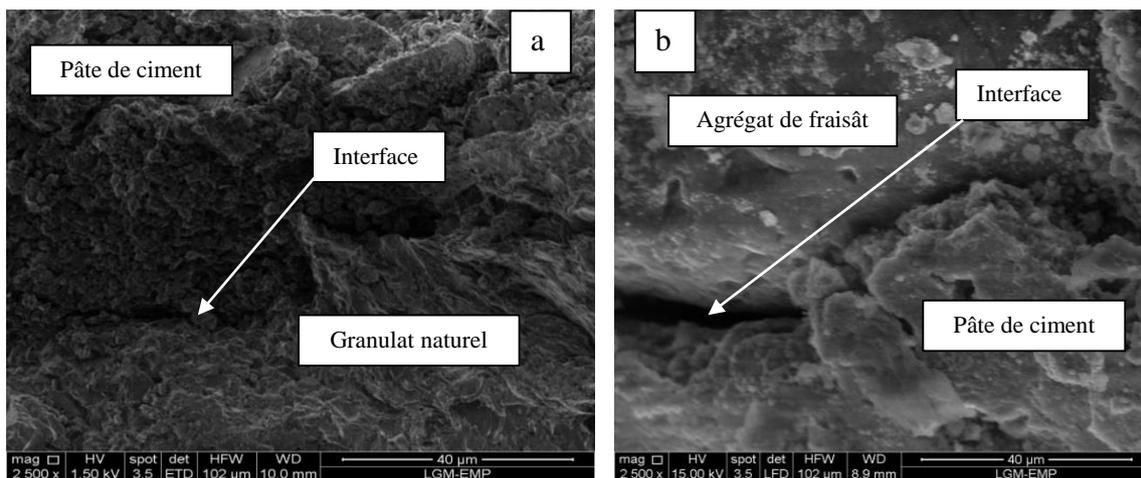


Fig. 3.6 Image MEB a) zone de transition dans un béton témoin b) zone de transition dans un béton de fraisât.

La Fig 3.7 montre l'aspect des hydrates de ciment (CSH, portlandite et étringite) qui se sont développés normalement dans la matrice des bétons témoins présentant un aspect dense, et dans la matrice des bétons de fraisâts présentant un aspect moins dense à cause de la présence du film bitumineux.

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

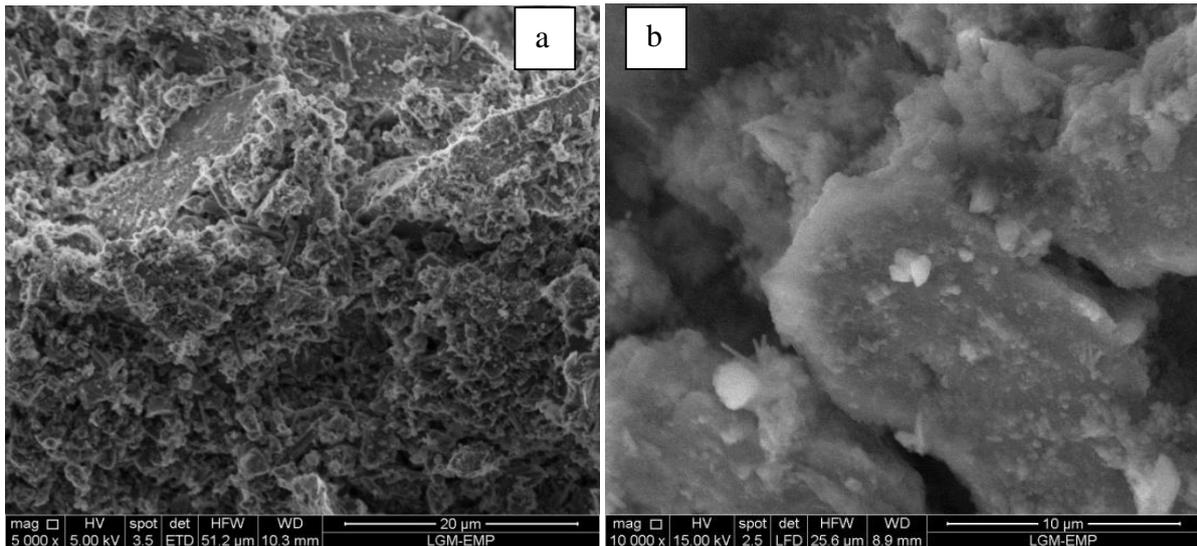


Fig. 3.7 Image MEB a) matrice d'un béton témoin b) matrice d'un béton de fraisât.

Afin de mieux apprécier l'évolution de la résistance en compression dans le temps et en présence de plusieurs taux de fraisâts, d'autres essais ont été réalisés à 3-7-14 et 91j. Les résultats des essais sont mentionnés sur le Tableau 3.1 où chaque valeur correspond à la moyenne arithmétique des résultats sur trois spécimens. La Fig. 3.8 représente l'évolution dans le temps de la résistance en compression des bétons témoins et des bétons de fraisâts pour les trois valeurs de rapports de E/C. A partir de ces courbes, il apparaît clairement que l'évolution dans le temps de la résistance en compression des bétons témoins est similaire à celle des bétons de fraisâts ; elle augmente avec le temps, résultant du processus de l'hydratation du ciment. Cependant, la résistance ciblée (20 MPa) n'est atteinte que par les bétons témoins.

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

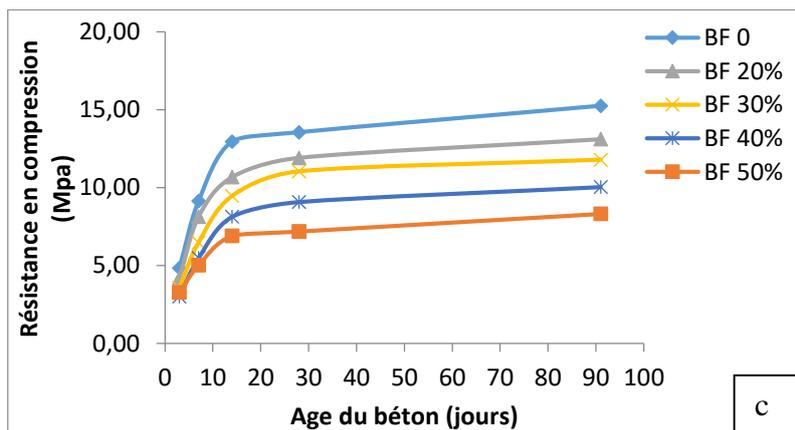
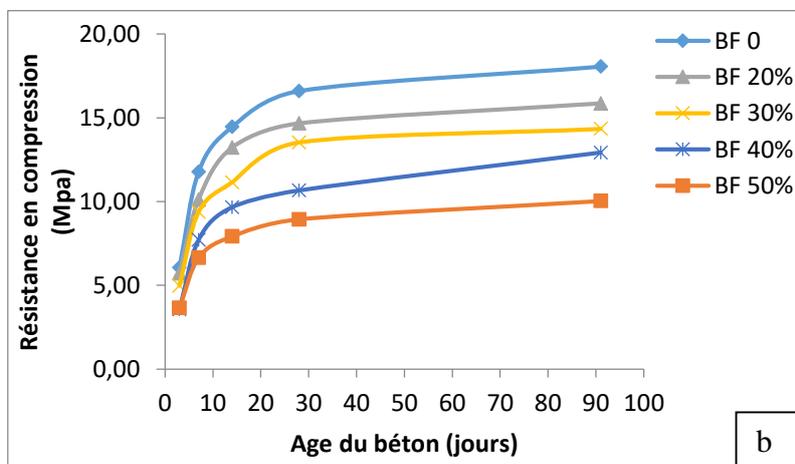
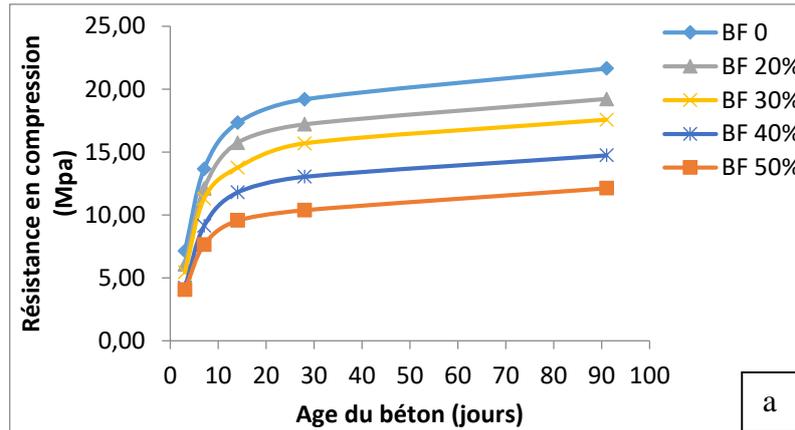


Fig. 3.8 Evolution de la résistance en compression en fonction de l'âge du béton

a) E/C=0.50 b) E/C=0.60 c) E/C=0.70.

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

La baisse relative de la résistance en compression due à l'introduction du fraisât à 7 jours est de 11% pour les BF 20% lorsque $E/C=0.50$, 14% lorsque $E/C=0.60$ et 11% lorsque $E/C=0.70$. Pour les BF 40%, la baisse relative est de l'ordre de 33% lorsque $E/C=0.50$, 34% lorsque $E/C=0.60$ et 40% lorsque $E/C=0.70$. Enfin, pour les BF 50%, la baisse relative est de 44% lorsque $E/C=0.50$, 43% lorsque $E/C=0.60$ et 45% lorsque $E/C=0.70$.

A 14 jours, la baisse relative pour les BF 20% est de 9% lorsque $E/C=0.50$, 11% lorsque $E/C=0.60$ et 17% lorsque $E/C=0.70$. Pour les BF 30%, la baisse relative est de l'ordre de 21% lorsque $E/C=0.50$, 23% lorsque $E/C=0.60$ et 27% lorsque $E/C=0.70$. Pour les BF 40%, la baisse relative est de l'ordre de 32% lorsque $E/C=0.50$, 33% lorsque $E/C=0.60$ et 37% lorsque $E/C=0.70$. Enfin, pour les BF 50%, la baisse relative est de l'ordre de 45% lorsque $E/C=0.50$, 45% également lorsque $E/C=0.60$ et 47% lorsque $E/C=0.70$.

Enfin à 91 jours, la baisse relative pour les BF 20% est de 11% lorsque $E/C=0.50$, 12% lorsque $E/C=0.60$ et 14% lorsque $E/C=0.70$. Pour les BF 30%, la baisse relative est de 19% lorsque $E/C=0.50$, 21% lorsque $E/C=0.60$ et 23% lorsque $E/C=0.70$. Pour les BF 40%, la baisse relative est de 32% lorsque $E/C=0.50$, 28% lorsque $E/C=0.60$ et 34% lorsque $E/C=0.60$. Enfin, pour les BF 50%, la baisse relative est de 44% lorsque $E/C=0.50$, 44% également lorsque $E/C=0.60$ et 45% lorsque $E/C=0.70$.

Concernant l'effet de variation du rapport E/C sur la résistance en compression, pour les bétons témoins comme pour les bétons de fraisât, la résistance en compression baisse lorsque le rapport de E/C augmente. Cependant, la baisse relative de la résistance en compression due à l'introduction du fraisât est plus importante lorsque le rapport de E/C est élevé.

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

Tableau 3.1 Résistance en compression en fonction de l'introduction de fraisâts.

Désignation	Résistance en compression (MPa)					
	E/C	3 jours	7 jours	14 jours	28 jours	91 jours
BF 0%	0.50	7.13	13.64	17.32	19.19	21.64
BF 20%		6.05	12.10	15.73	17.19	19.21
BF 30%		5.43	11.28	13.75	15.68	17.56
BF 40%		4.20	9.12	11.79	13.03	14.73
BF 50%		4.05	7.63	9.55	10.38	12.12
BF 0%	0.60	6.05	11.78	14.45	16.60	18.06
BF 20%		5.71	10.12	12.85	14.66	15.85
BF 30%		4.97	9.37	11.15	13.53	14.34
BF 40%		3.55	7.71	9.66	10.66	12.92
BF 50%		3.65	6.64	7.92	8.94	10.03
BF 0%	0.70	4.83	9.12	12.94	13.54	15.24
BF 20%		4.19	8.13	10.67	11.91	13.10
BF 30%		3.56	6.47	9.45	10.87	11.78
BF 40%		3.00	5.47	8.12	9.07	10.03
BF 50%		3.27	4.96	6.89	7.15	8.31

2.2.3. Résistance en traction indirecte par fendage

L'essai de traction indirecte par fendage consiste à appliquer à un disque un effort sur deux côtés opposés afin de forcer l'éprouvette à se rompre en traction dans le sens perpendiculaire au sens du chargement (Fig.3.9). Les éprouvettes utilisées sont cylindriques de dimension 16 cm de diamètre et 32 cm de hauteur. Pour les besoins de l'essai, deux barres de fer très épaisses et non déformables ont été utilisées pour répartir uniformément la charge sur la longueur de l'éprouvette, comme le montre la Fig.3.10.

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraïsat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

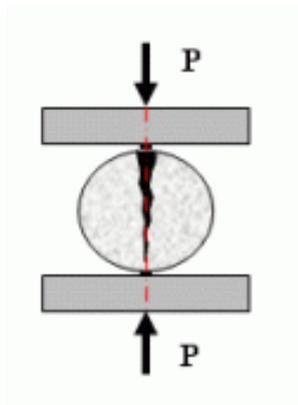


Fig. 3.9 Schéma de l'essai de traction indirecte par fendage.

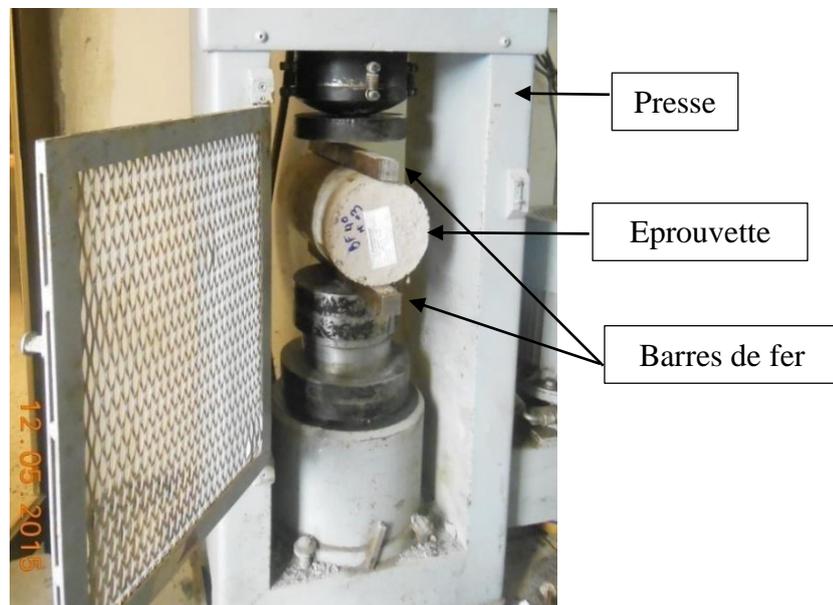


Fig. 3.10 Essai de traction indirecte par fendage.

La résistance en traction donnée en MPa est donnée par l'équation Eq. 3.3.

$$\sigma_{rupt} = 2 \cdot \frac{F}{\pi d L} \quad (3.3)$$

Avec :

σ_{rupt} : la résistance en traction

F : la charge maximale en N

d : le diamètre de l'éprouvette en mm

L : la hauteur de l'éprouvette en mm.

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

Les résultats des essais de détermination de la résistance en traction par fendage à 28 jours sont rapportés sur la Fig.3.13. Tout comme pour la résistance en compression, la résistance en traction diminue lorsque le pourcentage de fraisât augmente dans le mix, mais d'une manière moins significative, rejoignant les résultats rapportés par Mathias (Mathias, 2005). En effet, la baisse relative de la résistance en traction par fendage, définie par l'Eq. 3.4, est de l'ordre de 6%-8% et 10% lorsque les rapports de E/C=0.50, 0.60 et 0.70 respectivement pour les BF 20%. Pour les BF 30%, la baisse est de l'ordre de 17% - 15% et 16% lorsque les rapports de E/C=0.50, 0.60 et 0.70 respectivement. Elle est plus importante pour les BF 40% ; une baisse relative de 24%-25% et 24% est observée lorsque les rapports de E/C=0.50, 0.60 et 0.70 respectivement. Enfin, pour les BF 50%, la baisse relative est de 38%-33% et 34% lorsque les rapports de E/C=0.50, 0.60 et 0.70 respectivement.

$$\Delta R_f (\%) = \frac{R_f (BF=0) - R_f (BF)}{R_f (BF=0)} * 100 \quad (3.4)$$

Avec :

ΔR_f : baisse relative en termes de résistance en traction par fendage, exprimée en (%).

$R_f (BF)$: résistance en traction par fendage des bétons de fraisâts.

$R_f (BF=0)$: résistance en traction par fendage des bétons de référence (100% granulats naturels).

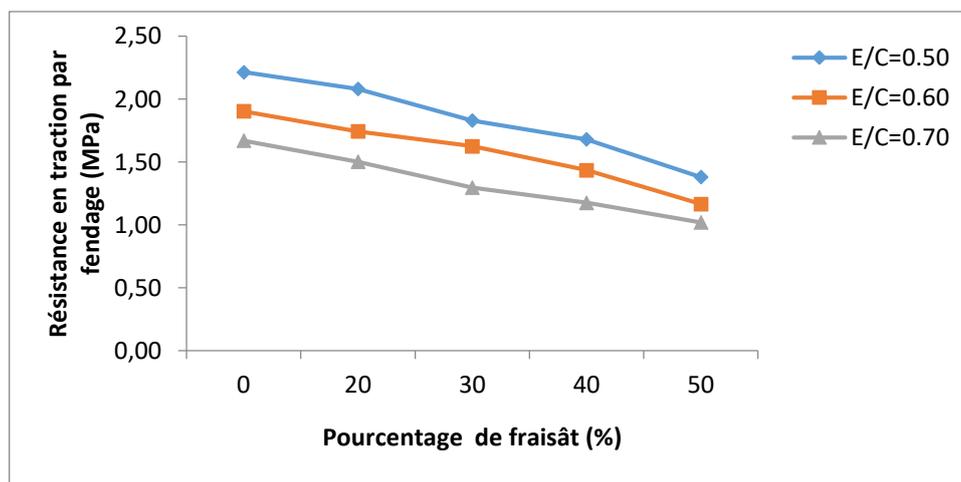


Fig. 3.11 Résistance en traction par fendage à 28 jours en fonction du pourcentage de fraisât.

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

Concernant l'effet de variation du rapport de E/C sur la résistance en traction indirecte par fendage, la résistance baisse lorsque le rapport de E/C augmente. Cette tendance est valable aussi bien pour les bétons témoins que pour les bétons de fraisâts. Cependant, la baisse relative de la résistance en traction due à l'introduction du fraisât est sensiblement plus importante lorsque le rapport de E/C est élevé, mais d'une manière moins prononcée que pour la résistance en compression.

La résistance en traction par fendage baisse lorsque le pourcentage de fraisât augmente dans le mix, à cause de la faible interface entre le film bitumineux et la pâte de ciment (Mathias, 2005 ; Erdem et Blankson, 2014 ; Huang et al. 2005), comme montré précédemment grâce à l'analyse MEB.

La baisse relative de la résistance à 7 jours est de l'ordre de 10% pour les BF 20% lorsque E/C=0.50, 6% lorsque E/C=0.60 et 4% lorsque E/C=0.70. La baisse relative pour les BF 50% est de 30% pour les BF 50% lorsque E/C=0.50, 32% lorsque E/C=0.60 et 33% lorsque E/C=0.70. Des valeurs intermédiaires sont obtenues pour les BF 30% et 40%. A 91 jours, la baisse relative de la résistance pour les BF 20% est de l'ordre de 4% lorsque E/C=0.50, 6% lorsque E/C=0.60 et 9% lorsque E/C=0.70 comparés aux bétons témoins. Pour les BF 50%, la baisse relative atteint 29% lorsque E/C=0.50, 30% lorsque E/C=0.60 et 30% également lorsque E/C=0.70.

Afin d'observer l'évolution de la résistance en traction indirecte par fendage, d'autres essais ont été réalisés à 3-7-14 et 91j. Les résultats sont rapportés sur le Tableau 3.2 et sur la Fig.3.12 où chaque valeur correspond à la moyenne arithmétique de trois spécimens. D'abord, les courbes obtenues sont semblables ; l'évolution dans le temps de la résistance en traction par fendage en fonction de la durée de cure est similaire pour les bétons témoins et les bétons de fraisâts. La résistance en traction par fendage augmente avec le temps résultant du processus de l'hydratation du ciment.

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

Tableau 3.2 Résistance en traction par fendage en fonction de l'introduction de fraisâts.

Désignation	Résistance en traction indirect par fendage (MPa)					
	E/C	3 jours	7 jours	14 jours	28 jours	91 jours
BF 0%	0.50	1.39	1.71	1.90	2.21	2.25
BF 20%		1.30	1.52	1.80	2.08	2.15
BF 30%		1.26	1.43	1.69	1.83	2.04
BF 40%		1.17	1.31	1.47	1.68	1.82
BF 50%		1.10	1.19	1.30	1.38	1.60
BF 0%	0.60	1.30	1.44	1.70	1.90	2.08
BF 20%		1.19	1.36	1.61	1.74	1.96
BF 30%		1.10	1.23	1.49	1.63	1.80
BF 40%		1.01	1.10	1.30	1.43	1.68
BF 50%		0.90	0.98	1.14	1.27	1.46
BF 0%	0.70	1.18	1.30	1.52	1.67	1.86
BF 20%		0.98	1.24	1.42	1.50	1.70
BF 30%		0.95	1.07	1.32	1.40	1.58
BF 40%		0.90	0.97	1.16	1.28	1.41
BF 50%		0.74	0.87	1.01	1.10	1.30

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

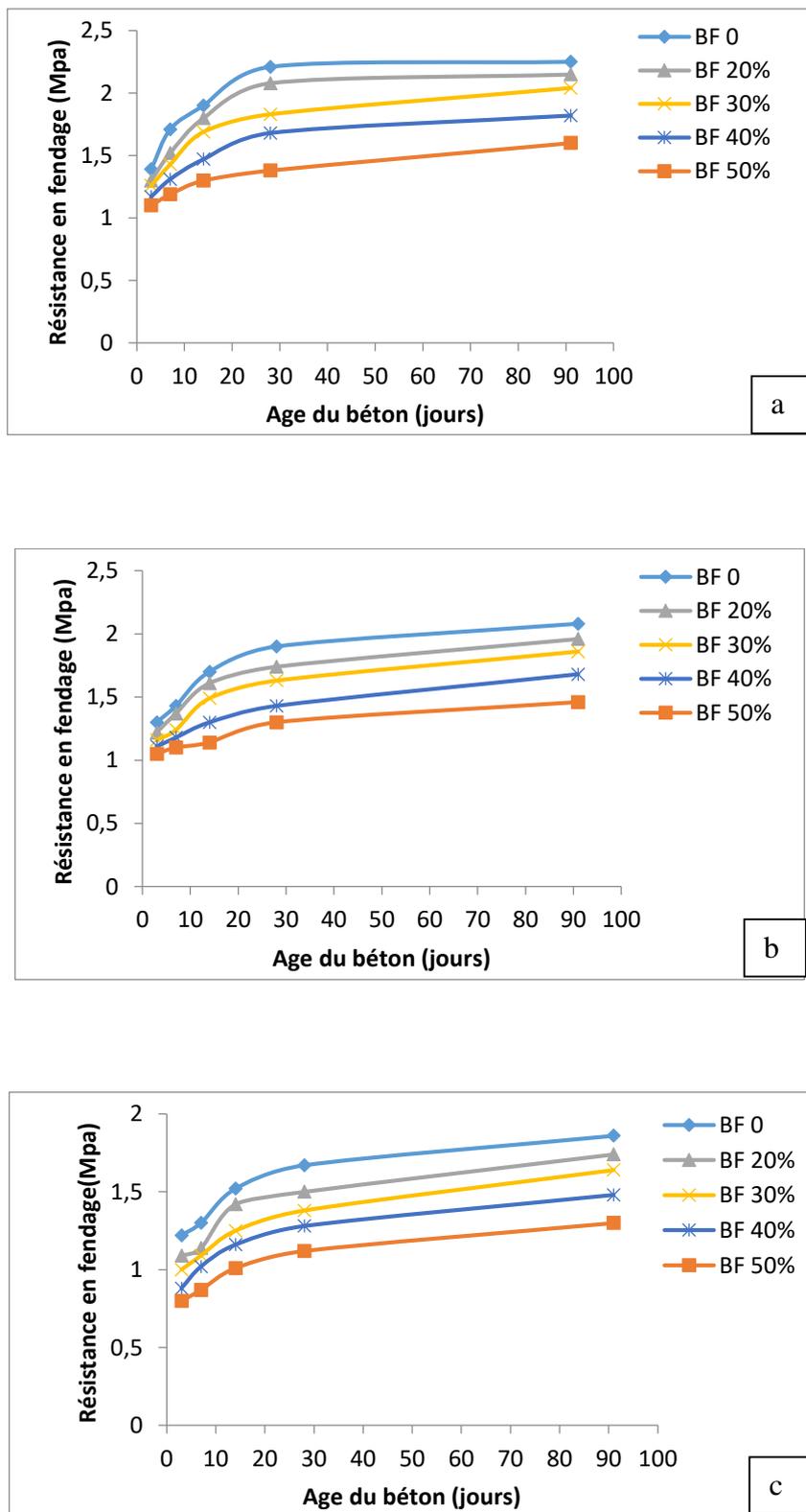


Fig. 3.12 Evolution de la résistance en traction en fonction de la durée de cure a) E/C=0.50 b) E/C=0.60 c) E/C=0.70.

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

2.2.4. Résistance en traction par flexion

L'essai réalisé est dit essai de flexion à trois points sur éprouvettes prismatiques, comme montré par la Fig. 3.13.

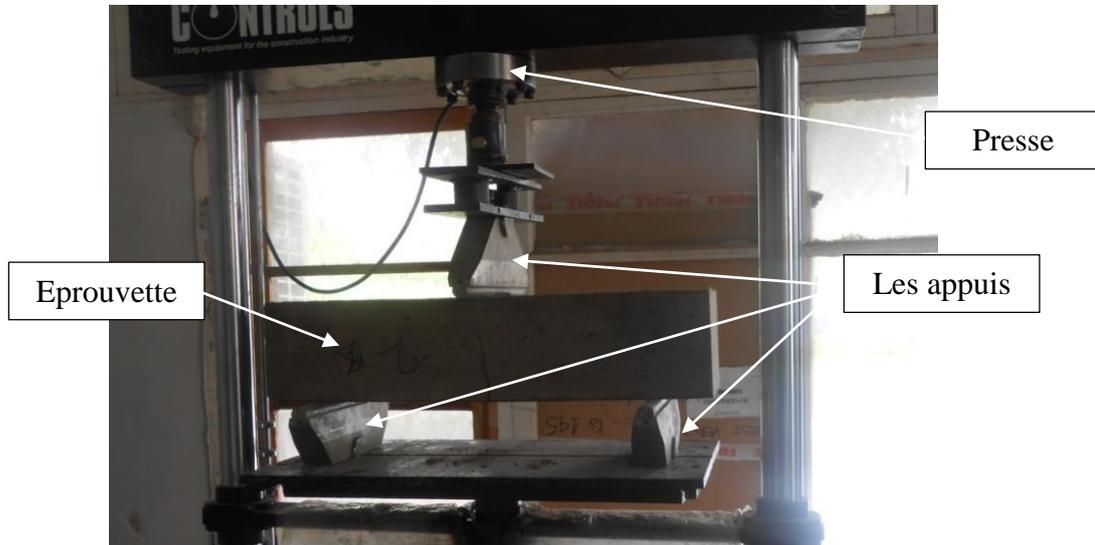


Fig. 3.13 Essai de flexion à trois points.

Les éprouvettes prismatiques de dimensions 15cm de largeur, 15 cm de hauteur et 60 cm de longueur sont soumises à une charge par le biais d'un rouleau supérieur en acier et deux rouleaux inférieurs en acier, conformément aux dispositions prescrites par la norme NF EN 12390-5, jusqu'à rupture par flexion.

La résistance en flexion σ_{flex} est donnée en (MPa) par l'équation Eq. 3.5

$$\sigma_{flex} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F.l}{d_1 d_2^2} \quad (3.5)$$

Avec :

σ_{flex} : la résistance en flexion

d: côté de la surface carrée du prisme en (mm).

L : longueur du prisme en (mm).

l: distance entre axe de rouleaux en (mm).

F : la charge appliquée en (N).

Les résultats expérimentaux sont rapportés sur la Fig. 3.14 et sur le Tableau 3.3. Les résultats expérimentaux montrent que la résistance en flexion diminue lorsque le pourcentage de fraisât augmente dans le mélange. Lorsque le rapport de E/C augmente la résistance en flexion diminue aussi.

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

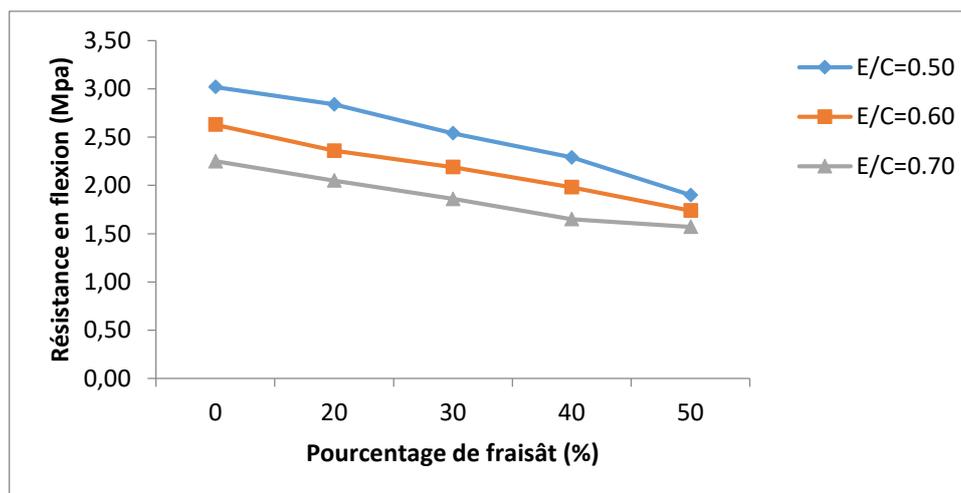


Fig. 3.14 Résistance en traction par flexion à 28 jours en fonction du pourcentage de fraisât.

Tableau 3.3 Résistance en traction par flexion en fonction de l'introduction de fraisâts.

Désignation	Résistance en flexion (MPa)					
	E/C	3 jours	7 jours	14 jours	28 jours	91 jours
BF 0%	0.50	1.92	2.35	2.65	3.02	3.10
BF 20%		1.80	2.15	2.42	2.84	2.97
BF 30%		1.73	1.94	2.27	2.54	2.76
BF 40%		1.60	1.80	2.02	2.29	2.50
BF 50%		1.51	1.63	1.76	1.90	2.20
BF 0%	0.60	1.76	2.01	2.30	2.63	2.80
BF 20%		1.65	1.80	2.19	2.36	2.62
BF 30%		1.52	1.67	2.10	2.19	2.46
BF 40%		1.50	1.60	1.85	1.98	2.21
BF 50%		1.37	1.45	1.58	1.74	1.97
BF 0%	0.70	1.60	1.76	2.05	2.25	2.51
BF 20%		1.46	1.64	1.92	2.05	2.34
BF 30%		1.34	1.46	1.75	1.86	2.12
BF 40%		1.20	1.36	1.56	1.65	2.03
BF 50%		1.08	1.23	1.38	1.57	1.80

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

A 28 jours, la résistance en flexion passe de 3.02 MPa pour les bétons témoins à 1.90 MPa pour les BF 50% lorsque E/C=0.50, de 2.63 MPa à 1.74 MPa lorsque E/C=0.60 et enfin de 2.25 MPa à 1.57 lorsque E/C=0.70, soit représentant une baisse relative, définie par l'Eq. 3.6 de 37%, 34% et 30% respectivement ce qui reste important. Des valeurs intermédiaires sont obtenues pour les autres formules ; la baisse relative pour les BF 20% est de 6%-10% et 9% lorsque E/C=0.50, 0.60 et 0.70 respectivement. Pour les BF 30%, elle est de 16%-17% et 17% lorsque E/C=0.50, 0.60 et 0.70 respectivement. Enfin, pour les BF 40%, elle est de 24%, 25% et 27% lorsque E/C=0.50, 0.60 et 0.70 respectivement.

$$\Delta R_{flex} (\%) = \frac{R_{flex} (BF=0) - R_{flex} (BF)}{R_{flex} (BF=0)} * 100 \quad (3.6)$$

Avec :

ΔR_{flex} : baisse relative en termes de résistance en flexion, exprimée en (%).

$R_{flex} (BF)$: résistance en flexion des bétons de fraisâts.

$R_{flex} (BF=0)$: résistance en flexion des bétons de référence (100% granulats naturels).

La baisse de la résistance en traction par flexion lorsque le pourcentage de fraisât augmente dans le mix, est principalement due à la faible interface entre le film bitumineux et la pâte de ciment (Mathias, 2005 ; Erdem et Blankson, 2014 ; Huang et al., 2005).

Afin de suivre l'évolution dans le temps de la résistance en traction par flexion, d'autres essais ont été réalisés à 3-7-14 et 91 jours. Les courbes obtenues sont représentées sur la Fig. 3.15. Ces courbes indiquent que l'évolution dans le temps de la résistance en flexion est similaire aussi bien pour les bétons témoins que pour les bétons de fraisâts, résultat du processus de l'hydratation du ciment.

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

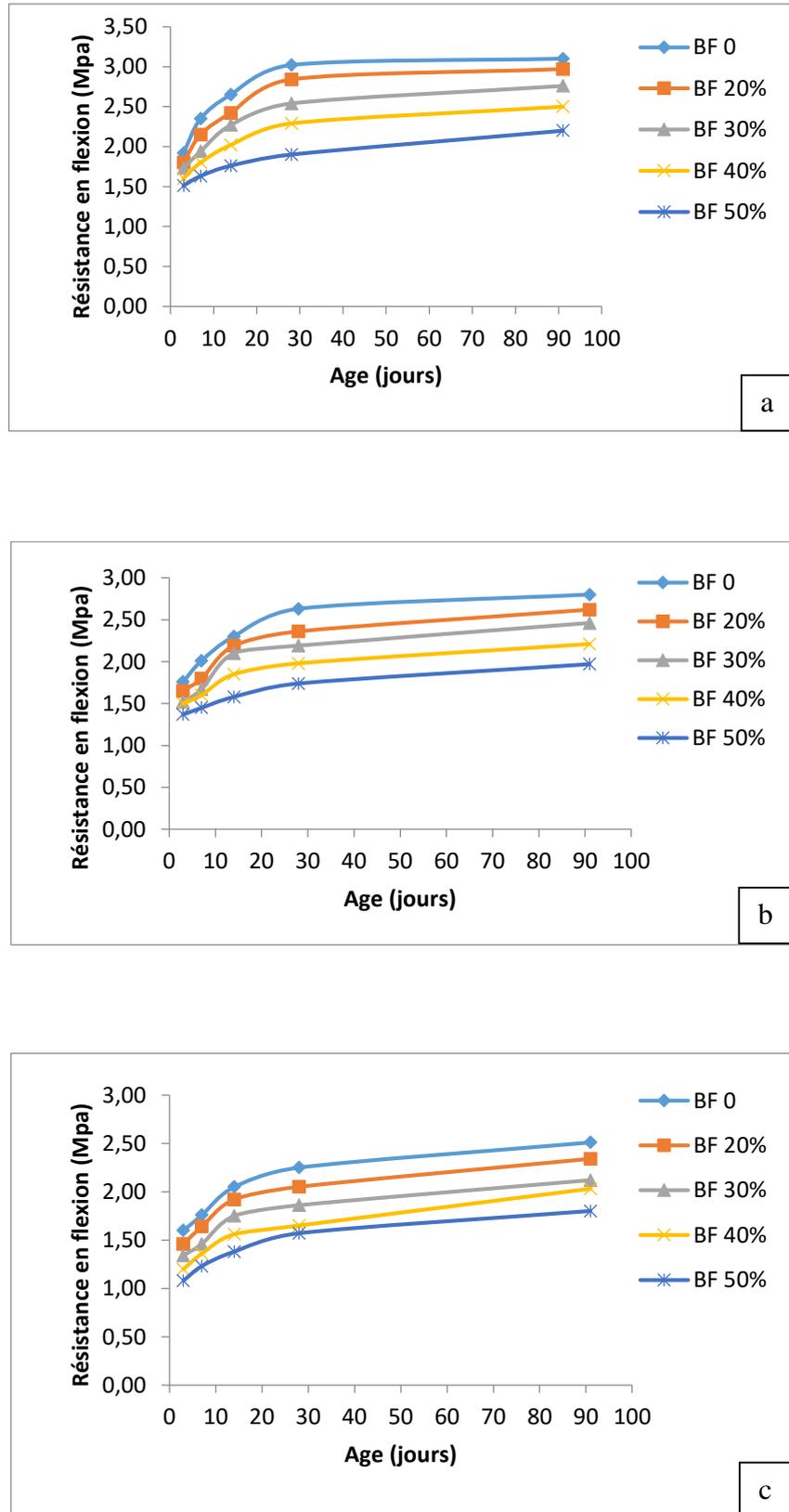


Fig. 3.15 Evolution de la résistance en traction par flexion en fonction de la durée de cure

a) E/C=0.50 b) E/C=0.60 c) E/C=0.70.

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

La baisse relative de la résistance en flexion à 3 jours est de l'ordre de 6% à 9% pour les BF 20% par rapport aux bétons témoins, pour les différents rapports de E/C. Pour les BF 30%, elle varie entre 10% et 16%, entre 15 et 25% pour les BF 40% et enfin, elle atteint 21% à 32% pour les BF 50%.

A 7 jours, une baisse relative légèrement plus importante est observée pour tous les bétons de fraisâts. En effet, pour les BF 20% elle est de 8% lorsque E/C=0.50, 10% lorsque E/C=0.60 et 7% lorsque E/C=0.70. Pour les BF 30%, la baisse relative varie entre 17% et 18% entre les différentes valeurs de E/C. Pour les BF 40%, elle varie entre 20% et 23% entre les différentes valeurs de E/C. Pour les BF 50%, la baisse relative atteint 31%. Le même ordre de grandeur est obtenu à 14 et 91 jours.

- **Relation expérimentale entre la résistance en compression et la résistance en traction**

A partir des résultats expérimentaux, une relation expérimentale est dégagée entre la résistance en compression et la résistance en traction par fendage. Il est utile de rappeler que selon le BAEL (BAEL 91 révisées 99), la résistance caractéristique à la traction est conventionnellement défini par la relation (3.7):

$$f_{tj} = 0,6 + 0,06 \cdot F_{cj} \quad (3.7)$$

Elle est montrée par la Fig.3.16. Puis une autre relation expérimentale est dégagée entre la résistance en compression et la résistance en flexion. Elle est montrée par la Fig.3.17.

Les figures Fig.3.16 et Fig.3.17 montrent qu'il y a une étroite relation entre la résistance en compression et la résistance en traction. La relation proposée est à chaque fois linéaire et indique une relation proportionnelle. Les coefficients de corrélation obtenus sont de $R^2= 0.897$ pour la relation expérimentale entre la résistance en compression et la résistance en traction par fendage et de $R^2=0.925$ pour la relation expérimentale entre la résistance en compression et la résistance en traction par flexion, et sont considérés comme satisfaisants (Ostle et al.1999).

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

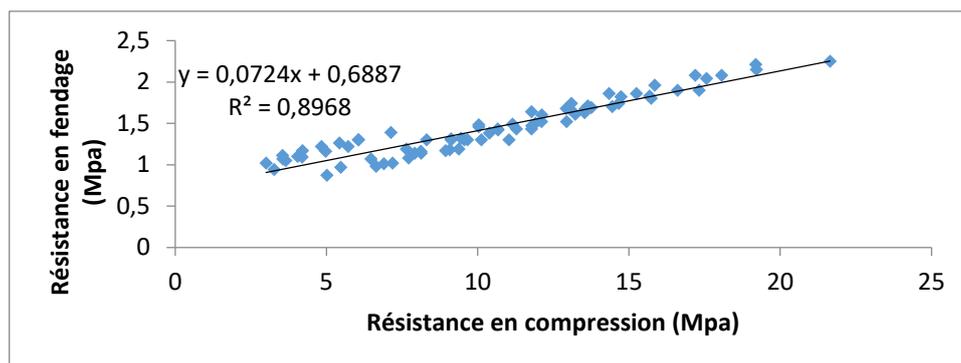


Fig. 3.16 Relation entre la résistance en compression et la résistance en traction par fendage.

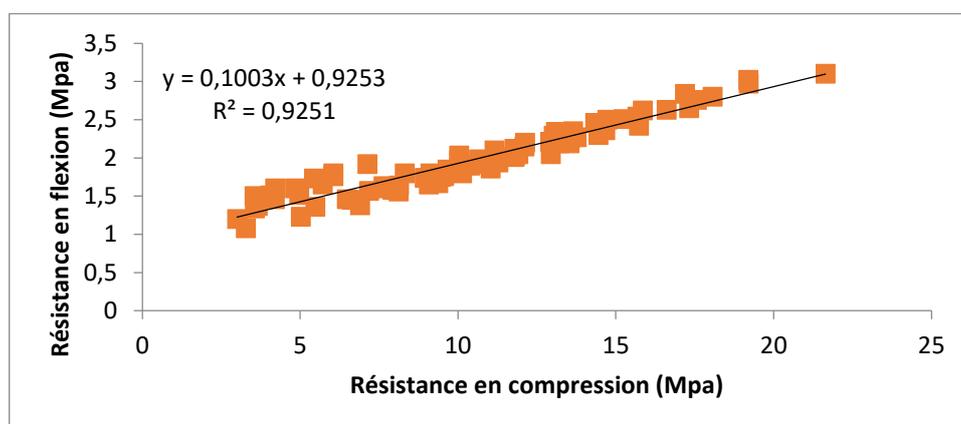


Fig. 3.17 Relation entre la résistance en compression et la résistance en flexion.

2.2.5. Module d'élasticité statique

Le module d'élasticité statique être déterminé à partir les courbes de contraintes-déformations ou par l'essai normalisé, comme c'est le cas dans la présente étude. Cet essai est appelé « essai de détermination du module d'élasticité en compression », car les contraintes appliquées sur les spécimens, sont des contraintes de compression. Le dispositif utilisé est montré par la Fig. 3.18. Le principe de l'essai est le suivant : en début d'essai une contrainte initiale, appelée contrainte de base de chargement de $\sigma_b = 0,5 \text{ N/mm}^2$ est appliquée, la déformation initiale est ainsi relevée. La contrainte appliquée est ensuite progressivement augmentée à une vitesse de $0,6 \pm 0,4 \text{ N/mm}^2/\text{s}$ jusqu'à ce que la contrainte σ_a atteigne le tiers (1/3) de la contrainte de compression limite f_c ($\sigma_a = f_c/3$). La contrainte appliquée est maintenue pendant soixante (60) secondes afin de relever la déformation correspondante. La contrainte est ensuite diminuée à la même vitesse jusqu'à atteindre de nouveau la contrainte σ_b . L'opération est renouvelée plusieurs fois selon les indications de la norme, afin de balayer le palier d'élasticité plusieurs fois.

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

Le module d'élasticité en compression E donné en N/mm^2 est donné par l'expression de l'équation Eq. 3.8

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b} \quad (3.8)$$

Avec :

σ_a : la contrainte supérieure de chargement ($\sigma_a = f_c/3$).

σ_b : la contrainte de base ($0.5 N/mm^2$).

ε_a : la déformation résultant de la contrainte de chargement supérieure.

ε_b : la déformation résultant de la contrainte de chargement de base.

L'essai de détermination du module d'élasticité est effectué sur des éprouvettes de 28 jours.

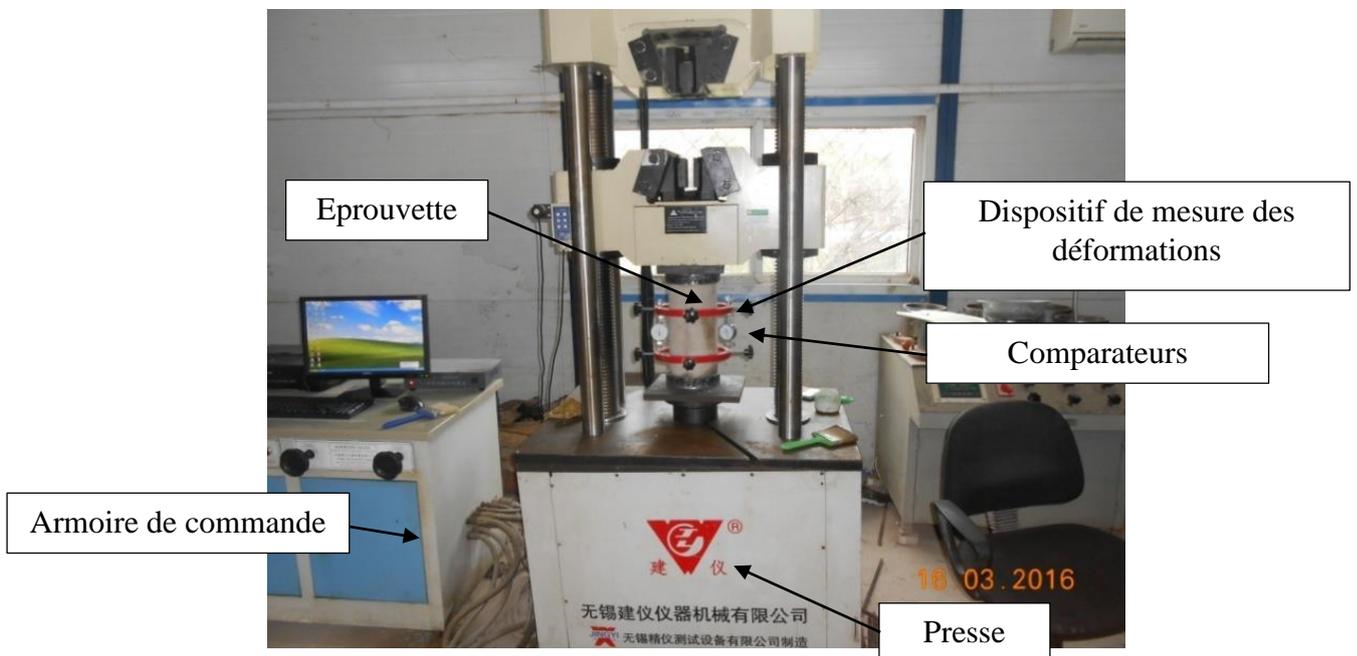


Fig. 3.18 Dispositif de l'essai de détermination du module d'élasticité.

Les résultats des essais sont rapportés sur le Tableau 3.4 puis repris graphiquement sur la Fig. 3.19 afin de mieux observer l'effet de l'introduction du fraisât sur le module d'élasticité statique.

Tableau 3.4 Résultats des essais de détermination du module d'élasticité.

E/C	0.50	0.60	0.70
BF 0%	29.50	27.12	26.06
BF 20%	24.78	21.74	18.54
BF 30%	21.86	19.07	14.80
BF 40%	20.11	16.21	12.68
BF 50%	17.88	13.06	10.65

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

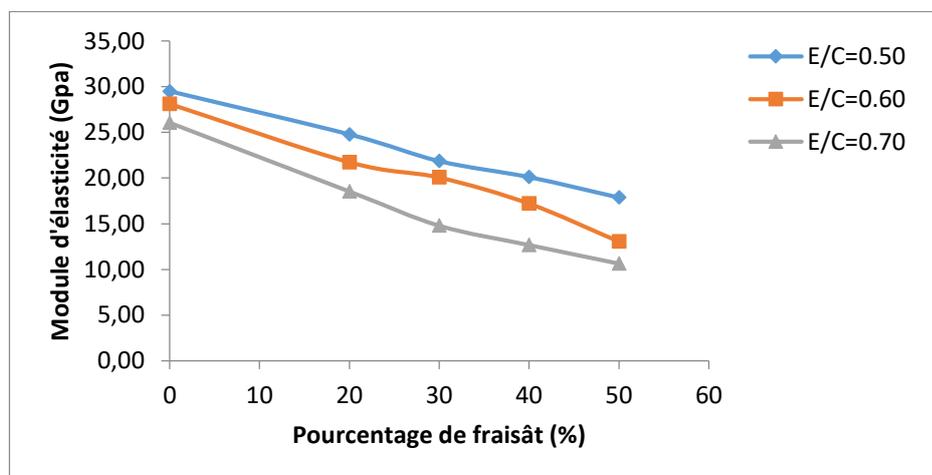


Fig. 3.19 Résultats des essais de module d'élasticité à 28 jours en fonction du pourcentage de fraisât.

Les résultats expérimentaux montrent que le module d'élasticité statique diminue considérablement lorsque le pourcentage de fraisâts augmente dans le mix et lorsque le rapport de E/C augmente. La baisse relative du module d'élasticité due à l'introduction du fraisât, défini par l'Eq.3.9, est de 16% pour les BF 20% lorsque E/C=0.50. Elle est de 20% lorsque E/C=0.60 et 29% lorsque E/C=0.70. Pour les BF 30%, la baisse relative est de 26%-29% et 43% lorsque E/C=0.50-0.60 et 0.70 respectivement. La baisse relative est encore plus importante lorsque le pourcentage de fraisât dans le mix augmente ; elle atteint pour les BF 50%, les valeurs de 40%-52% et 59% ce qui est important. Cette baisse du module d'élasticité peut être expliquée comme suit ; l'introduction des agrégats de fraisât peut engendrer plus de déformations lors du chargement entraînant ainsi une rupture du matériau (béton de fraisât) plus ductile.

$$\Delta E_{stat} (\%) = \frac{E_{stat} (BF=0) - E_{stat} (BF)}{E_{stat} (BF=0)} * 100 \quad (3.9)$$

Avec :

ΔE_{stat} : baisse relative en termes de module d'élasticité, exprimée en (%).

$E_{stat} (BF)$: Module d'élasticité des bétons de fraisâts.

$E_{stat} (BF=0)$: Module d'élasticité des bétons de référence (100% granulats naturels).

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

Si l'on compare l'effet du fraisât sur les résistances mécaniques et sur le module d'élasticité, il apparaît que la résistance en compression et le module d'élasticité sont les caractéristiques les plus affectées par le remplacement partiel des granulats naturels par les agrégats de fraisâts. La résistance en traction ainsi que la résistance en flexion sont aussi affectées par l'introduction du fraisât mais d'une manière moins importante que la résistance en compression et le module d'élasticité statique.

Concernant l'effet de la variation du rapport de E/C, les résistances mécaniques ainsi que le module d'élasticité baissent lorsque le rapport E/C augmente, aussi bien pour les bétons témoins que pour les bétons de fraisât. Cependant, d'une manière générale et pour toutes les propriétés mécaniques et élastiques précédentes, l'effet néfaste de l'introduction du fraisât est plus important pour les rapports de E/C élevés. De ce fait, il est recommandé de choisir des rapports de E/C relativement faible. En fait, le rapport de E/C doit être suffisamment faible pour limiter l'effet négatif du fraisât mais suffisamment élevé pour garantir une mise en œuvre facile des dalles de grandes surfaces telles que les dalles des chaussées rigides. Un rapport de E/C de 0.50 semble adéquat.

2.2.6. Module d'élasticité dynamique

Le module d'élasticité dynamique est un paramètre important. Il permet d'estimer la rigidité du matériau en utilisant une méthode non destructive. Cet essai est largement répandu du fait de sa simplicité. Dans un premier temps, il est mesuré le temps de propagation de la première impulsion d'ondes longitudinales générées par un transducteur (transducteur émetteur) et reçue par un autre transducteur (transducteur récepteur) entre deux points déterminés du béton à mesurer (Fig.3.20). A partir du temps de mesure, la vitesse conventionnelle de propagation est estimée. Le module d'élasticité dynamique E_d est déterminé selon l'équation Eq. 3.10 où V_p est la vitesse conventionnelle de propagation de l'onde ultrasonique et ρ la densité de l'éprouvette

$$V_p = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (3.10)$$

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

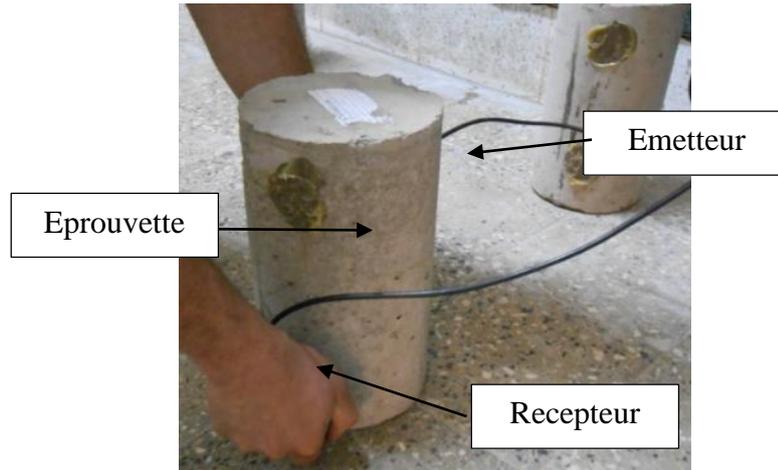


Fig. 3.20 Détermination du temps de propagation de l'onde ultra sonique.

Les résultats des essais à 28 jours, montrent tout d'abord, que l'onde émise par l'émetteur ultrasonique, parcourt aussi bien les bétons conventionnels que les bétons de fraisât ; elle est cependant affectée par la présence de du film bitumineux ; l'onde ultrasonique met plus de temps dans les bétons de fraisâts que dans les bétons de référence à parcourir la même distance. De plus, le temps de propagation de l'onde ultrasonique augmente d'une façon très claire lorsque le pourcentage de fraisât augmente dans le mix. Le temps que met l'onde ultrasonique dans les bétons témoins de 28 jours, confectionnés à $E/C=0.50$ est de l'ordre de $37.54 \mu s$ tandis qu'elle est de $38.87 \mu s$ dans les bétons témoins confectionnés à $E/C=0.60$ et de $40.47 \mu s$ dans les bétons témoins confectionnés à $E/C=0.70$. Toujours à 28 jours, pour les BF 20%, l'onde ultrasonique met $37.97 \mu s - 39.84 \mu s$ et $41.51 \mu s$ lorsque $E/C=0.50-0.60$ et 0.70 respectivement. Le temps de mesure atteint $40.97 \mu s$ pour les BF 50% confectionnés à $E/C=0.50$ et $43.15 \mu s$ pour les BF 50% confectionnés à $E/C=0.60$ et enfin $45.11 \mu s$ pour les BF 50% confectionnés à $E/C=0.70$. En fait, l'onde dans son parcours, va contourner l'interface bitumineuse lorsqu'elle rencontre un agrégat bitumineux, ce qui va augmenter la distance parcourue.

A partir du temps mesuré et connaissant la distance parcourue par l'onde ultrasonique (qui est le diamètre de chaque éprouvette), la vitesse de propagation de l'onde longitudinale ultrasonique est déterminée. Les résultats à 28 jours de la vitesse de propagation de l'onde ultrasonique en fonction du pourcentage de fraisâts sont représentés graphiquement sur la Fig. 3.21. Plus le temps que met l'onde à traverser la distance considérée est important, plus la vitesse de propagation est réduite, plus le temps de propagation de l'onde est faible, plus la

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

vitesse de propagation est importante. La vitesse de propagation de l'onde ultrasonique diminue lorsque le pourcentage de fraisât diminue et lorsque le rapport de E/C augmente.

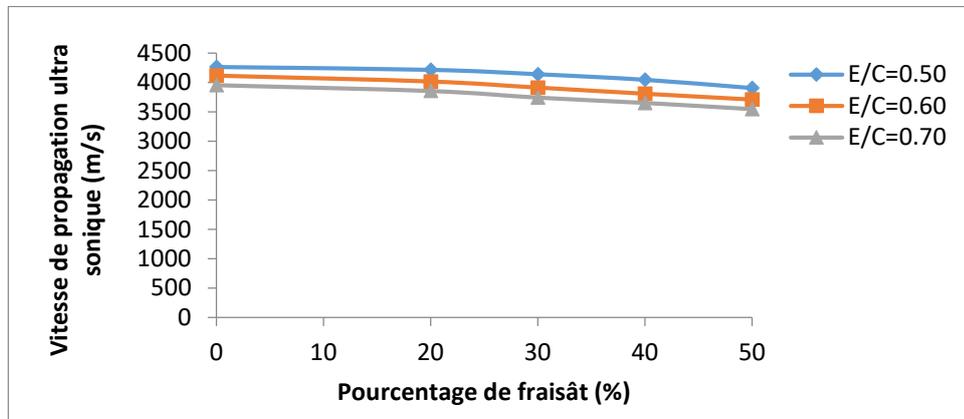


Fig. 3.21 Vitesse de propagation de l'onde ultrasonique en fonction du pourcentage de fraisât à 28 jours.

Pour les bétons témoins à 28 jours, la vitesse varie de 4262 m/s à 3996 m/s lorsque E/C=0.60, à 3894 m/s lorsque E/C=0.70 pour les différents rapports de E/C considérés. Pour les BF 20%, la vitesse de propagation varie de 4214 m/s lorsque E/C=0.50 à 4016 m/s lorsque E/C=0.60 à 3854 m/s lorsque E/C=0.70. Pour les BF 50, elle varie de 3905 m/s à 3708 m/s à 3547 m/s lorsque le rapport de E/C passe de 0.50 à 0.60 à 0.70. Des valeurs intermédiaires sont obtenues pour les autres formulations de béton de fraisât. Ce qui représente des baisses relatives, définies par l'Eq.3.11, de l'ordre de 1% à 3% seulement pour les BF 20%, de 3% à 5% pour les BF 30%, de 5% à 8% pour les BF 40% et enfin de 8% à 10% pour les BF 50% et ce pour les différents rapports de E/C considérés.

$$\Delta V_p (\%) = \frac{V_p (BF=0) - V_p (BF)}{V_p (BF=0)} * 100 \quad (3.11)$$

Avec :

ΔV_p : baisse relative en termes de vitesse de propagation de l'onde, exprimée en (%).

$V_p (BF)$: vitesse de propagation de l'onde dans les bétons de fraisâts.

$V_p (BF=0)$: vitesse de propagation de l'onde dans les bétons de référence (100% granulats naturels).

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

Afin de suivre l'évolution dans le temps de la vitesse de propagation dans le temps et en fonction du pourcentage de fraisât, d'autres essais ont été réalisés à 7-14 et 91 jours. Les résultats sont rapportés sur le Tableau 3.5 où la vitesse conventionnelle est donnée en m/s.

Tableau 3.5 Vitesse de propagation de l'onde ultrasonique en fonction du pourcentage de fraisâts.

Désignation	E/C	Vitesse ultrasonique (m/s)			
		7 jours	14 jours	28 jours	91 jours
BF 0%	0.50	3929	4069	4262	4367
BF 20%		3868	3997	4214	4307
BF 30%		3784	3960	4140	4205
BF 40%		3705	3880	4046	4124
BF 50%		3678	3757	3905	4020
BF 0%	0.60	3814	3996	4116	4227
BF 20%		3759	3882	4016	4166
BF 30%		3626	3830	3912	3998
BF 40%		3560	3711	3808	3959
BF 50%		3513	3653	3708	3904
BF 0%	0.70	3697	3894	3954	4042
BF 20%		3605	3811	3854	4004
BF 30%		3480	3717	3743	3763
BF 40%		3422	3655	3652	3738
BF 50%		3376	3522	3547	3677

D'une manière générale, pour les bétons conventionnels, les essais ultrasoniques sont utilisés pour estimer la résistance en compression en utilisant des essais non destructifs en utilisant des abaques normalisés. Une vitesse de propagation de l'onde ultrasonique importante traduit une bonne résistance en compression. Une vitesse moindre traduit une résistance en compression plus faible. Dans ce qui suit, une relation expérimentale permettant d'estimer la résistance en compression à partir de la vitesse de propagation de l'onde ultrasonique est donné, valable aussi bien pour les bétons conventionnels que pour les bétons de fraisât. Elle est montrée par la Fig. 3.22. La relation proposée est linéaire avec un indice de corrélation obtenu $R^2=0.936$ considéré comme satisfaisant (Ostle, 1999).

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

Ce résultat est important et pratique dans la mesure où la résistance en compression des bétons de fraisât peut être estimée à partir d'essais non destructifs.

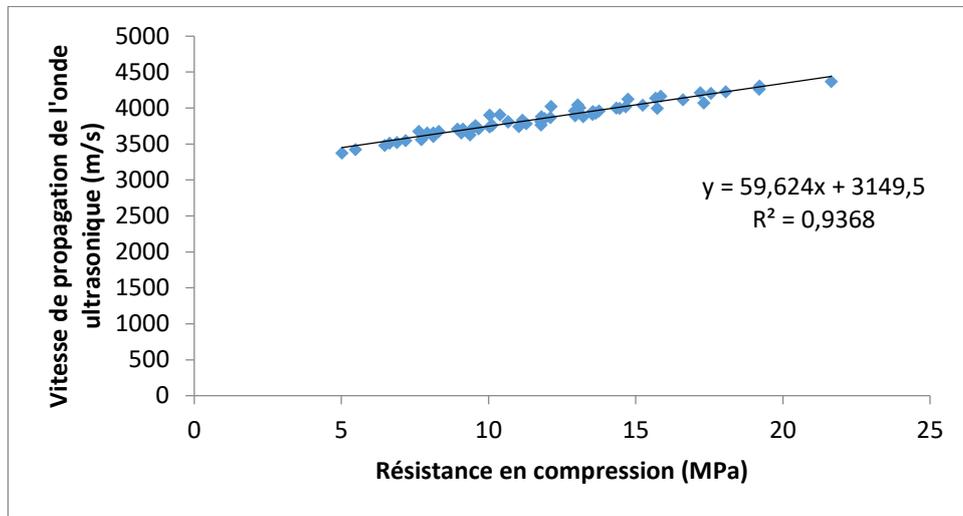


Fig. 3.22 Relation expérimentale estimant la résistance en compression à partir de la vitesse de propagation de l'onde ultrasonique.

A partir de la vitesse de propagation de l'onde ultrasonique dans chaque éprouvette cylindrique de béton et à partir de la densité de chaque éprouvette, le module d'élasticité dynamique E_d est estimé selon l'expression donnée par l'Eq. 2.1 à 7-14-28 et 91 jours. Les résultats sont représentés graphiquement par la Fig. 3.23 pour les trois rapports de E/C considérés.

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraïsat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

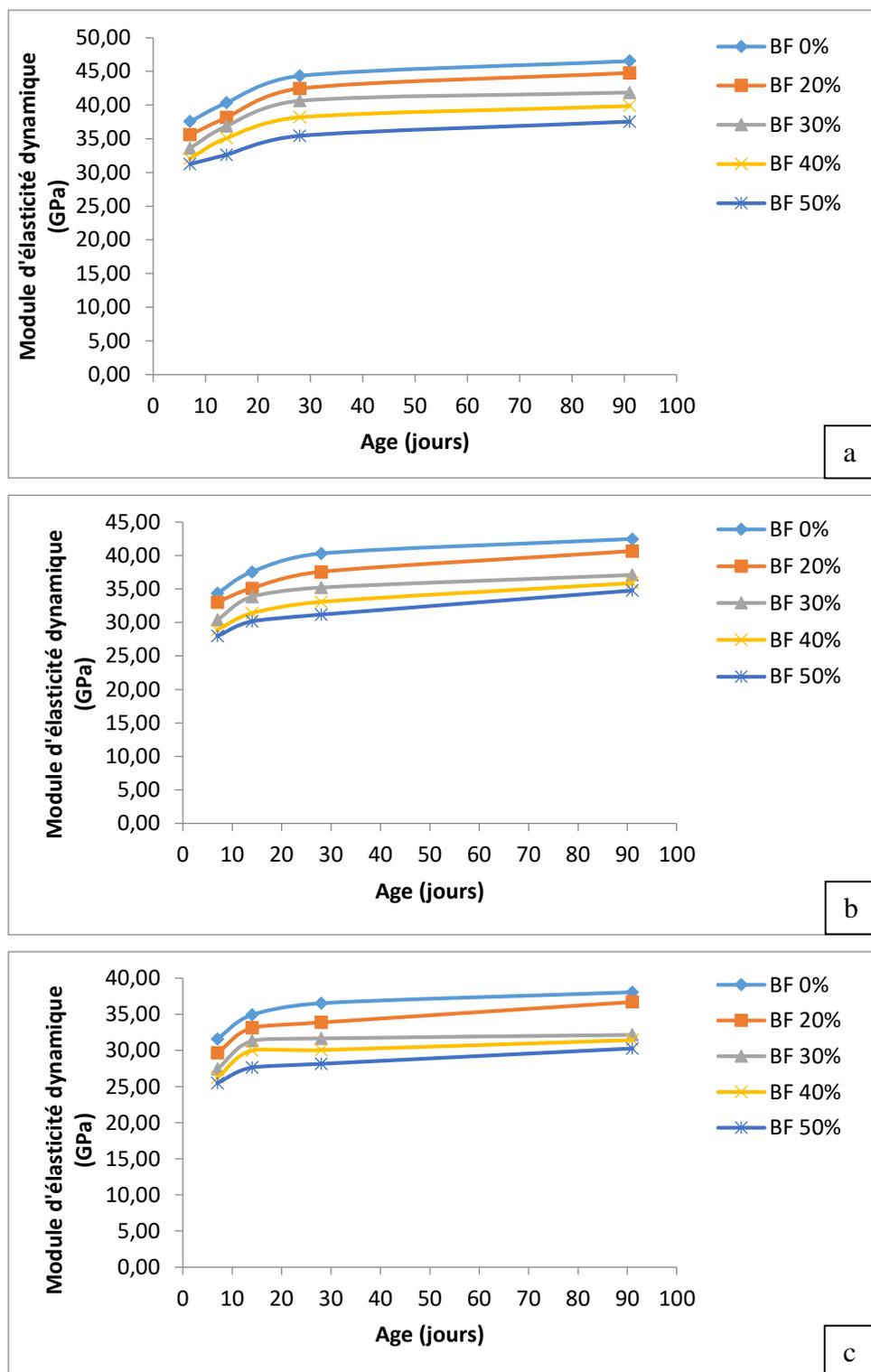


Fig. 3.23 Evolution du module d'élasticité dynamique en fonction de la durée de cure

a) E/C=0.50 b) E/C=0.60 c) E/C=0.70.

Chapitre 3- Effet des agrégats de fraisat sur les caractéristiques mécaniques des bétons

Les valeurs du module d'élasticité dynamiques sont plus importantes que les valeurs du module d'élasticité statique. A 7 jours, la baisse relative en termes de module d'élasticité dynamique, définie par l'Eq.3.12, de l'ordre de 4% à 6% seulement par rapport aux bétons conventionnels et ce pour les trois rapports de E/C considérés. La baisse relative est plus importante pour les BF 30% ; elle est de 10% à 13%. Pour les BF 40%, elle est de 14% à 17%. Pour les BF 50%, elle est de 17% à 19% encore une fois par rapport aux bétons conventionnels.

A 28 jours, la baisse relative des valeurs du module d'élasticité dynamique sont légèrement plus importantes ; elle varie de 4% à 7% pour les BF 20% et elle atteint 23% pour les BF 50%. Des valeurs intermédiaires sont observées pour les autres bétons de fraisâts.

$$\Delta E_{dyn} (\%) = \frac{E_{dyn}(BF=0) - E_{dyn}(BF)}{E_{dyn}(BF=0)} * 100 \quad (3.12)$$

Avec :

ΔE_{dyn} : baisse relative en termes de module d'élasticité dynamique, exprimée en (%).

$E_{dynVp}(BF)$: module d'élasticité dynamique des bétons de fraisâts.

$E_{dyn}(BF=0)$: module d'élasticité dynamique des bétons de référence (100% granulats naturels).

3. Conclusion

Dans le présent chapitre, il a été montré que le remplacement des granulats naturels par des agrégats de fraisâts a un effet négatif sur les propriétés mécaniques des bétons rejoignant ainsi les différents résultats expérimentaux rapportés dans la littérature.

La résistance en compression ainsi que le module d'élasticité statique sont les propriétés les plus sensibles à l'introduction de fraisât. Les résistances en traction par fendage et par flexion ainsi que le module d'élasticité dynamique et la densité des bétons sont aussi affectés par l'introduction de fraisât mais d'une manière moins significative.

Concernant l'effet de la variation du rapport de E/C sur les propriétés des bétons de fraisâts ; les performances diminuent lorsque le rapport de E/C augmente aussi bien pour les bétons conventionnels que pour les bétons de fraisâts.

Afin d'améliorer les caractéristiques des bétons de fraisât, des ajouts sont envisagés, objet du chapitre suivant.

Chapitre 4 – Amélioration des propriétés mécaniques des bétons de fraisats

1. Introduction

Afin de tenter d'améliorer, dans un premier temps, la principale propriété mécanique du béton qui est la résistance en compression, notre choix s'est fixé sur deux types d'ajouts : un ajout organique : des fibres de polypropylène (FP), et un ajout minéral : la fumée de silice (FS), en dépit d'autres ajouts qui auraient, bien entendu, pu convenir.

Les fibres de polypropylène ont depuis très longtemps été utilisées pour renforcer les bétons ; elles ont l'avantage d'être organiques, inertes à des PH élevées, non toxiques et dont le coût est relativement faible, comparé aux autres fibres. Un autre avantage de renforcer le béton avec les fibres de polypropylène est la réduction significative des effets du retrait, surtout au jeune âge, ce qui est un résultat utile et pratique pour les éléments de grandes surfaces telles que les dalles de chaussées rigides.

Quant à la fumée de silice, c'est un produit obtenu pendant la production du silicium et des alliages de ferrosilicium sous forme de sphères de 50 à 200 nanomètres. Ces sphères contiennent principalement du SiO_2 et des quantités variables de Ca, Al, Na ainsi que des oxydes de K (considérés comme des pollutions). D'une manière générale, la fumée de silice (ajoutée à des taux avoisinant les 10% en remplacement du poids du ciment) augmente l'adhérence entre les différents constituants des bétons grâce à ses propriétés pozzolaniques. De ce fait, la résistance en compression est augmentée.

Quant à son utilisation dans les bétons fabriqués entièrement ou partiellement à partir d'agrégats recyclés (agrégats issus de la démolition des constructions), l'ajout de la fumée de silice augmente la résistance en compression même si celle-ci est diminuée à cause de l'introduction d'agrégats recyclés.

Dans ce qui suit, il s'agira dans un premier temps, de déterminer l'effet de l'ajout des fibres de polypropylène ainsi que l'effet de la fumée de silice sur la principale propriété des bétons qui est la résistance en compression. Pour cela, les fibres de polypropylènes ont été introduites à deux dosages : à 0.1% (taux usuel) puis à 1% (fort taux). La fumée de silice a été introduite à 10% (taux usuel) puis à 15% (fort taux) en remplacement du poids du ciment.

2. Amélioration de la résistance en compression des bétons de fraisâts

2.1 Par ajout des fibres de polypropylène

Les essais de résistance en compression ont été réalisés sur les différents bétons de fraisâts, pour les trois rapports de E/C et à 3-7-14-28 et 91 jours.

Les résultats des essais à 3-7-14-28 et 91 jours sont rapportés sur le Tableau 4.1. Les résultats des essais de résistance en compression à 28 jours sont repris graphiquement par la Fig. 4.1. Afin de mieux montrer la tendance.

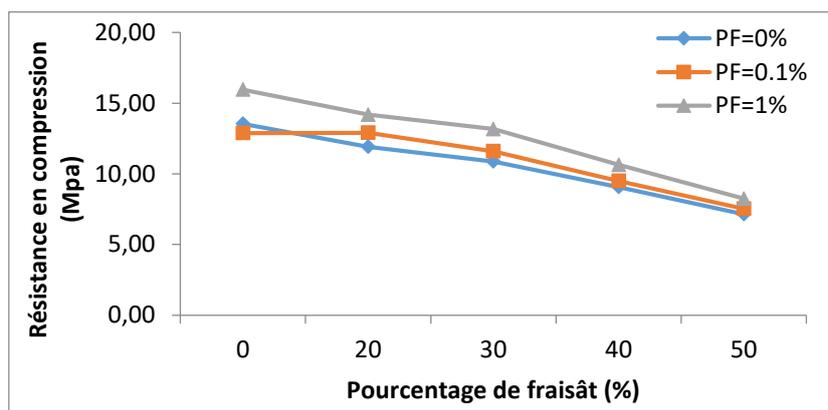
D'après les résultats obtenus, l'introduction des fibres de polypropylène augmente la résistance en compression ; d'une manière non négligeable lorsqu'elles sont introduites à 0.1% et d'une manière significative lorsqu'elles sont introduites à 1%. Cette tendance est observée pour les trois rapports de E/C considérés quel que soit le temps de cure. En effet, le gain relative en termes de résistance en compression varie de 3.6 à 8.6% lorsque les fibres sont introduites à 0.1% et lorsque le rapport de E/C=0.50 pour les différentes formules de bétons, de 1.6 à 10% lorsque le rapport de E/C=0.60 et enfin de 3 à 9.5% lorsque le rapport de E/C=0.70. Lorsque les fibres sont introduites à 1%, le gain relative est plus important ; il varie de 12 à 26% lorsque le rapport de E/C=0.50, de 8 à 26% lorsque le rapport de E/C=0.60 et enfin de 10 à 25% lorsque le rapport de E/C=0.70, et ce pour les différentes formules de bétons. Ces résultats sont en accord avec ceux de Nili et Afroughsabet (Nili and Afroughsabet, 2010). Les fibres de polypropylène se dispersant bien dans le mélange, leur introduction produit une réduction des microfissures et une réduction de la largeur des microfissures, réduisant ainsi les vides et par conséquent la perméabilité (Banthia et Gupta, 2006 ; Toutanji et Korchi, 1995).

Aussi, la résistance en compression augmente avec le temps de cure, résultat du processus de durcissement du béton. Ce résultat prouve que l'introduction des fibres de polypropylène n'affecte pas le processus de l'hydratation du ciment dans les bétons de références et dans les bétons de fraisâts.

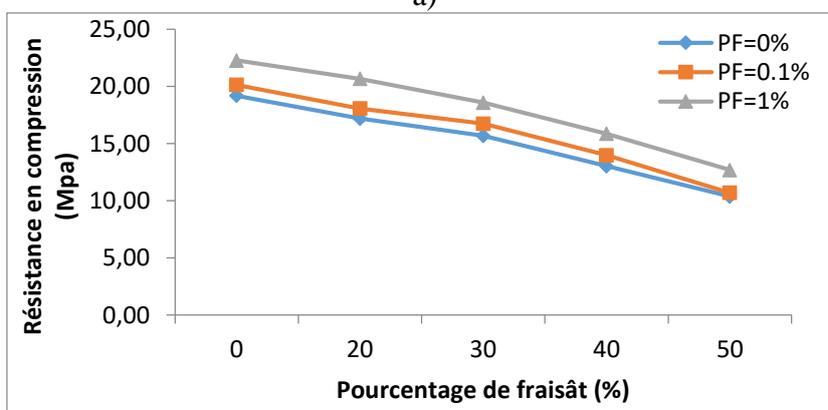
Chapitre 4 – Amélioration des propriétés mécaniques des bétons de fraisats

Tableau 4.1. Résultats des essais de résistances en compression des bétons en fonction du taux de renforcement en fibres.

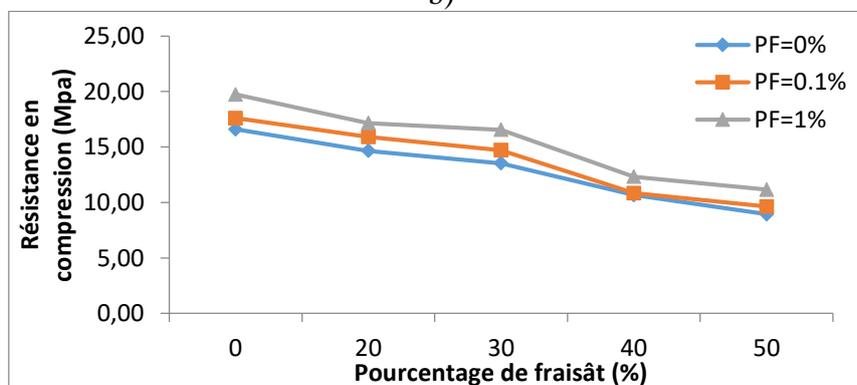
Dosage en fibres	3 jours			7 jours		
	0%	0.1%	1%	0%	0.1%	1%
BF 0%	7.13	7.60	8.61	13.64	14.80	17.19
BF 20%	6.05	6.36	7.37	12.10	12.85	14.92
BF 30% E/C=0.50	5.43	5.66	6.44	11.28	11.84	13.48
BF 40%	4.20	4.45	4.87	9.12	9.91	10.67
BF 50%	4.05	4.26	4.70	7.63	8.06	9.41
BF 0%	6.05	6.39	7.41	11.78	12.31	14.66
BF 20%	5.71	5.99	6.83	10.12	10.95	10.95
BF 30% E/C=0.60	4.97	5.35	5.86	9.37	10.30	10.91
BF 40%	3.55	3.78	4.29	7.71	7.51	9.44
BF 50%	3.65	3.84	4.26	6.64	6.92	7.80
BF 0%	4.83	5.22	5.81	9.12	9.92	10.77
BF 20%	4.19	4.43	4.98	8.13	8.87	9.59
BF 30% E/C=0.70	3.56	3.79	4.22	6.47	6.91	7.90
BF 40%	3.00	3.18	3.49	5.47	5.91	6.57
BF 50%	3.27	3.47	3.74	4.96	5.33	5.88
	14 jours			91 jours		
Dosage en fibres	0%	0.1%	1%	0%	0.1%	1%
BF 0%	17.32	18.63	20.79	21.64	22.43	25.34
BF 20%	15.73	16.62	17.71	19.21	20.04	22.75
BF 30% E/C=0.50	13.75	14.75	16.88	17.56	18.53	20.52
BF 40%	11.79	11.42	14.49	14.73	15.79	17.77
BF 50%	9.55	10.30	10.71	12.12	10.70	14.65
BF 0%	14.45	15.25	17.19	18.06	18.84	21.50
BF 20%	12.85	13.98	15.78	15.85	16.83	18.82
BF 30% E/C=0.60	11.15	11.65	14.09	14.34	15.14	17.48
BF 40%	9.66	10.17	11.82	12.92	13.81	15.37
BF 50%	7.92	8.10	9.66	10.03	10.40	12.09
BF 0%	12.94	14.05	15.83	15.24	16.06	18.11
BF 20%	10.67	11.37	13.14	13.10	13.77	15.59
BF 30% E/C=0.70	9.45	10.25	11.85	11.78	12.33	14.15
BF 40%	8.12	8.89	9.57	10.03	10.46	11.72
BF 50%	6.89	7.11	7.58	8.31	8.66	9.55



a)



b)



c)

Fig. 4.1 Effet des fibres de polypropylène sur la résistance en compression à 28 jours a) E/C=0.50 b) E/C=0.60 c) E/C=0.70.

2.2 Par ajout de la fumée de silice

Les essais de résistance en compression ont été réalisés sur les différents bétons de fraisats, pour les trois rapports de E/C et à 7-28 et 91 jours, pour des taux de fumée de silice de 10% et 15% en remplacement du poids du ciment. Les résultats des essais à 7-28 et 91 jours sont rapportés sur le Tableau 4.2. Les résultats des essais à 28 jours sont repris sur la Fig. 4.2

Chapitre 4 – Amélioration des propriétés mécaniques des bétons de fraisats

Tableau 4.2. Résultats des essais de résistances en compression des bétons en fonction du taux de fumée de silice.

		7 jours			28 jours		
Fumée de silice		0%	10%	15%	0%	10%	15%
BF 0%		13.64	15.35	15.50	19.19	22.72	22.62
BF 20%		12.10	13.51	13.52	17.19	19.96	20.01
BF 30%	E/C=0.50	11.28	12.45	12.58	15.68	18.08	18.11
BF 40%		9.12	9.93	9.98	13.03	14.85	14.88
BF 50%		7.63	8.22	8.26	10.38	11.58	11.62
BF 0%		11.78	13.20	13.37	16.60	19.68	19.45
BF 20%		10.12	11.22	11.26	14.66	16.91	17.05
BF 30%	E/C=0.60	9.37	10.31	10.41	13.53	15.57	15.60
BF 40%		7.71	8.36	8.43	10.66	12.05	12.05
BF 50%		6.64	7.05	7.17	8.94	9.89	9.99
BF 0%		9.12	10.08	10.27	13.54	15.82	15.82
BF 20%		7.54	8.29	8.30	11.91	13.73	13.82
BF 30%	E/C=0.70	6.47	6.99	7.13	10.87	12.38	12.50
BF 40%		5.47	5.89	5.97	9.07	10.19	10.32
BF 50%		4.96	5.27	5.31	7.15	7.88	8.09
		91 jours					
Fumée de silice		0%	10%	15%			
BF 0%		21.64	26.08	25.80			
BF 20%		19.21	22.77	22.39			
BF 30%	E/C=0.50	17.56	20.45	20.43			
BF 40%		14.73	16.97	16.90			
BF 50%		12.12	13.80	13.51			
BF 0%		18.06	21.68	21.50			
BF 20%		15.85	18.73	18.40			
BF 30%	E/C=0.60	14.34	16.63	16.64			
BF 40%		12.92	14.87	14.84			
BF 50%		10.03	11.34	11.35			
BF 0%		15.24	18.16	18.06			
BF 20%		13.10	15.37	15.19			
BF 30%	E/C=0.70	11.78	13.64	13.62			
BF 40%		10.03	11.52	11.50			
BF 50%		8.31	9.39	9.31			

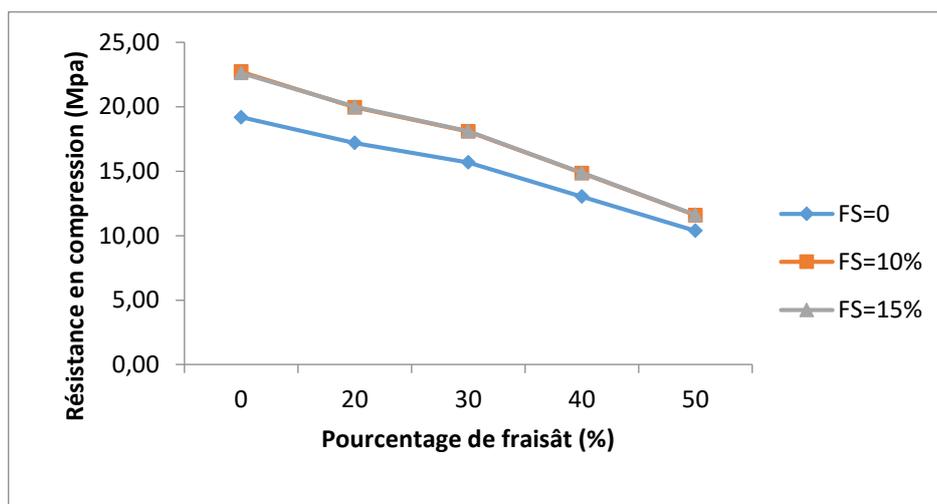


Fig. 4.2 Résultats des essais de compression.

Tout comme pour les résultats obtenus précédemment (chapitre 3), les résultats expérimentaux montrent tout d'abord que l'évolution dans le temps de la résistance en compression des bétons de fraisâts est similaire à celle des bétons conventionnels ; elle augmente avec le temps. Aussi, la résistance en compression diminue considérablement lorsque le pourcentage de fraisâts augmente dans le mix.

Lorsque la FS est introduite à 10% en remplacement du ciment, la résistance en compression est augmentée. Le gain relatif en résistance en compression, défini par l'équation Eq.4.1, est de l'ordre de 20% à 91 jours pour les bétons conventionnels, rejoignant les résultats rapportés dans la littérature (Siddique, 2011 ; Dilbas et al., 2014 ; Nili and Afroughsabet, 2012 ; Fonteboa and Abella, 2008) et de l'ordre de 14% à 18% à 91 jours pour les bétons de fraisâts. A 7 jours, le gain relatif en termes de résistance en compression lorsque la FS est ajoutée à 10% est de l'ordre de 10 à 11% pour les BF 20% pour les différents rapports de E/C. Pour les BF 30 %, le gain relatif est du même ordre : de 8 à 10%. Pour les BF 40%, il est de 7 à 9% et enfin pour les BF 50%, il est de 6 à 7% (sensiblement le même ordre de grandeur).

A 28 jours, le gain relatif en termes de résistance en compression est plus important, pour les BF 20%, il est de l'ordre de 15 à 16%, pour les BF 30%, de 14 à 15%, pour les BF 40% il est de 12 à 14% et enfin, pour les BF 50% de 10 à 12%. Les mêmes valeurs sont obtenues pour les bétons de fraisâts à 91 jours.

Des gains relatifs très similaires sont observés lorsque la FS est introduite à 15% en remplacement du poids du ciment, aussi bien pour les bétons conventionnels que pour les bétons de fraisâts ; il n'y a pas vraiment d'effet supplémentaire de la FS sur la résistance en compression lorsque cette dernière est introduite à des taux trop élevés (>10% en remplacement du poids du ciment).

$$\Delta R_c (\%) = \frac{R_c (FS) - R_c (FS=0)}{R_c (FS=0)} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Avec :

ΔR_c : gain relatif en termes de résistance en compression, donné en pourcentage

$R_c (FS)$: résistance en compression du béton avec ajout de FS (à 10% ou 15% en remplacement du ciment).

$R_c (FS=0)$: résistance en compression du béton sans ajout de FS.

La réduction de la taille des pores due à la finesse de la FS conduit à une réduction de la porosité et de la perméabilité des bétons et par conséquent une matrice plus dense (Siddique 2011).

Cependant, le résultat le plus important reste le fait que la réaction pozzolanique a bien eu lieu malgré la présence du film bitumineux autour des agrégats ; l'effet pozzolanique de la FS dans les bétons ne dépend pas de la nature de l'interface dans la mesure où elle se produit aussi bien dans des bétons confectionnés à partir de granulats naturels (Siddique 2011, Dilbas et al 2014, Nili and Afroughsabet 2012, Fonteboa and Abella 2008), que dans les bétons confectionnés à partir d'agrégats issus de la démolition des constructions (Dilbas et al. 2014, Corinaldesi and Moriconi 2009, Kou et al. 2011, Elhakam et al. 2012) que dans les bétons confectionnés à partir de fraisât, comme il est démontré dans la présente étude.

L'analyse au Microscope Electronique à balayage (MEB) réalisés sur nos échantillons, confirme les conclusions de notre travail, comme montré sur la Fig. 4.3

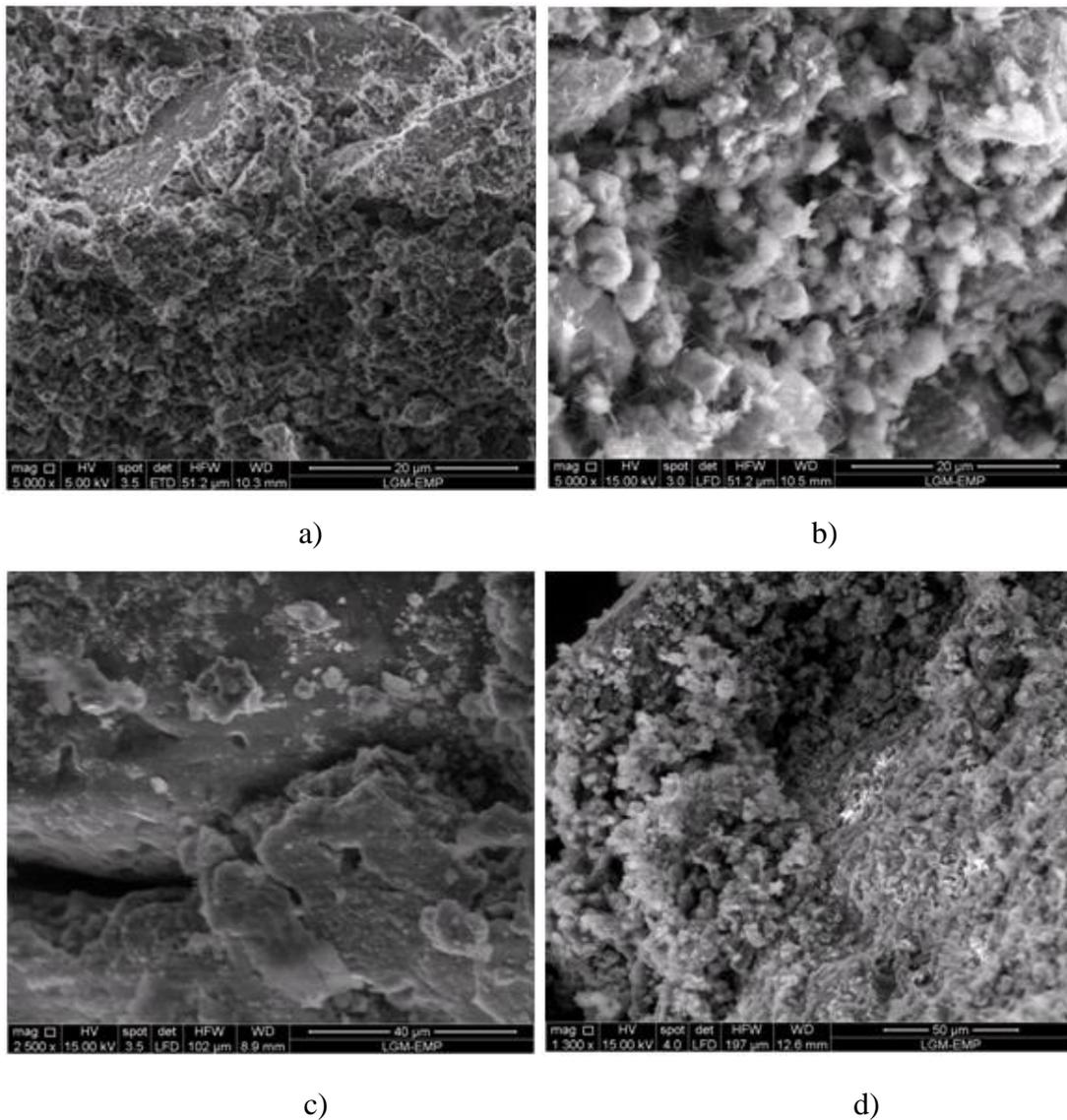
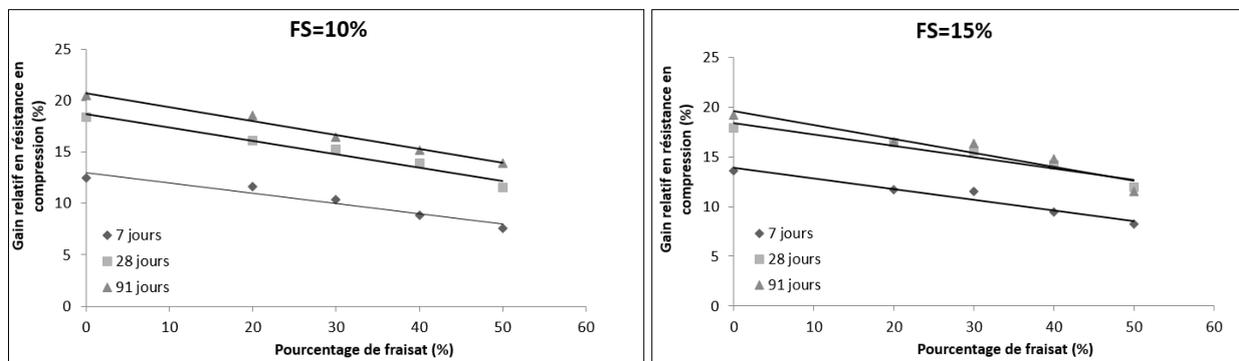


Fig.4.3 Analyse MEB de l'interface a) granulats naturels-pâte de ciment sans FS b) granulats naturels-pâte de ciment avec FS c) agrégats de fraisât-pâte de ciment sans FS d) agrégats de fraisât-pâte de ciment avec FS.

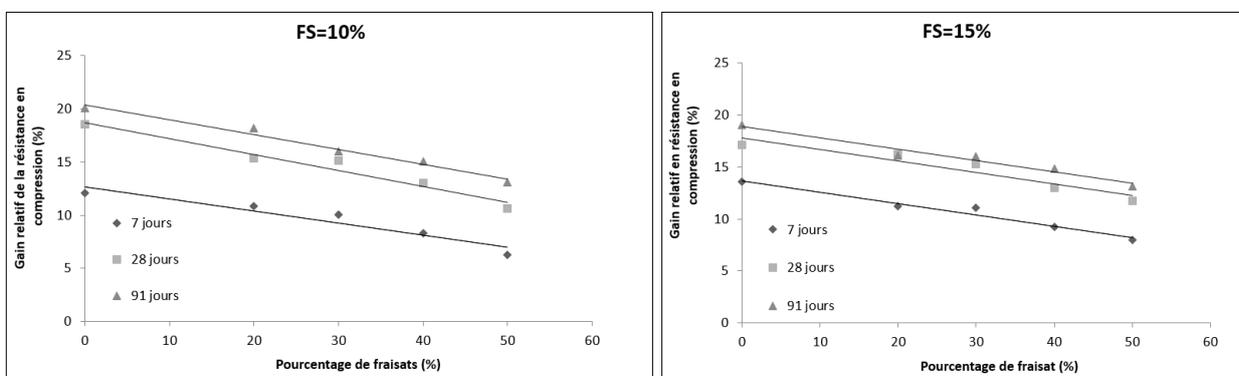
Comme cité précédemment, la résistance en compression des bétons diminue lorsque le pourcentage de fraisats augmente dans le mix. Elle a été augmentée avec l'ajout de la FS. Seulement, même si la résistance en compression des bétons de fraisât est améliorée grâce à l'ajout de la FS, il est important de noter que l'efficacité de la fumée de silice diminue lorsque le pourcentage de fraisât augmente dans le béton, comme montré sur la Fig. 4.4 où le gain relatif en résistance en compression est représenté en fonction du pourcentage de fraisât. En effet, les

Chapitre 4 – Amélioration des propriétés mécaniques des bétons de fraisats

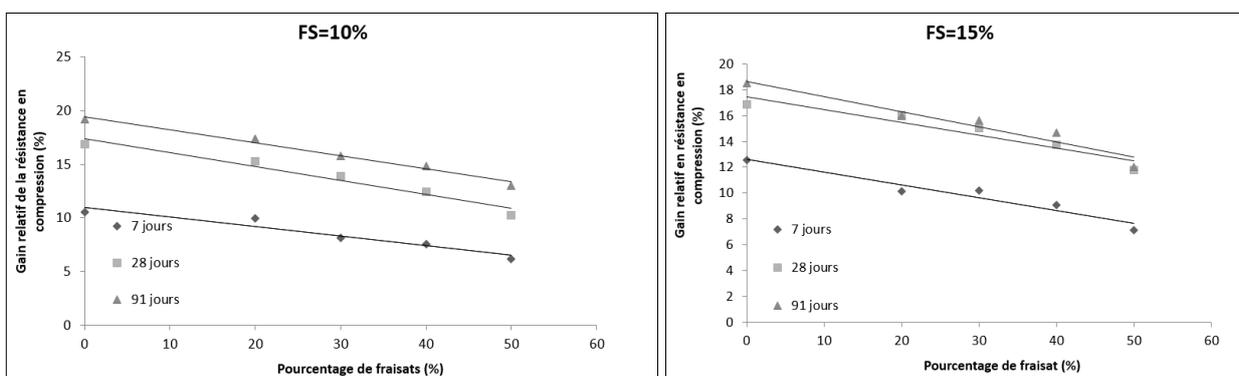
impuretés et les pollutions apportées par les fraisâts non lavés peuvent réduire l'efficacité de la FS à augmenter la résistance en compression (Dilbas et al. 2014).



a)



b)



c)

Fig. 4.4 Gain relatif en résistance en compression en fonction du pourcentage de fraisât a) pour $E/C=0.50$ b) pour $E/C=0.60$ c) pour $E/C=0.70$

La variation du gain relatif en résistance en compression due à l'ajout de la FS en fonction du pourcentage de fraisât, suit une tendance linéaire. Les équations traduisant cette tendance sont reportées sur le Tableau 4.3. Dans tous les cas, le coefficient R^2 (>0.90) montre bien que la

Chapitre 4 – Amélioration des propriétés mécaniques des bétons de fraisats

tendance linéaire proposée traduit bien la diminution du gain relatif en résistance en compression en fonction du pourcentage de fraisât lorsque la fumée de silice est introduite, et cette variation est proportionnelle à la variation du pourcentage de fraisât.

Tableau 4.3. Equations traduisant la tendance linéaire entre le gain relatif de la résistance en compression et le pourcentage de fraisât.

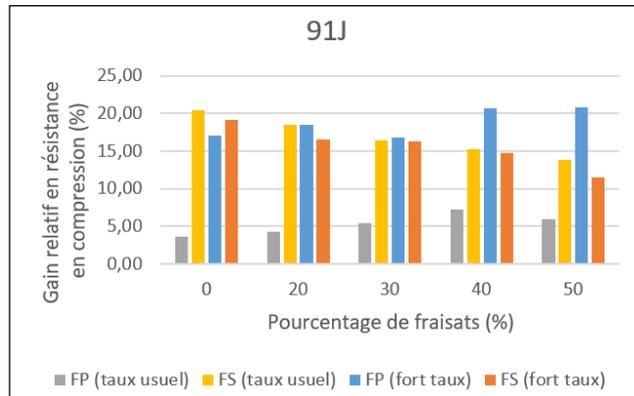
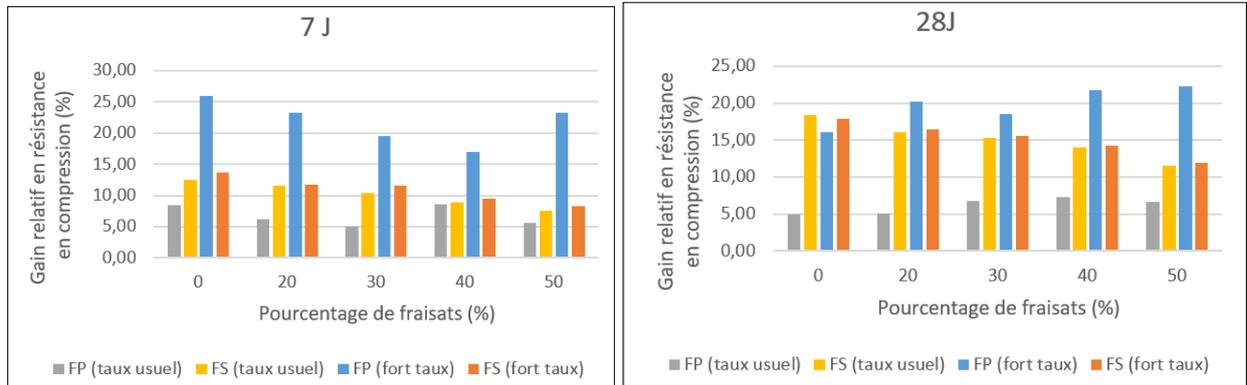
		FS=10%		FS=15%	
		Equation	R ²	Equation	R ²
7 jours		$y = -0.1006 x + 13.012$	0.938	$y = -0.1066 x + 13.882$	0.946
28 jours	E/C=0.50	$y = -0.1296 x + 18.692$	0.963	$y = -0.1138 x + 18.369$	0.931
91 jours		$y = -0.1361 x + 20.734$	0.987	$y = -0.1401 x + 19.592$	0.910
7 jours		$y = -0.1389 x + 20.37$	0.9775	$y = -0.1102 x + 18.922$	0.9578
28 jours	E/C=0.60	$y = -0.1501 x + 18.734$	0.9595	$y = -0.1118 x + 17.823$	0.907
91 jours		$y = -0.113 x + 12.677$	0.9147	$y = -0.1094 x + 13.676$	0.968
7 jours		$y = -0.887 x + 10.962$	0.9236	$y = -0.0989 x + 12.588$	0.9347
28 jours	E/C=0.70	$y = -0.1299 x + 17.36$	0.956	$y = -0.0982 x + 17.436$	0.9049
91 jours		$y = -0.1216 x + 19.435$	0.9825	$y = -0.117 x + 18.643$	0.9299

Il est utile de rappeler que tous les essais ont été réalisés dans des conditions similaires, la seule variation étant les paramètres étudiés et tous les autres paramètres étant fixes et constants. Par conséquent, il n'y a aucun effet des paramètres fixés sur les résultats obtenus.

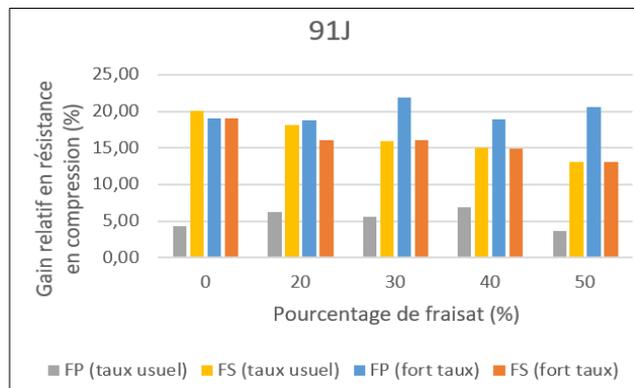
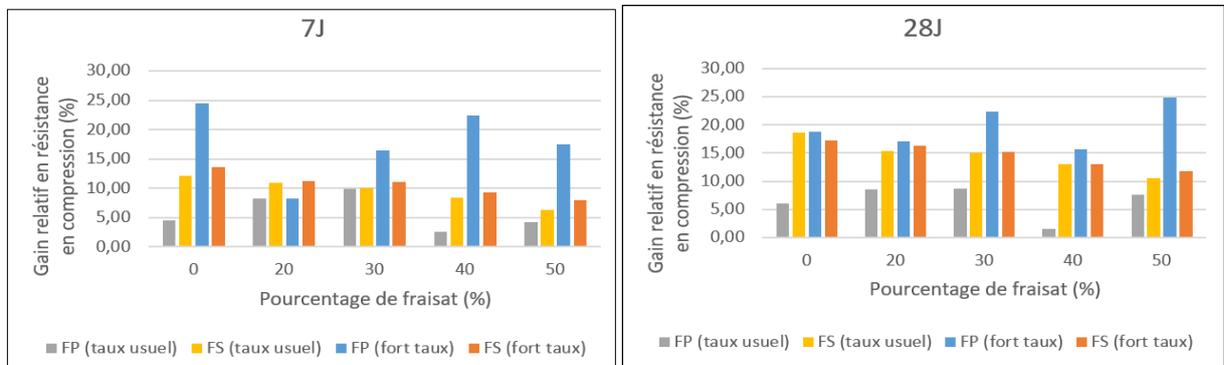
2.3 Choix du type d'ajout

Dans la partie précédente, les résultats de l'effet de l'ajout des FP ainsi que l'effet de l'ajout de la FS sur la résistance en compression des bétons de fraisâts. Dans un premier temps, il apparaît que dans les deux cas, la résistance en compression des bétons est augmentée. La Fig. 4.5 montre le gain relatif en termes de résistance en compression dans le cas de l'ajout des fibres et dans le cas de l'ajout de la FS, à des taux usuels et à des taux élevés, et ce 7-28 et 91 jours pour les trois rapports de E/C.

Chapitre 4 – Amélioration des propriétés mécaniques des bétons de fraisats

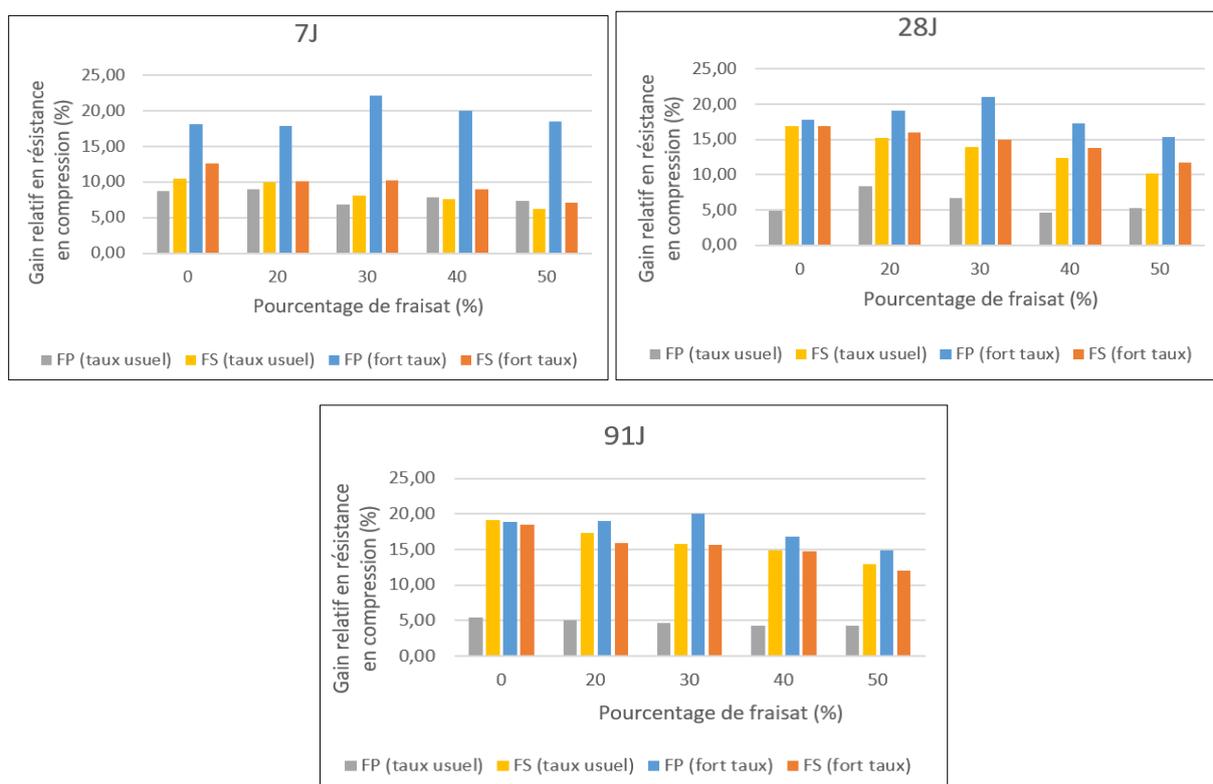


a)



b)

Chapitre 4 – Amélioration des propriétés mécaniques des bétons de fraisats



c)

Fig. 4.5 Gain relatif en résistance en compression du aux ajouts à a) $E/C=0.50$ b) $E/C=0.60$
c) $E/C=0.70$

L'analyse des graphes présentés montre que pour un même type de béton ; à taux usuel, l'ajout de la fumée de silice augmente d'avantage la résistance en compression comparé aux fibres et ce à 7-14 et 91 jours. A des taux élevés, l'ajout des fibres conduit à une augmentation de la résistance en compression plus importante que l'augmentation du à la FS, d'ailleurs l'effet de la FS à 10% est similaire à l'effet de la fumée de silice lorsque celle-ci est introduite à 15% (il n'est donc pas intéressant d'augmenter le taux de FS à des taux trop importants). Cette augmentation est d'autant plus marquée à 7 jours ; en fait l'effet de l'ajout des fibres est très marqué au jeune âge, et cet effet diminue avec le temps sans pour autant s'annuler. Il reste considérable mais diminue avec l'augmentation de l'âge du béton (91 jours).

Aussi, le gain relatif en résistance en compression dû à l'ajout de la FS diminue lorsque le pourcentage de fraisats augmente (comme montré sur la Fig.4.4) tandis que le gain relatif dû à l'ajout des fibres est sensiblement le même pour tous les bétons de fraisât. Les mêmes observations sont valables pour les trois ratios de E/C .

Enfin, l'avantage de l'utilisation des fibres de polypropylène montré plus haut, peut être ajouté à un autre avantage qui est la limitation du retrait au jeune âge des bétons, lorsque ceux-ci sont des

structures en dalles présentant de grandes surfaces exposées au climat extérieur, ce qui est le cas pour des dalles en béton pour chaussée (application routière des bétons de fraisats). Un autre avantage de ces fibres est incontestablement leur coût relativement faible comparé au coût de la fumée de silice. La fumée de silice ayant longtemps été considérée comme déchet ou sous-produit industriel, est de nos jours considérée comme un produit industriel à part entière, dont le coût est relativement élevé (en Algérie).

Ainsi, afin d'améliorer la résistance en compression des bétons de fraisats fortement diminuée à cause de l'introduction des agrégats de fraisats. Dans la suite de la partie expérimentale de cette étude, notre choix s'est fixé sur l'ajout des fibres de polypropylène, pour les avantages cités précédemment, sans pour autant exclure la fumée de silice tant qu'ajout, parfaitement indiqué pour augmenter la résistance en compression des bétons de fraisats. D'ailleurs, nous recommandons pour des travaux futurs, l'étude de l'effet de la fumée de silice sur les autres propriétés des bétons de fraisats, ainsi qu'une étude poussée de l'aspect chimie/réactions, interfaces, ou encore l'effet de la combinaison des deux ajouts étudiés (FP et FS).

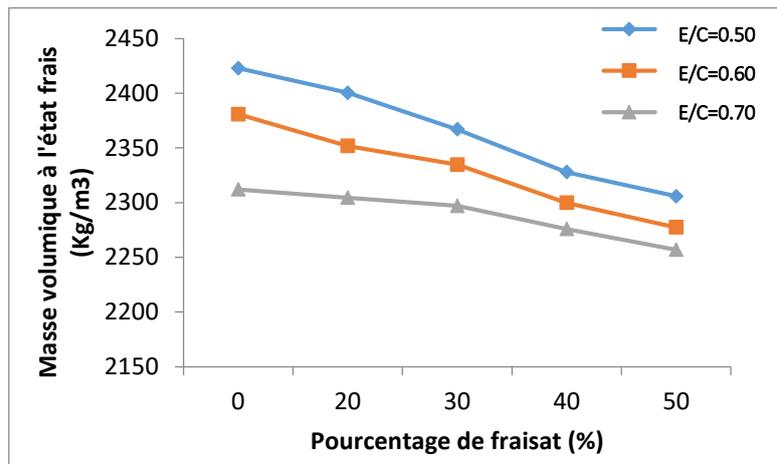
Dans ce qui suit, l'effet de l'ajout des fibres de polypropylène sur les autres propriétés mécaniques des bétons de fraisat sera étudié, à l'état frais et à l'état durci.

3. Effet des fibres de polypropylène sur les autres propriétés mécaniques des bétons

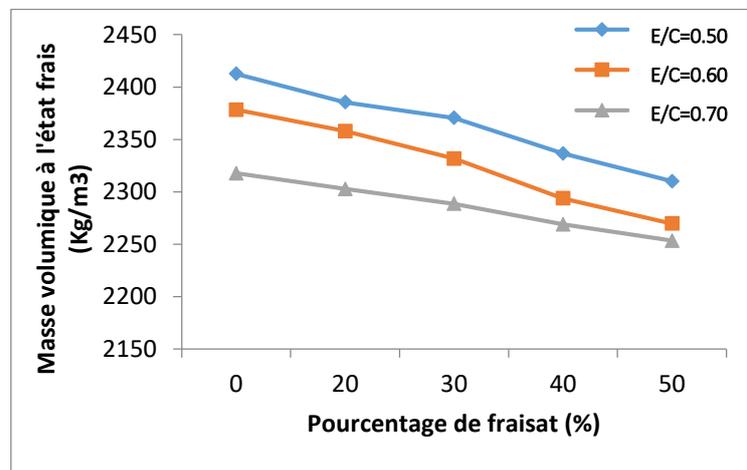
Les résultats des essais réalisés sont rapportés dans ce qui suit :

3.1 Propriétés à l'état frais

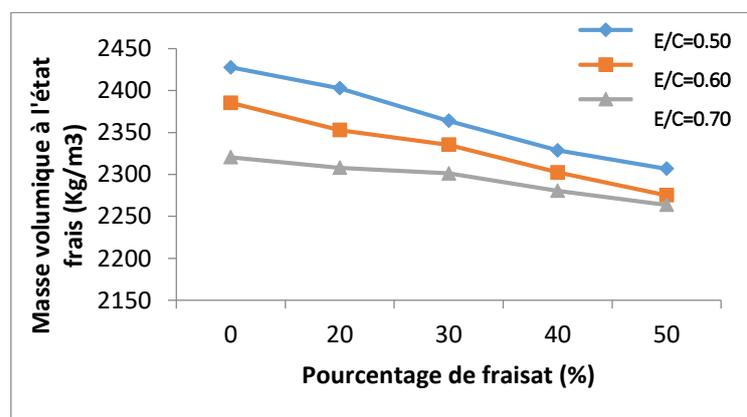
Les résultats expérimentaux montrent tout d'abord, que l'effet des fibres de polypropylène est négligeable sur la masse volumique à l'état frais des bétons. En effet, les valeurs de la masse volumique à l'état frais sont similaires à celles des bétons non renforcés, comme le montre la Fig.4.6 et ce pour les trois rapports de E/C considérés. Ceci est dû au fait que les fibres en question présentent une masse volumique faible (0.91 g/cm^3).



a)



b)



c)

Fig. 4.6 Masse volumique à l'état frais en fonction du pourcentage de fraisats a) sans fibres b) avec 0.1% de fibres c) avec 1% de fibres.

Chapitre 4 – Amélioration des propriétés mécaniques des bétons de fraisats

Concernant l'ouvrabilité des bétons de fraisats, d'une manière générale, l'affaissement n'est pas affecté par l'introduction des fibres ; il varie entre 90 et 150 mm et reste contrôlé. Cependant, lorsque les fibres sont introduites à 1%, une faible quantité supplémentaire d'adjuvant a été nécessaire afin de maintenir l'affaissement considéré.

3.2 Propriétés à l'état durci

3.2.1 Masse volumique des bétons durcis

Tout comme pour la masse volumique à l'état frais, la masse volumique à l'état durci, aussi bien des bétons conventionnels que des bétons de fraisats, n'est pas affectée significativement par l'introduction de fibres de polypropylène, à cause de leur masse volumique faible. Les résultats expérimentaux à 28 jours sont représentés sur la Fig. 4.7 et les autres résultats expérimentaux sont rapportés sur le Tableau 4.4. A 28 jours, et pour le rapport de E/C de 0.50 à titre d'exemple, la masse volumique des bétons témoins varie entre 2439 kg/m³ à 2446 kg/m³ lorsque les fibres sont introduites. La masse volumique des BF 20% varie de 2391 kg/m³ à 2405 kg/m³. La masse volumique des BF 50% varie de 2323 kg/m³ à 2331 kg/m³.

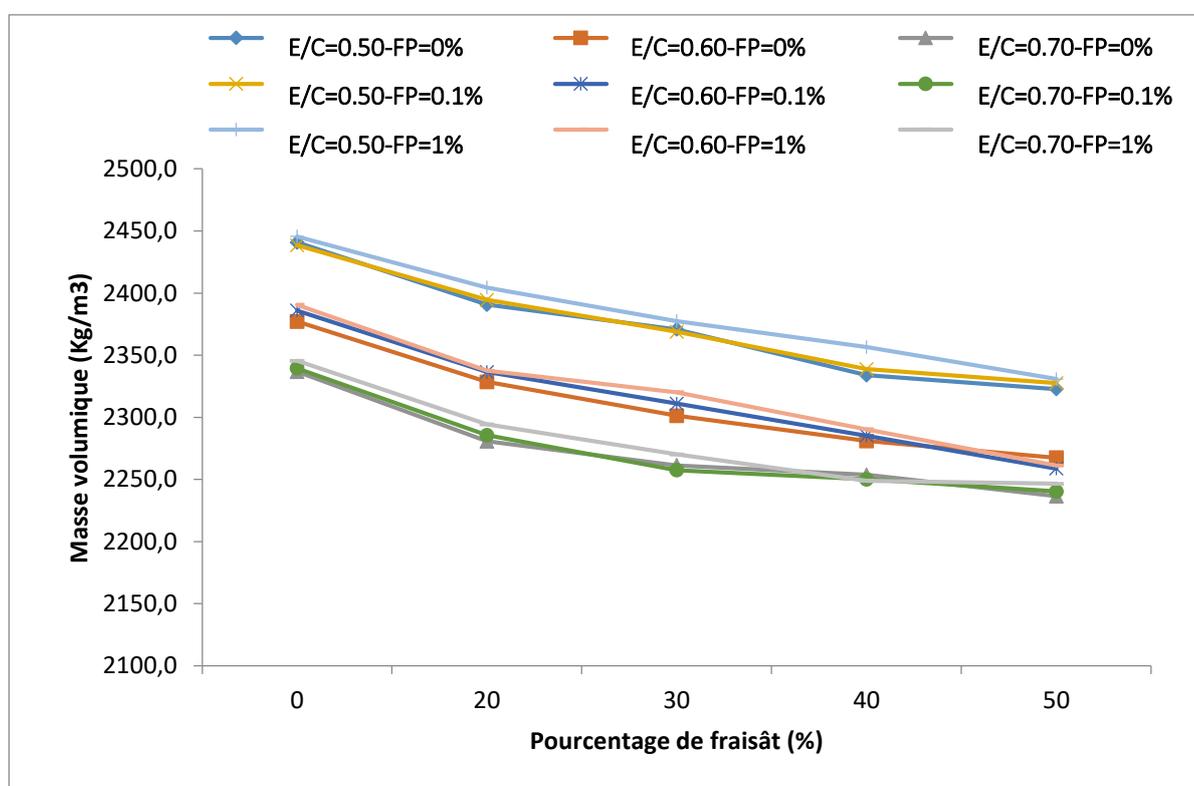


Fig.4.7 Effet des fibres de polypropylène sur la masse volumique des bétons durcis à 28 jours.

Chapitre 4 – Amélioration des propriétés mécaniques des bétons de fraisats

Tableau 4.4. Résultats des essais de détermination de la masse volumique des bétons en fonction du taux de renforcement en fibres.

Dosage en fibres	3 jours			7 jours		
	0%	0.1%	1%	0%	0.1%	1%
BF 0%	2426.9	2428.4	2432.7	2432.1	2430.3	2439.5
BF 20%	2377.5	2386.8	2392.2	2379.8	2390.3	2394.3
BF 30%	E/C=0.50	2350.9	2355.8	2364.3	2345.9	2362.1
BF 40%		2346.5	2330.0	2330.2	2334.3	2330.2
BF 50%		2315.5	2313.2	2314.3	2308.6	2316.3
BF 0%		2369.5	2364.8	2360.1	2360.1	2365.4
BF 20%		2322.7	2317.3	2311.1	2337.5	2338.4
BF 30%	E/C=0.60	2287.9	2297.0	2277.5	2310.8	2318.4
BF 40%		2280.1	2274.3	2260.3	2280.5	2280.0
BF 50%		2270.8	2272.0	2247.3	2266.4	2267.3
BF 0%		2324.8	2330.1	2324.2	2310.9	2307.5
BF 20%		2273.2	2280.8	2283.0	2280.7	2285.4
BF 30%	E/C=0.70	2253.5	2262.3	2263.4	2263.7	2256.5
BF 40%		2240.2	2236.5	2246.8	2240.6	2242.3
BF 50%		2220.3	2210.0	2219.5	2235.4	2226.5
Dosage en fibres	14 jours			91 jours		
	0%	0.1%	1%	0%	0.1%	1%
BF 0%	2435.9	2440.3	2450.4	2441.0	2438.9	2445.4
BF 20%	2387.9	2402.3	2405.4	2412.9	2417.8	2424.4
BF 30%	E/C=0.50	2350.2	2350.4	2366.4	2366.9	2374.4
BF 40%		2330.7	2329.4	2340.2	2344.8	2346.5
BF 50%		2310.8	2312.6	2320.1	2322.6	2328.7
BF 0%		2350.7	2365.6	2374.3	2376.4	2372.3
BF 20%		2328.7	2333.2	2330.7	2342.5	2344.8
BF 30%	E/C=0.60	2307.5	2307.5	2295.5	2320.8	2318.2
BF 40%		2277.5	2280.3	2273.2	2289.3	2280.7
BF 50%		2260.6	2252.2	2255.5	2280.6	2284.3
BF 0%		2302.5	2305.5	2307.6	2329.5	2330.4
BF 20%		2280.9	2283.4	2294.3	2290.8	2286.5
BF 30%	E/C=0.70	2266.4	2269.0	2264.3	2271.2	2273.4
BF 40%		2244.8	2250.2	2248.8	2250.6	2255.4
BF 50%		2226.5	2230.8	2238.6	2238.6	2235.4

3.2.2 Résistance en traction indirecte par fendage

Les résultats des essais de résistance en traction par fendage à 28 jours sont montrés par la Fig. 4.8. Les résultats des essais à 3-7-14 et 91 jours sont rapportés sur le Tableau 4.5.

Ces résultats montrent que lorsque les fibres de polypropylène sont introduites à taux usuel, l'effet sur la résistance en traction par fendage n'est pas très clair ; en effet il n'est pas possible de dégager une tendance. Ceci est valable aussi bien pour les bétons conventionnels, rejoignant les résultats de Alhozaimy et son équipe (Alhozaimy et al., 1996) que pour les bétons de fraisats, et ce à n'importe quel temps de cure et pour les trois rapports de E/C considérés.

Lorsque les fibres de polypropylène sont introduites à 1%, la résistance en traction par fendage diminue, aussi bien dans les bétons conventionnels, rejoignant les résultats de Manolis et son équipe (Manolis et al., 1997) que dans les bétons de fraisats. Cette tendance est observée pour les trois rapports de E/C considérés. En effet, la baisse relative en termes de résistance en traction par fendage varie de 10 à 25% lorsque le rapport de E/C=0.50 ; elle varie de 3 à 21% lorsque E/C=0.60 et enfin de 7 à 21% lorsque E/C=0.70 et ce pour les différentes formules de bétons confondues.

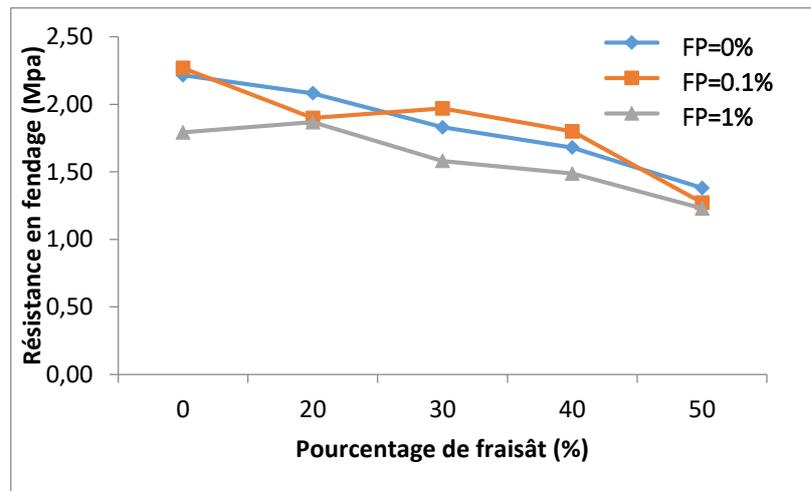
La réduction de la résistance en fendage peut être expliquée par le fait que le module d'élasticité en traction des fibres dépend du taux de chargement, et sous l'essai de fendage qui est un essai statique, est plus faible que celui des bétons produisant ainsi une réduction de la résistance des bétons fibrés.

Chapitre 4 – Amélioration des propriétés mécaniques des bétons de fraisats

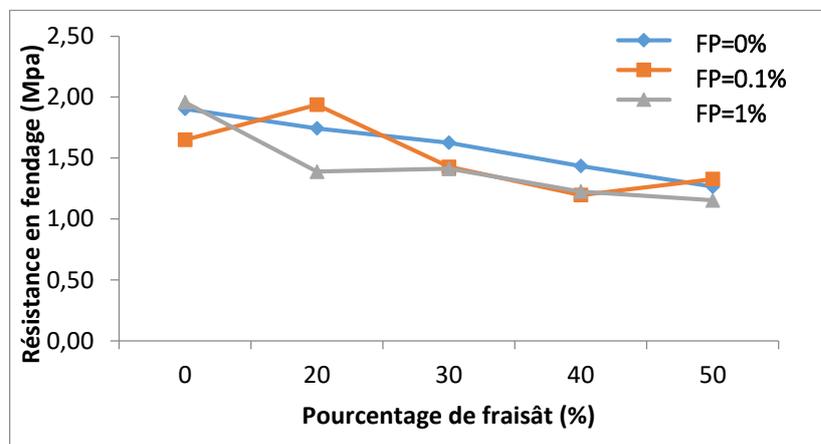
Tableau 4.5. Résultats des essais de résistances en fendage des bétons en fonction du taux de renforcement en fibres.

Dosage en fibres		3 jours			7 jours		
		0%	0.1%	1%	0%	0.1%	1%
BF 0%		1.39	1.37	1.14	1.71	1.56	1.34
BF 20%		1.30	1.34	1.01	1.52	1.37	1.15
BF 30%	E/C=0.50	1.26	1.13	1.07	1.43	1.30	1.24
BF 40%		1.17	1.21	0.98	1.31	1.29	1.14
BF 50%		1.10	1.05	0.99	1.19	1.22	1.22
BF 0%		1.30	1.37	1.09	1.44	1.57	1.18
BF 20%		1.19	1.01	0.97	1.36	1.27	1.12
BF 30%	E/C=0.60	1.10	1.01	0.91	1.23	1.08	1.13
BF 40%		1.01	0.90	0.82	1.10	1.24	0.87
BF 50%		0.90	0.78	0.78	0.98	0.83	1.01
BF 0%		1.18	1.11	0.99	1.30	1.37	1.19
BF 20%		0.98	1.01	0.79	1.24	1.22	1.06
BF 30%	E/C=0.70	0.95	0.85	0.79	1.07	0.93	0.84
BF 40%		0.90	0.82	0.72	0.97	0.95	0.85
BF 50%		0.74	0.78	0.65	0.87	0.79	0.81
Dosage en fibres		14 jours			91 jours		
		0%	0.1%	1%	0%	0.1%	1%
BF 0%		1.90	1.71	1.61	2.25	2.32	1.83
BF 20%		1.80	1.60	1.43	2.15	2.29	1.91
BF 30%	E/C=0.50	1.69	1.71	1.42	2.04	1.87	1.73
BF 40%		1.47	1.55	1.29	1.82	1.73	1.55
BF 50%		1.30	1.20	1.12	1.60	1.47	1.38
BF 0%		1.70	1.73	1.44	2.08	2.10	1.77
BF 20%		1.61	1.49	1.35	1.96	1.81	1.66
BF 30%	E/C=0.60	1.49	1.45	1.31	1.80	1.65	1.55
BF 40%		1.30	1.37	1.12	1.68	1.55	1.41
BF 50%		1.14	1.04	0.98	1.46	1.48	1.25
BF 0%		1.52	1.39	1.35	1.86	1.80	1.55
BF 20%		1.42	1.47	1.19	1.70	1.59	1.44
BF 30%	E/C=0.70	1.32	1.21	1.08	1.58	1.46	1.35
BF 40%		1.16	1.07	1.02	1.41	1.33	1.19
BF 50%		1.01	0.94	0.93	1.30	1.20	1.11

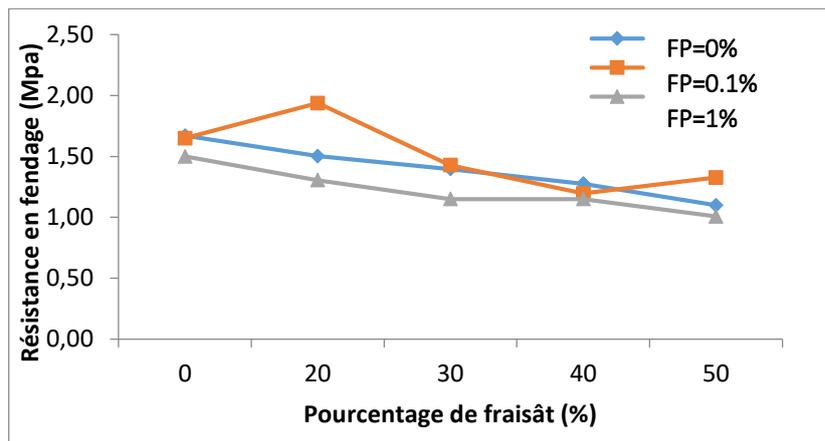
Chapitre 4 – Amélioration des propriétés mécaniques des bétons de fraisats



a)



b)



c)

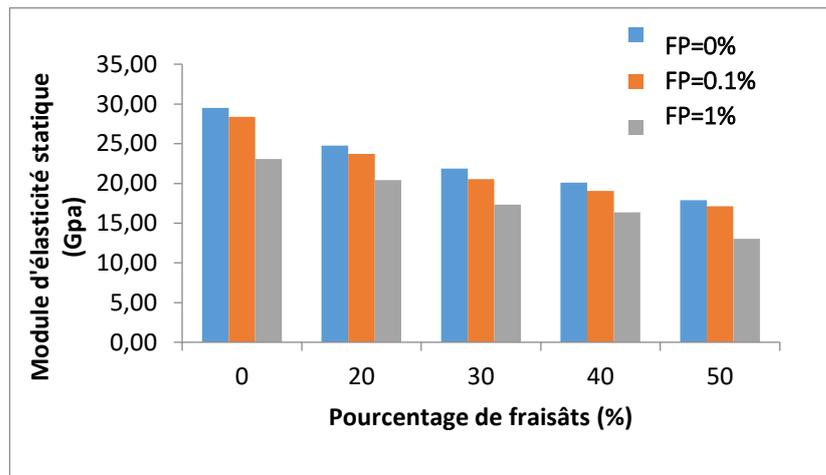
Fig. 4.8 Effet des fibres de polypropylène sur la résistance en traction par fendage à a) $E/C=0.50$
E/C=0.60 c) $E/C=0.70$.

3.2.3 Module d'élasticité statique

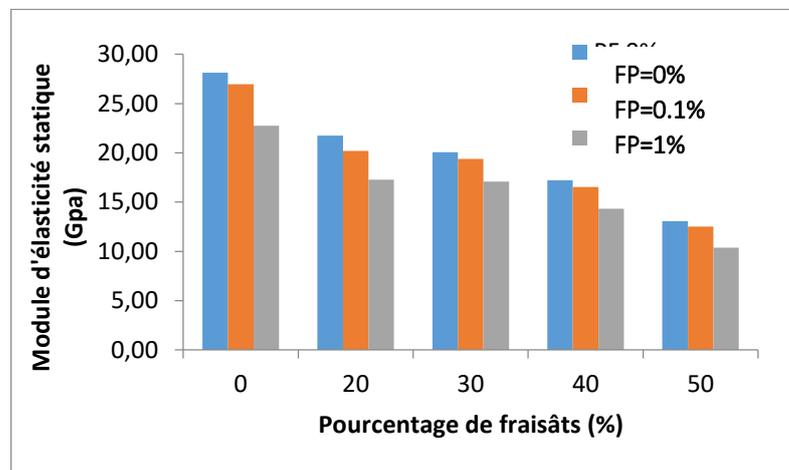
Des essais de détermination du module d'élasticité statique ont été réalisés sur les bétons fibrés durcis, comme montré par la Fig.4.9. L'effet des fibres de polypropylène sur le module d'élasticité des bétons étudiés, est montré par la Fig. 4.10, où sont représentés les résultats à 28 jours. D'une manière générale, l'introduction des fibres de polypropylène affecte négativement les valeurs du module d'élasticité statique.



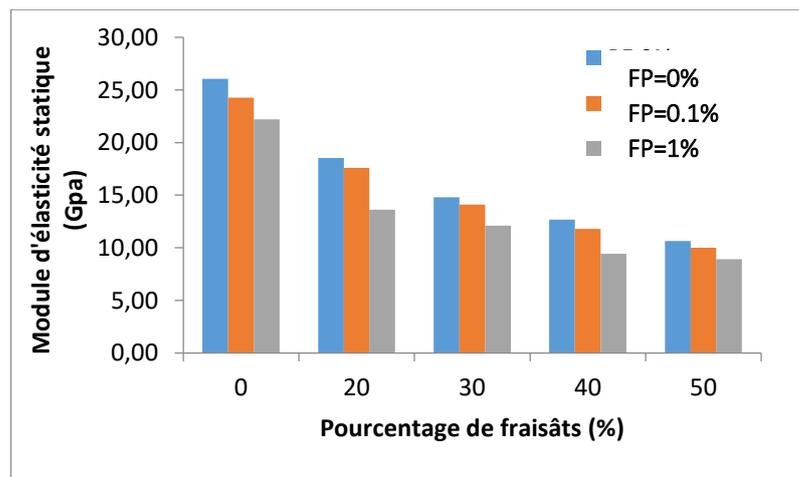
Fig.4.9 Essai de module d'élasticité statique.



a)



b)



c)

Fig. 4.10 Effet des fibres de polypropylène sur le module d'élasticité statique à a) E/C=0.50
b) E/C=0.60 c) E/C=0.70.

En effet, lorsque les fibres de polypropylène sont introduites, les valeurs du module d'élasticité statique baisse considérablement, aussi bien pour les bétons conventionnels que pour les bétons de fraisât. Lorsque les fibres sont introduites à 0.1%, la baisse relative du module d'élasticité est de l'ordre de 3 à 7% pour toutes formules de bétons confondues ; en fait, le même ordre de grandeur est obtenu quel que soit le rapport de E/C. Lorsqu'elles sont introduites à 1%, la baisse relative du module d'élasticité est plus importante ; elle est de l'ordre de 18 à 27% lorsque E/C=0.50, de 15 à 21% lorsque E/C=0.60 et enfin de 15% à 27% lorsque E/C=0.70.

Cette réduction du module d'élasticité est expliquée par le fait que le module d'élasticité des fibres utilisées est faible (3750 MPa) contribuant ainsi à réduire le module d'élasticité des bétons fibrés par leur introduction. Ainsi la réduction est plus importante lorsque les fibres sont introduites à taux élevé.

Remarque :

L'introduction des fibres de polypropylène a, d'une manière générale, augmenté la résistance en compression mais diminué la résistance en traction par fendage, ainsi que le module d'élasticité statique. Aussi, il ne nous a pas semblé utile d'aller plus loin dans cette partie expérimentale, les résultats prévisibles étant une diminution de la résistance en flexion (au même titre que la résistance en traction par fendage), et une diminution du module d'élasticité dynamique (au même titre que le module d'élasticité statique).

4. Indice de qualité élastique

Il est utile de rappeler que les bétons de fraisâts sont généralement utilisés pour la construction de chaussées rigides. Dans la partie suivante, nous allons étudier la possibilité d'utiliser les bétons de fraisâts renforcés aux fibres de polypropylène dans des chaussées rigides.

La résistance en traction et le module d'élasticité jouent un rôle important, dans la tenue en fatigue et l'endurance d'un matériau routier et ce quel que soit le mode d'endommagement. De ce fait, un bon compromis doit donc être trouvé entre ces paramètres ; la combinaison d'une résistance suffisamment élevée et d'un module suffisamment faible permet d'obtenir un matériau ayant de bonnes capacités en utilisation routière (Mathias, 2005). La notion d'indice qualité élastique (IQE) est souvent utilisé pour estimer d'une manière pratique et rapide la qualité du matériau en utilisation routière. Il est défini comme une épaisseur équivalente de chaussée. Dans le cas d'une structure de chaussée bicouches constitué en partie supérieure du matériau à étudier, l'IQE est l'épaisseur conduisant à une contrainte en fond de couche égale à la résistance en traction de la sous couche, et ce pour des conditions de charges définies -standard français- (Paute et al.,

Chapitre 4 – Amélioration des propriétés mécaniques des bétons de fraisats

2001). Plus l'indice IQE est faible, plus l'épaisseur du matériau nécessaire pour un cas de figure donnée est faible, ce qui signifie que le matériau est de meilleure qualité (Mathias, 2005).

L'indice de qualité élastique permet de donner une estimation rapide quant à la qualité d'un matériau routier. Il se détermine principalement à partir du couple résistance en traction directe et module d'élasticité des bétons durcis (CECA-CEE-CEEA, 1981). La résistance en traction directe peut être estimée à partir de la résistance en traction par fendage selon l'équation Eq.4.2 (SETRA-LCPC 1994).

$$R_t = 0.8 R_f \quad (4.2)$$

Avec : R_t : la résistance en traction directe et R_f la résistance en traction par fendage.

Par exemple, pour un béton de référence ($E/C=0.50$) à 28 jours, avec

$R_f = 2.21$ MPa et donc $R_t=1.77$ MPa, et $E_{stat} = 29.5$ Gpa, le couple (1.77 , 29.5) donne un IQE de 19 cm à partir de l'abbaque.

La Fig. 4.11 montre l'évolution de l'IQE en fonction du pourcentage de fraisât pour les bétons renforcés et non renforcés.

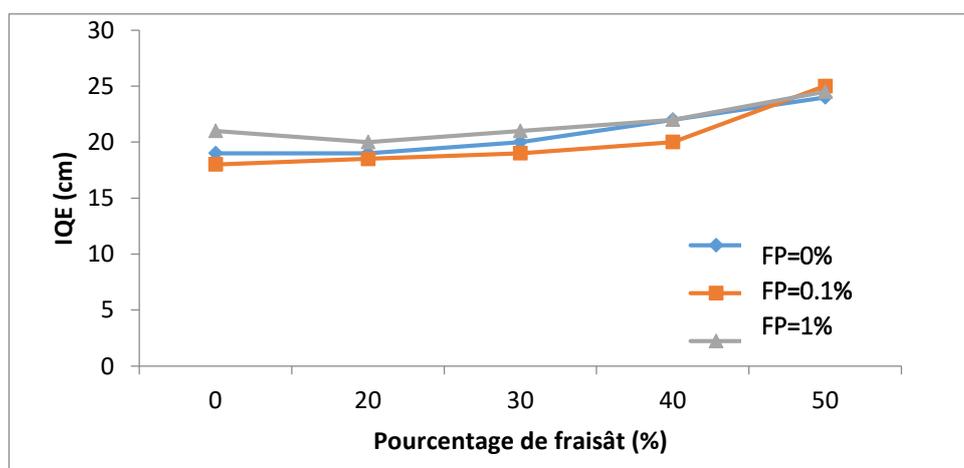


Fig. 4.11 Evolution de l'IQE en fonction du pourcentage de fraisât et du pourcentage de fibres.

Les résultats montrent que, d'une manière générale, l'IQE est affecté par le pourcentage de fraisât et par le taux de renforcement aux fibres. En effet, l'IQE augmente lorsque le pourcentage de fraisât introduit augmente, traduisant un matériau de moindre qualité comparé aux bétons de références, ce qui était prévisible. Cependant, le meilleur IQE est obtenu pour les bétons renforcés à 0.1% de fibres polypropylène. Il augmente lorsque le taux de renforcement aux fibres est de 1%. Ceci s'explique par le fait qu'à 0.1% de fibres, un bon compromis est réalisé entre une légère baisse de la résistance en traction et une baisse significative du module d'élasticité permettant d'obtenir un IQE plus faible traduisant un matériau de meilleure qualité. A un

renforcement de 1% de fibres, une baisse trop importante des deux caractéristiques donnant un IQE plus important et donc un matériau de moindre qualité. D'un point de vue qualité de matériau routier, les bétons de fraisats renforcés à faible taux de fibres de polypropylène sont les plus indiqués.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons améliorée la résistance en compression des bétons de fraisats en proposant un ajout organique (fibres de polypropylène) et un ajout minéral (fumée de silice). Les résultats ont montrés que les deux ajouts convenaient ; d'un côté, un ajout de ces fibres, même à faible dosage, augmente la résistance en compression ; le gain est de l'ordre de 3 à 10%. L'ajout des fibres de polypropylène à taux élevé (1% comme il est le cas dans la présente étude) augmente considérablement la résistance en compression des bétons de fraisât ; l'augmentation de la résistance en compression peut atteindre 26% et est indépendant du taux de fraisât introduit. Le résultat pratique est que des bétons confectionnés partiellement à partir de fraisats peuvent présenter des résistances en compression similaires à celles de bétons conventionnels, en ajoutant des fibres de polypropylène.

D'un autre côté, l'ajout de la fumée de silice (à 10% ou à 15% en remplacement du poids du ciment) augmente la résistance en compression des bétons ; le gain relatif est de l'ordre de 20% pour les bétons conventionnels, et de l'ordre de 14% à 18% pour les bétons de fraisats (durcis). Mais, l'efficacité de la fumée de silice diminue lorsque le pourcentage de fraisât augmente dans le mix. Le renforcement aux fibres a été préféré au renforcement à la fumée de silice pour les raisons évoquées. Cependant, l'augmentation de la résistance en compression est accompagnée d'une réduction du module d'élasticité sans affecter significativement la résistance en traction par fendage lorsque les fibres sont introduites à des taux usuels. Par contre, lorsque ces fibres sont introduites à des taux élevés, l'augmentation de la résistance en compression s'accompagne d'une réduction de la résistance en fendage allant jusqu'à 24% ainsi qu'une réduction importante du module d'élasticité allant jusqu'à 27%.

Tous comme les bétons de fraisats, les bétons de fraisats renforcés aux fibres de polypropylène conviennent pour la construction des chaussées rigides ; un meilleur indice IQE est obtenu pour les bétons de fraisats renforcés à 0.1% (taux usuel) par rapports à l'IQE des bétons de fraisât non renforcés. Ainsi, les bétons de fraisats renforcés aux fibres de polypropylène (à des taux faibles) constituent des matériaux économiques, écologiques et performants et sont recommandés pour la construction de chaussées rigides.

Chapitre 5 – Modélisation

La partie expérimentale présentée précédemment, nous a permis de caractériser les bétons de fraisâts, puis d'améliorer leurs propriétés grâce à l'ajout de fibres de polypropylène ou encore l'ajout de fumée de silice.

Les résultats expérimentaux sont utilisés pour la modélisation moyennant dans un premier temps les plans factoriels d'expériences où les effets individuels et combinés des paramètres influents sur les réponses ont été estimés et où l'évolution dans le temps de ces effets sur les réponses a été montrée. Les modèles polynomiaux construits sont utilisés localement afin de déterminer d'autres résultats sans avoir recours à d'autres expérimentations.

Dans un second temps, une modélisation moyennant les réseaux de neurones artificiels (RNA) a été utilisée afin de prédire la résistance en compression (caractéristique la plus importante) des bétons de fraisâts.

1. Planification factorielle des expériences.

La mise en modèle des processus est une opération primordiale en sciences de l'ingénieur génie des procédés et répond à plusieurs objectifs dont l'importance relative dépend du phénomène étudié.

Un modèle est la représentation plus ou moins approchée d'un processus, il est dit mathématique, lorsque l'ensemble du processus soumis à l'examen est décrit, de manière simplifiée, au moyen d'un ensemble d'équations mathématiques. Une fois établi, le modèle peut rendre compte du comportement du système. Il permet de faire des prévisions, de formuler des recommandations; il ouvre donc la voie aux problèmes de l'optimisation (Trambouse et Wauquier, 1975).

L'établissement d'un modèle, aussi simple soit-il, requiert des résultats expérimentaux, et le problème est d'en connaître leur nombre, leur précision et leur localisation.

Le plan d'expériences consiste à réaliser une série d'essais selon un programme systématique permettant d'aboutir à l'élaboration d'un modèle mathématique moyennant le minimum d'essais (Trambouse et Wauquier, 1975 ; Degea et Girault, 1972).

1.1.Méthodologie

L'un des plans les plus utilisés est le plan factoriel à deux niveaux, dit aussi plan factoriel 2^n , qui trouve une application très générale pour l'établissement des modèles formels. Un tel plan nécessite 2^n essais, correspondant au total des combinaisons des n variables. Afin de simplifier

l'écriture de toutes les combinaisons, on définit généralement un nouveau système de coordonnées qui a pour origine l'intersection des valeurs moyennes entre les deux niveaux de chaque variable. Le domaine expérimental est alors transformé en un hypercube, centré à l'origine $(0,0,\dots,0)$, dont les sommets ont pour coordonnées $(\pm 1, \pm 1, \pm 1, \dots, \pm 1)$. Autour de l'origine, on admet que la grandeur étudiée est développable en une fonction polynomiale.

Les 2^n essais fournissent 2^n valeurs de la grandeur étudiée et permettent la détermination des 2^n coefficients de la fonction polynomiale qui est en fait le modèle recherché.

Il existe d'autres plans où les variables occupent 3, 4 ou même m niveaux, on parlera alors des plans 3^n , 4^n ou m^n , ce qui aura pour effet de diviser le domaine expérimental en blocs, comptant chacun le même nombre d'essais (Trambouse et Wauquier, 1975 ; Degea et Girault, 1972).

1.2. Interactions des paramètres

L'un des avantages de la planification factorielle des expériences est de rendre compte non seulement des effets individuels de chaque paramètre, mais aussi des interactions entre ces paramètres.

Dans le plan factoriel 2^k , les expériences sont conduites sur deux niveaux, un niveau supérieur et un niveau inférieur. Au cours de chaque expérience, il est possible de combiner entre k variables.

Soient Z_1, Z_2, \dots, Z_k les k variables. Pour simplifier l'écriture de toutes les combinaisons, on définit un nouveau système de coordonnées avec :

$$Z_j^0 = (Z_j^{\max} + Z_j^{\min})/2 \quad \forall j = 1, k \quad (5.1)$$

$$\Delta Z_j^0 = (Z_j^{\max} - Z_j^{\min})/2 \quad \forall j = 1, k \quad (5.2)$$

Z_j^{\max} étant le niveau supérieur, et Z_j^{\min} le niveau inférieur.

Z_j^0 , le centre du plan au niveau fondamental et ΔZ_j^0 la limite ou l'intervalle de variation suivant l'axe des Z_j .

On passe ensuite à un système sans dimension de coordonnées x_1, x_2, \dots, x_k en utilisant la formule suivante:

$$x_j = (Z_j - Z_0) / \Delta Z_j \quad \forall j = 1, k \quad (5.3)$$

Dans le nouveau système, le niveau supérieur a pour valeur +1, le niveau inférieur -1, et les coordonnées du centre du plan sont nulles et coïncident avec l'origine des coordonnées. Ceci peut être interprété géométriquement par un cube.

Pour des raisons de simplification, le modèle peut être considéré comme une fonction de degré 1, et le critère d'optimalité peut s'écrire:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_k x_k + a_{12} x_1 x_2 + a_{13} x_1 x_3 + \dots + a_{1k} x_1 x_k + a_{23} x_2 x_3 + \dots + a_{2k} x_2 x_k + \dots + a_{123} x_1 x_2 x_3 + \dots + a_{12\dots k} x_1 x_2 \dots x_k \quad (5.4)$$

avec:

a_1, a_2, \dots, a_k : effets d'interaction simple,

$a_{12}, a_{13}, a_{23}, \dots$: effets d'interaction double,

a_{123}, \dots : effets d'interaction triple.

Les coordonnées de la planification factorielle des expériences 2^k peuvent être écrites suivant une matrice dont les propriétés sont telles que les effets simples et les effets d'interaction peuvent être calculés à partir des formules suivantes:

$$a_j = (\sum_{i=1, N} x_{ij} \cdot y_i) / N \quad \forall j = 1 \text{ à } k \quad (5.5)$$

$$a_{jl} = (\sum_{i=1, N} x_{ij} \cdot x_{il} \cdot y_i) / N \quad \forall j = 1 \text{ à } k ; i = 2 \text{ à } k \quad (5.6)$$

où N est le nombre d'essais effectués.

Comme cité précédemment, les plans d'expérience peuvent être utilisés dans n'importe quel domaine ; dans le domaine de l'industrie chimique, Feki et Ayedi (Feki et Ayedi, 2000) ont utilisé les plans d'expérience pour établir une relation entre les performances à l'extraction et les paramètres fonctionnels de purification du procédé industriel de l'acide phosphorique, en se basant sur leurs propres résultats de laboratoire.

Dans le domaine des réactions physiques-chimie, Dufaud et Corbel (Dufaud et Corbel, 2004) ont développé un outil permettant d'assurer des couches uniformes de céramique en suspension et ont construit un modèle expérimental afin de déterminer l'influence de chaque facteur sur l'épaisseur de la couche déposée afin d'optimisation.

Benyoussef et son équipe (Benyoussef et al., 2000), Amdoun et son équipe (Amdoun et al., 2009) ainsi que Kitous et son équipe (Kitous et al., 2016) ont réalisé une étude sur l'évolution dans le

temps de l'influence des paramètres sur la réponse et ce dans différents domaines (extraction de l'huile essentielle, élicitation, traitement de l'eau) en utilisant les plans d'expériences.

Cette même approche a été utilisée dans le domaine du génie civil où l'évolution dans le temps des effets de paramètres influents sur les propriétés mécaniques des bétons de fraisât (Larbi et al., 2017, Larbi et al., 2019).

1.3. Application

L'étude expérimentale précédant a permis de rendre compte des effets individuels de chacun des paramètres, qui sont : le taux de fraisâts introduit en substitution partielle des granulats naturels, le rapport de E/C et le temps de cure.

Nous nous sommes proposé dans cette partie d'évaluer les effets individuels de ces paramètres ainsi que leur interaction sur les réponses étudiées qui sont : la résistance en compression, la résistance en traction indirecte par fendage, le module d'élasticité statique, et d'apprécier l'évolution dans le temps des effets individuels et combinés sur les paramètres considérés (avec l'âge des bétons confectionnés), et ce moyennant la technique de la planification factorielle.

Au lieu de construire une matrice 2^3 qui consisterait en la réalisation de huit essais relatifs à l'ensemble des combinaisons des deux niveaux du taux de fraisât, du rapport de E/C et de l'âge du béton, nous avons opté pour la construction d'une matrice 2^2 où la réponse est l'évolution de la propriété étudiée en fonction de l'âge du béton. L'avantage de cette façon de procéder, est d'une part, une fois les courbes cinétiques tracées, de pouvoir construire des matrices 2^3 pour n'importe quel âge du béton dans le domaine considéré et ce, par simple exploitation des résultats sans avoir recours à l'expérimentation. D'autre part elle permet d'atteindre la cinétique de l'effet alors qu'une matrice classique 2^3 donne qu'une valeur de l'effet (Benyoussef et al., 2000). Les variables physiques sont alors transformées en variables codées et le modèle mathématique de forme polynomiale obtenue reste valable uniquement dans le domaine et dans les conditions où il a été établi.

Une fois établis, les modèles formels obtenus par planification factorielle des expériences doivent être validés statistiquement par le biais de tests statistiques. La popularité des plans d'expériences tient du fait qu'il s'agit d'une modélisation formelle qui trouve une utilisation dans divers domaines de recherche (Benyoussef et al., 2000 ; Feki et Ayedi, 2000 ; Dufaud et Corbel, 2004 ; Amdoun et al., 2009 ; Kitous et al., 2016).

1.3.1. Modélisation de la résistance en compression

Les domaines considérés sont : [0-30%] noté domaine I, [30%-50%] noté domaine II, [20%-40%] noté domaine III, [0-40%] noté domaine IV et enfin [0-50%] noté domaine V. Les variables codées sont notées X1 pour représenter le pourcentage d'ajout de fraisât et X2 pour représenter le rapport de E/C. Ce changement de variables conduit à la construction de polynôme de type :

$$Rc = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_{12} X_1 X_2$$

Avec :

Rc est la résistance en compression, X1 variable codée relative au pourcentage de fraisât et X2 variable codée relative au rapport de E/C. Il s'agit alors de déterminer l'effet sur la résistance en compression, du pourcentage de fraisât a_1 , de la variation du rapport de E/C a_2 , et de l'interaction de ces deux paramètres a_{12} .

La résolution mathématique des équations établies pour la détermination des différents coefficients a_0 , a_1 , a_2 et a_{12} , permet de tracer l'évolution de ces coefficients dans le temps sur les cinq domaines explorés. Les résultats sont rapportés sur le Tableau 5.1. Cette évolution est similaire pour les cinq domaines, nous montrons l'évolution des effets dans le temps sur la Fig.5.1.

Tableau 5.1. Coefficients polynomiaux relatifs à la modélisation de la résistance en compression.

Domaine	Age du béton	a ₀	a ₁	a ₂	a ₁₂
I	3	5,237	-0,743	-1,043	0,107
	7	10,127	-1,253	-2,333	0,073
	14	13,365	-1,765	-2,170	0,020
	28	15,005	-1,360	-2,430	0,395
	91	16,805	-1,635	-2,795	0,405
II	3	4,077	-0,417	-0,663	0,273
	7	7,485	-1,390	-1,970	0,435
	14	9,910	-1,690	-1,740	0,410
	28	11,445	-2,200	-1,585	0,450
	91	12,755	-2,415	-2,085	0,305
III	3	4,360	-0,760	-0,765	0,165
	7	8,725	-1,430	-1,925	0,100
	14	11,577	-1,623	-2,183	0,347
	28	13,210	-1,665	-1,900	0,415
	91	14,775	-1,855	-2,195	0,385
IV	3	4,790	-1,190	-0,875	0,275
	7	9,337	-2,043	-2,043	0,217
	14	12,543	-2,587	-2,013	0,177
	28	13,955	-2,410	-2,155	0,670
	91	15,680	-2,760	-2,505	0,695
V	3	4,820	-1,160	-0,770	0,380
	7	8,737	-2,643	-1,897	0,363
	14	11,675	-3,455	-1,760	0,430
	28	12,805	-3,560	-1,980	0,845
	91	14,390	-4,050	-2,490	0,710

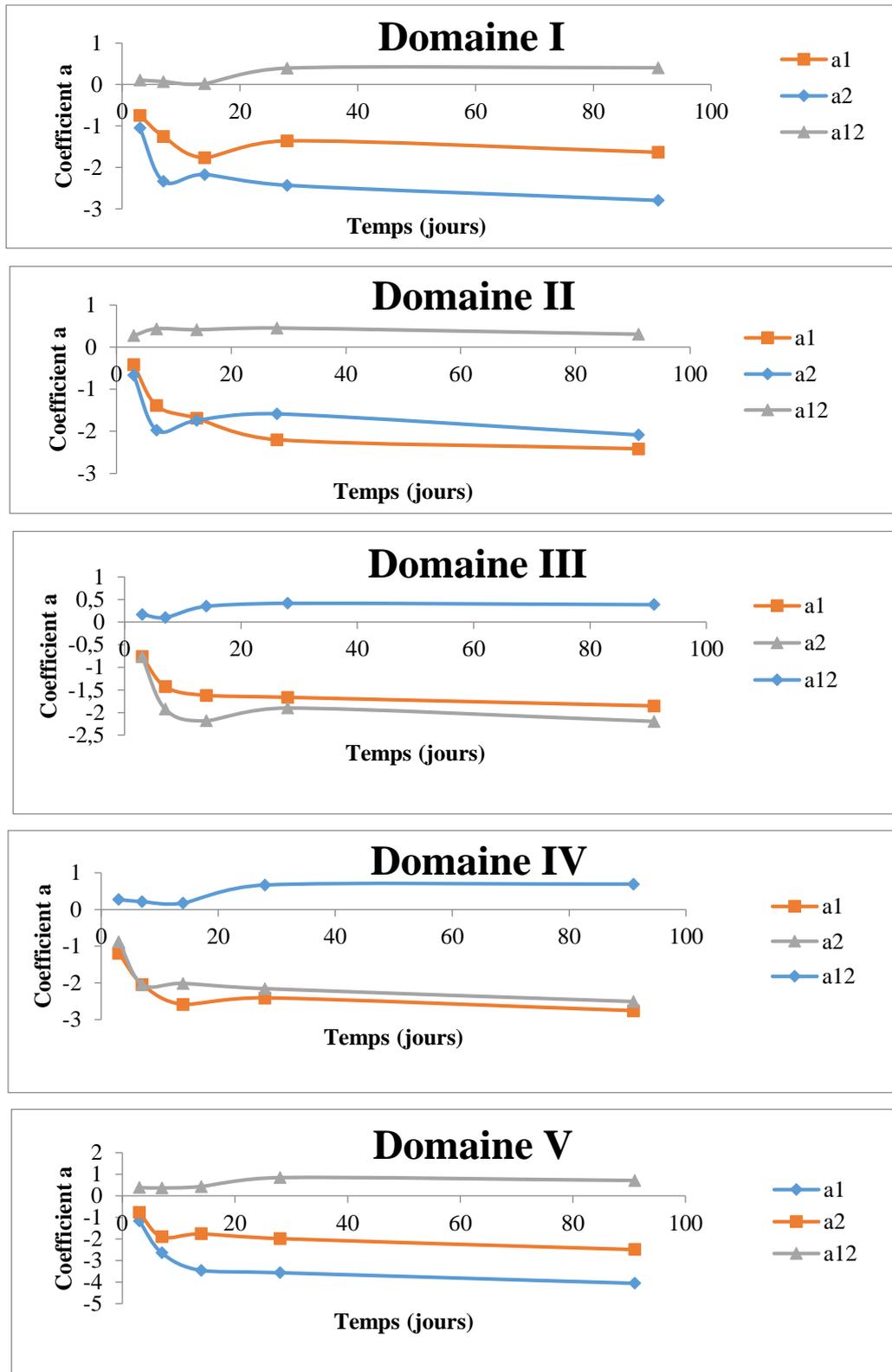


Fig. 5.1 Evolution dans le temps des coefficients polynomiaux pour les domaines de I à V.

L'analyse de ces courbes montre que l'effet du pourcentage de fraisât introduit est négatif sur la résistance en compression, ce qui était attendu. Sur tous les domaines considérés, l'évolution du

coefficient a_1 dans le temps passe par un « régime transitoire » entre 3 et 28 jours, pour se stabiliser vers « un régime permanent » traduit par la valeur constante vers laquelle le coefficient étudié tend, et qui est propre à chaque domaine, comme nous pouvons le voir sur les courbes de la Fig.5.1. L'effet du rapport de E/C est négatif sur la résistance en compression. Sur tous les domaines considérés, l'évolution du coefficient a_2 dans le temps passe également par un « régime transitoire » entre 3 et 28 jours, pour se stabiliser vers « un régime permanent » traduit par la valeur constante vers laquelle le coefficient étudié tend, et qui est la même pour tous les domaines.

Même si l'effet du pourcentage de fraisât et du rapport de E/C sont négatifs lorsqu'ils sont considérés séparément, il n'en reste pas moins que leur effet combiné a un effet positif sur la résistance en compression.

Ces résultats indiquent que l'intervalle de pourcentage de fraisât recommandé est l'intervalle réduit de [0,30%].

L'analyse statistiques des résultats expérimentaux, réalisées dans les différents domaines, avec validation aux centres et à toutes les durées de cure, nous a permis d'estimer l'erreur expérimentale qui était inférieure à 10%.

Afin de retenir un ordre de grandeur, l'intervalle de confiance de l'estimation de la résistance en compression à 28 jours, au centre du domaine [0-30%] et pour la valeur centrale de E/C est **$a_i \pm 0.231$ (MPa)**. Des intervalles de confiance du même ordre sont obtenus sur les autres domaines et aux différents âges de béton.

1.3.2. Modélisation de la résistance en traction indirecte par fendage

Les domaines considérés sont les mêmes que ceux considérés précédemment. Il s'agit alors de déterminer l'effet sur la résistance en traction indirecte par fendage, du pourcentage de fraisât a_1 , de la variation du rapport de E/C a_2 , et de l'interaction de ces deux paramètres a_{12} , suivant la relation :

$$R_t = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_{12} X_1 X_2$$

Où R_t est la résistance en traction indirecte par fendage, X_1 variable codée relative au pourcentage de fraisât et X_2 variable codée relative au rapport de E/C.

La même précédente démarche est suivie pour construire le polynôme traduisant la résistance en traction par fendage pour les différents âges de béton. La résolution mathématique des équations établies pour la détermination des différents coefficients a_0 , a_1 , a_2 et a_{12} , permet de tracer l'évolution de ces coefficients dans le temps pour les cinq domaines considérés. Les résultats sont

rapportés sur le Tableau 5.2. Cette évolution est similaire pour les cinq domaines, nous montrons l'évolution des effets dans le temps sur la Fig.5.2.

Tableau 5.2. Coefficients polynomiaux relatifs à la modélisation de la résistance en fendage.

Domaine	Age du béton	a ₀	a ₁	a ₂	a ₁₂
I	3	1,195	-0,090	-0,130	-0,025
	7	1,377	-0,127	-0,193	0,013
	14	1,607	-0,103	-0,187	0,003
	28	1,777	-0,163	-0,243	0,027
	91	1,933	-0,123	-0,213	-0,017
II	3	1,013	-0,093	-0,167	-0,013
	7	1,140	-0,110	-0,170	0,010
	14	1,330	-0,175	-0,165	0,020
	28	1,427	-0,187	-0,177	0,037
	91	1,629	-0,181	-0,191	0,039
III	3	1,087	-0,053	-0,147	0,013
	7	1,260	-0,120	-0,155	-0,015
	14	1,463	-0,147	-0,173	0,017
	28	1,635	-0,155	-0,245	0,045
	91	1,770	-0,155	-0,215	0,010
IV	3	1,160	-0,125	-0,120	-0,015
	7	1,347	-0,157	-0,163	0,043
	14	1,513	-0,197	-0,173	0,017
	28	1,710	-0,230	-0,235	0,035
	91	1,835	-0,220	-0,200	-0,005
V	3	1,103	-0,183	-0,143	-0,037
	7	1,267	-0,237	-0,183	0,023
	14	1,433	-0,277	-0,167	0,023
	28	1,590	-0,350	-0,205	0,065
	91	1,752	-0,303	-0,173	0,022

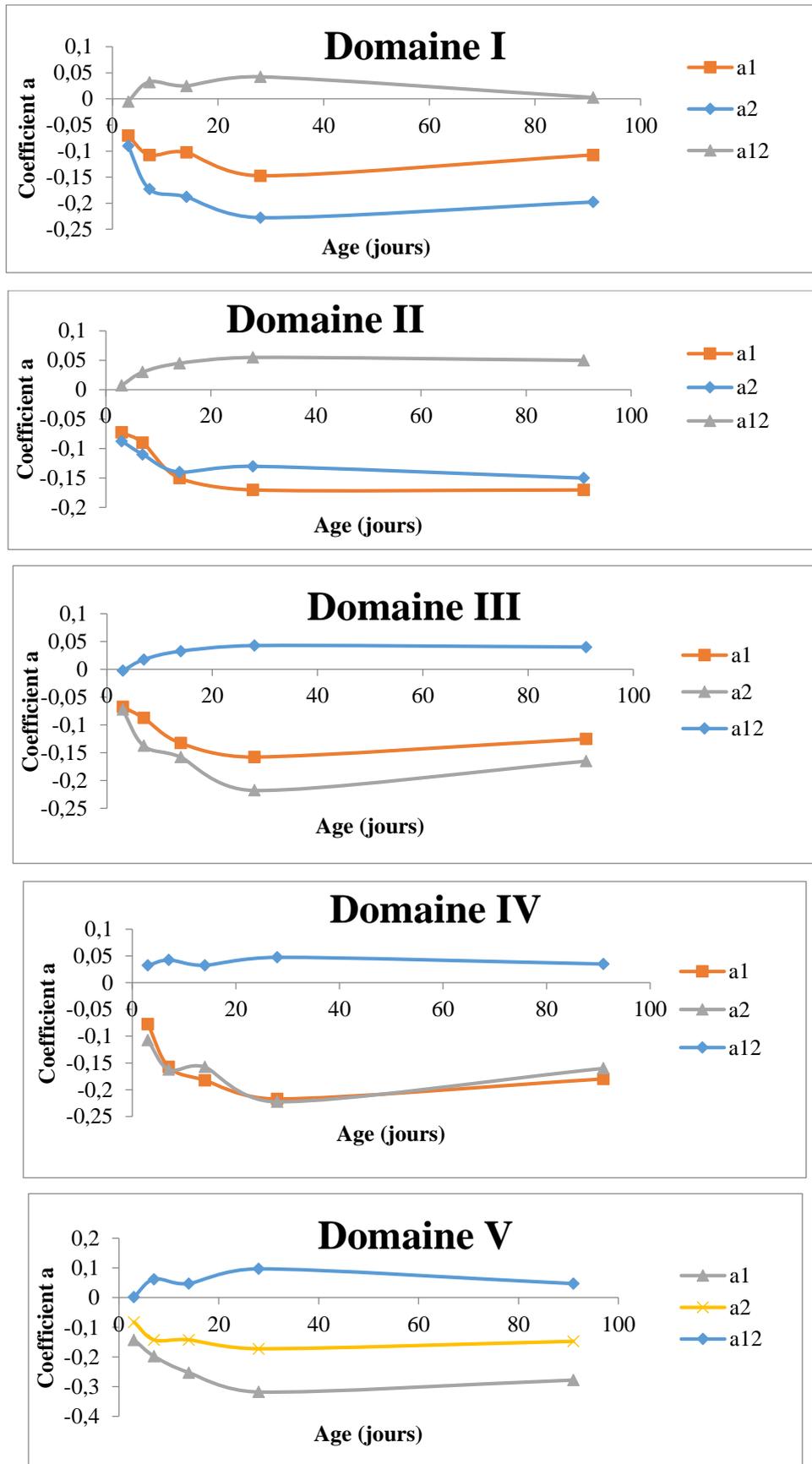


Fig. 5.2 Evolution dans le temps des coefficients polynomiaux pour les domaines de I à V.

Les résultats obtenus indiquent que jusqu'à la moitié des granulats naturels peuvent être remplacés par des fraisâts, et ce quel que soit le rapport de E/C considéré, l'effet de l'introduction de fraisât ainsi que la variation de E/C, même s'il est négatif, n'est pas très important sur la résistance en traction par fendage. Concernant l'effet combiné des deux paramètres, il est quasi nul sur la résistance en traction par fendage.

L'analyse statistiques des résultats expérimentaux, réalisées dans les différents domaines, avec validation aux centres et à toutes les durées de cure, nous a permis d'estimer l'erreur expérimentale qui était inférieure à 10%.

1.3.3. Modélisation du module d'élasticité statique

Les domaines considérés sont les mêmes que ceux considérés précédemment. Il s'agit alors de déterminer l'effet sur le module d'élasticité statique, du pourcentage de fraisât a_1 , de la variation du rapport de E/C a_2 , et de l'interaction de ces deux paramètres a_{12} , suivant la relation :

$$Estat = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_{12} X_1 X_2$$

Où Estat est le module d'élasticité statique à 28 jours, X_1 variable codée relative au pourcentage de fraisât et X_2 variable codée relative au rapport de E/C.

Les résultats sont rapportés sur le Tableau 5.3.

Tableau 5.3. Coefficients polynomiaux relatifs à la modélisation du module d'élasticité.

Domaine	a_0	a_1	a_2	a_{12}
I [0-30%]	23,055	-4,725	-2,625	-0,905
II [30-50%]	16,297	-2,033	-3,573	-0,043
III [20-40%]	19,027	-2,633	-3,417	-0,297
IV [0-40%]	22,087	-5,693	-2,717	-0,997
V [0-50%]	21,023	-6,757	-2,667	-0,947

En ce qui concerne l'effet individuel et combiné des paramètres, l'effet de l'introduction de fraisâts dans le mix est négatif sur le module d'élasticité statique. Il en est de même lorsque le rapport de E/C augmente. Aussi, l'effet combiné des deux paramètres a un effet négatif non négligeable sur le module d'élasticité.

En utilisant cette approche de modélisation : modélisation du module d'élasticité à 28 jours, il a été possible de quantifier l'effet des paramètres : pourcentage de fraisât et rapport de E/C. Ainsi, la quantification de l'effet de n'importe quel paramètres considéré dans la présente étude, tel que l'ajout des fibres de polypropylène ou encore l'ajout de la fumée de silice, en plus du pourcentage de fraisât ou du rapport de E/C ainsi que toutes les combinaisons possibles entre ces paramètres,

sur les principales propriétés mécaniques des bétons telles que la résistance en compression, la résistance en traction et le module d'élasticité.

L'analyse statistiques des résultats expérimentaux, réalisées dans les différents domaines, avec validation aux centres, nous a permis d'estimer l'erreur expérimentale qui était inférieure à 10%.

La démarche ainsi décrite et suivie, peut éventuellement être appliquée pour d'autres paramètres influents tels que : le pourcentage de fibres de polypropylène, le pourcentage de fumée de silice ainsi que pour déterminer les effets combinés de tous ces paramètres.

1.4. Conclusion

Cette étude a permis de quantifier et de suivre l'évolution dans le temps, des effets des paramètres qui sont le pourcentage de fraisât et la variation du rapport de E/C sur la résistance en compression, la résistance en traction indirecte par fendage ainsi que sur le module d'élasticité des bétons de fraisâts.

Ainsi, il est recommandé de choisir des taux de substitution des granulats naturels par les agrégats de fraisâts appartenant à l'intervalle [0,30%].

Quel que soit l'intervalle de pourcentage de fraisât, l'effet de l'augmentation du rapport de E/C de 0.50 à 0.70 reste inchangé aussi bien pour les bétons témoins que pour les bétons de fraisâts.

La modélisation des caractéristiques mécaniques, en utilisant les plans factoriels, nous a permis de prédire ces dernières localement (dans les intervalles recommandés) pour n'importe quel pourcentage de fraisâts, pour n'importe quel rapport de E/C et à n'importe quel âge de béton.

2. Réseaux de neurones artificiels

2.1. Introduction

Les réseaux de neurones artificiels (RNAs) sont des outils puissants pouvant résoudre des problèmes d'engineering très complexes qui ne peuvent être résolus par des méthodes classiques (Oliveira et al., 2007). Ils ont déjà été utilisés il y a de cela plusieurs années, avec succès, afin de prédire les propriétés mécaniques des bétons conventionnels (Demir, 2008 ; Alshihri et al., 2009 ; Kewalramani et Gupta, 2006 ; Ni et Wang, 2000 ; Pala et al., 2007), des bétons contenant de la métakaolin et de la fumée de silice (Saridemir, 2009), des bétons contenant du caoutchouc (Topçu et Saridemir, 2008) et des bétons contenant des agrégats issus de la démolition des constructions (Topçu et Saridemir, 2007 ; Topçu et Saridemir, 2008 ; Duan et al., 2013 ; Duan et al., 2013 ;

Dantas et al., 2013). Le plus gros intérêt de cette méthode réside dans le fait que le modèle peut apprendre à partir d'exemples. Les autres avantages résident dans le fait que le même modèle peut produire des réponses satisfaisantes à partir de tâches incomplètes ou encore à partir d'informations bruitées et peuvent généraliser des résultats à partir de nouveaux cas (Saridemir, 2009).

2.2. Notions fondamentales sur les réseaux de neurones artificiels

2.2.1. Le neurone formel

Dans la science de la biologie, les neurones sont le siège de l'intelligence, par conséquent, la science de l'intelligence artificielle a été développée en s'inspirant des études de biologie (Wira, 2008). Le neurone artificiel est un opérateur mathématique simple qui traduit la représentation mathématique d'un neurone biologique. Il possède des entrées qui peuvent être les sorties d'autres neurones ou des entrées extérieures, et une sortie (voir Fig. 5.3). La valeur calculée en sortie est le résultat de la somme des entrées, pondérées par les poids synaptiques et le calcul d'une fonction d'activation -fonction non linéaire bornée, le plus souvent sigmoïde- (Si Moussa, 2010).

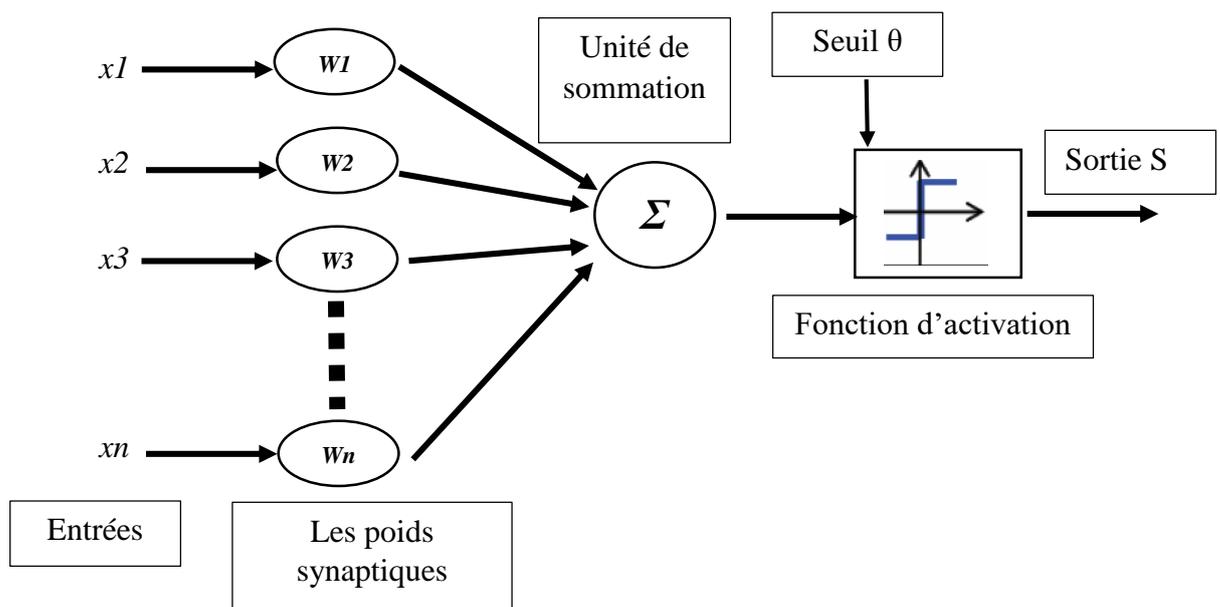


Fig. 5.3 Schéma d'un neurone artificiel (Bouzidi, 2006).

2.2.2. Les fonctions d'activation (transfert)

La fonction d'activation effectue la sommation pondérée des entrées et des poids de connexion, afin d'aboutir à la sortie voulue. Le choix de cette dernière lors de la modélisation est déterminant sur la qualité des résultats obtenus.

Différentes fonctions de transfert pouvant être utilisées comme fonction d'activation du neurone : le tableau suivant reprend les principales fonctions de transfert disponible sur l'interface de Matlab (Tableau 5.4).

Tableau 5.4. Fonctions de transfert.

Nom de la fonction	Relation entrée/sortie	Commande sous Matlab
Seuil	$a=0$ si $n<0$ $a=1$ si $n\geq 0$	hardlim
Seuil symétrique	$a=-1$ si $n<0$ $a=1$ si $n\geq 0$	hardlims
Linéaire	$a=n$	purelin
Linéaire saturée	$a=0$ si $n<0$ $a=n$ si $0\leq n\leq 1$ $a=1$ si $n>1$	satlin
Linéaire saturée symétrique	$a=-1$ si $n<-1$ $a=n$ si $-1\leq n\leq 1$ $a=1$ si $n>-1$	satlins
Linéaire positive	$a=0$ si $n<0$ $a=n$ si $n\geq 0$	poslin
sigmoid	$a=\frac{1}{1+exp^{-n}}$	logsig
Tangente hyperbolique	$a=\frac{e^n-e^{-n}}{e^n+e^{-n}}$	tansig
compétitive	$a=1$ si n maximum $a=0$ autrement	compet

2.2.3. Architecture des RNA

En dehors du réseau de neurones de type feedforward décrit plus haut, il existe plusieurs types de RNA. Dans ce qui suit, une description brève des types de RNA basée sur le guide d'utilisateur de la boîte d'outils des RNA sur l'interface Matlab®.

2.2.3.1. Les RNA à fonctions radiales de base

Il s'agit d'un perceptron multicouche spécialisé où les neurones de ces réseaux sont actifs dans une zone restreinte de l'espace d'entrée définies par des fonctions radiales de base (Radial Basis Function Network) en utilisant la non linéarité d'une fonction pour déterminer la réponse des couches cachées, comme le montre la Fig. 5.4. Dans cet exemple illustré par la Fig.5.4, l'entrée nette de la fonction de transfert est la distance vectorielle entre le vecteur des poids w et le vecteurs des entrées p , multiplié par le biais b . $\| \text{dist} \|$ signifie que la fonction accepte le vecteur d'entrée et la ligne des poids et calcule de produit.

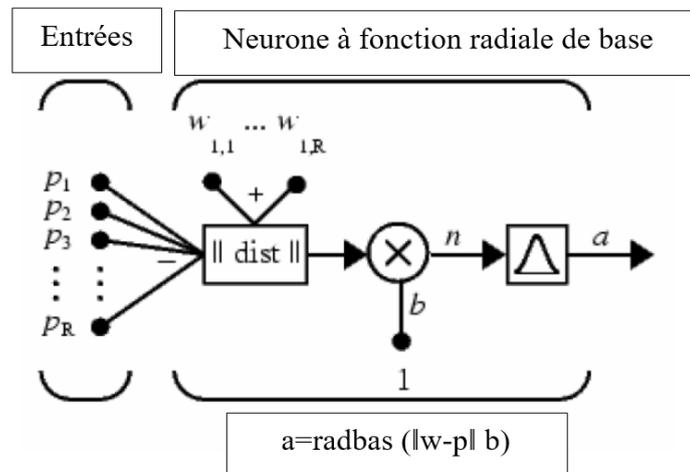


Fig. 5.4 Schéma d'un neurone à fonction radiale de base.

Selon le processus que subit la sortie de la seule couche cachée de neurones à fonction radiale de base, il y a le réseau de neurones probabiliste (Probabilistic Neural Networks) et le réseau de neurones à régression généralisée (Generalized Neural Networks).

2.2.3.2. Les RNA compétitifs (cartes auto organisatrices)

Les neurones de ces réseaux sont capables de reconnaître des groupes dans les vecteurs d'entrées. Les cartes auto organisatrices peuvent reconnaître des vecteurs similaires et répondre à ces valeurs d'entrées similaires.

Sur la Fig. 5.5 qui montre l'architecture d'un réseau de Kohonen, $\|ndist\|$ signifie la multiplication du vecteur des entrées p et la matrice des poids des entrées $IW_{1,1}$ et produit un vecteur ayant S^1 éléments. Les éléments sont le négatif des distances entre le vecteur d'entrées p et les vecteurs $iIW_{1,1}$ formés des lignes de la matrice de poids des entrées. Il calcule l'entrée nette n^1 d'une couche compétitive en trouvant la distance négative entre le vecteur d'entrées p et les vecteurs de poids et ajoutant les biais b .

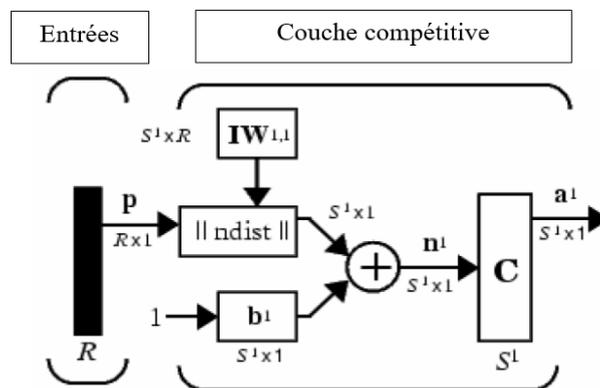


Fig. 5.5 Architecture d'un réseau de neurones compétitifs (réseau de Kohonen).

L'architecture du réseau de carte auto organisatrice, comme le montre la Fig.5.6 ressemble à celle d'un réseau compétitif sauf qu'aucun biais n'est utilisé.

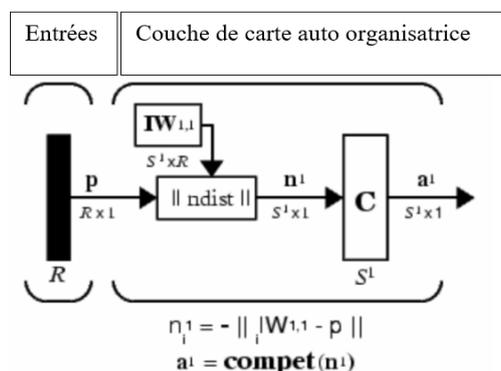


Fig. 5.6 Schéma d'un réseau de carte auto organisatrice.

2.2.3.3. Les réseaux de neurones non bouclés (statiques)

Un réseau de neurones non bouclé est représenté graphiquement par un ensemble de neurones "connectés" entre eux, l'information circulant des entrées vers les sorties dans un sens unique.

Les réseaux de neurones non bouclés sont des objets statiques : si les entrées sont indépendantes du temps, les sorties seront indépendantes du temps. Ils sont utilisés principalement pour effectuer des tâches d'approximation de fonction non linéaire (Bishop., 1995).

2.2.3.4. Les réseaux de neurones bouclés (dynamiques)

Les réseaux de neurones bouclés peuvent avoir des connexions quelconques ramenant ainsi aux entrées la valeur d'une ou plusieurs sorties. Pour ce type de système, à chaque boucle est associé un retard. Ce système est considéré comme dynamique, régi par des équations différentielles résolues par ordinateur ; où les équations différentielles sont remplacées par des équations aux différences (Bishop., 1995). La forme de ces équations est généralement canonique.

2.2.4. L'apprentissage des réseaux de neurones

L'apprentissage est la phase de développement d'un réseau de neurones où se fait le calcul et la modification des poids de connexion jusqu'à l'obtention de la réponse désirée. Il existe de nombreux types d'apprentissage qui peuvent être regroupées en trois catégories :

- L'apprentissage supervisé
- L'apprentissage non supervisé.

2.2.4.1. L'apprentissage supervisé

Ce genre d'apprentissage est réalisé à l'aide d'une base de données d'apprentissage, constituée de plusieurs exemples de type entrées-sorties. Le réseau apprend par présentation de pair d'entrée/sortie. Durant l'apprentissage, les valeurs de sorties désirées sont comparées à celles produites par le réseau. L'erreur résultante est utilisée pour l'ajustement des poids des connexions dans le cas où notre modèle n'est pas adéquat jusqu'à ce que l'écart entre les sorties du réseau (ou résultats calculés) et les résultats désirés soient minimisés (Ammar., 2007).

2.2.4.2.L'apprentissage non-supervisé

Contrairement au mode d'apprentissage supervisé, dans cet apprentissage, aucune information sur la sortie désirée du réseau n'est disponible. La modification des poids de connexion se fait uniquement sur la base des données de l'apprentissage.

Ainsi, le réseau manipule des données qui lui sont présentées en entrée et cherche à extraire quelques propriétés qui formeront les sorties du réseau. L'extraction de ces propriétés dépend de la règle d'apprentissage utilisée dans le réseau (Kalakh., 2013).

2.3.Application

Le principal objectif de cette partie de l'étude est de montrer dans un premier temps qu'il est possible de développer un réseau de neurones artificiel capable de prédire la résistance en compression des bétons de fraisâts, quel que soit sa nature et l'origine des agrégats de fraisâts, ensuite de déterminer l'influence de la taille de la base de données sur les résultats du réseau de neurones développé.

2.3.1. Modèle utilisé

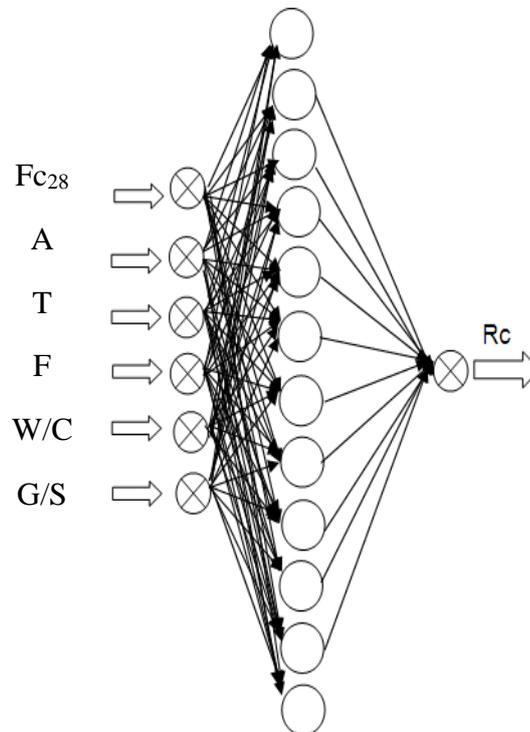


Fig. 5.7 Architecture du modèle.

Pour le cas présent, un réseau de neurone de type « feed forward » multicouches avec algorithme d'apprentissage « back propagation » a été développé avec l'interface Matlab[®]. La fonction « Sigmoid » a été utilisée. L'architecture choisie est montrée par la Fig.5.7. avec six (06) paramètres d'entrée, un (01) paramètre de sortie et une (01) couche intermédiaire contenant 12 neurones. Les paramètres d'entrée considérés sont : la résistance en compression ciblée (Fc28), l'âge des bétons (A), la température (T), le pourcentage de fraisât (F), le rapport eau sur ciment (E/C) et le rapport gravier sur sable (G/S). Un seul paramètre de sortie est considéré : la résistance en compression (Rc). L'erreur obtenue lors de la phase de l'entraînement et la phase de test est mesurée en termes *d'erreur quadratique moyenne (mean squared error MSE)* selon l'Eq. (5.7) (Topçu et Saridemir, 2008) et le coefficient de régression (R) mesurant la corrélation entre les entrées et les sorties.

$$MSE = \frac{1}{p} \sum_i (t_i - e_i)^2 \quad (5.7)$$

Où t est la valeur ciblée, e est la valeur expérimental et p le nombre d'itérations. Les paramètres utilisés pour le modèle sont rapportés sur le Tableau 5.5.

Tableau 5.5. Paramètres du modèle.

Nombre de paramètres d'entrée	6
Nombre de couches intermédiaires	1
Nombre de neurones dans la couche intermédiaire	12
Nombre de paramètres de sortie	1
Adaptation	'trains'
Diviseur	'dividerand'
Gradient	'calcjx'
Initialisation	'initlay'
Performance	'mse'
Algorithme	'trainlm'

2.3.2. Base de données

Pour l'entraînement, la validation et le test du modèle de réseau de neurones artificiel, les données ont été recueillies à partir de différentes sources disponibles dans la littérature (Mathias et al., 2009 ; Huang et al., 2005 ; Erdem et Blankson, 2014) prenant en considération le fait que les chercheurs aient utilisé des formes différentes et des dimensions différentes de spécimens. Ainsi, une conversion de la résistance en compression sur cubes à la résistance en compression sur cylindres a été effectuée selon Eurocode 2 (Eurocode 2, 2004). Nos propres résultats expérimentaux ont aussi été utilisés pour la construction de la base de données. Un total de 104 données ont initialement été utilisées pour l'entraînement, la validation et le test du modèle, avec 60% des données choisis aléatoirement pour l'entraînement, 20% des données choisis aléatoirement pour la validation et enfin 20% des données choisis aléatoirement pour le test.

Afin de faire varier la taille de la base de données, et n'ayant pas d'autres résultats expérimentaux disponibles pouvant être ajoutés, nous avons appliqué la méthode de plans d'expériences (comme expliqué dans le précédent chapitre) sur les résultats expérimentaux des autres auteurs lorsque possible. Des modèles polynomiaux ont été construits et par conséquent de nouveaux résultats expérimentaux ont été générés.

Les paramètres physiques considérés dans chaque étude ont été remplacés par des variables réduites adimensionnelles X_i où i est le nombre de paramètres physiques influents considérés, variant dans le domaine $[-1,+1]$. Les modèles polynomiaux proposés sont rapportés sur le Tableau.5.6.

Tableau 5.6. Modèles polynomiaux pour chaque étude.

Référence	Paramètres influents	Variable codée	Age du béton	Domaine de fraisâts (%)	Modèle polynomial
(Mathias et al., 2005)	RAP	X_1	28 jours	[0-30%]	$R_c=39.05-7.1 X_1-4.25 X_2-0.7 X_1 X_2$
	Température	X_2		[30%-100%]	$R_c=24.25-7.7 X_1-5.55 X_2-0.6 X_1 X_2$
(Huang et al., 2005)	RAP	/	/	/	/
(Erdem et Blankson, 2014)	RAP	/	/	/	/
Nos résultats expérimentaux	RAP	X_1	3 jours	[0-30%]	$R_c=5.24-0.74 X_1-1.04 X_2+0.11 X_1 X_2$
	W/C	X_2		[30%-50%]	$R_c=4.08-0.42 X_1-0.66 X_2+0.27 X_1 X_2$
			7 jours	[0-30%]	$R_c=10.13-1.25 X_1-2.33 X_2-0.07 X_1 X_2$
				[30%-50%]	$R_c=7.48-1.39 X_1-1.97 X_2+0.43 X_1 X_2$
			14 jours	[0-30%]	$R_c=13.36-1.76 X_1-2.17 X_2+0.02 X_1 X_2$
				[30%-50%]	$R_c=9.91-1.69 X_1-1.74 X_2+0.41 X_1 X_2$
			28 jours	[0-30%]	$R_c=15-1.36 X_1-2.43 X_2+0.395 X_1 X_2$
				[30%-50%]	$R_c=11.44-2.2 X_1-1.59 X_2+0.45 X_1 X_2$
		91 jours	[0-30%]	$R_c=16.81-1.63 X_1-2.79 X_2+0.405 X_1 X_2$	
			[30%-50%]	$R_c=12.75-2.415 X_1-2.085 X_2+0.305 X_1 X_2$	

Remarque :

Concernant les résultats expérimentaux des auteurs Huang et son équipe, et de Erdem et Blankson, le seul facteur influent variable considéré étant le pourcentage de fraisâts, il n'a pas été possible d'appliquer la méthode des plans factoriels d'expérience. Ainsi, leurs résultats expérimentaux sont intégrés dans la base de données tels quels.

Les modèles polynomiaux proposés sont utilisés pour générer des données. Les valeurs de pas choisies sont : 1, 0.5, 0.2 et 0.1 en tenant compte de toutes les combinaisons possibles et imaginables entre les variables codées et ce pour chaque pas. Ensuite, les résultats codés obtenus sont convertis en résultats physiques, et c'est alors que la base de données peut être construite. Grâce à la génération de nouvelles données, la taille de la base de donnée est passée de 104 à 123-315-1467 et 5307 données respectivement en utilisant les pas 1, 0.5, 0.2 et 0.1 respectivement.

2.4. Résultats et discussions

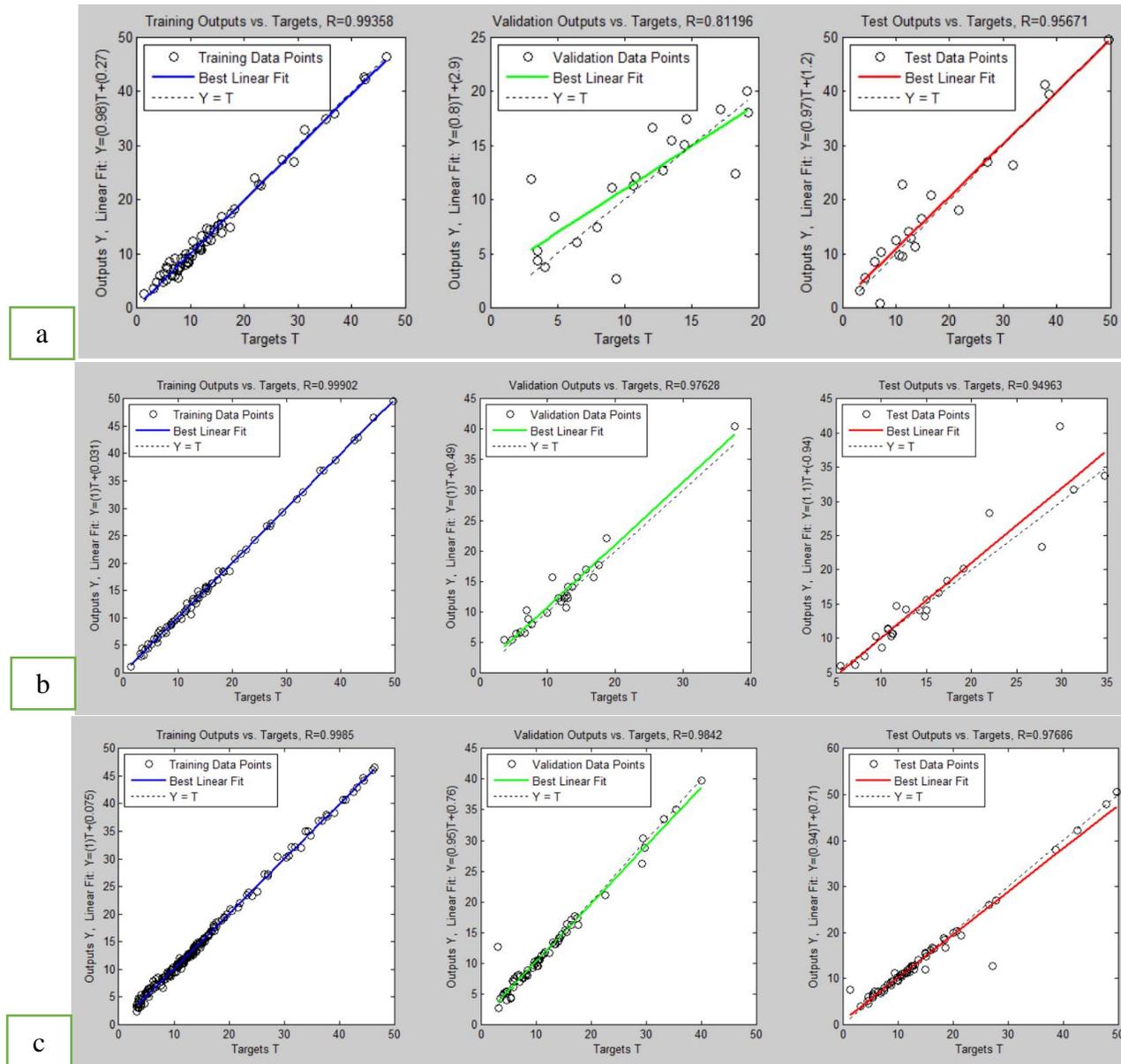
Le Tableau 5.7. montre les résultats du modèle « back propagation » avec architecture 12-1, exprimés en termes de R et MSE; les résultats de la prédiction de la résistance en compression par le réseau de neurone développé, en fonction de la taille de la base de données.

Lorsque la base de données initiale a été utilisée, le coefficient R pour l'entraînement et le test est respectivement de 0.9935 et 0.9567 tandis que la MSE est respectivement de 1.252 et 14.402 pour l'entraînement et le test. Les deux paramètres ont été améliorés lorsque les données constituent la base de données ont été générées avec un pas de 1. Les meilleurs résultats sont obtenus avec le pas de 0.1 ; le coefficient R pour l'entraînement et le test est de 0.9994 et 0.9985 respectivement et le coefficient MSE est respectivement de 0.099 et 0.282 (des valeurs proches de 0) pour l'entraînement et le test lorsque la base de données était constituée de 5307 données.

Tableau 5.7. Résistance en compression en fonction de la taille de la base de données.

Nombre de données	Phase entraînement	R	MSE
104	62 données	0.9935	1.252
123	74 données	0.9990	2.409
315	188 données	0.9985	2.941
1467	880 données	0.9956	0.8696
5307	3184 données	0.9994	0.0986
Nombre de données	Phase de test	R	MSE
104	21 données	0.9567	14.402
123	24 données	0.9496	8.780
315	63 données	0.9769	4.565
1467	293 données	0.9945	1.001
5307	1061 données	0.9985	0.282

L'analyse des résultats montre que le réseau de neurones artificiel développé est parfaitement capable de prédire la résistance en compression des bétons contenant des agrégats de fraisâts, quel que soit le pourcentage des agrégats de fraisât et surtout quel que soit leur origine, donnant des valeurs très proches des valeurs expérimentales à l'exception de quelques valeurs dans le cas de la base de données initiale. Plus la taille de la base de données est importante, meilleur est le résultat obtenu. Les meilleurs résultats sont obtenus lorsque le nombre de données constituant la base de données est plus important (cas de 5307 données), comme montré sur la Fig.5.8.



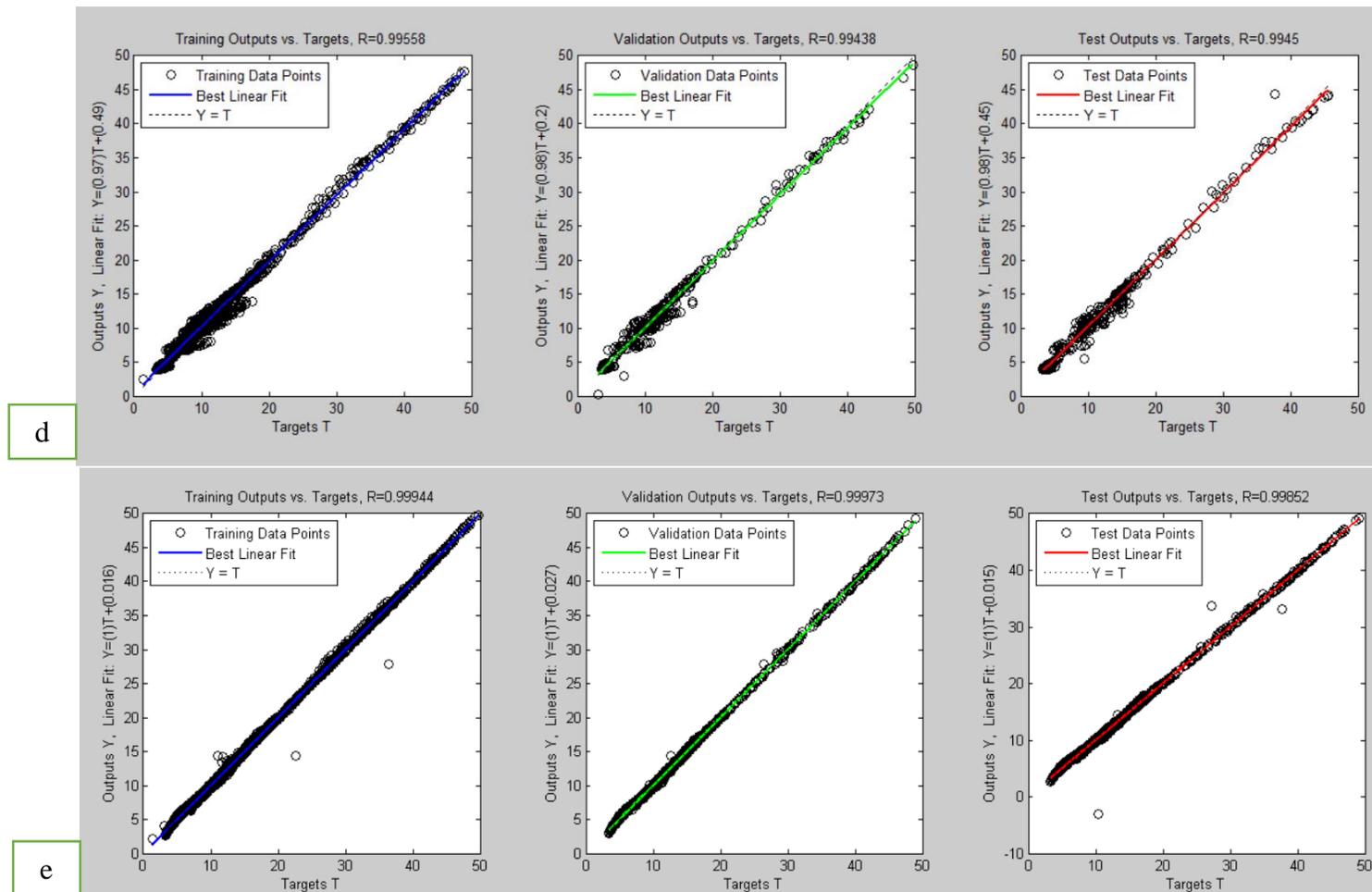


Fig. 5.8 Performance de l'entraînement, de la validation et du test a) base de données initiale de 104 données b) base de données de 123 données c) Base de données de 315 données d) base de données de 1467 données e) base de données de 5307 données.

Cependant, quelques valeurs prédites par le modèle sont relativement éloignées des valeurs expérimentales. Ceci peut être dû à plusieurs raisons, notamment le type de ciment utilisé dans les différentes études expérimentales des différents chercheurs n'étant pas le même et le type de ciment n'est pas considéré comme paramètre d'entrée, si bien que la base de données en elle-même peut contenir les valeurs erronées.

Ainsi, l'application de la technique des plans factoriels d'expérience a permis de générer des résultats expérimentaux dans le but d'augmenter la taille de la base de données utilisée pour le développement du réseau de neurones artificiel capable de prédire la résistance en compression des bétons de fraisâts.

Conclusion générale et perspectives

Les bétons de fraisats sont les bétons cimentaires constitués entièrement ou partiellement d'agrégats de fraisat, longtemps été considérés comme déchet, issus de l'entretien des chaussées bitumineuses. Ces matériaux sont écologiques, économiques et contribuent à la protection de l'environnement en limitant la demande en granulats naturels, par leur substitution par des agrégats recyclés (fraisat). Les bétons de fraisats sont essentiellement principalement utilisés dans les routes secondaires, aire de stationnement ou encore dans des éléments non structuraux. Plusieurs études et investigations ont été menées sur ces bétons de fraisats et les principaux résultats expérimentaux rapportés dans la littérature montrent que les bétons de fraisats ont un comportement rhéologique semblable à celui des bétons conventionnels et que les performances et les propriétés mécaniques des bétons de fraisats sont réduites à cause de la faible interface entre l'agrégat de fraisat et la pâte de ciment.

Dans la présente étude, il a été question, dans un premier temps de caractériser différentes formulations de bétons, où les granulats naturels ont été remplacés par des agrégats de fraisats à des taux allant jusqu'à 50% (fraction de volume) et où trois rapports de E/C ont été considérés. Les résultats expérimentaux des essais de résistance en compression, traction par fendage, traction par flexion et de détermination du module d'élasticité statique et dynamique montrent que plus le pourcentage de fraisats augmente, plus les performances diminuent. Ceci est probablement due à la faible interface entre l'agrégat de fraisat et la pâte de ciment. Une analyse au microscope électronique à balayage a été réalisée et les résultats obtenus confirment l'explication des résultats obtenus.

Afin d'améliorer les performances mécaniques et élastiques de ces bétons de fraisat, deux ajouts ont été envisagés ; un ajout organique (fibres de polypropylène de type multifilament) et un ajout minéral (fumée de silice). Les résultats expérimentaux obtenus montrent que les deux ajouts augmentent la résistance en compression des bétons de fraisat. Cependant, les fibres de

polypropylène augmentent la résistance en compression d'une manière similaire pour toutes les bétons de fraisats, tandis que l'efficacité de la fumée de silice diminue lorsque le pourcentage de fraisat augmente dans le mélange. Ceci est dû au fait que les fibres se dispersent dans la matrice cimentaire indépendamment de la présence des fraisats, tandis que la fumée de silice est affectée par la présence de pollution apportée par les agrégats de fraisat non lavés, réduisant ainsi son effet pozzolanique. Encore une fois, une analyse au microscope électronique à balayage a été réalisée et les résultats obtenus confirment l'explication présentée. Ainsi, l'ajout des fibres de polypropylène est privilégié pour le reste de la campagne expérimentale. Même si les fibres augmentent la résistance en compression des bétons, elles diminuent la résistance en traction par fendage ainsi que le module d'élasticité statique. Ceci peut revenir au type de fibres utilisées. Aussi, nous recommandons pour des travaux futurs d'étudier l'effet du type de fibres et de leur longueur sur les propriétés des bétons de fraisat.

Cependant, l'indice qualité élastique, utilisé pour quantifier a priori la qualité d'un matériau routier, montrent que les bétons de fraisats renforcés à 0.1% de fibres montrent un indice satisfaisant pour une utilisation routière, car ils présentent un bon compromis entre résistance en traction par fendage et module d'élasticité statique.

Dans cette étude, plusieurs paramètres influents ont été considérés. Dans la partie modélisation, il a été question dans un premier temps d'utiliser les plans d'expérience, pour suivre dans le temps, les effets individuels et combinés des paramètres influents (pourcentage de fraisat, rapport de E/C) sur les propriétés mécaniques des bétons de fraisats (résistance en compression, résistance en fendage). L'analyse des résultats montre que ces effets passent par régime transitoire entre 3 et 28 jours, pour tendre vers des constantes avec le temps, et ce quelque soit le domaine de pourcentage de fraisat considéré, et qu'un taux de 30% de fraisat est recommandé avec un minimum d'impact sur les performances dans les propriétés. Aussi, la construction de modèles polynomiaux, limités et valables dans le domaine de la présente étude,

nous a permis de prédire les propriétés mécaniques des bétons de fraisat pour d'autres valeurs de paramètres sans avoir recours à l'expérimentation. Ainsi, nous recommandons pour des travaux futurs, l'utilisation des plans factoriels pour la modélisation d'autres propriétés mécaniques ; telles que la résistance en traction par flexion, le module d'élasticité...etc. en considérant l'effet individuel et combinés des paramètres influents ; tels que les fibres de polypropylène, la fumée de silice...etc.

Enfin, une seconde modélisation, moyennant les réseaux de neurones artificiels, nous a permis non seulement de prédire la résistance en compression des bétons de fraisats, grâce à la propriété de généralisation de ces réseaux de neurones simplement en introduisant les valeurs des six (06) entrées ; la résistance en compression ciblée (F_{c28}), l'âge des bétons (A), la température (T), le pourcentage de fraisât (F), le rapport eau sur ciment (E/C) et le rapport gravier sur sable (G/S), mais aussi, en utilisant les plans d'expériences, d'étudier l'influence de la taille de la base de données sur les résultats obtenus. Les résultats ont montré que plus la taille de la base de données est importante, meilleurs sont les résultats. Aussi, pour les travaux futurs, nous recommandons vivement de considérer, d'autres architectures de réseaux, de considérer d'autres entrées et d'autres sorties, uniques ou multiples ; telle que la prédiction de la résistance en compression, la résistance en traction par fendage, les deux propriétés en sortie multiples, ou encore de prédire les propriétés des bétons de fraista renforcés aux fibres ou à la fumée de silice.

Bibliographie

- Abtahi S.M., M., Sheikhzadeh M., Hejazi S.M. (2010), Fiber-reinforced asphalt concrete – A review. *Construction and Buildings Materials* 24, 871-877
- Alhozaimy A.M., Soroushian P, Mirza F. (1996), Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete and the effect of pozzolanic materials. *Journal of Cement Concrete Composite* 18, 85-92
- Alshihri M.M., Azmy A.M., El-Bisy M.S. (2009), Neural networks for predicting compressive strength of structural light weight concrete. *Construction and Building Materials*, 23 (6), 2214-2219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.12.003>
- Amdoun R., Khelifi L., Khelifi-Slaoui M., Amroune S., Benyoussef E.H., Thi D.V., Assaf-Ducrocq C., Gontier E. (2009), Influence of minerals and elicitation on *Datura stramonium* L. tropane alkaloid production: modelization of the in vitro biochemical response. *Plant Science* 177(2), 81–87
- Ammar M.Y., (2007), Mise en oeuvre de réseaux de neurones pour la modélisation de cinétiques réactionnelles en vue de la transposition batch/continu, 194 p, Thèse de Doctorat de l'I.N. P, département de génie des procédés et de l'environnement, Ecole doctorale : Transfert, Dynamique des Fluides, Energétique & Procédés-Toulouse.
- BAEL 91 révisées 99 Février, (2000), DTU P 18-702, Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites.
- Banthia N., Gupta R. (2006), Influence of polypropylene geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. *Cement and Concrete Research* 36, 1263-1267.
- Benyoussef E.H., Beddek N., Bellabbes R., Bessière J.M. (2000), Evolution des effets de certains paramètres opératoires de l'entraînement à la vapeur d'eau des graines de coriandre sur le rendement en huile essentielle. *Entropie* 229,18–23
- Biryukovich K.L., Biryukovich Yu. L., Biryukovich D.L.(1964), *Glass fibre reinforced cement*, Kiev: Budivel'nik, (CERA translation, 1965, N°12)
- Bishop C., (1995), *Neural Networks for Pattern Recognition*, Oxford : University Press, 498p.
- Brandt A.M. (2008), Fibre reinforced cement based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Composites Structures* 86, 3-9.

BRMCA (2008), Guidance document on sustainable concrete design and rating systems. Haymarket: British Ready-Mixed Concrete Association.

CECA-CEE-CEEA (Octobre 1981), Études pratiques sur les scories LD utilisées en technique routière, recherche technique acier, Direction générale Marché de l'information et innovation, Bruxelles Luxembourg

Choi Y., Yuan R.L. (2005), Experimental relationship between splitting tensile strength and compressive strength of GFRC and PFRC. *Cement and Concrete Research* 35, 1587-1591

Chung D.D.L. (2002), Review, Improving cement based materials bu using silica fume, *Journal of materials science* 37, 673-682

Corinaldesi V., Moriconi G.(2009), Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials* 23 (8), 2869-2876, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.004>

Dantas A.T.A., Leite M.B., Nagahama K.D.J. (2013), Prediction of compressive strength of concrete containing construction and demolition waste using artificial neural networks, *Construction and Building Materials*, 38, 717-722, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.026>

Degea P. et Girault M. (1972), *Analyse de la variance et plans d'expériences*, Wiley interscience.

Demir F. (2008), Prediction of elastic modulus and high strength concrete by artificial neural networks, *Construction and Building Materials*, 22 (7), 1428-1435, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.04.004>

Design manual for roads and bridges. (2007), The use of recycled concrete aggregate in structural concrete, BA 92/07 Vol. 2, Section 3, Part 9. England: Highways Agency.

Dilbas H., Şimşek M., Çakir Ö. (2014), An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume, *Construction and Building Materials* 61, 50-59, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.057>

Duan Z.H., Kou S.C., Poon S.C. (2013), Prediction of compressive strength of recycled aggregate concrete using artificial neural networks, *Construction and Building Materials*, 40, 1200-1206, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.063>

- Duan Z.H., Kou S.C., Poon S.C. (2013), Using artificial neural networks for predicting the elastic modulus of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 44, 524-532, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.064>
- Dufaud O., Corbel S. (2004), Dispositif de déposition de couches de suspensions de céramiques appliqué à la stéréolithographie, *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 82 (5), 986–993
- Duval R., Kadri E.H., (1998), Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high performance concretes, *Cement and Concrete research* 28, 533-547
- Elhakam A.A., Mohamed A.E., Awad E.(2012), Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete, *Construction and Building Materials* 35, 421–427, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.013>
- Erdem S., Blankson M.A. (2014), Environnemental performance and mechanical analysis of concrete containing recycled asphalt pavement and waste precast concrete as aggregate, *journal of Hazardous materials* 264, 403-410.
- Eurocode 2, 2010, Design of concrete structures – part 2: concrete bridges – design and detailing rules.
- Feki M., Ayedi H.F. (2000), Modélisation du traitement de purification de l'acide phosphorique de voie humide par la méthylisobutylcétone. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 78 (3), 540–546
- Fonteboa B.G., Abella F.M.(2008), Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume, *Materials and mechanical properties. Building and Environment* 43, 429–437, [10.1016/j.buildenv.2007.01.008](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.008)
- Goupy J. (2006), Tutoriel les plans d'expérience, revue MODULAD N°34
- Grilli A., M. Bocci, A.M. Tarantino (2013), Experimental investigation on fiber reinforced cement-treated materials using reclaimed asphalt, *Construction and building materials* 38, 491-496
- Hannant D.J. (1998), Durability of polypropylene fibers in Portland cement based composites : eighteen years of data, *Cement and Concrete Research* 28 (12), 1809-1917

Huang B., Shu X., Li G. (2005), Laboratory investigation of Portland cement concrete containing recycled asphalt pavement, *Cement and Concrete Research* 35, 2008-2013

ISO 1920, 2010, Testing of concrete-part 10 -determination of static modulus of elasticity in compression.

IFSTTAR (18 Octobre 2013), Le manège de fatigue des structures routières: 35 ans d'innovation, Dossier de presse.

Jansen D., Goetz-Neunhoeffler F., Neubauer J., Haerzschel R., Hergeth W.D. (2013), Effects of polymers on cement hydration: A case study using substituted PDADMA, *Cement and Concrete Composites* 35, 71-77

Jean-Pierre SERFASS (10/02/2009), Recyclage et retraitement en place des matériaux de chaussées Ingénieur civil des Mines, Techniques de l'ingénieur

Jones R., Mc Carthy, M., Newlands M. (2010), Green concrete: Embracing change, *Concrete* 44 (6), 50–52.

Kalakh M. (2013), Modélisation d'un réseau de neurones d'un canal web UWB d'un environnement minier souterrain, 83 p, mémoire de fin d'étude, département de génie, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.

Kewalramani M.A., Gupta R. (2006), Concrete compressive strength prediction using ultrasonic pulse velocity through artificial neural networks, *Automation in Construction* 15 (3), 374-379, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2005.07.003>

Khan M.I., Siddique R. (2011), Utilization of silica fume in concrete: review of durability properties, *Resources, conservation and recycling* 57, 30-35.

Kitous O., Abdi N., Lounici H., Griba H., Drouicheb N., Benyoussef E.H., Mameri N. (2016), Modeling of the adsorption of metribuzin pesticide onto electro-activated granular carbon, *Desalination and Water Treatment* 57 (4), 1865–1873

Kolias S. (1996), Mechanical properties of cement treated mixtures of milled bitumenous concrete and crushed aggregates, *Materials and structures* 29, 411-417

Kou S.C., Poon C.S., Agrelà F. (2011), Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures, *Cement and Concrete Composites* 33 (8): 788-795, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.05.009>

Larbi R., Benyoussef E.H., Morsli M., Bensaïbi M., Bali A. (2019), Improving the compressive strength of reclaimed asphalt pavement concretes with silica fume, Iranian journal of science and technology-transactions of civil engineering.

Larbi R., Morsli M., Bensaïbi M., Bali A., Benyoussef E.H. (2017), Study and modeling of the compressive and splitting tensile strength of polypropylene fiber reinforced concrete containing recycled asphalt pavement, Journal of materials and applications 6 (1), 13-22.

Manolis G.D., Gareis P.J., Tsonos A.D., Nael J.A. (1997), Dynamic properties of polypropylene fiber reinforced concrete slabs. Cement and Concrete Composites 19, 341-349

Martín-Morales, M., Zamorano, M., Ruiz-Moyano, A., Valverde-Espinosa, I. (2011), Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08, Construction and Building Materials 25, 742–748

Mathias V. (2005), Recyclage des fraisâts d'enrobés dans les bétons hydrauliques routiers, Thèse de doctorat, laboratoire centrale des ponts et chaussées.

Mazloom M., Ramezani pour A.A., Brooks J.J. (2004), Effect of silica fume on mechanical properties of high strength concrete, Cement and Concrete Composites 26, 347-357

NA 442 (2000), Ciment, composition, spécifications et critères de conformité de ciments courants.

NF EN 12350-2 (1999), Essais pour béton frais, partie 2 : essai s'affaissement

NF EN 12350-6 (1999), Essais pour béton frais, partie 6 : masse volumique

NF EN 12390-2 (2001), Essai pour béton durci, partie 2 : confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance.

NF EN 12390-3 (2003), Essai pour béton durci, partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes

NF EN 12390-5 (2001), Essai pour béton durci, partie 5 : résistance à la flexion sur éprouvettes

NF EN 12390-6 (2001), Essai pour béton durci, partie 6 :résistance en traction par fendage des éprouvettes

NF EN 12390-7 (2001), Essai pour béton durci, partie 7 : masse volumique du béton.

NF EN 12504-4 (2005), Essais pour béton dans les structures, partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son.

NF EN 12697-1 (2012), Mélanges bitumineux – méthodes d’essai pour mélange hydrocarbonné à chaud-Partie 1 : teneur en liant soluble.

NF EN 12697-1 (2012), Mélanges bitumineux – Méthodes d’essai pour mélange hydrocarbonés à chaud – partie 1 : teneur en liant soluble.

NF P 18-418 (1999), Auscultation sonique mesure du temps de propagation d’ondes soniques dans le béton.

NF P 18-554 (1990), Granulats : mesure des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d’absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux.

NF P 18-555 (1990),), Granulats : mesure des masses volumiques, coefficient d’absorption et teneur en eau des sables.

NF P 18-560 (1990), Granulats : analyse granulométrique par tamisage.

NF P 18-561 (1990), Granulats : mesure du coefficient d’aplatissement.

NF P 18-572 (1990), Granulats : essai d’usure micro deval.

NF P 18-573 (1990), Granulats : Essai de Los Angeles.

NF P 18-591 (1990), Granulats : détermination de la propreté superficielle.

NF P 18-598 (1991), Granulats : Equivalent de sable.

NF XP P 18-540 (1997), Granulats – définitions, conformité, spécifications, indice de classement.

Ni H.G.,Wang J.Z. (2000), Prediction of compressive strength of concrete by neural networks, Cement and Concrete Research 30 (8), 1245-1250, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00345-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00345-8)

Nili M., Afroughsabet V. (2010), The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete, *Construction and building materials* 24, 927-933

Nili M., Afroughsabet V. (2012), The long-term compressive strength and durability properties of silica fume fiber-reinforced concrete, *Materials science and engineering A* 531, 107-111.

Oliveira Junior H.A., Caldeira A.M., Machado M.A.S., Souza R.C., Transcheit R. (2007), *Computational intelligence applied to the administrative, economics and engineering in Matlab*, New York: Thomson learning

Ostle B., Turner K.V., Hicks C.R., Mcelrath G.W. (1999), *Engineering Statistics: The industrial Experience*, Duxbury Press, Pacific Grove, CA

Pala M., Özbay E., Öztaş A., Yuce M.I. (2007), Appraisal of long term effects of fly ash and silica fume on compressive strength of concrete by neural networks, *Construction and Building Materials* 21 (2), 384-394, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.009>

Paute J. L., Hameury O., Labois G. (Janvier-Février 2001), Détermination en laboratoire du délai de maniabilité des graves-ciment. Méthode d'auscultation dynamique, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées* N°220. Référence 4208, 3-14

Pouliot N., Marchand J., Pigeon M. (2002), High performance rehabilitation of roads: influence of bitumen on the mechanical properties of cement mortars, publication extraite de la thèse de doctorat de Pouliot, Université Laval, Québec.

Revue construction moderne N°105. Solutions béton.

Revue RGRA N°819, Juillet-août 2003, L'aire des Châtaigniers, une première concluante.

Revue Route N°113, Septembre 2010, environnement

Revue Travaux N°877, Décembre 2010 : Janvier 2011, Innovation et génie civil

Richardson A. (2013), Reuse of Materials and byproducts in Construction, *Green Energy and Technology*, DOI: 10.1007/978-1-4471-5376-4_4.

- Richardson, A. E., Allain, P., Veuille, M. (2010), Concrete with crushed, graded and washed recycled construction demolition waste as a coarse aggregate replacement, *Structural Survey* 28 (2), 142–148
- Richardson, A. E., Coventry, K. (2010), Early life freeze/thaw durability of Type 1 polypropylene fibre and ground granulated blast furnace slag concretes, Coventry University and UWM Center for By-Products Utilization, Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, June 28–June 30, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy
- Romualdi J.P., Mandel J.A. (1964), Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement, *Journal ACI*, 657-670.
- Rosenblatt F. (1958), The Perceptron : A Probabilistic Model For Information Storage And Organization In The Brain, *Psychological Review* 65, 386-408.
- Rumelhart D., Hinton G., Williams R. (1986), Learning Internal Representations By Error Propagation, *Parallel Distributed Processing*, Éd. McClelland D. Et Rumelhart J., Cambridge : Mit Press 1, 318-362,
- Sani D., Moriconi G., Fava G., Corinaldesi V. (2005), Leaching and mechanical behaviour of concrete manufactured with recycled aggregates, *Waste Manage* 25, 177-182.
- Saridemir M. (2009), Prediction of compressive strength of concretes containing metakaolin and silica fume by artificial neural networks, *Advances in Engineering Software* 40, 350-355. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2008.05.002>
- SETRA, LCPC (Décembre 1994), Conception et Dimensionnement des Structures de Chaussée, Guide Technique
- Siddique R. (2011), Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties. *Resources, Conservation and recycling* 55, 923-932
- Si Moussa C. (2010), Modélisation des équilibres de phases à pressions élevées par les réseaux de neurones artificiels, Thèse doctorat, Ecole Nationale Polytechnique.
- Tapin S. (2008), The effect of polypropylene fibers on asphalt performance, *Building and environment* 43, 1065-1071.

Topçu I.B., Saridemir M. (2007), Prediction of properties of waste AAC aggregate concrete using artificial neural network, *Computational Materials Science* 41 (1), 117-125, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2007.03.010>

Topçu I.B., Saridemir M. (2008), Prediction of mechanical properties recycled aggregate concretes containing silica fume using artificial neural networks and fuzzy logic, *Computational Materials Science* 42 (1), 74-82, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2007.06.011>

Topçu I.B., Saridemir M. (2008), Prediction of rubberized concrete properties using artificial neural network and fuzzy logic, *Construction and Building Materials* 22 (4), 532-540, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.11.007>

Toutanji H.A., El Korchi T. (1995), The influence of silica fume on the compressive strength of cement paste and mortars, *Cement and Concrete Research* 25 (7), 1591-1602

Trambouse P. et Wauquier J.P. (1975), *Le développement des procédés de raffinage et pétrochimie*, Technip Paris.

Vivian W.Y. Tam, X.F. Gao, C.M. Tam. (2005), Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach, *Cement and Concrete Research* 35, 1195-1203

White H., 1992, *Artificial neural networks*, Blackwell, New York, 329.

Wira P. (2008), Des réseaux de neurones artificiels pour l'identification et le contrôle de systèmes électriques, *International Conference on Electrical Engineering and its Applications*, Sidi Bel-Abbes.

Wong H.S., Razak H.A. (2005), Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance, *Cement and concrete research* 35 (4), 696-702.

World Business Council for Sustainable Development (2009), *The cement sustainability initiative*, Recycling concrete.