



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



Université Amar Thelidji-Laghouat

FACULTÉ DE GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE.

DÉPARTEMENT DE GENIE CIVIL.

MÉMOIRE DE MASTER

Présenté par : NAKH ZINEB.

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE.

FILIERE : GENIE CIVIL.

OPTION : MATERIAUX EN GENIE CIVIL.

Thème

**Comportements rhéologique et physico-mécanique des mortiers
autoplaçants contenant des granulats issus de déchets de plastique.**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mr. Merah Ahmed	Maître de conférences (A)	Président
Mr. Belaidi Akram Salah Eddine	Maître de conférences (A)	Examineur
Mr. Bouziani Tayeb	Professeur	Rapporteur
Mr. Kouidri Ahmed	Maître Assistant (A)	Co-rapporteur

Promotion : Juin- 2019.

Remerciements

***J**e tiens tout d'abord à remercier **Dieu** le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.*

***J**'exprime toutes mes profondes reconnaissances à mon encadreur Monsieur **Bouziati Tayeb** de m'avoir fait confiance pour mener à bien ce présent travail.*

*Je tiens à remercier mon Co-encadreur Monsieur **Kouidri Ahmed** de m'avoir fait confiance pour mener à bien ce présent travail.*

***J**e tiens à remercier très vivement et respectueusement Monsieur **Merah Ahmed**, maitre de conférences à l'Université de Laghouat, pour m'avoir fait l'honneur de présider au jury de ma soutenance.*

***J**e remercie aussi Monsieur **Belaidi Akram Salah Eddine**, Maître de conférences à l'Université de Laghouat, d'avoir accepté d'examiner ce travail et de participer au jury.*

***J**'adresse mes sincères remerciements à tous mes enseignants en particulier : **Mr T. Nouioua, Mr B. Krobb, Mr A. Boucedra, Mr A. Ziregue**, pour leurs conseils enrichissants, leurs appuis et leurs disponibilités.*

***M**es grands remerciements vont à tous **les doctorants** qui m'ont aidé en particulier **Mr M .Sahraoui** pour son aide précieuse et sa documentation.*

***J**e souhaite également exprimer mes plus sincères remerciements à tous les enseignants du département de Génie Civil et à toute l'équipe de soutien de laboratoire de génie civil pour tous les efforts qui ont fait à bien mener ma formation et mon projet de fin d'étude. Je n'ose citer des noms de peur d'oublier quelque uns mais je garderai en mémoire leur aide et leur soutien.*

***E**nfin je tiens à remercier, tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour réaliser ce travail et en particulier **Mr Attiat Aissa** agent technique chargé de bibliothèque d'avoir mis à ma disposition toute la documentation nécessaire.*

Merci à tous

Au nom de dieu le tout clément le tout miséricordieux.

Dédicaces

Grace à Dieu le tout puissant, le jour attendu arrive.

À vous je dédie ce modeste travail.

*À l'homme de ma vie, mon exemple éternel, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu le garde « **mon père** ».*

*À la femme parfaite, celle que je respecte et que j'aime énormément à toi **ma mère**.*

*À **ma sœur Narimane**, pour avoir supporté une sœur stressée durant toutes ces années, et à **son mari** pour ces encouragements.*

*À **mon frère Mohamed Ilyes**, pour son amour, j'espère que la vie lui réserve le meilleur.*

*À l'homme le plus précieux, pour sa présence permanente, sa confiance et surtout sa patience à toi **Abdou**.*

*À mes sœurs, **Siham, Hanane, Sara, Zineb** pour leur écoute et leurs soutiens moraux.*

*À **ma grande mère**, qu'Allah la guérisse et lui donne une longue vie.*

*À l'âme de mon frère **Bensaid Mohamed Bachir**, pour tous moments qu'on a passé ensemble 'Tu me manques'.*

*À l'esprit de mon grand-père **Hadj Bouchareb Boubaker**, pour ses prières tout au long de mes études.*

*À l'âme de **Mes grands-parents paternels**, qu'Allah les accueille en son vaste paradis.*

À Tous mes collègues de la promotion 2018/2019. Que tous ceux que je n'ai pu citer leur nom veuillent bien m'excuser.

Vous avez cru en moi c'est pourquoi je suis, je vous dédie ce travail, qui ne pourra t'être que témoin et non jamais assez une reconnaissance à vous.

Table de matière

Remerciements	i
Dédicaces	ii
Table de matière	iii
ملخص	v
Résumé	vi
Abstract	vii
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	xi
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Etat de connaissances sur les bétons et mortiers autoplaçants	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Historique du béton autoplaçant	3
1.3 Définition du béton Autoplaçant.....	3
1.4 Cahier de charge d'un BAP	4
1.5 Structure des BAP.....	5
1.6 Les principaux constituants de béton autoplaçant	7
1.7 Méthodes de formulation des BAP	10
1.8 Propriété principale des BAP.....	18
1.9 Intérêts techniques des BAP	22
1.10 Mortiers autoplaçant	24
1.10.1 Définition.....	24
1.10.2 Propriétés essentielles d'un MAP	25
Chapitre 2 : Rhéologie des mortiers autoplaçants	27
2.1 Introduction.....	27
2.2 Définition de la rhéologie	27
2.3 Importance de l'étude rhéologique	27
2.4 Définition des propriétés rhéologiques	28
2.5 Différents comportements rhéologiques	32
2.6 Facteurs affectant la rhéologie des matériaux cimentaires	35
Chapitre 3 : Valorisation des déchets de plastique dans les matériaux cimentaires	41
3.1 Introduction.....	41
3.2 Composition et origine du plastique	41
3.3 Impacts des déchets de plastique sur la santé et l'environnement.....	41

3.4 Granulats recyclés de déchet de plastique	43
3.5 Matériaux à base de sachets plastiques	43
Chapitre 4 : Méthodes et matériaux	48
4.1 Introduction.....	49
4.2 Méthode de plan de mélange	49
4.3 Matériaux et essais de caractérisation.....	55
4.3.1 Sables	55
4.3.2 Déchets en plastique recyclé.....	61
4.3.3 Ciment et fillers de calcaire	64
4.3.4 Superplastifiant	64
4.3.5 Eau de gâchage	65
4.4 Formulation du mortier autoplaçant	65
4.5 Procédure de malaxage	67
4.6 Procédures des essais.....	68
4.6.1 Essais sur mortier autoplaçant à l'état frais	68
4.6.2 Essais sur mortier autoplaçant à l'état durci	71
Chapitre 5 : Résultats et interprétations	74
5.1 Introduction.....	74
5.2 Préparation de l'étude.....	74
5.3 Choix des réponses	74
5.4 Choix des facteurs.....	74
5.5 Résultats des essais	75
Conclusions générales	92
Perspectives et recommandations.....	94
Références bibliographiques	95
Annexes	103
A.1 Fiche technique du superplastifiant	103
A.2. Etapes d'analyse avec logiciel JMP	104
A.3. Graphiques quelques réponses (Valeurs prévues en fonction de celles Observées) ..	105
A.4. Résultats d'analyse granulométrique	107
A.5. Exemple de quelques résultats rhéologiques obtenues à l'aide du RhéoGraph.....	108

ملخص

هذه العمل التجريبي يمثل دراسة حول تأثير النفايات البلاستيكية المعاد تدويرها في مجال البناء على الخواص الريولوجية و الفيزيو- ميكانيكية للملاط ذاتي التوضع.

لتجسيد هذا العمل، قمنا بتحضير خمسة عشر خليط اعد بنسبة $E/L=0.4$ ، و نسبة من الملدن 1.2 %، حسب خطة الخلط.

تحتوي الخلطة المرجعية على رمل الوادي فقط، في حين الخلطات الاخرى تحتوي على رمل الكثبان و النفايات البلاستيكية بنسب مختلفة ثنائية و ثلاثية. خواص الملاط ذاتي التوضع في الحالة المرنة تمت دراستها باستعمال التجارب التالية: تجربة الانتشار باستعمال مخروط صغير، اختبار القمع على شكل حرف V، تجربة الكتلة الحجمية الظاهرية و القياسات الريولوجية بالاستعانة بخلاط « RZR 2102 » و تطبيق « Rheograph ». في الحالة المتصلبة، تمت دراسة الخواص الميكانيكية مثل القوى الميكانيكية (اجهاد الضغط و الانحاء). يتم تحليل ومقارنة الخصائص الريولوجية و الفيزيو- ميكانيكية للخلائط المتقاربة من خلال تطبيق النمذجة الرياضية على أساس النهج الإحصائي.

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها التأثير الايجابي لإدخال النفايات البلاستيكية على تخفيف الملاط ذاتي التوضع. مع ذلك، فإن إدخال النفايات يؤثر سلباً على الخصائص الميكانيكية.

الكلمات المفتاحية: السلوك الريولوجي، ملاط ذاتي التوضع، النفايات البلاستيكية، رمل الكثبان، خطة الخلط.

Résumé

Ce travail expérimental présente une étude sur l'effet des granulats issus de déchet de plastique sur le comportement rhéologique et physico-mécaniques des mortiers autoplaçants (MAP).

Pour la réalisation de ce travail, quinze compositions ont été préparées avec un rapport E/L=0.4, et un dosage en superplastifiant de 1.2%, selon un plan de mélange (plan d'expériences). La composition de référence contient uniquement le sable alluvionnaire, alors que pour les autres mélanges leurs compositions comportent le sable de dune et le déchet en plastique recyclés en différents proportions binaires et ternaires avec le sable alluvionnaire. Les propriétés des MAP ont été testées à l'état frais et à l'état durci à travers les essais suivants: l'étalement au mini cône, l'écoulement à l'entonnoir en V (mini V-Funnel), la masse volumique apparente, mesures des caractéristiques rhéologiques à l'aide de l'agitateur « RZR-2102 » et l'application « Rheograph » et finalement les essais mécaniques (l'essai de flexion par trois point et l'essai de compression) afin d'être analysées et comparées en appliquant une modélisation mathématique basée sur une approche statistique.

Les résultats obtenus montrent l'effet bénéfique de l'introduction des déchets de plastiques pour l'allègement du mortier autoplaçant. Néanmoins, l'introduction du déchet affecte négativement les résistances mécaniques.

Mots clés : comportement rhéologique; mortier autoplaçant; déchet de plastique; sable de dune; plan de mélange.

Abstract

This experimental work presents a study on the effect of aggregates from recycled plastic waste on the rheological, physical and mechanical properties of self – compacting mortar.

For the realization of this work, fifteen compositions have been prepared with ratio of $W/B=0.4$ and a dosage of superplasticizer 1.2%, according to a mixture design (Design of experiments DOE). The reference composition contains only the river sand, while for other mixtures their compositions include dune sand and recycled plastic waste in different binary and ternary percentages with river sand. The properties of self-compacting mortar in the fresh state were tested through the following tests: mortar flow test, funnel test, the apparent density and rheological measurement using the agitator «RZR-2102» with the program «Rheograph » and finally, in the hardened state, the mechanical properties such as the mechanical strength (flexural and compressive strengths).

The results obtained show the beneficial effect of the introduction of plastic waste for the lightening of self – compacting mortar. Nevertheless, the introduction of the waste adversely affects mechanical strength.

Keywords: self–compacting mortar; plastic waste; dune sand; mixture design; rheological behavior.

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1. 1. (a) Constituants des bétons ordinaires(BO) et des BAP [BAP , 2000], (b) Aspect à l'état frais des BO et des BAP.....	7
Figure 1. 2. Surface de réponse qui correspond aux réponses de l'ensemble des points du domaine d'étude [Goupy, 2007].....	13
Figure 1.3. Essais d'étalement au cône d'Abrams.	19
Figure 1.4. Essais d'écoulement à la boîte L-box ou boîte en L.	20
Figure 1. 5. Essai de stabilité au tamis.	20
Figure 1. 6. Étapes de l'essai d'étalement au Mini cône de pâte.	25
Figure 1.7. Essai de l'entonnoir en V.....	25
Figure 1.8. Essai de résistance à la compression.....	26

Chapitre 2

Figure 2.1. Schéma glissement des couches [Adjoudj, 2015].	29
Figure 2.2. Schéma de vitesse de cisaillement [Adjoudj, 2015].....	29
Figure 2.3. Contributions de la phase solide et de la phase liquide à la résistance au cisaillement du béton [De Larrard et Belloc A, 1999].	31
Figure 2.4. Comportement d'un corps thixotropique [Nguyen, 1996].....	32
Figure 2.5. Les comportements rhéologiques des fluides.	34
Figure 2.6. Effet du rapport E/C sur les paramètres rhéologiques des bétons [Domone et al, 1999].....	36
Figure 2.7. Effet de la poudre de marbre sur la viscosité du béton de sable auto-plaçant [Bouziani, 2011]......	37
Figure 2. 8. Variation du seuil de cisaillement et de la viscosité d'une pâte de ciment en fonction de types et du temps d'introduction de superplastifiant [Bjömström et Chandra, 2003].....	38
Figure 2.9. Évolution du comportement rhéologique en fonction du temps Pâte E/C=0,4 S: Quarts (pâte inerte), C: Ciment (pâte active) [Smgh et Singh, 1993].	39

Chapitre 3

Figure 3.1. Caniveau jonché de sachets plastiques (Représentation Nationale de CREPA, 2011).....	42
Figure 3.2. Les étapes de recyclage des granulats.....	43
Figure 3.3. Pavés à base de sachets recyclés.....	44

Chapitre 4

Figure 4.1. Représentation des mélanges à trois constituants à l'aide d'un triangle équilatéral.	51
Figure 4.2. Plan de mélanges ne comportant que les trois produits purs.	53
Figure 4.3. Plan de mélanges en réseaux (Simplex lattice designs) comportant les trois produits purs et les mélanges moitié-moitié. Ce plan est noté 3,2.	53
Figure 4.4. Plan de mélanges en réseaux (Simplex lattice designs) comportant les trois produits purs et les mélanges 1/3-2/3 et 1/3-1/3-1/3Ce plan est noté {3, 3}.....	54
Figure 4.5. Sable de dune.	55
Figure 4.6. Sable alluvionnaire.	55
Figure 4.7. Essai de la masse volumique absolue	56
Figure 4.8. Essai de la masse volumique apparente.	57
Figure 4. 9. Essai d'équivalent de sable.	59
Figure 4. 10. Détermination du coefficient d'absorption.	60
Figure 4.11. Distributions granulométriques des sables utilisés.	60
Figure 4. 12. Les étapes de recyclage des granulats et le produit final.	61
Figure 4.13. Détermination de la masse volumique du déchet de plastique	62
Figure 4.14. Courbe granulométrique de déchet de plastique.	63
Figure 4.15. Ciment MoKaouem de Lafarge.	64
Figure 4.16. Illustration de graphique ternaire et des 15 mélanges d'essai.	66
Figure 4.17. Malaxeur à axe vertical.	68
Figure 4.18. Essai d'étalement au mini cône.	69
Figure 4.19. Essai d'écoulement au mini v-funnel.....	69
Figure 4.20. Essai de mesure de la masse volumique apparente.....	70
Figure 4.21. Dispositif du rhéomètre utilisé.....	71
Figure 4.22. Confection des éprouvettes.	72
Figure 4.23. Schématisation du dispositif de flexion 3 points.	72
Figure 4.24. Schématisation du dispositif de compression.	73

Chapitre 5

Figure 5.1. Graphique ternaire de l'étalement (cm) en fonction des dosages de SD, SA et DP.	81
Figure 5.2. Graphique ternaire du temps d'écoulement au mini v-Funnel (s) en fonction du dosage de SD, SA et DP.....	82
Figure 5.3. Graphique ternaire de la masse volumique apparente (g/cm ³) en fonction du dosage de SD, SA et DP.....	83

Figure 5. 4. Graphique ternaire de la résistance à la flexion R_f 28j (MPa) en fonction du dosage de SD, SA et DP.....	84
Figure 5.5. Graphique ternaire de la résistance à la compression R_c 28j (MPa) en fonction du dosage de SD, SA, DP.....	85
Figure 5.6. Graphique ternaire du seuil de cisaillement selon le modèle de Bingham (A), Bingham modifié (B) et Herschel-Buckley (C) en fonction du dosage de SD, SA, DP.....	86
Figure 5.7. Graphique ternaire de la viscosité plastique modèle de Bingham (A), Bingham modifié (B) et Herschel-Bulkley (C) en fonction du dosage de SD, SA, DP.	88
Figure 5. 8. Corrélation entre étalement et le seuil de cisaillements obtenus par les trois modèles.....	90
Figure 5. 9. Corrélation entre V-Funnel et la viscosité plastique obtenues par les trois modèles.....	91

Liste des tableaux

Chapitre 1

Tableau 1.1. Valeurs de k en fonction de nombre de mesures et de la probabilité [Goupy, 2007].	16
--	----

Chapitre 2

Tableau 2.1. Définitions des viscosités [Nguyen, 1996].	30
Tableau 2.2. Modèles de comportement rhéologique des fluides.	35
Tableau 2.3. Ordres de grandeur des paramètres rhéologiques pour différents types de Matériau.	35

Chapitre 4

Tableau 4.1. Résultats de l'essai de L'équivalent de sable de dune.	59
Tableau 4.2. Résultats d'analyse granulométrique des déchets de plastique.	63
Tableau 4.3. Propriétés physiques du ciment et du filler de calcaire.	64
Tableau 4. 4. Résultats des essais préliminaires.	65
Tableau 4. 5. Les dosages des constituants du mortier pour un dosage de 1m^3 .	66
Tableau 4. 6. Les différentes proportions des granulats.	67

Chapitre 5

Tableau 5.1. Résultats des essais physico-mécaniques.	75
Tableau 5.2. Résultats des essais rhéologiques.	76
Tableau 5.3. Coefficients et paramètres des modèles des réponses physico-mécaniques	78
Tableau 5.4. Coefficients et paramètres des modèles des réponses selon Bingham et masse volumique.	79
Tableau 5.5. Coefficients et paramètres des modèles des réponses selon rhéologiques.	79
Tableau 5.6. Analyse de la variance des réponses.	80
Tableau 5. 7. Analyse de la variance des réponses.	80



INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le béton autoplaçant (BAP) est un béton très fluide, stable et homogène. Il se distingue des bétons ordinaires par ses propriétés à l'état frais, qui sont généralement liées aux celles de leurs mortiers autoplaçants (MAP), c'est à dire à la composition de base (sable + pâte). Les principales propriétés à assurer par un BAP sont principalement la capacité au passage, au remplissage et à résister à la ségrégation. A cet effet, la bonne compréhension de ces propriétés est étroitement liée à l'évaluation des propriétés rhéologiques et physico-mécaniques du MAP.

Pour un souci écologique, il est actuellement plus qu'important de formuler des matériaux cimentaires en utilisant des matériaux recyclés tels que: le plastique recyclé. Aujourd'hui, le développement de ces nouveaux matériaux, intensifie le besoin de caractériser encore mieux leurs comportements rhéologiques et physico-mécaniques.

L'objectif de notre travail est alors de déterminer les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques des mortiers autoplaçants contenant des granulats issus de déchet de plastique, en combinaison avec deux types de sables.

Pour cette étude quinze compositions du MAP ont été préparés en utilisant le sable alluvionnaire (SA), le sable dunaire (SD) et le déchet de plastique (DP) en différents pourcentages binaire et ternaire, à l'aide d'une modélisation statistique selon un plan de mélange. Les propriétés de ces mélanges à l'état frais ont été évaluées par des essais d'ouvrabilité à l'aide de mini cône et le mini V-funnel, l'essai de la masse volumique apparente et par les mesures des caractéristiques rhéologiques à l'aide d'un agitateur ZRZ-2102 et les propriétés à l'état durci par les essais de résistances mécaniques à la flexion et à la compression.

A partir de ces essais, et par l'utilisation de plan de mélange, nous avons pu mettre en évidence l'effet de la variation des dosages de sable alluvionnaire, sable de dune et déchet de plastique en système binaire et ternaire, sur les propriétés des MAP à l'état frais et à l'état durci.

Quant à l'organisation du présent mémoire, il est subdivisé en cinq chapitres :

Introduction générale

Les trois premiers chapitres représentent une recherche bibliographique sur les bétons et les mortiers autoplaçants, la rhéologie des mortiers autoplaçants et finalement le déchet en plastique recyclé.

Le premier chapitre est consacré à la présentation de l'état de l'art sur les bétons et mortiers autoplaçant.

Le deuxième chapitre décrit l'importance de l'étude rhéologique des BAP, les différents paramètres et comportements rhéologiques, les modèles rhéologiques, et les facteurs affectant la rhéologie des matériaux cimentaires.

Le troisième chapitre est consacré aux travaux antérieurs réalisés sur les déchets de plastique et leurs valorisations dans les matériaux cimentaires.

La partie expérimentale est constituée de deux chapitres. Le chapitre quatre est consacré à la caractérisation des matériaux et aux méthodes utilisées, et le cinquième chapitre dédiés à la présentation des résultats des essais et des modèles trouvés ainsi que leurs interprétations.

Enfin, et sur la base des résultats obtenus, le travail s'achèvera par une conclusion générale et des perspectives pour les recherches à venir.

CHAPITRE 1 :

***Etat de connaissances sur les bétons et
mortiers autoplaçants.***

Chapitre 1 : Etat de connaissances sur les bétons et mortiers autoplaçants

1.1 Introduction

Cette partie présente un aperçu détaillé sur le béton autoplaçant (BAP) et le mortier autoplaçant (MAP) en tant que nouveaux matériaux. Il expose d'abord l'historique de leurs développements ainsi que leurs définitions, ce chapitre fait une synthèse sur les méthodes de formulation et les domaines d'emplois du BAP, finalement, il met en relief les propriétés à l'état frais et à l'état durci du MAP.

1.2 Historique du béton autoplaçant

Le BAP a été développé dans les années 90 au Japon pour réaliser des structures en béton durable en améliorant le processus de construction et de mise en place, telle que la capacité de remplissage, la résistance à la ségrégation, etc. [Tanigawa et al. 1989; Tangtermsirikul et al, 1991; Ozawa et al, 1990]. La recherche et le développement dans le domaine du BAP en Europe a commencé en Suède. En France, les premières applications de BAP datent de 1995. L'utilisation de la technologie du BAP au Japon a été basée sur des superplastifiants (SP) conventionnels pour créer un béton très fluide, et éventuellement celle d'un agent de viscosité pour augmenter la viscosité plastique qui empêche la ségrégation. Lorsque la technologie du BAP est arrivée en Europe, son approche a consisté à ajouter des liants (ciment, ajouts cimentaires) passant à 150 µm au tamis pour augmenter la viscosité plastique. Jusqu'en 2003, le Japon et les pays européens ont utilisé du BAP dans la construction des ponts, bâtiments et tunnels. Par contre, aux États-Unis, l'application de BAP pour les routes et les ponts est très limitée jusqu'en 2003 [Ouchi et al, 2003]. Après une phase de recherche et plusieurs années de développement régulier, les BAP ont été progressivement testés et adoptés par les entreprises et par les usines de préfabrication pour la réalisation de bâtiments ou de structure de génie civil.

1.3 Définition du béton Autoplaçant

Un béton autoplaçant est un béton très fluide, homogène et stable, mis en œuvre sans vibration (la compaction des BAP s'effectuent par le seul effet gravitaire) et conférant à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondant aux bétons classiques mis en œuvre par vibration.

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais. Les critères caractérisant un béton autoplaçant sont :

- 1- les valeurs cibles d'étalement au cône d'Abrams sont généralement fixés dans la fourchette 60 cm à 75 cm (et pas de ségrégation visible en fin d'essai : auréole de laitance ou amoncellement de gros granulats au centre).
- 2- le taux de passage à la boîte en L doit être supérieur à 0,8.
- 3- Le béton doit être stable sous l'effet de la gravité (pas de ségrégation) et présente une capacité de ressuage limitée. L'absence de ségrégation visuelle lors de l'essai d'étalement au cône d'Abrams n'est pas suffisante.

1.4 Cahier de charge d'un BAP

Les BAP se distinguent des bétons dits ordinaires (BO), ou bétons spéciaux à vibrer, par leur comportement à l'état frais. Notre propos sera donc focalisé sur leur cahier de charge en termes de rhéologie, dont le détail est décrit ci-dessous.

- Un BAP doit, tout d'abord, s'écouler sous son propre poids, et avec un débit suffisant en milieu infini. Ceci se traduit dans la pratique par un étalement et une vitesse d'étalement importants [**Clergue et al, 2000**].
- Un BAP doit également pouvoir s'écouler, sans apport de vibration, au travers de zones confinées (dans un coffrage très ferrailé, au droit d'un diaphragme, etc.). Pour cela, une grande fluidité du béton n'est pas une condition suffisante. En effet, lors de l'écoulement d'un béton fluide au droit d'un obstacle, les gravillons cisailent le mortier et ont tendance à venir en contact les uns avec les autres si ce dernier n'est pas assez résistant au cisaillement. Des voûtes peuvent ainsi se former par contacts solides, se colmater avec des parties fines et interrompre l'écoulement. Il faut donc qu'un BAP présente une bonne résistance à la ségrégation dynamique en phase d'écoulement dans une zone confinée [**Sedran, 1995**].
- Un BAP doit aussi avoir une bonne résistance à la ségrégation statique (une fois mis en place) jusqu'à sa prise, pour des raisons évidentes d'homogénéité de ses propriétés mécaniques. De façon corollaire, il ne doit pas subir un tassement ou un ressuage trop fort car ceci peut générer une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées par rapport à celles situées en zone inférieure lors du coulage, ainsi que l'apparition de fissures [**Clergue et al, 2000 ; Khayat et al, 1997**].
- Ajoutons, enfin, que le pompage apparaissant comme le moyen de transport naturel de ce béton, il faut donc s'assurer de sa pompabilité. Comme un BAP présente une consistance spécialement fluide, il exerce une pression de type hydrostatique sur les coffrages, lesquels doivent être rigides et étanches.

En conclusion, la principale difficulté, à laquelle les formulateurs de BAP sont confrontés, est de pouvoir concilier des propriétés a priori contradictoires ; d'une part, une grande déformabilité (capacité de remplissage) et, d'autre part, une haute stabilité afin de limiter la ségrégation et le ressuage et d'obtenir finalement un béton très maniable. La déformabilité peut se définir comme étant la capacité du béton à s'étendre à l'horizontal sur une grande distance et à se faufiler sans peine au travers d'armatures serrées. De son côté, la stabilité est la capacité du béton à conserver un corps homogène dans toute son étendue [Roussel, 2002]. Finalement la maniabilité est la propriété qui détermine la facilité avec laquelle le béton peut être malaxé, placé, consolidé et fini tout en conservant son homogénéité.

1.5 Structure des BAP

Pour parvenir au cahier des charges précédent, les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau, de l'air et d'une addition minérale, est privilégiée au détriment des gravillons.

En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition minérale qui sert de substitut aux gravillons.

Cependant, cette formulation n'est pas suffisante pour atteindre la fluidité, il est donc nécessaire d'ajouter aux BAP un défloculant (superplastifiant), sans lequel la demande en eau du mélange serait trop élevée [Turcry, 2003].

D'autres adjuvants chimiques tels que les agents colloïdaux (dits aussi agents de viscosité) peuvent être introduits afin d'empêcher la ségrégation et d'assurer une meilleure stabilité de béton. En revanche, leur utilisation est au contraire peu répandue, car ils engendrent un surcoût, qui s'ajoute à ceux dus au superplastifiant et aux additions minérales. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie.

De manière plus approfondie, les recherches consacrées aux BAP nous permettent de souligner cinq particularités de leur structure dont le détail est décrit ci-dessous.

1.5.1 Un volume de pâte élevé

Les frottements entre les gravillons limitent l'étalement et l'écoulement des bétons. C'est pourquoi, les BAP contiennent un volume de pâte important dont le rôle est d'écarter les gravillons les uns des autres [Clergue et al 2000].

1.5.2 Une quantité importante de fines

Pour leur assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP renferment une quantité de fines supérieures à celle des BO. Toutefois, pour éviter des problèmes d'élévation excessive de la température lors de l'hydratation ainsi que pour abaisser leur coût global, le liant est souvent un composé binaire [Yurugi et al, 2000], voire ternaire [Tangtermsirikul et al, 1991] ciment portland mélangé avec cendres volantes, laitier, fillers calcaires, pouzzolanes naturelles, ou fumée de silice.

1.5.3 Un faible volume de gravillons

Comme les gravillons sont à l'origine du blocage de béton en milieu confiné, il faut en limiter leur volume. D'un autre côté la présence de gravillons permet de diminuer le volume de vides du squelette granulaire du béton et donc de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir la maniabilité et la résistance mécanique souhaitées. En général, ces considérations conduisent à adopter un rapport massique (gravillons/sable) de l'ordre de 1 dans les BAP. Bien évidemment ce rapport peut être revu à la hausse si le confinement est faible (dans un ouvrage peu ferrailé par exemple) ou à la baisse dans le cas contraire [Clergue et al, 2000].

1.5.4 Un fort dosage de superplastifiant

L'introduction de dosage relativement important de superplastifiant dans les BAP permet en premier lieu de réduire la teneur en eau tout en conservant leur grande maniabilité. Toutefois, un dosage trop élevé (proche ou supérieur au dosage de saturation [De Larrard et al, 1996] peut augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage.

1.5.5 L'utilisation éventuelle d'agent colloïdal

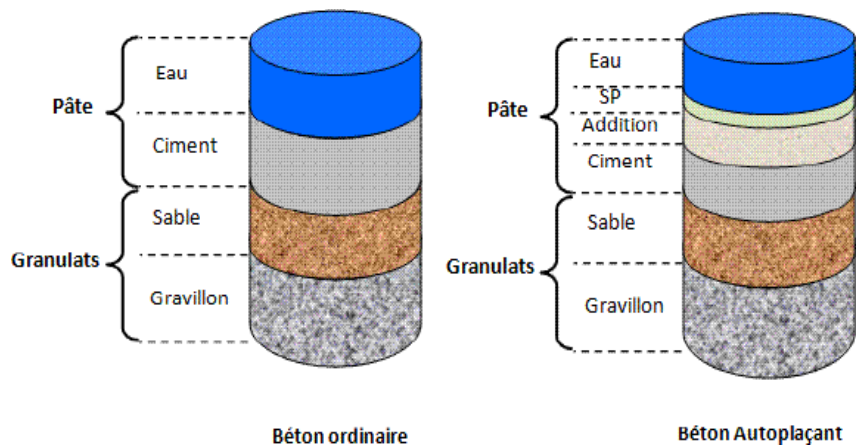
Bien que ce ne soit pas systématique, les BAP contiennent la plus part du temps un agent colloïdal [Sedran, 1995]. Ce produit, comme les fines, a pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation des granulats en rendant la pâte plus épaisse. De façon schématique l'utilisation de ce produit semble se justifier dans le cas des bétons ayant des rapports eau/liant élevés car les fines ne sont pas toujours suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. Il semble par contre inutile dans le cas de BAP ayant des rapports massique eau/liant faible (BAP de résistance supérieure à 50 MPa). L'agent colloïdal a la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations d'eau vis-à-vis du problème du ressuage et de la ségrégation [Kuroiwa et al, 1993 ; Shindoh et al, 1992].

1.6 Les principaux constituants de béton autoplaçant

La qualité du béton dépend de la qualité de la pâte et du granulat. Dans du béton bien constitué, chaque particule de granulat est complètement enrobée de pâte et tous les espaces entre les particules sont complètement remplis de pâte.

Pour toute combinaison des matériaux et de conditions de cure, la qualité du béton durci dépend dans une large mesure de la quantité d'eau utilisée par rapport à celle du ciment.

Les BAP se différencient des bétons ordinaires (BO) ou vibrés, par leurs caractéristiques à l'état frais, par leur composition (présence indispensable des fines minérales (les ajouts minéraux), et de superplastifiants) ; voir **Figure 1. 1** suivant :



(a)



(b)

Figure 1. 1. (a) Constituants des bétons ordinaires(BO) et des BAP [BAP , 2000], (b) Aspect à l'état frais des BO et des BAP.

Les constituants du BAP ont un rôle très important dans la détermination des propriétés des BAP à l'état frais et durci. Donc, il est nécessaire de connaître le rôle que peut jouer chaque constituant ainsi que leur influence sur les propriétés des BAP.

1.6.1 Granulats

Les granulats tels que le gravillon et le sable, constituent le squelette du béton. Pour être utilisés dans la composition du BAP, les granulats doivent être chimiquement stables lors du contact avec les autres constituants. La nature, la forme et la granularité des granulats influencent fortement les propriétés des BAP à l'état frais et durci [Bethmont, 2005]. Il est possible d'utiliser les granulats roulés ou concassés pour la formulation des BAP. Toutefois, afin d'éliminer le risque de blocage, il faut limiter la taille maximale du gravillon et diminuer la quantité des granulats [Siahmed et Oualit, 2007].

1.6.2 Pâte

La pâte (eau, ciment, addition minérale, adjuvant et air) sert à remplir les vides laissés par le squelette granulaire et à englober les grains de granulat. A titre d'illustration, les granulats peuvent être considérés comme étant noyés dans une matrice cimentaire de manière à former un mélange biphasique homogène. Comme les BAP résistent mieux au phénomène de ressuage [Safi, 2012], moins de perturbation sera provoquée vis-à-vis de la porosité de pâte dans la zone de transition.

a) Ciment

Plusieurs travaux ont été menés sur les bétons autoplaçants dans le sens du choix du type de ciment à utiliser. Ces travaux montrent que la résistance et la durabilité du béton dépendent principalement du dosage de ciment. Pour les BAP, le dosage du ciment doit ainsi répondre aux exigences prescrites par les normes (par exemple, EN 206-1). Par ailleurs, avec l'augmentation du dosage de ciment dans le béton, plus de chaleur se produit au cours de l'hydratation du ciment, ainsi que plus de déformations différées (retrait et fluage) à long terme. Il est à noter que les effets engendrés par l'ajout excessif du ciment sont propices à l'apparition des fissures pour les éléments en béton. Etant donné que les BAP contiennent plus de fines que les bétons ordinaires, une partie du ciment est souvent remplacée par les additions minérales en vue de limiter les effets défavorables mentionnés ci-dessus tout en assurant la résistance et la durabilité suffisantes des BAP [Siahmed et Oualit, 2007].

b) Eau de gâchage

L'eau remplit deux fonctions : d'une part, elle sert à l'hydratation du ciment et d'autre part, elle permet la fluidification de la pâte [Fares, 2009]. Une partie d'eau est consommée par l'hydratation du ciment, soit entrant dans la composition chimique de l'hydrate,

soit étant piégée à l'intérieur des pores de l'hydrate. Cette eau étant physico-chimique fixée par les hydrates, ne contribue pas à la fluidification de la pâte. Par contre, une autre partie de l'eau ne participe pas à l'hydratation du ciment.

c) Ajouts minéraux

Les ajouts cimentaires sont des matériaux qui, combinés au ciment Portland, contribuent aux propriétés des coulis frais et durci par action hydraulique ou pouzzolanique ou les deux à la fois. Les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé broyé et les fumées de silice sont des exemples courants.

Ces ajouts sont incorporés aux mélanges de coulis ou de béton pour différentes raisons:

- Améliorer Les caractéristiques rhéologiques des coulis (viscosité et stabilité).
- Améliorer la résistance du coulis durci et augmenter sa durabilité.
- Réduire le coût de la matière liante: ces ajouts étant le plus souvent des sous-produits d'autres industries, leur incorporation dans le ciment avec des proportions pouvant atteindre les 30% permet de réduire le prix de revient de la matière liante.
- Favoriser la pénétrabilité dans les fissures fines: certains de ces ajouts sont plus fins que le ciment (exp.fumée de silice).

L'utilisation croissante d'ajouts cimentaires dans le béton de ciment portland a entraîné la publication en 1982 d'une nouvelle norme CSA-A23.5, qui fut révisée en 1986 .la norme CSA A23.5 reconnaît trois groupes d'ajouts cimentaires : les fumés de silice, les pouzzolanes, les laitiers granulés [**Siahmed et Oualit, 2007**].

d) Superplastifiants

Les superplastifiants sont apparus à la fin des années 1970 au Japon et en Allemagne. Ce sont généralement des sels sulfoniques de formaldéhydes, naphtalènes ou mélamines, qui ont la propriété de pouvoir améliorer notablement la fluidité d'une gâchée, et donc de diminuer la quantité d'eau nécessaire à sa mise en œuvre. Leur arrivée sur le marché a permis le développement des bétons à "hautes performances". Ces superplastifiants assurent une défloculation de la suspension de ciment en solution aqueuse, ce qui améliore caractéristiques rhéologiques du mélange [**Siahmed et Oualit, 2007**].

Les superplastifiants interagissent avec les particules du ciment et celles des fines s'en adsorbent à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation. La grande fluidité des

bétons autoplacants est assurée par des dosages relativement important en fluidifiants. La capacité de remplissage d'un BAP croit avec le dosage en fluidifiant jusqu'à un maximum au-delà duquel le phénomène de ségrégation apparaît.

1.7 Méthodes de formulation des BAP

La formulation des BAP s'avère beaucoup plus complexe par rapport aux autres types de bétons. La fluidité et la résistance à la ségrégation recherchées à l'état frais, par l'utilisation de fluidifiant et l'introduction de fines au détriment de gros granulats, rendent les méthodes classiques de formulation des bétons traditionnels difficiles, voir impossibles à les utiliser.

Dans les recommandations provisoires de L'association française de génie civil [AFGC, 2008] on trouve, cité ci-après, des plages de valeurs généralement utilisés dans les formulations des BAP, afin de faciliter le travail de formateur :

- Un important volume de pâte (environ 40% du volume total).
- Un faible volume de gravillons (rapport gravillons/sable est environ 1).
- Un diamètre maximal (D_{max}) réduit.
- Introduction d'un superplastifiant, à un dosage proche du dosage à saturation.

Nous présentons dans ce qui suit, les méthodes de formulation des BAP les plus utilisées.

1.7.1 Méthode basée sur l'optimisation du mortier

Okamura et Ozawa [2003] sont les précurseurs en matière de formulation des BAP. Les caractéristiques requises sont une capacité de déformation élevée de la pâte et du mortier, ainsi qu'une résistance à la ségrégation lors de l'écoulement en milieu confiné. Leur méthode de formulation se base sur les critères suivants [Okamura, 2003] :

- Une quantité de gravillons limitée.
- Un rapport eau/poudre faible.
- Utilisation d'un superplastifiant.

Les quantités de gravillons et de sable sont fixées de manière à obtenir facilement les caractéristiques des BAP en n'ajustant que le rapport eau/poudre et le dosage en superplastifiant. Ainsi, la quantité de gravillons est limitée à 50% de leur compacité (qui est le rapport entre le volume de grains sur le volume total du système grains + vides) afin de minimiser les risques de blocage. Il semblerait que ce rapport soit sécuritaire [Turcry, 2003 ;

Sedran, 1999]. La quantité de sable est par ailleurs limitée à 40% du volume du mortier. Les propriétés de la pâte (rapport eau/poudre et quantité de superplastifiant) sont ensuite optimisées et caractérisées à l'aide d'essais sur mortiers. Un étalement relatif (Γ_m) est déterminé à l'aide de l'essai au mini-cône et une vitesse d'écoulement relative (R_m) est déterminée par un essai au V-funnel pour mortier :

$$\begin{aligned}(\Gamma_m) &= (D^2 - d^2)/d^2 \\ (R_m) &= 10/t\end{aligned}\tag{Eq (1.1)}$$

Où:

- **D** est le diamètre d'étalement de la galette de mortier.
- **d** est le diamètre inférieur du cône, et **t** est le temps d'écoulement du mortier.
- L'étalement relatif **Γ_m** indique la fluidité et la vitesse d'écoulement **R_m** indique la viscosité.

Les auteurs ont montré qu'il existait une relation linéaire entre Γ_m et R_m pour un dosage en superplastifiant donné et quand le rapport eau/poudre varie. Pour formuler un BAP acceptable, il faut obtenir simultanément $\Gamma_m = 5$ et $R_m = 1$ [**Jin, 2002**].

Edamatsu et al [**1999**] proposent une méthode pour évaluer les interactions entre le sable ou les poudres du mortier et les gros granulats. Ils montrent qu'en faisant varier les paramètres Γ_m et R_m dans une certaine gamme, le rapport R_{mb}/R_m est constant.

R_{mb} est la vitesse d'écoulement relative du béton modèle composé du mortier étudié ainsi que 20% de billes de verre de 10 mm de diamètre. A partir de ce rapport, les auteurs déclarent qu'il est possible d'évaluer les interactions entre les gravillons et les particules du mortier (sable ou poudre).

A la suite d'une optimisation identique du mortier, Ouchi, M et al [**1999**] proposent de doser les gravillons en cherchant expérimentalement leur volume limite menant à un blocage. Ce volume est évalué en comparant l'écoulement du mortier dans un entonnoir avec et sans gravillons.

La formulation d'un BAP par le biais de son mortier trouve sa justification dans quelques publications [**Billberg, 1999**] et [**Jacobs et Hunkeler, 1999**] montrent à cet effet que la rhéologie d'un béton se corrèle bien avec celle de son mortier.

1.7.2 Optimisation de la quantité de pâte

Le béton est considéré ici comme un mélange bi-phasique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte. Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant. Oh et al [Oh et al, 1999] introduisent la notion d'excès de pâte. La formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage.

Oh et al [Oh et al, 1999] ont obtenu par l'expérience des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte. Lors de la formulation, il faut d'abord optimiser et caractériser la rhéologie de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton. Les auteurs ne proposent pas de méthode pour doser la pâte par rapport au blocage.

Il existe une approche similaire du dosage de la pâte mise au point par Tangtermsirikul, S., [1995]. Cette fois, deux critères, calés aussi expérimentalement, sont proposés : un volume de pâte minimal vis à vis de la fluidité, et un volume de pâte minimal vis à vis du blocage.

La notion d'excès de pâte a également été proposée par Chanvillard et Basuyaux [1996], dans une méthode de formulation des bétons de sable.

1.7.3 Optimisation du squelette

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons [Baron, 1996]. Il est connu par exemple que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte. L'ouvrabilité est elle-aussi tributaire de l'arrangement du squelette granulaire.

Sedran [2000] a développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage. A l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton. Le modèle est implanté dans un logiciel Sedran [2000], qui permet de plus de simuler les autres propriétés du béton. Ses auteurs proposent un cahier des charges spécifique pour les BAP, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton.

Roshavelov [1999] a également développé un modèle d'empilement granulaire, qui semble néanmoins être resté à un stade plus théorique.

1.7.4 Méthode basée sur un plan d'expérience (méthode statistique)

Vu la diversité des matériaux utilisés dans sa formulation, il n'existe pas une méthode unique et universelle pour formuler un BAP (comme il est le cas de la méthode Dreux-Gorisse dans la formulation des bétons ordinaires). En plus, plusieurs gâchés sont nécessaires dans la formulation des BAP pour prendre en considération tous les facteurs affectant les propriétés aux états frais et durci. Les méthodes basées sur le plan d'expérience permettent d'atteindre les propriétés visées et d'obtenir des formulations optimisées pour des cas spéciaux par l'établissement des modèles statistiques donnant l'effet de chaque paramètre de formulation et leurs effets combinés sur ces propriétés, tout en minimisant le nombre de gâchés [Khayat, 1999 ; Yahia, 2001 ; Sonebi, 2001].

a) Préparation du plan d'expérience

La première étape dans la préparation du plan d'expérience est la définition des objectifs de l'étude. Cela va permettre de choisir les réponses permettant d'atteindre les objectifs visés et par la suite rechercher les facteurs qui pourraient être influant sur la réponse. Les facteurs choisis doivent être étudiés dans des intervalles limités par des niveaux haut et bas. Le choix des limites des intervalles est fait selon l'influence du facteur, donc une connaissance préliminaire de l'effet de chaque facteur est nécessaire (généralement les limites hautes et basses des facteurs sont recherchés dans la littérature et confirmés par des essais aux laboratoires).

a) Choix du plan d'expérience

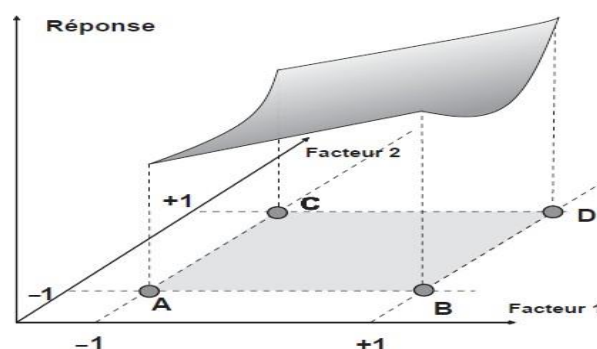


Figure 1. 2. Surface de réponse qui correspond aux réponses de l'ensemble des points du domaine d'étude [Goupy, 2007].

Généralement, avec un plan d'expérience on cherche à réaliser le minimum d'essais tout en réduisant l'influence de l'erreur expérimentale sur les modélisations mathématiques qui serviront à prendre des décisions. On atteint ce but en considérant les propriétés mathématiques et statistiques qui relient la réponse aux facteurs. Il existe des plans classiques qui possèdent d'excellentes qualités statistiques et qui permettent de modéliser les réponses dans les meilleures conditions (ex: plans factoriels complet, plans factoriels fractionnaires). À chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. À l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localise sur une surface appelée surface de réponse (**Figure 1. 2**).

La variation de la réponse (y) est, d'une manière générale, liée aux facteurs (x_1, x_2, \dots) par la relation suivante :

$$y = f(x_1, x_2, \dots) \quad \text{Eq (1.2)}$$

Pour en faire une approximation, il est d'usage de prendre un développement limité de Taylor-Mac Laurin. Si on considère les dérivées comme des constantes, la relation précédente prend la forme d'un polynôme de degré de plus en plus élevé:

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ii} x_i^2 + \dots \quad \text{Eq (1.3)}$$

a_0, a_i, a_{ij} et a_{ii} sont les coefficients du polynôme.

La modélisation mathématique décrite ci-dessous donne une prévision dans le domaine d'étude, que l'on doit toujours préciser. Dans le cas d'une modélisation des données expérimentales le modèle mathématique théorique doit être ajusté par deux compléments. Le premier complément est le manque d'ajustement (Δ), qui représente l'écart entre le modèle théorique et le modèle réel qui régit le phénomène étudié. Le deuxième complément est l'erreur expérimentale (ε), qui traduit la dispersion des résultats dans un même point expérimental.

Généralement, la modélisation ne peut être menée à bien que si l'on utilise une méthode de régression (comme celle basée sur les critères d'optimisation des moindres carrés).

b) Outils statistiques appliqués aux plans d'expériences

La validité d'un modèle mathématique postulé dans un plan d'expérience est basée sur l'évaluation de l'incertitude attachée aux coefficients de ce modèle. Lors de la détermination des coefficients d'un modèle, il y a deux sources d'erreurs possibles :

- La première est l'erreur expérimentale : lorsqu'on répète plusieurs fois la même expérience, sous les mêmes conditions, on remarque que les réponses mesurées sont différentes mais proches les unes des autres. Cette dispersion des résultats est l'origine de l'erreur expérimentale.
- La seconde est l'erreur d'ajustement : elle traduit la différence entre le modèle mathématique postulé et celui réel.

L'application des notions de statistiques permet de comparer les coefficients trouvés et de distinguer ceux qui devraient être retenus de ceux qui pourraient être éliminés du modèle final. Généralement les calculs sont faits à l'aide des logiciels, mais il faut toujours connaître les notions de base de statistique utilisées pour être capable d'interpréter les informations qu'ils nous fournissent.

c) Erreur expérimentale

Ce sont les points de centre qui nous permettent d'évaluer cette erreur. Ils peuvent être représentés par la moyenne et l'écart type. Ce dernier donne une idée sur la dispersion des points autour de la moyenne.

La moyenne peut être déterminée par la relation suivante :

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad \text{Eq (1.4)}$$

L'écart type est obtenu par la relation suivante:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{Eq (1.5)}$$

On définit aussi la variance $V(y_i)$ d'une réponse, qui représente le carré de l'écart type, par la relation suivante :

$$v(y_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad \text{Eq (1.6)}$$

d) Intervalle de confiance des réponses

La qualité de l'estimation de l'écart type, obtenue à l'aide de la relation (1.5) dépend du nombre de mesures n. lorsqu'on a un grand nombre de mesures, la qualité de l'écart type sera bonne, mais si on a peu de mesures, la qualité on aura de moins bonne qualité de l'écart type.

L'intervalle de confiance (I_c), qui dépend de la probabilité choisie, du nombre de mesures (n) et de l'écart type (1.7), nous permettra de prendre en considération la qualité de l'écart type.

$$I_c = \frac{k \sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{Eq (1.7)}$$

Où k est une constante qui dépend de la probabilité choisie et aussi du nombre de mesures effectuées sur la réponse (voir le **Tableau 1.1** ci-dessous).

Tableau 1.1. Valeurs de k en fonction de nombre de mesures et de la probabilité [Goupy, 2007].

		Nombre de mesures						
		2	3	4	5	10	20	∞
Probabilité (%)	70	1.96	1.38	1.25	1.19	1.1	1.06	1.03
	90	6.31	2.92	2.35	2.13	1.83	1.73	1.64
	95	12.71	4.3	3.18	2.78	2.26	2.06	1.92
	99	63.66	9.92	5.84	4.6	3.25	2.86	2.58

Dans les plans d'expériences, il est rare que le nombre des mesures soit élevé. A cet effet, on répète quelques mesures sur un même point du plan. Généralement, c'est le point au centre qui sera répété dans les mêmes conditions expérimentales. Par exemple, si on répète le point central 5 fois et on vise une probabilité de 95%, l'intervalle de confiance sera $I_c = 2.78\sigma$ (d'après le **Tableau 1.1**). C'est-à-dire on aura 95% de chance que l'intervalle $y_i \pm I_c$ contienne la moyenne.

e) Coefficients influents

Les coefficients du modèle mathématique postulé servent à l'évaluation des facteurs et des interactions influents sur la réponse étudiée. Pour juger l'importance d'un coefficient, on

comparera sa valeur à la valeur de son écart type. La comparaison d'un coefficient (a_i) à son écart type (σ_a) se fait par le rapport : a_i / σ_a . Ce rapport est appelé rapport-t (t-ratio). Il nous permet d'évaluer la probabilité que l'influence du coefficient soit significative ou non. Cette probabilité est appelée p-value. Si la valeur de p-value est proche de 0 (généralement si p-value est inférieure à 0.05, qui correspond à $|\text{rapport-t}| > 2$), le coefficient est influant et si elle est proche de 1, le coefficient est négligeable.

f) Analyse de la variance

Le principe de l'analyse de la variance est de détecter la variation dans les réponses. Si on utilise la méthode des moindres carrés pour calculer les réponses (c'est-à-dire la méthode qui consiste à minimiser les carrés des écarts), les écarts sont appelés dans ce cas, résidus (r).

Ils représentent l'écart entre les réponses mesurées (y_i) aux celles calculées par le modèle mathématique postulé (\hat{y}).

$$r = y_i - \hat{y} \quad \text{Eq (1.8)}$$

Si on introduit la moyenne et on fait quelques transformations la relation 1.9 on obtient :

$$\sum_{i=0}^n r^2 = \sum_{i=0}^n (y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^n (\hat{y} - y)^2 \quad \text{Eq (1.9)}$$

Donc, la somme des carrés des écarts total (SCE t) est égal à la somme des carrés des écarts dus au modèle (SCE m) plus la somme des carrés des écarts dus aux erreurs (SCE e).

Habituellement, on représente l'analyse de la variance sous forme d'un tableau, faisant apparaître les trois sources de variations (Total, Modèle et Erreur) où à chaque source de variation correspond un nombre de degré de liberté (DDL), respectivement égal à $n-1$, p et $n-p-1$. Si on divise la SCE par le nombre de degrés de liberté de la source de variation correspondante, on obtient la variance (n est le nombre de mesures et p est le nombre variable retenu dans le modèle).

Le rapport entre la variance du modèle à la variance des erreurs est défini comme le rapport F (F de Fisher).

Ce rapport permet de calculer la probabilité que les deux variances ne sont pas égales (si le rapport F est élevé, faible probabilité que le modèle soit celui de la moyenne).

g) Coefficient de détermination R^2

C'est un outil statistique très utile qui permet d'évaluer la capacité du modèle de retrouver des valeurs proches de celles mesurées. Il représente le rapport de la somme des carrés des écarts des (SCE m) réponses calculées à la somme des carrés des écarts (SCE t) des réponses mesurées. Donc il donne une idée sur de la qualité du modèle postulé. Généralement, on dit qu'un modèle est de bonne qualité lorsque le R^2 est proche de 1.

1.8 Propriété principale des BAP

1.8.1 A l'état frais

Les propriétés générales d'un béton autoplaçant frais sont la fluidité et l'homogénéité. Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques : le remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité à passer à travers les obstacles que nous appellerons capacité de passage.

Plusieurs essais ont été développés pour déterminer les propriétés rhéologiques tant au point de vue de la fluidité que de la ségrégation (essai à la boîte en L, au tube en U et à l'entonnoir en V, essai d'étalement, divers rhéomètres, etc.). Certains essais permettent de qualifier soit la fluidité du béton, soit son comportement rhéologique. Pour évaluer la résistance à la ségrégation statique.

a) Essais d'étalement

Pour la détermination de l'étalement on utilise le même cône que celui normalement utilisé pour l'essai d'affaissement. Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante, puis il est rempli de BAP. Le cône est ensuite soulevé et le BAP en sort en formant une galette (**Figure 1.3**) qui s'élargit sous sa propre énergie, sans qu'il soit nécessaire de soulever et de laisser retomber la plaque, comme dans l'essai classique d'étalement. La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue, qui devrait être comprise entre 600 et 800mm. La tendance à la ségrégation peut être évaluée qualitativement. Les granulats grossiers devraient être répartis uniformément et aucune concentration ou séparation de fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette.

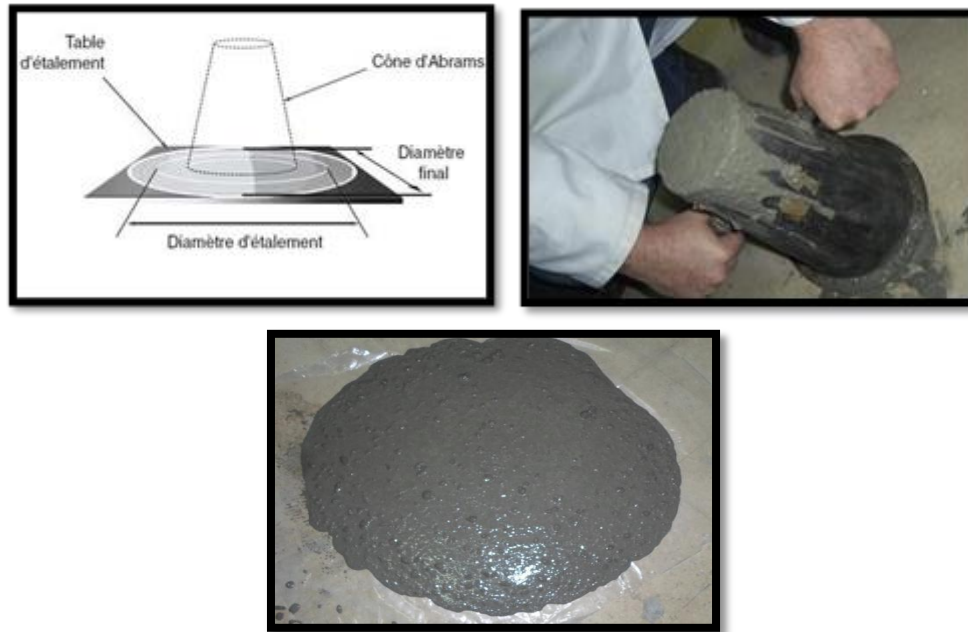


Figure 1.3. Essais d'étalement au cône d'Abrams.

b) Essai de la boîte en L

Cet essai permet de caractériser la mobilité du mélange frais en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables. Le dispositif d'essai est constitué d'une boîte en forme de L (**Figure 1.4**).

- La partie verticale est séparée de la partie horizontale par une trappe, des armatures peuvent être intercalées avant la trappe.
- On laisse le béton reposer pendant une minute on lève la trappe à une hauteur de 16 cm et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers une grille de ferrailage, cette dernière est composée de trois barres éloignées entre elles de 39 mm.
- Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H_1 et H_2 .
- On vise un rapport H_2/H_1 d'au moins 0.8 pour un béton autoplaçant.

Beaucoup d'autre essais similaires à celui de la boîte en L sont utilisés partout dans le monde pour caractériser l'aptitude au remplissage du béton tel que : l'essai en U, l'essai de capacité de remplissage etc.

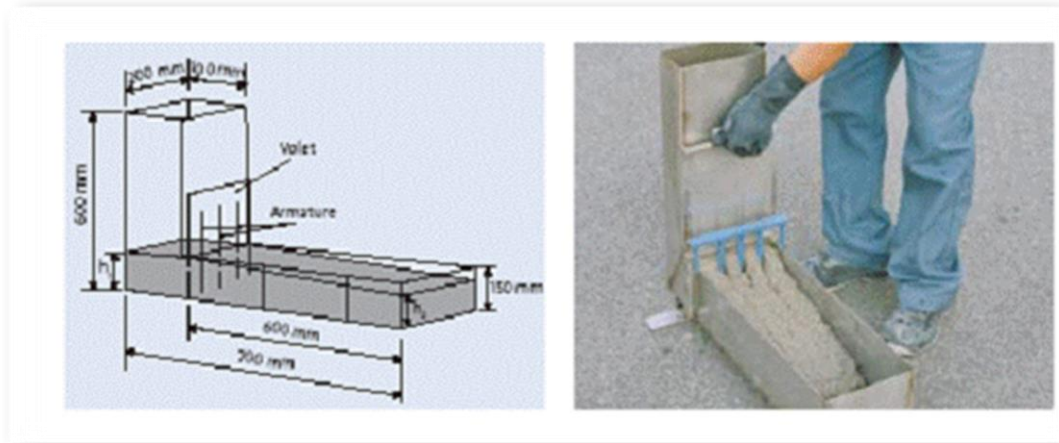


Figure 1.4. Essais d'écoulement à la boîte L-box ou boîte en L.

c) Essai stabilité au tamis

Cet essai vise à qualifier les BAP vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un BAP en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier. Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité.

Cet essai consiste à déposer deux litre de béton sur un tamis ayant des mailles de 5 mm d'ouverture. Après cinq minutes on pèse la quantité de béton ayant traversé le tamis (**Figure 1. 5**). Cette quantité par rapport à la quantité initialement présentée dans le conteneur de 2L donne l'indice de ségrégation du notre béton.

- Si $0\% < p < 15\%$: stabilité satisfaisante.
- Si $15\% < p < 30\%$: stabilité critique.
- Si $30\% < p < 100\%$: stabilité mauvaise.



Figure 1. 5. Essai de stabilité au tamis.

1.8.2 A l'état durci

Le comportement à l'état durci rapporte essentiellement des travaux concernant les performances mécaniques (résistance à la compression, résistance à la traction) et le retrait des bétons autoplacants.

a) Résistance à la compression

Les BAP se caractérisent par un rapport E/C bas, ce qui amène à des bonnes résistances mécaniques. L'utilisation de filler dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique au jeune âge.

Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense.

Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite. Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton. Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges.

b) Résistance à la traction

Plusieurs auteurs ont constatés qu'il n'y a aucune différence entre la résistance à la traction des BAP et celle des bétons références. Par contre, d'autres ont montré que la résistance à la traction est plus grande que la résistance des bétons références. En comparant des mélanges de BAP ont le même E/C on trouve que le type et la finesse de poudre affecte peu la résistance en traction.

c) Module d'élasticité

Les différents matériaux de BAP peuvent montrer un différent comportement de relation contrainte-déformation si les BAP contiennent une faible quantité de gros granulats si on se réfère à la formule réglementaire du module ($E_{ij} = 11000 \sqrt[3]{f_{cj}}$), celui-ci ne dépend que de la résistance du béton. Ainsi, à résistance égale, un béton autoplacant aurait donc le même module qu'un béton vibré.

d) Le retrait

Le retrait endogène des BAP est plus faible (les valeurs s'échelonnent entre 50 - 2005($\mu\text{m}/\text{m}$) que celui des bétons vibré BV. Le retrait endogène est similaire pour BAP et BV, présentant le même rapport E/C, la présence de l'addition n'a en général pas d'effet significatif, au moins à long terme, sur la déformation chimique. Les données sur le retrait de séchage sont très partagées d'un côté le retrait total est trouvé équivalent pour BAP et BV et de l'autre, il est partagées d'un sensiblement supérieur dans le cas des BAP.

1.9 Intérêts techniques des BAP

1.9.1 Domaine d'emploi

Les caractéristiques des BAP laissent entrevoir de nombreuses possibilités techniques du fait de leur grande fluidité :

- Possibilité de coulage de zones fortement ferraillées.
- Possibilité de coulage de zones d'architecture complexe.
- Obtention de très bonnes qualités de parement.

L'un des avantages majeurs du BAP est de permettre la réalisation de parements de grande qualité. Leur composition, riche en éléments fins, permet d'obtenir une texture de surface plus fine et plus fidèle à la peau coffrante utilisée. Les aspects satinés, lisses ou très structurés recherchés par les architectes sont alors plus facilement réalisables. Des teintes homogènes et régulières peuvent être obtenues si les conditions de mise en œuvre sont respectées, notamment du point de vue de la propreté des coffrages.

Le coulage d'un béton dans une zone très fortement ferraillée menait traditionnellement à un surdimensionnement de la pièce afin de rendre accessible tout point du bétonnage. L'utilisation des BAP présente des intérêts architecturaux importants puisque, sans augmenter les performances mécaniques d'une structure donnée, ils permettent l'optimisation des sections ou la réalisation d'éléments de forme complexe. Les BAP constituent donc une alternative particulièrement intéressante au béton vibré dans les différents domaines de la construction: bâtiment, ouvrages d'art, tunnels, préfabrication, réhabilitation, etc.

Walraven [2003] précise cependant que les BAP sont souvent adoptés dans le domaine de la préfabrication grâce aux avantages et aux gains directs qu'ils présentent. Globalement, leur utilisation permet de réduire les coûts de production et, parallèlement, d'améliorer les conditions de travail et la qualité des produits finis. Leur utilisation est plus délicate sur site

car les BAP sont particulièrement sensibles aux variations de teneur en eau. Or, bien que la production soit contrôlée, les lots de matériaux peuvent avoir des caractéristiques légèrement différentes.

Les BAP constituent une véritable alternative au béton traditionnel. Bien que leur formulation et leur contrôle, lors de la mise en œuvre, nécessitent une attention particulière, différents exemples ont mis en évidence les possibilités techniques qu'ils offrent. Outre le fait qu'ils couvrent la gamme des propriétés mécaniques usuelles, les qualités esthétiques des parements obtenus devraient rapidement séduire les maîtres d'ouvrage. Les caractéristiques techniques des BAP ont par ailleurs une implication directe du point de vue économique mais aussi social.

1.9.2 Impacts socio-économiques

Nous avons vu que la fluidité des BAP est telle qu'il n'est plus nécessaire de les vibrer pour les mettre en œuvre. La suppression de la phase de vibration est particulièrement bénéfique pour les personnes chargées de la mise en place, puisque cela implique :

- une diminution du bruit sur site.
- une diminution de la pénibilité des tâches.
- une réduction des risques d'accident.

En effet, le bruit engendré pendant la phase de vibration est particulièrement désagréable puisqu'il est d'une intensité élevée sur des périodes relativement longues. Dans le cas des usines de préfabrication, où la réverbération du bruit sur les parois peut augmenter le niveau sonore de manière très importante, toutes les personnes présentes dans l'atelier sont concernées par la réduction du niveau sonore ambiant. Cette réduction des nuisances sonores peut éventuellement permettre une meilleure implantation des usines dans leur environnement, puisqu'il est plus facile de respecter les réglementations en matière d'insonorisation. Dans le cas d'un chantier en extérieur, ce sont principalement les personnes chargées de la mise en place et de la vibration qui bénéficient de la réduction du bruit, mais également les riverains lorsqu'il s'agit d'un site urbain.

Malgré l'utilisation de procédés de construction de plus en plus mécanisés, les efforts physiques auxquels sont soumis les ouvriers restent pénibles. Avec l'apparition des BAP, les opérations traditionnelles de coulage, d'étalement, de talochage et de surfaçage se réduisent à une étape de coulage suivie d'un dé-bullage dans le cas des applications horizontales. Pour les opérations verticales, les divers déplacements sur les banches, à travers trappes et échelles,

sont réduits de manière significative. De plus, le fait de vibrer le béton peut avoir de graves répercussions sur la santé et peut notamment provoquer des troubles de la circulation sanguine (maladie des « mains blanches »).

Par ailleurs, les BAP sont mis en place par des opérations simplifiées donc par des agents plus rapidement formés.

Ils peuvent donc se concentrer sur la préparation des coffrages sans avoir à assimiler ou mettre en pratique les recommandations sur la vibration. Mais compte tenu des objectifs exigeants des BAP, les techniciens du béton (formulateurs, agents de laboratoires et responsables de chantier) sont plus sollicités sur leurs connaissances des matériaux. Ils doivent donc se familiariser avec ces nouvelles formules de béton, les constituants utilisés, mais aussi avec les matériels et procédures nécessaires à leur préparation [BAP, 2000].

L'utilisation d'un BAP peut s'avérer plus économique que celle d'un béton ordinaire, et ce malgré un surcoût de formulation.

Ce surcoût est principalement lié à l'adjuvantation puisque la fluidité doit être instantanée, mais également se maintenir dans le temps, dans le cas où les lieux de fabrication et de coulage ne seraient pas les mêmes. Cependant, ces frais supplémentaires peuvent rapidement être compensés par la diminution des coûts de main d'œuvre (réduction du nombre d'intervenants pendant la mise en place du béton), du temps de coulage, des délais de fabrication, etc. Les BAP montrent en effet tout leur potentiel lorsque le chantier est considéré dans son ensemble, frais direct et indirect, donc par « l'approche globale » suggérée par [BHP, 2000].

Même si l'utilisation des BAP nécessite certaines précautions en matière de formulation ou de préparation du matériel, l'évaluation de leurs avantages techniques mais également socioéconomiques montre que ces bétons devraient être de plus en plus utilisés à l'avenir.

1.10 Mortiers autoplaçant

1.10.1 Définition

Le mortier autoplaçant correspond à l'ensemble ciment, additions, eau efficace, air, adjuvant. Chacun de ces éléments joue un rôle différent dans le comportement du mortier frais et durci.

1.10.2 Propriétés essentielles d'un MAP

1.10.2.1 Étalement au mini cône

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur une surface horizontale lisse (**Figure 1. 6**), une fois le moule soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaire la moyenne est retenu [**Belaidi, 2013**].



Figure 1. 6. Étapes de l'essai d'étalement au Mini cône de pâte.

1.10.2.2 Essais de déformabilité de l'Entonnoir en V (V-funnel)

L'essai d'écoulement à l'entonnoir (ou V-funnel test) est utilisé pour évaluer la fluidité et la viscosité des MAP.

Dans l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), l'entonnoir est rempli de mortier (1,1 litre). Le temps d'écoulement est calculé entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir. (**Figure 1.7**) [**Belaidi, 2013**].

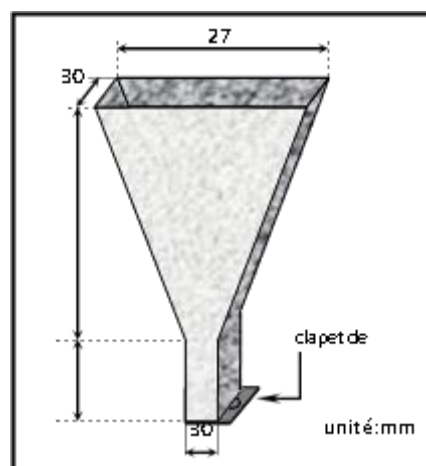


Figure 1.7. Essai de l'entonnoir en V.

1.10.2.3 Résistance à la compression

La résistance à la compression est considérée comme la plus importante des propriétés sur laquelle repose la conception d'une structure, elle donne une indication sur la qualité du béton puisqu'elle est liée directement à la structure de la pâte de ciment hydraté.

Parmi les facteurs qui influent sur la résistance à la compression:

Le rapport Eau/Ciment dont elle est inversement proportionnelle, les moyens de serrage disponibles et l'adjonction des ultrafines telles les fumées de silice, ou encore l'ajout d'un superplastifiant qui fait augmenter la résistance. Le squelette granulaire ainsi que la type de ciment, influent également la résistance finale du béton.



Figure 1.8. Essai de résistance à la compression.



CHAPITRE 2 :

Rhéologie des mortiers autoplaçants.

Chapitre 2 : Rhéologie des mortiers autoplaçants

2.1 Introduction

Ce deuxième chapitre présente une partie introductive sur la rhéologie. Dans un premier lieu, nous présentons les notions de base et l'importance de l'étude rhéologique ainsi que les caractéristiques rhéologiques utilisées dans le domaine des matériaux cimentaires et granulaires. Par la suite, nous citons les différents comportements rhéologiques. Enfin, nous mettrons en évidence les principaux facteurs affectant la rhéologie des matériaux cimentaires.

2.2 Définition de la rhéologie

La rhéologie, mot inventé en 1929 par Bingham, est généralement définie comme « l'étude de la déformation de la matière » [Fergusson, 1991].

En se rapportant aux racines grecques du mot, le verbe « rhéin » signifie s'écouler et le mot « lógos » peut être traduit par étude ; c'est donc la science qui étudie l'écoulement et les déformations de la matière et plus généralement la viscosité, l'élasticité et la plasticité des matériaux sous l'action de contraintes. D'une façon générale, le but principal de la rhéologie est d'étudier la réponse différente que chaque matériau oppose aux sollicitations mécaniques qu'il subit.

Avec l'avènement des bétons autoplaçants (très fluides), la rhéologie a connu un intérêt croissant dans le domaine des matériaux de construction. Pour le béton, la rhéologie désigne généralement l'étude de comportement à l'état frais de ce matériau où il est considéré comme un fluide.

Les principaux paramètres rhéologiques dans le domaine du béton sont: la contrainte de cisaillement « τ », le seuil de cisaillement « τ_0 », la vitesse de cisaillement « $\dot{\gamma}$ » et la viscosité plastique « μ ».

L'obtention de la contrainte de cisaillement « τ » et de la vitesse de cisaillement ou taux de déformation « $\dot{\gamma}$ » permet d'établir des rhéogrammes ou courbes d'écoulement. Ces dernières relient généralement les contraintes de cisaillement aux vitesses de cisaillement et permettent de déterminer la viscosité et le seuil de cisaillement du matériau.

2.3 Importance de l'étude rhéologique

Bien que les propriétés du béton à l'état durci soient plus évoquées pour les bétons d'aujourd'hui, il s'avère que si un béton ne peut être mis en place correctement, ses propriétés

désirées ne seront pas obtenues. Pour chaque application, les caractéristiques requises pour le béton frais sont différentes et définissent si un béton a de bonnes propriétés à l'état frais telles que les besoins de finition, de mise en place, de pompabilité, de résistance à la ségrégation etc... Aujourd'hui, le développement des nouveaux bétons intensifie le besoin de caractériser encore mieux le comportement du béton et son écoulement. De nombreux ajouts cimentaires et adjuvants organiques ont fait leur apparition et viennent apporter des modifications importantes au béton. L'importance de la maniabilité et de sa mesure ont pris du même coup une importance primordiale. Auparavant, un béton plus fluide était automatiquement associé aux problèmes de ségrégation et une faible résistance à la compression. De nos jours, il est maintenant possible de produire un béton très fluide ayant d'excellentes propriétés mécaniques.

Les tests empiriques conventionnels ne suffisent plus pour certains cas à bien caractériser le comportement lors de l'écoulement et de la mise en place du béton frais. Le développement de nouveaux appareils basés sur une approche plus fondamentale et rhéologique donne des résultats plus adéquats et reflète bien l'aptitude physique du matériau à se déplacer sous son propre poids [Adjoudj, 2015].

2.4 Définition des propriétés rhéologiques

2.4.1 Contrainte de cisaillement

Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, les couches sont animées d'un mouvement relatif les unes par rapport aux autres. Il en résulte l'apparition de contraintes τ [Pa], qui s'exerce tangentiellement à la surface de la couche [Poitou et Racineux, 2001]. Donc, on peut dire que la contrainte de cisaillement est la force que l'on exerce par unité de surface du fluide:

$$\tau = \frac{dF}{dS} \quad \text{Eq (2.1)}$$

Où:

dF : projection de la force de frottement tangentielle.

dS : surface élémentaire d'une couche cisailée.

2.4.2 Viscosité

On considère idéalement un liquide au repos comme un ensemble de couches moléculaires parallèles soumise à une contrainte tangentielle. Si une des couches du liquide se déplace par

rapport à celle qui lui est sous-jacente (**Figure 2.1**), en raison du frottement permanent sur les molécules de la seconde couche, le mouvement est transmis partiellement à cette dernière en même temps que la vitesse de déplacement de la première couche diminue. Cet effet de retard, provoqué par la friction interne des molécules de la couche sous-jacente sur celle de la couche supérieure, est appelé viscosité μ [Pa.s].

Donc, la viscosité peut être définie comme la résistance à l'écoulement d'un système soumis à une contrainte tangentielle. Elle est caractérisée par un coefficient de viscosité qui joue un rôle essentiel dans la rhéologie des fluides. Pour certains fluides, sa connaissance suffit à caractériser de façon précise son comportement rhéologique [**Courrazé, 2000**]. Il existe quatre types de viscosité (**Tableau 2.1**) [**Nguyen, 1996**].

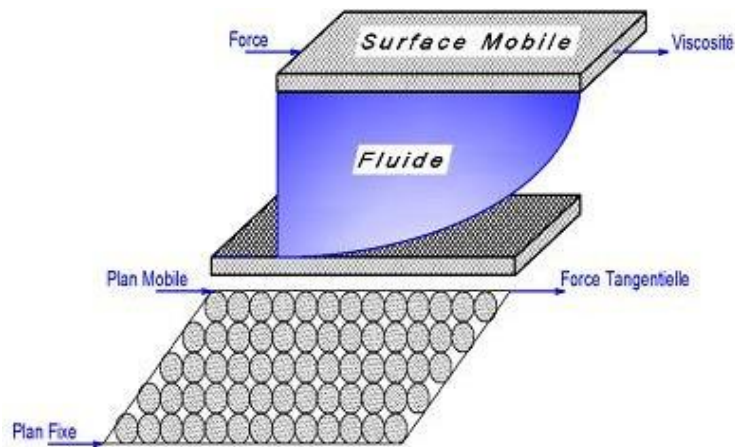


Figure 2.1. Schéma glissement des couches [Adjoudj, 2015].

2.4.3 Vitesse de cisaillement

Considérons un matériau comme un ensemble de couches moléculaires parallèles, emprisonné entre deux plans parallèles de surface S (séparés d'une distance dz). Un des plans est fixe, et le second est déplacé d'une distance dx à une vitesse constante de norme V_0 (**Figure 2.2**).

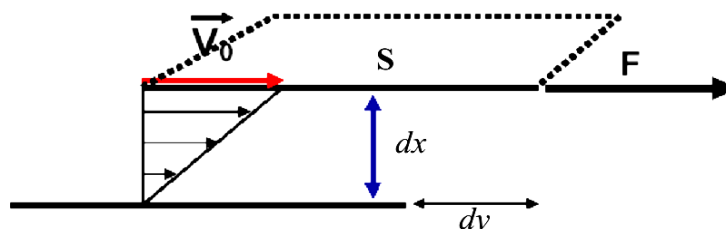


Figure 2.2. Schéma de vitesse de cisaillement [Adjoudj, 2015].

Tableau 2.1. Définitions des viscosités [Nguyen, 1996].

<i>Type de viscosité</i>	<i>Définition</i>	<i>Expression</i>	<i>Dépendance</i>
Viscosité dynamique η	Résistance au mouvement due aux frottements moléculaires internes, résistance que les molécules de ce fluide opposent aux forces de dissociation et au mouvement.	Pour un fluide idéal, la loi de Newton donne: $\tau = \eta\gamma$ (Pa.s) Pour les fluides dits non – Newtoniens la grandeur est la viscosité apparente.	Essentiellement de la cohésion et du taux de transfert de quantité de mouvement entre les molécules.
Viscosité cinétique ν	Doit son origine à l'utilisation des viscosimètres capillaires utilisant le temps d'écoulement sous l'effet de la pesanteur, qui intègre la masse spécifiques de la substance.	Temps d'écoulement $\nu = \eta/\rho$ avec ρ la densité du liquide et η sa viscosité (en stokes ou m ² /s).	De la densité du liquide et de sa viscosité.
Viscosité relative η_R	Correspond au rapport de la viscosité dynamique de cette solution sur la viscosité dynamique du solvant.	$\eta_R = \eta / \eta_s$	
Viscosité spécifique η_{sp}	Correspond à la viscosité d'une dispersion colloïdale diluée de particules sphériques.	$\eta_{SP} = \eta_R - 1$	

Sous l'effet de la force tangentielle, la première couche moléculaire se déplace à la même vitesse. Les couches inférieures vont se mouvoir dans la même direction mais avec des vitesses de plus en plus petites. Il se crée un gradient de vitesse entre les deux plans. Le déplacement entre les deux plans est défini comme la déformation, symbole γ suivant la relation:

$$\gamma = \frac{dx}{dz} \quad \text{Eq (2.2)}$$

La norme du gradient de vitesse dans tout l'échantillon est définie comme la vitesse de cisaillement, appelée également vitesse de déformation ou taux de cisaillement. Il s'agit de la vitesse de déformation entre deux couches successives voisines du fluide cisailé. Elle est souvent présentée comme étant la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement [Courrazé, 2000].

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dz} \right) = \frac{d}{dz} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \frac{dv}{dz} \quad \text{Eq (2.3)}$$

2.4.4 Seuil de cisaillement

Le seuil de cisaillement τ_0 est défini comme étant la contrainte de cisaillement minimale à atteindre pour qu'un fluide soumis à une déformation de cisaillement s'écoule. En dessous de cette valeur, ce fluide se comporte comme un pseudo-solide (pas de déformations permanentes). De Larrard et al [1999] ont considéré que le seuil de cisaillement τ_0 est la manifestation macroscopique du frottement entre les grains composant le squelette granulaire du béton y compris les grains de ciment et les particules ultrafines (Figure 2.3).

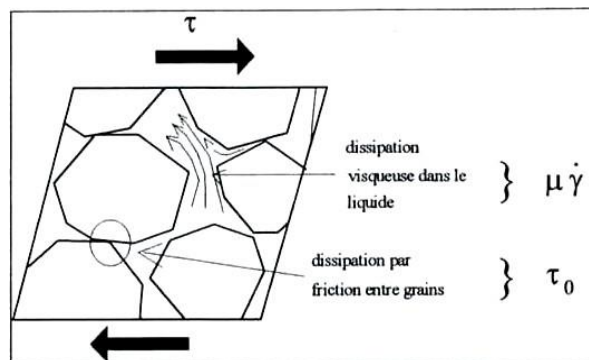


Figure 2.3. Contributions de la phase solide et de la phase liquide à la résistance au cisaillement du béton [De Larrard et Belloc A, 1999].

2.4.5 Thixotropie

La thixotropie est caractérisée par une diminution réversible de la viscosité apparente lors d'une sollicitation à vitesse constante. Cette propriété est généralement caractéristique des suspensions floculées. Elle est liée à la destruction progressive des floccs sous cisaillement. Les rhéogrammes de telles suspensions présentent une boucle d'hystérésis, c'est à dire que la courbe de montée en cisaillement ne coïncide pas avec la courbe de descente (**Figure 2.4**) [Ferraris, 1999].

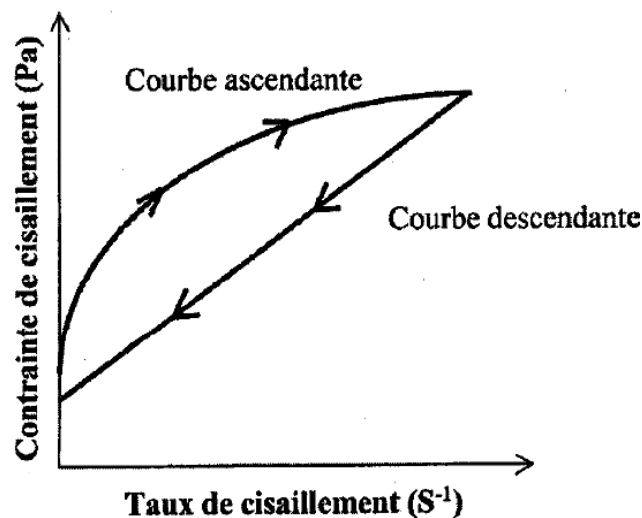


Figure 2.4. Comportement d'un corps thixotrope [Nguyen, 1996].

Dans le cas des matériaux cimentaires, on a une suspension que l'on peut assimiler généralement à un corps de Bingham. Bien que plusieurs études du comportement rhéologique des matériaux cimentaires aient été effectuées, il est encore difficile de donner une définition exacte des propriétés de ces derniers à cause de la multitude des facteurs qui influencent ce comportement rhéologique [Ferraris., 1999].

2.5 Différents comportements rhéologiques

Il existe plusieurs types de comportements rhéologiques qui se divisent en deux grandes familles : les fluides newtoniens et les fluides non- newtoniens.

2.5.1 Fluides newtoniens

Un fluide est dit newtonien lorsque les gradients de vitesse de sa déformation en mouvement sont linéairement proportionnels aux contraintes de cisaillement appliquées avec un seuil de

cisaillement négligeable (**Figure 2.5**), d'où on peut écrire la relation qui décrit son comportement rhéologique comme suit:

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad \text{Eq (2.4)}$$

Avec:

τ la contrainte de cisaillement [Pa].

μ la viscosité [Pa.s].

$\dot{\gamma}$ le taux de cisaillement [1/s].

2.5.2 Fluides non-newtoniens

Un fluide est dit non newtonien lorsque la contrainte n'est pas une fonction linéaire de la vitesse de déformation. Dans la famille des fluides non-newtoniens, on distingue plusieurs comportements tels que les fluides à seuil (Binghamien), les rhéofluidifiants, les fluides rhéoépaississants, etc... [**Hu et al, 1996**].

2.5.2.1 Fluide Binghamien

Ces types de fluides sont les plus simples des fluides non-newtoniens caractérisés par leur comportement rhéologique particulier. Tandis qu'un fluide newtonien s'écoule sous l'action d'une force de cisaillement infiniment faible, un fluide Binghamien exige une force minimale pour provoquer son écoulement (**Figure 2.5**) [**Coussot et al, 2002**].

Pour des forces inférieures à ce seuil, le fluide se comporte comme un solide. On appelle limite d'écoulement, ou résistance au cisaillement, ou seuil de rigidité, la tension de cisaillement à laquelle le fluide commence à s'écouler. Un fluide Binghamien se comporte ensuite comme un fluide normal. Il répond donc à l'équation ci-dessous:

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad \text{Eq (2.5)}$$

Avec :

τ_0 et μ représentent respectivement le seuil de cisaillement et le coefficient de viscosité.

Généralement, les coulis de ciment, les mortiers et les bétons ont approximativement le comportement d'un fluide Binghamien, avec un seuil de cisaillement τ_0 , et une viscosité plastique μ [Ferraris, 1999].

2.5.2.2 Fluide rhéofluidifiant

Le fluide rhéofluidifiant, appelé pseudo-plastique, est représenté par un rhéogramme dont la concavité est tournée vers le bas. Pour ces fluides la viscosité décroît lorsque le cisaillement augmente. Ainsi, le liquide devient moins visqueux et donc plus fluide lorsque le cisaillement augmente (Figure 2.5).

2.5.2.3 Fluide rhéoépaississant

Le fluide rhéoépaississant, appelé dilatant, est représenté par un rhéogramme dont la concavité est tournée vers le haut. Ainsi, le liquide devient plus visqueux et donc plus épais lorsque le cisaillement augmente (Figure 2.5).

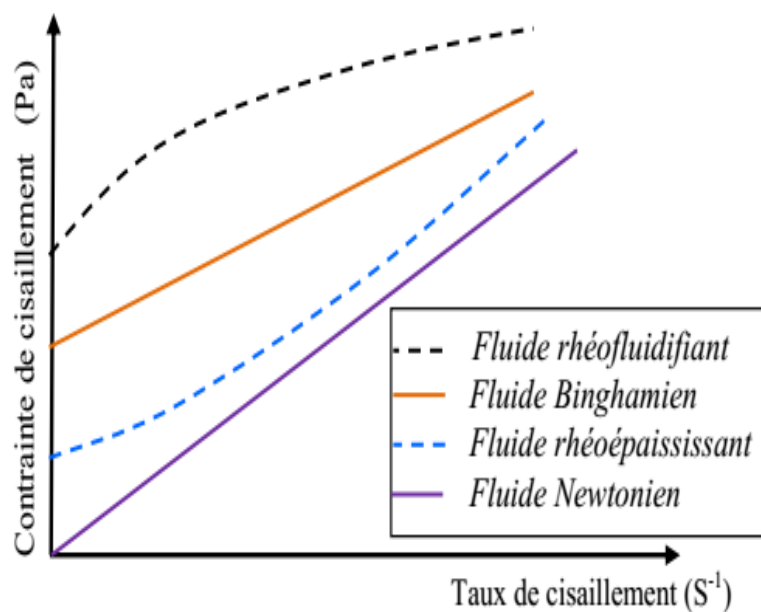


Figure 2.5. Les comportements rhéologiques des fluides.

Plusieurs chercheurs ont ajusté les modèles rhéologiques de base pour les calibrer avec leurs fluides étudiés. Les modèles de comportement rhéologique des fluides sont consignés dans le **tableau 2.2** suivant :

Tableau 2.2. Modèles de comportement rhéologique des fluides.

<i>Auteur</i>	<i>Loi de comportement</i>
Newton (1687)	$\tau = \mu \dot{\gamma}$
Bingham (1922)	$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$
Bingham modifié	$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} + c \dot{\gamma}^2$
Herschel Berkley (1926)	$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n$
Ostwald(1925)	$\tau = A \dot{\gamma}^n$
Von-berg	$\tau = \tau_0 + b \sinh^{-1}(\gamma/c)$
Sisko	$\tau = a\gamma + b\gamma^c$
Robertson-Sttif	$\tau = A(\gamma + B)^c$
Eyring	$\tau = a \sinh(b \dot{\gamma})$

Où :

- τ : contrainte de cisaillement [Pa].
- μ : viscosité [Pa.s].
- $\dot{\gamma}$: le taux de cisaillement [1/s].

2.6 Facteurs affectant la rhéologie des matériaux cimentaires

Comme toutes les caractéristiques d'un matériau cimentaire, les paramètres rhéologiques dépendent fortement de sa composition et des propriétés physico-chimiques de ses composants. Le **Tableau 2.3** présente des ordres de grandeur des paramètres rhéologiques pour pâte, mortier et béton [Coussot, 1993 ; Hafid, 2012].

Tableau 2.3. Ordres de grandeur des paramètres rhéologiques pour différents types de Matériau.

<i>Paramètres</i>	<i>Pâte</i>	<i>Mortier</i>	<i>BAP</i>	<i>Béton fluide</i>	<i>Béton ordinaire</i>
Seuil de cisaillement τ (Pa)	10-100	80-100	50-200	100-400	500-2000
Viscosité plastique μ (Pa.s)	0,01-1	1-3	20-100	20-100	50-100

2.6.1 Effet du rapport eau-ciment

Normalement, l'augmentation du rapport E/C diminue le seuil de cisaillement et la viscosité plastique [Tattersall, 1991]. Les auteurs qui ont noté cet effet ont souvent réalisé une gâchée de béton à un faible rapport E/C et par la suite ajouté successivement des quantités d'eau. La quantité de pâte de ciment n'est donc pas constante lorsque le rapport E/C varie.

Effectivement, le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent avec l'augmentation du rapport E/C. La **Figure 2.6** montre l'influence du rapport E/C sur les paramètres rhéologiques du béton [Domone et al, 1999].

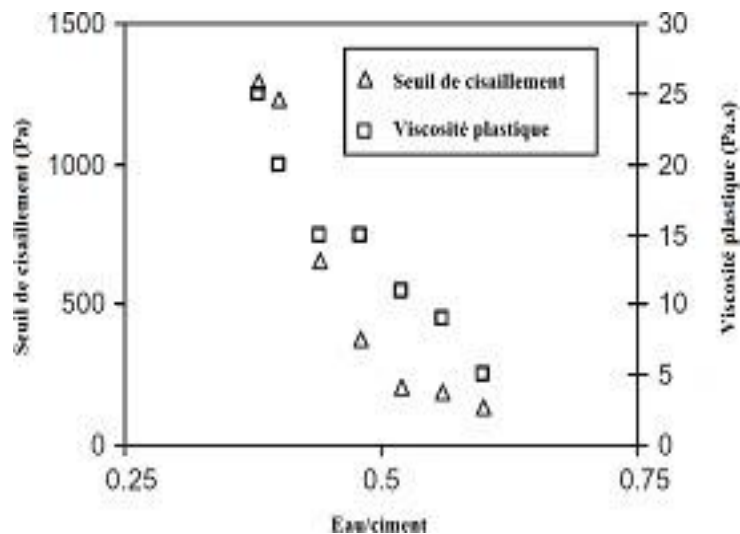


Figure 2.6. Effet du rapport E/C sur les paramètres rhéologiques des bétons [Domone et al, 1999].

2.6.2 Effet du type de ciment

L'influence de la composition du ciment Portland sur les propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires a été largement étudiée. Beaupré et Mindess [1998] ont effectué des essais avec trois types de ciment. Quand tous les autres paramètres sont constants, un mélange fabriqué avec du ciment résistant au sulfates (CRS) montre le plus faible seuil de cisaillement; un mélange fait avec du ciment courant avec de la fumée de silice montre le plus grand seuil de cisaillement et un mélange fait avec du ciment courant présente un seuil de cisaillement compris entre les deux précédents. Généralement ces résultats donnent une viscosité plastique pratiquement constante. Asakura et al [1992] ont constaté que la viscosité des pâtes de ciment augmente sensiblement dans le ciment ayant un faible rapport C_3S/C_2S ou C_3A/C_4AF lorsqu'un superplastifiant est employé.

2.6.3 Effet des additions minérales

Les additions minérales engendrent des modifications significatives sur les propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires à l'état frais et durci. A l'état frais, la présence des additions minérales modifie la structure du squelette granulaire et les frictions entre les composants solides dans la phase liquide. Au cours de la prise et du durcissement, les particules des additions minérales interagissent dans le processus d'hydratation du ciment en

modifiant la structure des produits hydratés. En plus, certaines additions peuvent réagir chimiquement en milieu cimentaires pour former de nouveaux produits hydratés qui présentent un caractère liant supplémentaire. Zhang et Han [2000] étudient l'effet des additions ultrafines sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment et constatent que le seuil de cisaillement augmente avec la quantité d'addition ultrafine incorporée tandis que la viscosité de la pâte varie avec la nature et la quantité d'addition. Lorsque le taux de substitution du ciment par des additions de fumée de silice, cendres volantes ou calcaires est inférieur à 15%, la viscosité de la pâte est remarquablement réduite. Ceci n'a pas été noté pour les additions de laitier.

L'addition minérale la plus utilisée dans la confection des bétons autoplaçants est la poudre de marbre. La poudre de marbre c'est un déchet résultant de coupage, façonnage et lustration des pierres de marbres. Dans une étude sur l'effet de la poudre de marbre sur la viscosité des bétons de sable autoplaçants, Bouziani et al [2011] ont trouvé que, par l'utilisation des paramètres de viscosité (indice de consistance (a) et indice d'écoulement (b), issus d'une modélisation rhéologiques), avec un dosage de 250 kg/m³ de poudre de marbre, le mélange présente des valeurs élevées de (a) et faibles de (b), ce qui signifie, selon les auteurs d'avoir un mélange initialement visqueux (résistant à la ségrégation) et fluide en écoulement (Figure 2.7).

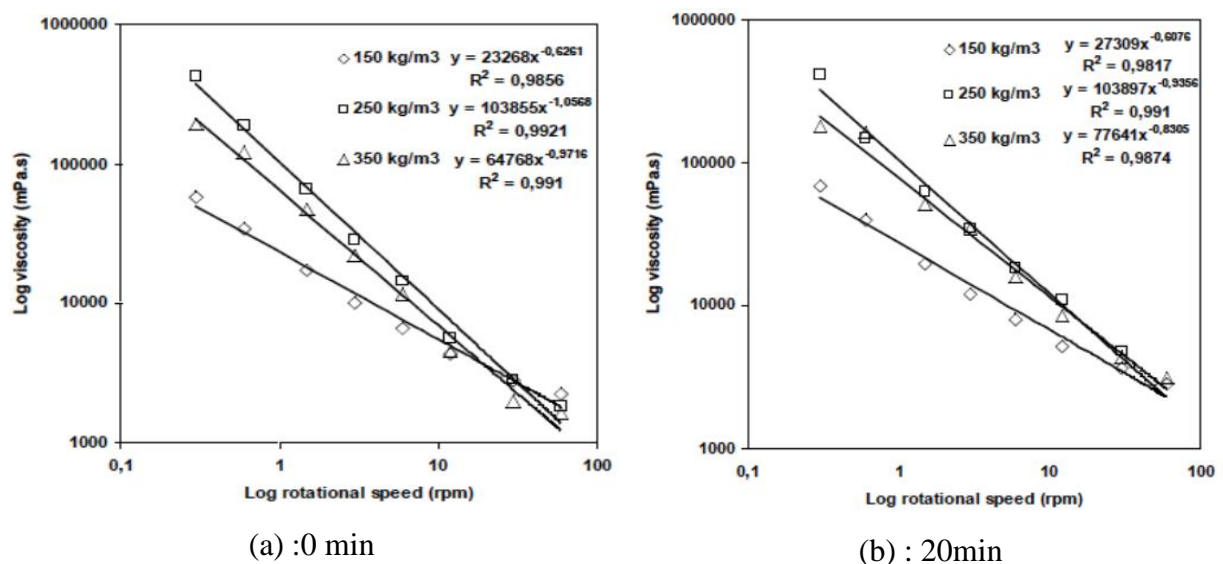


Figure 2.7. Effet de la poudre de marbre sur la viscosité du béton de sable auto-plaçant [Bouziani, 2011].

Belaidi [2013] ont étudié l'incorporation de la poudre de marbre dans le mortier autoplaçant. Les auteurs ont conclu que la substitution du ciment avec des teneurs de poudre de marbre de

5 à 30 % ont apporté un effet bénéfique sur le comportement rhéologique des mortiers autoplaçant.

2.6.4 Effet des adjuvants

Dans une étude de l'effet du temps d'introduction des superplastifiants sur les propriétés rhéologique des pâtes de ciment, il a été constaté que les superplastifiants à base de naphthalène et de mélamine augmentent les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment à court et à long termes et que la réduction de la viscosité plastique et le seuil de cisaillement dépendent de la composition du ciment et du temps d'introduction du superplastifiant. Aiad [2003] a estimé le temps optimal entre 10 à 15 min après le début du malaxage. Golaszewski et Szwabowski [2004] ont montré que le type de superplastifiant à une grande influence sur le comportement rhéologique des mortiers de ciment à l'état frais et que les superplastifiants à base de polycarboxylate étaient plus efficaces que les superplastifiants à base de naphthalène. Le type de superplastifiant utilisé et sa structure moléculaire influence l'état rhéologique des pâtes de ciments. Bjornstrom et Chandra [2003] ont mis en évidence l'action de plusieurs types de superplastifiant sur les paramètres rhéologiques où l'action des polycarboxylates est très significative comme l'illustre la Figure 2. 8.

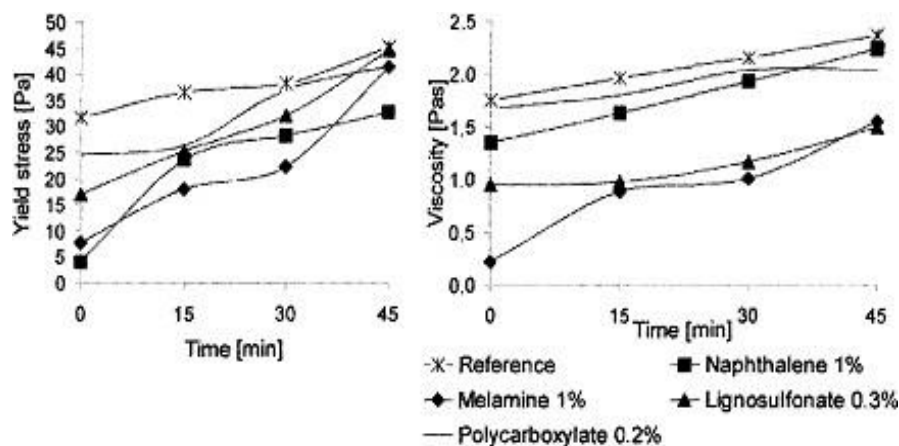


Figure 2. 8. Variation du seuil de cisaillement et de la viscosité d'une pâte de ciment en fonction de types et du temps d'introduction de superplastifiant [Bjömström et Chandra, 2003].

2.6.5 Effet des fibres

Les études de l'effet de l'ajout de fibres sur la rhéologie du béton frais montrent que le comportement des bétons est généralement Binghamien. Plusieurs auteurs montrent que lorsque la quantité de fibres augmente, la viscosité plastique et le seuil de cisaillement

augmentent aussi. Lorsque la longueur des fibres augmente, seul le seuil de cisaillement augmente [Beaupré, 1994].

2.6.6 Effet du temps

Le temps occupe une place particulière étant donné qu'il s'agit du seul facteur qui ne fait pas intrinsèquement partie de la composition du béton. La durée de la période où le béton frais reste suffisamment maniable est limitée dans le temps à cause du processus d'hydratation. Quand cette limite est dépassée, le béton perd sa maniabilité et son comportement rhéologique est modifié.

La **Figure 2.9** montre que le seuil de cisaillement de deux pâtes différentes après 5 et 60 minutes. On constate qu'à 5 minutes ces pâtes présentent un même comportement (Binghamien). Après 60 minutes la courbe du ciment (C) se différencie complètement de celle du quartz (S). Le seuil de cisaillement ciment (C) a augmenté. Il a fallu briser des liaisons chimiques pour atteindre ensuite un comportement Binghamien par contre la courbe du quartz (S) reste identique et n'est pas affectée par le temps.

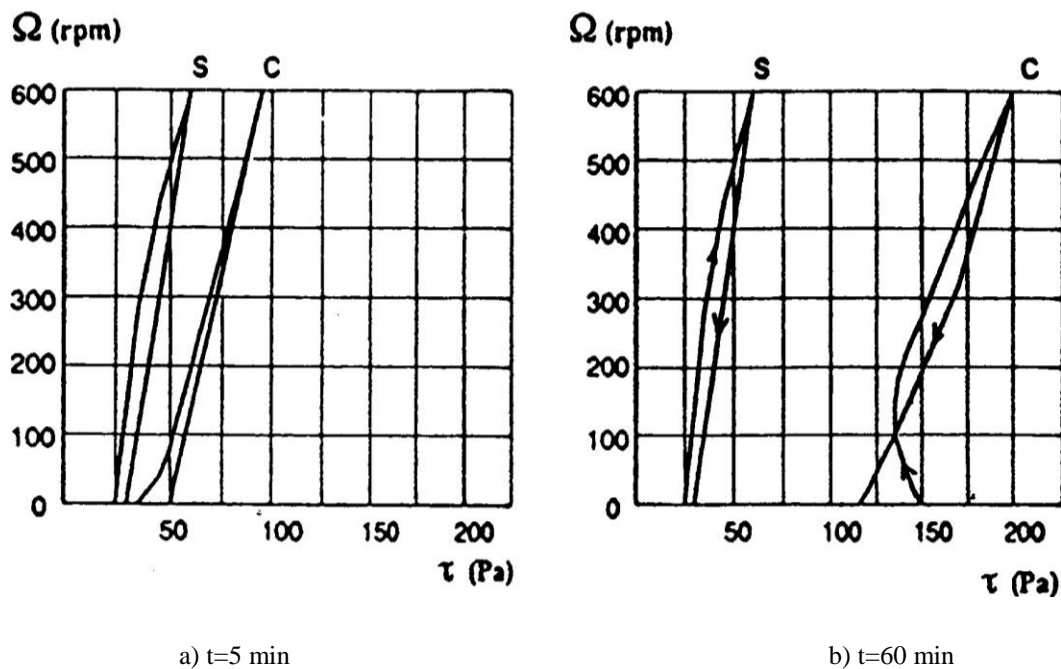


Figure 2.9. Évolution du comportement rhéologique en fonction du temps Pâte E/C=0,4 S: Quarts (pâte inerte), C: Ciment (pâte active) [Smgh et Singh, 1993].

2.6.7 Effet de la température

L'effet de la température sur la viscosité des pâtes de ciment est directement lié à leurs compositions chimiques. Les travaux de Griesser [2002] montrent que les ciments riches en C_3A se manifestent par un plus fort seuil d'écoulement. En général, le seuil de cisaillement augmente avec la température, cette dépendance est plus prononcée en cas du ciment C riche en C_3A (12.6%) où sa valeur double lorsque la température passe de 20 à 30°C. La viscosité augmente avec l'élévation de température et semble relié au type de superplastifiant utilisé. Elle augmente au cours du temps et autant plus si la température ambiante est élevée surtout entre 20 et 30° C. Golaszewki et Szwabowski [2004] observent une forte influence de l'élévation de la température sur le comportement rhéologique des mortiers accompagné d'une augmentation du seuil d'écoulement et une diminution de la viscosité plastique. Avec l'élévation de la température la contrainte de cisaillement diminue, cette diminution est beaucoup plus marquée en présence d'un superplastifiant [Griesser, 2002].

CHAPITRE 3 :

***Valorisation des déchets de plastique dans
les matériaux cimentaires***

Chapitre 3 : Valorisation des déchets de plastique dans les matériaux cimentaires

3.1 Introduction

Depuis ces vingt dernières années, les déchets en matières plastiques représentent une part importante des déchets solides municipaux. De plus, ils posent un sérieux problème à cause de leur durée de vie et parce que ce sont des déchets voyants. Leur gestion est donc nécessaire que ce soit d'un point de vue environnemental, économique ou social [Benimam et al, 2014]. Il est donc important de penser à la valorisation des déchets de plastique dans les matériaux cimentaires.

Ce chapitre est consacré aux déchets de plastiques, il expose la composition et l'origine du plastique, ainsi que l'impact des sachets de plastique sur la santé et l'environnement. Finalement, il met en relief les travaux récents effectués sur les déchets plastiques.

3.2 Composition et origine du plastique

Il existe deux groupes de plastique : les thermodurcissables, dont le durcissement, obtenu si chaud, est irréversible, et les thermoplastiques, qui se ramollissent sous l'effet de la chaleur et durcissent au froid de façon réversible.

Les matières plastiques occupent une place importante dans l'ensemble des produits de consommation.

Les matières plastiques sont composées en générale en trois composants qui sont:

- Résine de base (polymères).
- Adjuvants.
- Additifs.

Matière plastique = résine de base (Polymère) + adjuvants + additifs

3.3 Impacts des déchets de plastique sur la santé et l'environnement

Quel que soit le mode de gestion du déchet plastique, il présente de grands dangers pour l'environnement et la santé. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) renseigne que 21%

Chapitre 3: Valorisation des déchets de plastique dans les matériaux cimentaires

des maladies dans le monde aujourd'hui sont liés à l'insalubrité de l'environnement [Gbèdo, 2009].

En effet, un sac plastique met environ 400 ans pour se dégrader; son imperméabilité crée des conditions d'essoufflement au niveau des plantes, car ces dernières n'arrivent pas à faire explorer les profondeurs par leurs racines dans le sol à la recherche de l'eau et des nutriments [Agani et Tchehouali, 2014].

Environ 5% des 260 millions de tonnes de déchets plastiques produites sont recyclés ; c'est à dire que nous déversons environ 247 millions de tonnes de déchets plastiques dans la nature chaque année entraînant ainsi des déperditions inévitables.

Les sacs en plastique s'empilent également dans les caniveaux d'évacuation des eaux pluviales. Ce qui provoque parfois, des inondations pendant la saison pluvieuse car ils bloquent l'écoulement normal de l'eau (Figure 3. 1).



Figure 3. 1. Caniveau jonché de sachets plastiques [Agani et Tchehouali, 2014]

Signalons enfin que les sachets en plastique sont très dangereux pour les animaux. Ces derniers, suite à l'ingestion des sachets, connaissent une altération progressive et rapide de leur santé, entraînant une mort violente. Le taux de mortalité élevé, est dû au paludisme qui gangrène les populations. Plus spécifiquement sur la santé, les déchets plastiques peuvent causer d'énormes préjudices. Mieux, les déchets plastiques de par leur poids très léger sont des vecteurs de maladies puisque pouvant se déplacer d'un milieu à un autre [Agani et Tchehouali, 2014].

3.4 Granulats recyclés de déchet de plastique

Le recyclage des sacs de plastique passe par plusieurs étapes (du ramassage et récupération des sacs usés jusqu'au stockage en granulats, en passant par un traitement thermique). Les granulats produits à partir de déchets de sacs en plastique servent à être utilisés par la suite pour la fabrication de différents types d'emballage et de nouveaux sacs en plastique.

Le traitement thermique consiste à l'homogénéisation des différents déchets plastiques en une feuille de plastique, qui sera transformée par la suite en fibres minces. Ces fibres seront découpées en granulats manuellement ou automatiquement (**Figure 3.2**). Les granulats en plastique recyclés ont généralement des diamètres de 2 à 4 mm et une densité de l'ordre de $0,9 \text{ g/cm}^3$ [Ghernouti, 2015].



Figure 3.2. Les étapes de recyclage des granulats

3.5 Matériaux à base de sachets plastiques

Dans le cadre de la valorisation des déchets plastiques, des études ont été menées sur le recyclage des plastiques comme adjuvant dans les composites sable-plastique fondus, et d'autres études sur la valorisation des déchets plastiques en BTP.

Différentes études ont démontré qu'il est également possible de transformer les déchets plastiques par fusion, avec adjonction de sable ou non, en divers produits d'excellente qualité, comme des panneaux de signalisation, des pavés de sol (**Figure 3.3**), des dalles de caniveaux et de latrines.

L'expérience montre, toutefois, qu'avant de s'engager dans telles ou telles stratégies et/ou fabrications, il est bon de s'assurer qu'il y aura un marché rémunérateur et que les consommateurs potentiels s'approprient le produit valorisé. La stratégie de réduction des plastiques souples proposée dans la suite de notre travail est celle qui consiste à transformer les sachets plastiques usés en matériaux de construction [Agani et Tchehouali, 2014].



Figure 3.3. Pavés à base de sachets recyclés

Plusieurs travaux importants ont été réalisés sur les déchets plastiques dans le monde, nous citerons :

3.5.1 Matériau à base de granulats et déchets plastiques fondus

Tchehouali et al [2012] ont proposé la mise au point d'un matériau à base de granulats et déchets plastiques fondus. Cette étude vise à déterminer les caractéristiques physiques et mécaniques d'un matériau élaboré à partir du mélange de sachets plastiques fondus et de granulats. Le matériel utilisé comprend les accessoires destinés à la fusion des sachets plastiques notamment un réchaud à gaz et une marmite en aluminium, des moules prismatiques (40 x40 x 160) mm, cubiques (50 x 50 x 50) mm et cylindriques ($\text{Ø}50$; h= 100) mm. Les matériaux utilisés comprennent des sachets plastiques provenant de la récupération. D'autres, par contre, sont des sachets neufs acquis dans le commerce et servant de référence. Il s'agit des sachets plastiques de différentes marques. Les granulats utilisés sont constitués de trois (03) qualités de sables de caractéristiques différentes et du gravillon roulé propre.

Les investigations menées dans cette étude ont montré la possibilité de réaliser un matériau de construction à partir des sachets plastiques et des granulats. La technique consiste à fondre à 350°C environ ces sachets dans un récipient approprié et à mélanger le liant obtenu avec du sable et du gravillon. L'optimisation des dosages des intrants a montré que, parmi les paramètres clés qui influencent les performances du matériau, il faut compter le type de sachet plastique, la granulométrie des granulats et le dosage en sachets plastiques dans le mélange. L'exploitation des résultats obtenus en variant le type de sachets plastiques, présente des limites évidentes puisque les sachets plastiques triés des déchets solides sont des mélanges de tous les types de sachets plastiques. C'est pour ces raisons que la détermination de la composition chimique des sachets plastiques qui pourrait permettre d'élucider un certain

nombre de questionnements n'a pas été abordée dans ce travail à cause de l'intérêt mineur qu'elle porte à l'étape actuelle de la recherche. Les résistances mécaniques maximales enregistrées, avec un taux de 25% de sachets plastiques tout venant dans le mélange, se trouvent autour de 7 MPa. Le mélange contenant du sable et du gravillon présente des résistances légèrement plus faibles que celui contenant du sable fin sans gravillon. Les faibles caractéristiques mécaniques enregistrées sur le matériau n'autorisent pas d'envisager son utilisation dans les éléments porteurs mais le matériau présente de grandes potentialités en termes de matériau d'étanchéité et de remplissage, potentialités qui restent à évaluer avec précision.

3.5.2 Valorisation de déchets de plastiques comme ajouts

Ghernouti et al [2011] ont proposé la valorisation des déchets de sachets plastiques comme ajouts dans les mortiers et bétons de construction.

L'objectif principal de leur travail est de voir l'influence de ce déchet récupéré en substitution d'une partie de sable sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers et des bétons ainsi que leur comportement vis-à-vis des attaques chimiques. Les matériaux utilisés sont le ciment, le sable, l'eau et éventuellement les déchets de plastiques. L'ensemble des résultats trouvés montre sans équivoque que la présence de granulats de déchet de plastique dans la matrice cimentaire influe sur les propriétés physico mécaniques des mortiers d'une part et sur leur comportement vis-à-vis des attaques chimiques d'autre part :

- Une diminution de la résistance mécanique en fonction de l'augmentation de pourcentage de déchet de plastique, qui reste toujours proche du mortier de référence, où il a été enregistré une chute de résistance à la compression à 28 jours de l'ordre de 18 et 23% pour les mortiers contenant 10 et 20 % de déchets respectivement.
- Une diminution de la perte de masse des mortiers conservés dans l'acide sulfurique, en fonction de l'augmentation du pourcentage en déchet. Ce qui indique le bon comportement de ces mortiers vis-à-vis des attaques acides.
- Un freinage de la pénétration des ions chlorure par l'incorporation de déchets de plastique dans le mortier.
- Une amélioration de la sensibilité à la fissuration du mortier, par les déchets plastiques, lorsque ce dernier est soumis au retrait.

3.5.3 Valorisation de déchets de plastiques comme liant

Cette idée consiste à utiliser les sachets plastiques fondus comme liant dans l'élaboration de matériau composite « granulat – sachet fondu ». Les résultats ont montré que la quantité de sachets plastiques nécessaire pour une bonne mise en œuvre varie en fonction du type de sachet. Le type de sachet plastique le plus approprié a fourni les résistances les plus élevées en flexion (6,67MPa) et en compression (7,14MPa) avec les dosages pondéraux de 33% de sachets plastiques contre 63% de sable [Tchhouali et al 2012].

Par exemple, dans le cadre de la valorisation des déchets de sachets en plastiques au Tchad, un procédé a vu le jour et a consisté en la fabrication de pavés. Le procédé de fabrication est simple. Il s'apparente à celui d'un béton de sable (mélange de sable et de ciment). Du plastique en fusion sert comme liant à la place du ciment. Il est mélangé avec du sable de granulométrie choisie, dans des proportions précises, selon l'utilisation recherchée pour le produit fini (pavé piétonnier ou pavé de voirie).

3.5.4 Valorisation des déchets issus de bouteilles en plastique

Une valorisation innovante des déchets de bouteilles en plastique (en polyéthylène téréphtalate, PET), a été développée dans la fabrication de matériaux de construction à matrice cimentaire. L'association à un liant hydraulique se fait sans transformation chimique ou énergétique. Dans une étude sur ce sujet, différents pourcentages volumiques de sable (2%, 10% et 50%) ont été substitués par un même volume de déchets de granulat recyclé. L'influence de la proportion des granulats sur les caractéristiques physiques, mécaniques, hydrauliques et thermiques des nouveaux matériaux a été évaluée et analysée.

Les résultats ont montré que les granulats en PET peuvent être utilisés avec succès comme substituant partiel du sable dans les matériaux de construction car les nouveaux matériaux obtenus sont plus légers, plus isolants, suffisamment résistants, plus performants sur le plan hydrique et attractifs en terme de coût. De plus, ils permettent d'envisager la mise en place de nouvelles filières de valorisation des déchets solides en matière plastique [Marzouk et al, 2007].

3.5.5 Valorisation de déchets de plastiques comme mortier

Kumar et Prakash [2006] ont proposé la valorisation des déchets plastiques comme ajout dans le béton. Un béton courant employé habituellement pour la plupart des travaux de construction a été utilisé avec les plastiques dans différentes proportions. Ils ont été ajoutés dans les proportions telles que 2%, 4%, 6%... en remplacement de la même quantité de mortier (ciment et sable). Des essais ont été effectués sur les bétons incorporant des déchets de plastiques pour déterminer leurs propriétés mécaniques.

Les éprouvettes cubiques réalisées ont subi les écrasements à 1, 3, 7, 14 et 28 jours d'âge. Ces essais ont indiqué que le pourcentage optimal de plastiques est environ 5% et la force à la rupture s'est avérée deux fois plus grande que le béton de référence. Les travaux concrets employant ce modificateur peuvent être employés pour la construction des revêtements bétonnés qui mène à diminuer l'épaisseur globale du trottoir [Kumar et Prakash, 2006].

3.5.6 Valorisation de déchets de plastiques comme composite (plastique fondu - sol)

Tchehouali et al [2014] ont mené une étude consacrée essentiellement à la mise au point et à la caractérisation d'un nouveau matériau composite fait à base des sachets plastiques fondus et de sol. Ce sol a été par ailleurs traité pour permettre d'en extraire du sable utile dans la confection du matériau de référence.

L'étude expérimentale s'est appuyée sur l'examen de l'évolution des caractéristiques physique et mécanique du dit matériau par comparaison à celles obtenues pour le matériau de référence. La présence d'argile dans le mélange sachets plastiques fondus – sol ainsi que la température ambiante sont les paramètres qui ont été pris en compte.

Les résultats attestent clairement que la présence d'argile dans le matériau a une influence aussi bien sur sa densité absolue que sur son comportement mécanique et le rend moins vulnérable lorsqu'il est soumis à une élévation modérée de la température. Spécifiquement, on retient que :

- Le matériau contenant de l'argile présente une densité moins élevée mais offre de meilleures résistances en compression (8 à 10MPa) par rapport au matériau de référence (4 à 7MPa).
- Les deux matériaux, soumis à une élévation modérée de la température perdent de leur pouvoir de résistance.

- Le matériau contenant de l'argile se refroidit plus lentement que le matériau de référence.

Les résultats obtenus du point de vue des résistances en compression du matériau composite sachets fondus – sol sont plus satisfaisants que ceux obtenus avec le matériau composite sachets fondus – sable. Une des applications qu'on pourra en faire serait de les utiliser comme produit d'étanchéité pour les toitures en dalle, les murs de soutènement par exemple.

3.5.7 Valorisation de déchets de plastiques comme enrobage des granulats

Des travaux plus récents ont mis au point de nouveaux bétons contenant des gravillons enrobés de sachets plastiques fondus dans la perspective d'offrir des propriétés physiques et mécaniques satisfaisantes pour des applications dans l'industrie de la construction et possédant un pouvoir d'étanchéité avéré. Dans cette optique, un micro béton témoin de référence ne contenant que des granulats sains a été élaboré. Ensuite, le gravillon a été remplacé partiellement par du gravillon enrobé de sachet plastique fondu. La substitution a été faite dans les proportions pondérales de 25%, 50% et 75%.

Les propriétés physiques (la masse volumique absolue) et les caractéristiques mécaniques (résistance en compression et en traction) des micros bétons ont été déterminées. Leur pouvoir d'étanchéité a été mesuré et comparé en considérant les paramètres clé que sont le coefficient d'absorption et la vitesse de pénétration d'eau dans le béton.

Les résultats ont montré que les micros bétons contenant les gravillons enrobés de sachets plastiques fondus présentent des masses volumiques et des résistances mécaniques plus faibles que celles du micro béton témoin. Ces paramètres diminuent au fur et à mesure que le taux de granulats enrobés augmente. Comparativement au béton de référence, il a été observé une diminution allant jusqu'à 5,97% de la masse volumique alors que les résistances en compression et en traction par fendage ont chuté respectivement de 39,61% et 32,24% pour un taux de 75% de sachet plastique.



CHAPITRE 4 :

Méthodes et matériaux.

Chapitre 4 : Méthodes et matériaux

4.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre, en premier lieu, des notions de base sur le plan de mélange (plan d'expérience), ensuite nous allons exposer tous les essais de caractérisation effectués pour l'identification de la matière première aussi que les techniques expérimentales de formulation et les procédures de malaxage.

Finalement, nous exposons les différentes méthodes, outils et procédures utilisés lors de réalisation des essais expérimentaux effectués une fois le produit est fini.

4.2 Méthode de plan de mélange

Dans les plans d'expériences classiques (plans factoriels, plans pour surfaces de réponse) les facteurs sont indépendants. Cela signifie que l'on peut choisir en toute liberté le niveau d'un facteur quels que soient les niveaux déjà attribués aux autres facteurs. Par exemple, si, pour un plan 2^4 , on a choisi les niveaux des trois premiers facteurs, on pourra encore choisir librement les niveaux du quatrième facteur. Cette liberté n'existe pas lorsque l'on étudie des mélanges car, en général, on étudie les réponses en fonction des proportions des constituants du mélange. Dans ce cas les facteurs d'étude sont les proportions des constituants du mélange. Comme la somme de ces proportions est toujours égale à 100 %, le pourcentage du dernier constituant est imposé par la somme des pourcentages des premiers composés du mélange. Dans cette situation les facteurs ne sont pas indépendants et cela entraîne des mesures particulières.

La méthodologie de mise en forme de l'étude et la conduite des essais sont tout à fait comparables à celles des plans d'expériences classiques.

Il faut bien se rendre compte qu'il y a plan de mélanges lorsque la réponse étudiée dépend des proportions des constituants du mélange et non des quantités de mélange utilisées. Par exemple, la composition d'un mélange est une indication de la proportion des différents constituants. La mise au point du mélange en faisant varier les proportions des constituants est la réalisation d'un plan de mélanges.

4.2.1.1 Contrainte fondamentale des mélanges

Soit un mélange ayant n constituants. Le premier constituant représente un certain pourcentage du mélange, le second constituant un autre pourcentage du mélange, etc. Ainsi,

chaque constituant participe pour une certaine part au mélange total. Mais, l'ensemble des constituants du mélange forme un tout et la somme de leurs teneurs est égale à 100 %. Lorsque l'on a défini les proportions des $n-1$ premiers constituants, la proportion du dernier ne peut plus être choisie, elle est déjà déterminée.

Si l'on note x_i la teneur en constituant i , la somme des teneurs de tous les constituants du mélange satisfait à la relation :

$$\sum_{i=1}^{i=n} x_i = 100\% \quad \text{Eq (4.1)}$$

La teneur de chaque constituant reste comprise entre 0 et 100 %. Lorsqu'on augmente la teneur de l'un des constituants, la teneur des autres est automatiquement diminuée pour que la somme de toutes les teneurs reste égale à 100 %.

Si, au lieu d'utiliser les pourcentages, on ramène la somme des teneurs des différents constituants à l'unité, on écrira :

$$\sum_{i=1}^{i=n} x_i = 1 \quad \text{Eq (4.2)}$$

Cette relation s'appelle la contrainte fondamentale des mélanges. C'est à cause de cette contrainte que les mélanges doivent être étudiés à part car les représentations géométriques des plans de mélanges sont différentes des représentations utilisées pour les plans d'expériences classiques et les modèles mathématiques sont eux aussi profondément modifiés.

4.2.1.2 Lecture du diagramme des mélanges ternaires

Un raisonnement semblable à celui que nous avons tenu pour deux constituants montre que l'on peut représenter les mélanges ternaires à l'aide d'un triangle équilatéral. Les produits purs sont aux sommets du triangle équilatéral. Les mélanges binaires sont représentés par les côtés du triangle. Par exemple le côté gauche AB du triangle (**Figure 4.1**) représente les compositions des mélanges des seuls produits A et B, et ces mélanges ne contiennent pas de produit C.

Chapitre 4: Méthodes et matériaux

Chaque côté du triangle équilatéral est gradué de 0 à 100. On n'a laissé que l'échelle d'un seul produit sur chaque côté. L'échelle de l'autre produit se déduit par complément à 100. Le côté AB est gradué pour le produit A: 100 est au point A et 0 au point B. C'est l'échelle du produit A. Le côté BC est gradué pour le produit B : 100 est au point B et 0 est au point C. Le côté CA est gradué pour le produit C : 100 est au point C et 0 est au point A.

Un point de la surface intérieure du triangle équilatéral représente un mélange ternaire. Les compositions de chaque produit se lisent sur les côtés du triangle. La teneur en produit A se lit sur le côté AB qui est l'échelle du produit A. On projette le point M sur AB parallèlement à BC (côté opposé à A). De même la teneur en B se lit sur l'échelle de B (côté BC) en projetant le point M sur BC parallèlement à AC (côté opposé à B). Enfin la teneur en C se lit sur l'échelle de C (côté AC) en projetant le point M sur à AC parallèlement à AB (côté opposé à C).

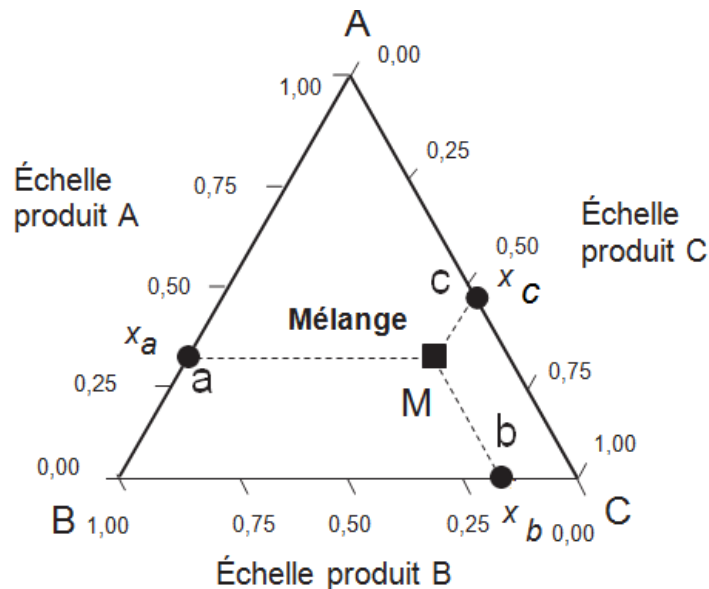


Figure 4.1. Représentation des mélanges à trois constituants à l'aide d'un triangle équilatéral.

Les propriétés géométriques du triangle équilatéral assurent le respect de la contrainte fondamentale des mélanges :

$$\sum_{i=1}^{i=n} x_i = 100\% \quad \text{Eq (4.3)}$$

4.2.1.3 Modèle mathématique et nombre d'essais

Modèle du second degré

Le modèle mathématique du second degré comprend les termes du premier degré, les termes rectangles et les termes carrés. Nous allons partir du modèle mathématique des plans factoriels et nous allons examiner les conséquences de la contrainte fondamentale des mélanges. Pour un mélange à deux constituants, on pourrait écrire sachant qu'il n'y a pas de constante :

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 \quad \text{Eq (4.4)}$$

Prenons en compte la contrainte fondamentale des mélanges :

$$x_1 + x_2 = 1 \quad \text{Eq (4.5)}$$

Que l'on peut écrire :

$$x_1 = 1 - x_2 \quad \text{Eq (4.6)}$$

Multiplions chaque membre par x_1 :

$$x_1^2 = x_1(1 - x_2) \quad \text{Eq (4.7)}$$

$$x_1^2 = x_1 - x_1x_2$$

On constate que le terme carré est converti en un terme du premier degré et en un terme rectangle. Les termes carrés disparaissent donc de la relation initiale. On obtient un modèle comprenant uniquement des termes du premier degré et des termes rectangles, soit en adaptant les notations :

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 \quad \text{Eq (4.8)}$$

Pour un mélange à trois constituants, on a :

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad \text{Eq (4.9)}$$

Plans en réseaux

Les plans en réseaux (Simplex lattice designs dans la littérature anglo-saxonne) sont les premiers plans de mélanges qui ont été introduits. Ils ont été présentés par Scheffé dans les

années 1958-1965. Les points de composition sont régulièrement repartis dans l'espace d'étude. Pour les mélanges à trois constituants, le plus simple des plans de mélanges en réseaux ne contient que les trois produits purs. Les points représentatifs de ces produits sont aux sommets du triangle équilatéral (

Figure 4.2). Les coordonnées de ces points sont 0 et 1.

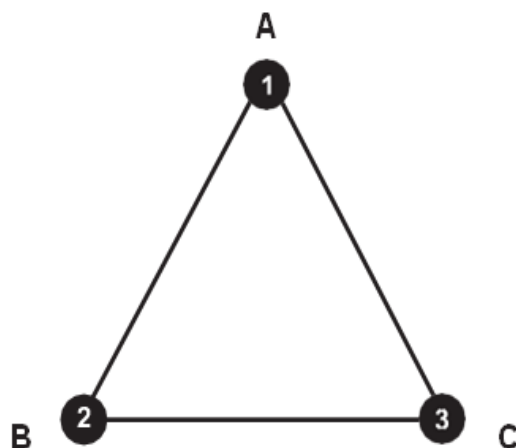


Figure 4.2. Plan de mélanges ne comportant que les trois produits purs.

Le plan qui ne fait intervenir que les produits purs peut être enrichi par les points de composition moyenne, c'est-à-dire par les mélanges contenant 50 % de chacun des produits. Ces points de composition moyenne se situent au milieu des côtés du triangle. Leurs coordonnées sont 0 et 1/2.

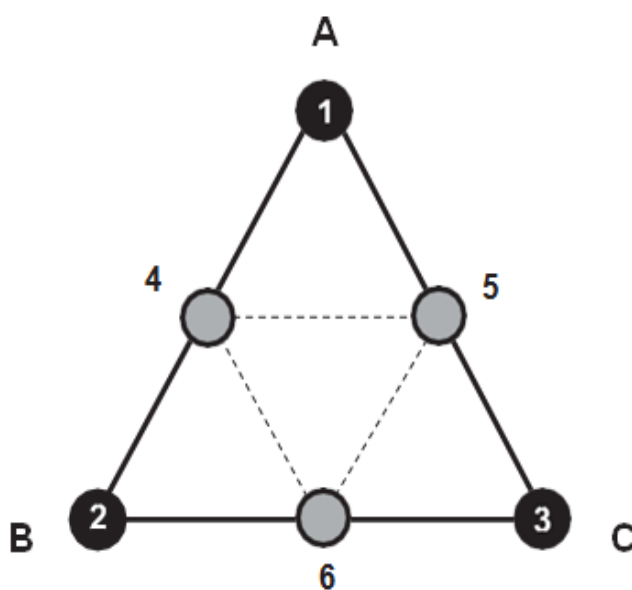


Figure 4.3. Plan de mélanges en réseaux (Simplex lattice designs) comportant les trois produits purs et les mélanges moitié-moitié. Ce plan est noté 3,2.

Les points n° 4, 5 et 6 forment un réseau. La longueur unité des côtés du triangle a été divisée par 2 et les coordonnées de ces points sont égales à 1/2. Si l'on désire un réseau de points plus serré, il faut diviser la longueur des côtés par trois. Le pas de ce nouveau réseau est 1/3. On peut continuer à construire ainsi des réseaux de plus en plus serrés en divisant l'unité par m . Le pas du réseau est de $1/m$ et les coordonnées des points expérimentaux sont $0, 1/m, 2/m, 3/m$ jusqu'à $m/m = 1$.

Pour nommer ces plans on adopte la convention suivante : on utilise deux chiffres, le premier correspond au nombre de constituants du mélange et le second correspond au diviseur utilisé pour établir le pas du réseau. Ces deux chiffres sont séparés par une virgule et mis entre deux accolades. Ici, le plan de la **Figure 4.3** est un plan $\{3, 2\}$, soit 3 constituants et un pas de 1/2. Le plan de la **Figure 4.4** est un plan $\{3, 3\}$, soit 3 constituants et un pas de 1/3.

Cette notation permet de calculer très rapidement le nombre de compositions à préparer et à étudier connaissant le nombre de constituants du mélange et le nombre m . Pour un plan $\{q, m\}$, le nombre total de compositions différentes est égal à :

$$C_{q+m-1}^m = \frac{(q+m-1)!}{m!(q-1)!} \quad \text{Eq (4.10)}$$

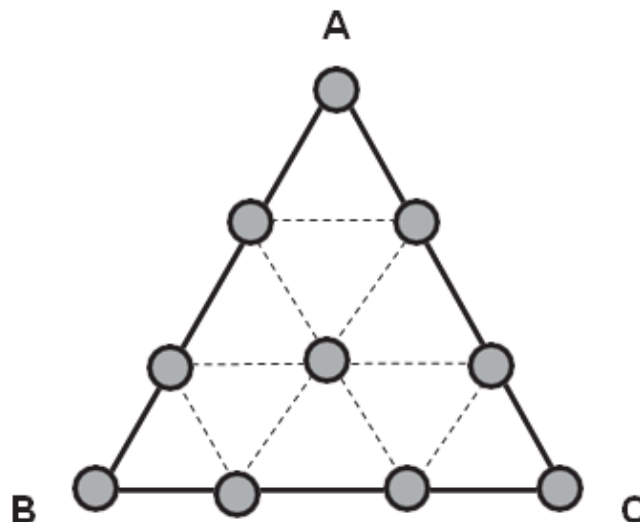


Figure 4.4. Plan de mélanges en réseaux (Simplex lattice designs) comportant les trois produits purs et les mélanges 1/3-2/3 et 1/3-1/3-1/3. Ce plan est noté $\{3, 3\}$.

4.3 Matériaux et essais de caractérisation

4.3.1 Sables

Pour formuler notre mortier autoplaçant, nous avons utilisés deux types de sables locaux : sable de dunes (**SD**) et sable alluvionnaire (**SA**) de la région de Laghouat.

Le sable de dunes est le résultant d'une érosion et d'une sédimentation des différentes roches suivie d'un transport fluviatile et parfois éolien. La plus grande partie des formations sableuses est constituée de quartz.

Le sable utilisé dans notre recherche expérimentale est le sable de dune ramené de la région nord de la ville de Laghouat (**Figure 4.5**).



Figure 4.5. Sable de dune.

Le sable alluvionnaire utilisé provient d'Oued M'zi wilaya de Laghouat (**Figure 4.6**).



Figure 4.6. Sable alluvionnaire.

Les essais effectués pour la caractérisation des sables utilisés lors de la formulation de notre mortier autoplaçant ainsi que leurs résultats sont présentés ci –dessous.

4.3.1.1 Masse volumique absolue (NFP 18-555)

a) Principe de l'essai

Il consiste à mesurer le déplacement du niveau de liquide contenu dans une éprouvette graduée (Figure 4.7), lorsqu'on introduit le sable dont on cherche la masse volumique absolue.

b) Conduite de l'essai

- Remplir l'éprouvette graduée avec un volume V_0 d'eau.
- Peser un échantillon sec M de sable de dune de 80 g et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
- Le liquide monte dans l'éprouvette.
- Lire le nouveau volume V_1 .
- Le volume absolue est $V_s = V_1 - V_0$.
- La masse volumique est alors :

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{M}{V_s} \quad \text{Eq (4.11)}$$



a) Niveau (V_0)



b) Niveau (V_1)

Figure 4.7. Essai de la masse volumique absolue

Résultats :

- ✚ La masse volumique absolue du sable alluvionnaire est : 2.50 g/cm^3 .
- ✚ La masse volumique absolue du sable de dune est : 2.53 g/cm^3 .

4.3.1.2 Masse volumique apparente (NFP 18-555)

C'est la masse de l'unité de volume (y compris les vides), elle est notée ρ_{app} et donnée par :

$$\rho_{app} = \frac{M}{V} \quad \text{Eq (4.12)}$$

Où M : Masse du sable.

V : Volume total de l'échantillon.

La détermination de la masse volumique apparente peut se faire en utilisant un récipient standard de volume connu 1litre et on pèse la masse totale M_T (Figure 4.8).

La masse de l'échantillon M sera :

$$M = M_T - M_R \quad \text{Eq (4.13)}$$

Où M_R est la masse du récipient.



(M_R)



(M_T)

Figure 4.8. Essai de la masse volumique apparente.

Résultats :

- ✚ La masse volumique apparente du sable alluvionnaire est 1.63 g/cm^3 .
- ✚ La masse volumique apparente du sable de dune est 1.50 g/cm^3 .

4.3.1.3 Compacité et Porosité (NFP 18-555)

La compacité (**C**) est définie par le rapport du volume (solide) de matière pleine au volume total, alors que la porosité (**P**) est par définition le complément à l'unité de la compacité.

La compacité et la porosité sont souvent exprimées en %. La somme des deux est alors égal à 100% (ou 1).

Si on connaît la masse volumique apparente et absolue du matériau, il est aisé alors de calculer sa compacité et sa porosité selon la formule suivante :

$$C = \rho_{\text{app}} / \rho_{\text{abs.}} \quad \text{Eq (4.14)}$$

$$P = 1 - C.$$

Résultats:

✚ La compacité et la porosité du sable alluvionnaire sont 65.2 %, 34.8% respectivement.

✚ La compacité et la porosité du sable de dune sont 59 %, 41% respectivement.

4.3.1.4 Equivalent de sable (NFP 18-598)

Principe de l'essai

L'essai est effectué sur la fraction 0/5 mm des matériaux à étudier. On lave l'échantillon selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 min, on mesure les éléments suivants :

- Hauteur **H₁** : sable propre + éléments fins.
- Hauteur **H₂** : sable propre seulement vue à l'œil.
- Hauteur **H*₂** : sable propre seulement mesuré à l'aide du piston (**Figure 4. 9**).

On détermine le degré de propreté du sable (en %) :

$$E_{sv} = \frac{H_2}{H_1} \times 100 \quad \text{Eq (4.15)}$$

$$E_{sp} = \frac{H^*_2}{H_1} \times 100$$



Figure 4. 9. Essai d'équivalent de sable.

Les résultats de l'équivalent de sable sont représentés dans le **Tableau 4.1**.

Tableau 4.1. Résultats de l'essai de L'équivalent de sable de dune.

Types de sable	ESV (%)	ESP (%)
Sable alluvionnaire	93.04	86.05
Sable de dune	91.82	89.90

✚ D'après les résultats obtenus de l'équivalent de sable on peut constater que les sables utilisés (sable dunaire et sable alluvionnaire) sont très propres.

4.3.1.5 Essai d'absorption (NFP 18-555)

L'échantillon du sable est testé après immersion dans l'eau pendant 24 h à 20 C°. Le coefficient d'absorption correspond au rapport de la masse d'échantillon humide M_h (à surface sèche) à la masse de l'échantillon sec M_s (après étuvage à 105°C). La détermination de la masse de la surface sèche est effectuée à l'aide du cône et de la dame selon la norme NFP 18-555 (**Figure 4.10**).

$$Abs = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 10 \quad \text{Eq (4.16)}$$

Où :

M_s : la masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve 105 C°.

M_h : la masse de l'échantillon à surface sèche.



Figure 4.10. Détermination du coefficient d'absorption.

Résultats

- ✚ Le coefficient d'absorption d'eau de sable alluvionnaire est 1%.
- ✚ Le coefficient d'absorption d'eau de sable de dune est 1.17 %.

4.3.1.6 Analyse granulométrique par tamisage (NFP18-560)

L'analyse granulométrique est l'un des essais les plus indispensables pour la fabrication des mortiers et bétons. L'essai est réalisé selon la norme Française NFP18-560. Elle permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Pour avoir les meilleurs mélanges, les granulats doivent respecter aux fuseaux granulaires et des intervalles bien connus.

Les résultats d'analyse granulométrique du sable alluvionnaire et le sable de dune utilisés sont représentés dans la Figure 4.11.

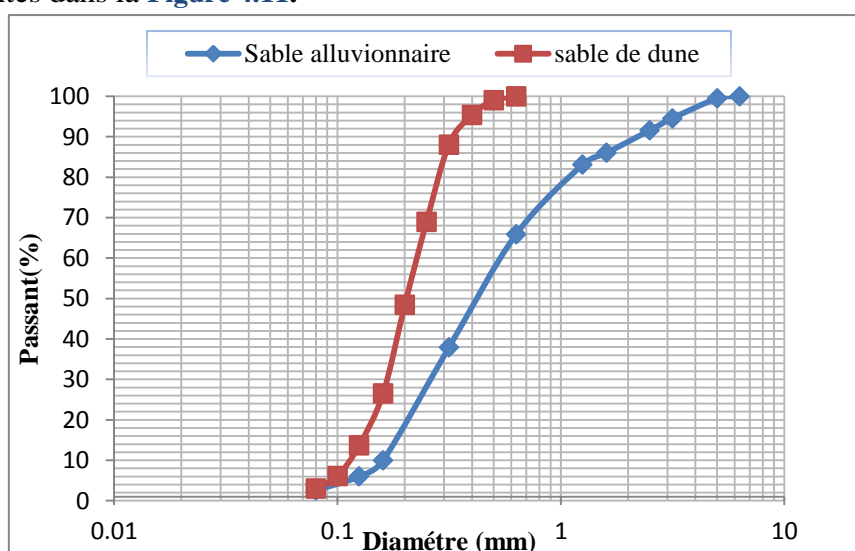


Figure 4.11. Distributions granulométriques des sables utilisés.

4.3.1.7 Module de finesse (NF EN 933-1)

A partir de l'analyse granulométrique on peut déduire le module de finesse de sable qui est défini comme le 1/100 de la somme des refus exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante : 0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 ; 5 mm.

Résultats

- ✚ Le module de finesse M_f du sable alluvionnaire est 2.12.
- ✚ Le module de finesse M_f du sable de dune est 0.85.

Discussions

- ✚ D'après les résultats, on définit donc le sable alluvionnaire comme étant un sable fin de diamètre $\max \leq$ à 6.3mm.
- ✚ La valeur du module de finesse confirme que le sable dunaire est un sable très fin.

4.3.2 Déchets en plastique recyclé

Les granulats utilisés dans ce travail sont des produits à partir des déchets de sacs en plastique (comme le montre la **Figure 4. 12**) La feuille de plastique est fondue en brins minces, produisant des fibres continues droites après découpé en granulats manuellement ou automatiquement. Les granulats en plastique recyclées de diamètre de 2 à 4 mm et une densité de $0,91 \text{ g} / \text{cm}^3$ (**Figure 4. 12**) [Ghernouti, 2015].

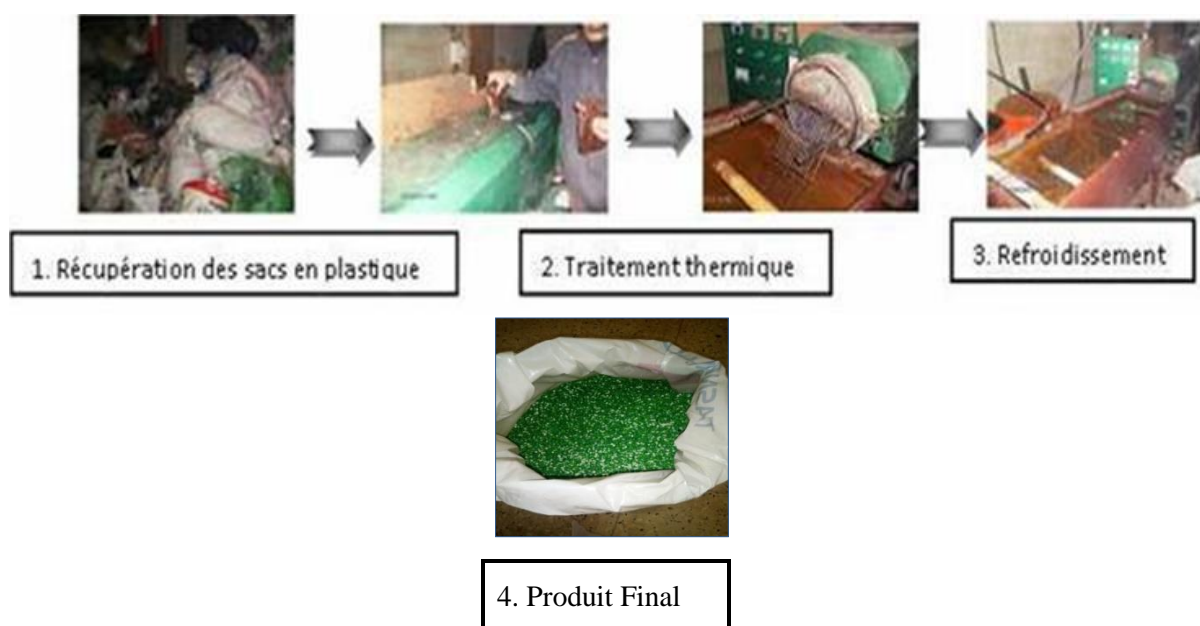


Figure 4. 12. Les étapes de recyclage des granulats et le produit final.

4.3.2.1 Masse volumique absolue (NF P 18 555)

La méthode utilisée pour la mesure de la masse volumique absolue est la méthode de pycnomètre.

- On détermine avec précision la masse M_1 du pycnomètre rempli d'eau (Figure 4.13).
- On détermine avec précision la masse M_2 d'un échantillon de matériau sec (environ 80 g),
- On introduit la totalité du matériau dans le pycnomètre, rempli d'eau, et on ferme le bouchon et remplir le volume restant du pycnomètre de l'eau (Figure 4.13).
- On pèse alors le pycnomètre, soit M_3 .

Dans tous les cas on vérifie que le pycnomètre ne contient aucune bulle d'air.

On peut alors écrire la relation entre les différents poids mesurés

$$M_3 = M_1 + M_2 - \left(\frac{M_2}{\rho_s}\right) * \rho_w \quad \text{Eq (4.16)}$$

$$M_3 = M_1 + M_2 - \frac{M_2}{\rho_s} \cdot \rho_w \text{ Où:}$$

- ρ_s est la masse volumique absolue du déchet de plastique.
- ρ_w est la masse volumique absolue de l'eau qui est égale à 1 g/cm³ ou 1000 kg/m³.

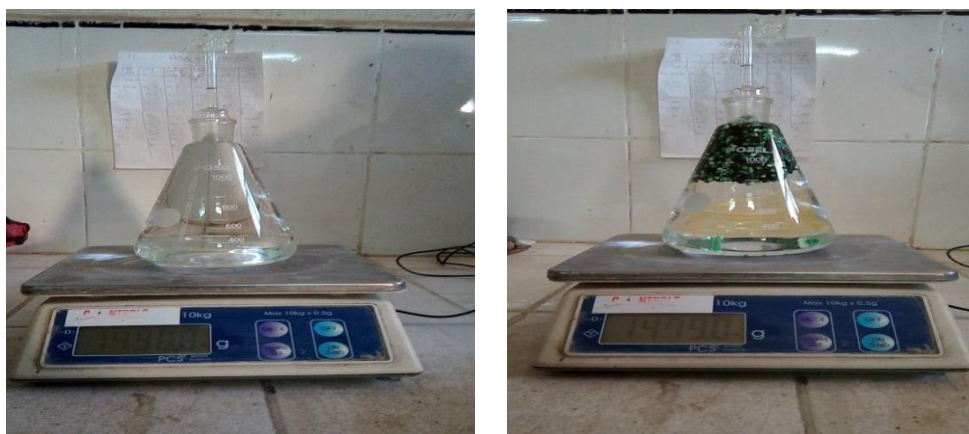


Figure 4.13. Détermination de la masse volumique du déchet de plastique.

Résultats

✚ La masse volumique absolue du déchet de plastique est 0.910 g/cm³.

4.3.2.2 Masse volumique apparente (NF P 18 555)

C'est la masse de l'unité de volume (y compris les vides), elle est notée ρ_{app} et donnée par :

$$\rho_{app} = \frac{M}{V} \quad \text{Eq (4.17)}$$

Résultats

✚ La masse volumique apparente de déchet de plastique est 0.535 g/cm^3 .

4.3.2.3 Analyse granulométrique par tamisage des déchets

L'analyse granulométrique est effectuée après l'élimination des particules supérieures à 5 mm avec le passage du déchet de plastique sur les tamis (5 mm).

Les résultats d'analyse granulométrique du déchet de plastique utilisé sont représentés dans le **Tableau 4.2** et la **Figure 4.14**:

Tableau 4.2. Résultats d'analyse granulométrique des déchets de plastique.

Analyse granulométrique des déchets el plastique la masse M = 2000 g					
Coefficient AFNOR	Diamètre des tamis (mm)	Masse Refus partiel (g)	Masse Refus Cumulée(g)	Refus cumulée (%)	Passant (%)
38	5	0	0	0	100
37	4	179.11	179.11	8.9555	91.0445
36	3.15	1488.72	1667.83	83.3915	16.6085
35	2.5	311.22	1979.05	98.9525	1.0475
34	2	15.63	1994.68	99.734	0.266
31	1	4.61	1999.29	99.9645	0.0355
Fond	f	0	0	0	0

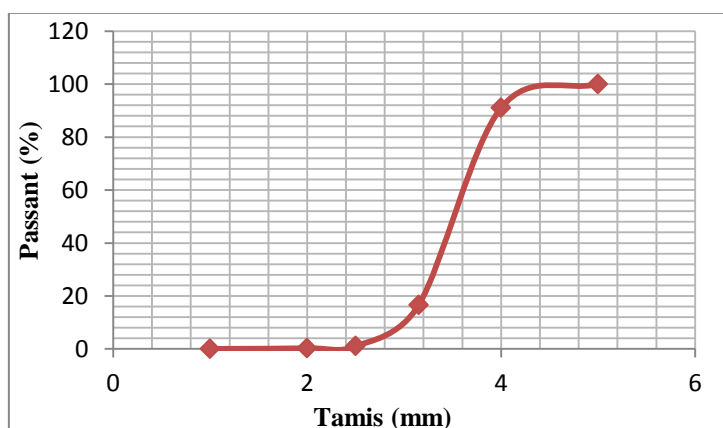


Figure 4.14. Courbe granulométrique de déchet de plastique.

4.3.3 Ciment et fillers de calcaire

Le Ciment utilisé dans notre travail est un ciment portland de type CEM I 42,5 N-SR3 (Figure 4.15). C'est un ciment gris résistant aux sulfates, résultat de la mouture d'un clinker contenant un faible taux d'aluminates de calcium avec une proportion de gypse inférieure à celle d'un ciment portland composé.



Figure 4.15. Ciment MoKaouem de Lafarge.

Le filler de calcaire est un déchet résultant de coupage, façonnage et lustration des pierres de marbres. Les résultats des essais de caractérisation physique du filler de calcaire et du ciment utilisés sont récapitulés dans le Tableau 4.3 suivant:

Tableau 4.3. Propriétés physiques du ciment et du filler de calcaire.

Propriétés physiques	Filler de calcaire	Ciment
Masse volumique apparente (g/cm ³)	0.878	3.09
Masse volumique Absolue (g/cm ³)	2.63	1.125

4.3.4 Superplastifiant

Le superplastifiant utilisé est MEDAFLOW 30 développé par la société GRANITEX en Algérie. C'est un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération, sous forme de liquide et d'une couleur jaunâtre, conforme à la norme EN 934-2 [AFONR, 2002] et conçu à base de polycarboxylates. La densité, le pH et l'extrait sec du superplastifiant sont respectivement 1.07, 6.5 et 30 %.

MEDAFLOW 30 permet de diminuer le rapport eau/ciment (E/C) tout en améliorant considérablement la fluidité du béton. Il permet aussi d'augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme.

La plage de dosage recommandée du MEDAFLOW 30 est de 0.5 à 2 %. Toutefois, le dosage optimal doit être recherché selon le type de béton et les propriétés recherchées.

4.3.5 Eau de gâchage

Nous avons utilisé pour la totalité de nos essais une eau potable du réseau domestique sans aucun traitement supplémentaire.

L'eau du robinet est utilisée pour la confection des mortiers autoplaçants. Cette eau est potable et propre à la consommation. De plus, elle renferme toutes les prescriptions de la norme P18-303.

4.4 Formulation du mortier autoplaçant

4.4.1 Détermination du dosage optimal du superplastifiant

A l'aide des essais de fluidité de la composition du MAP de référence, nous avons pu déterminer le dosage optimal en superplastifiant. La composition de référence est celle qui contient 100% du sable alluvionnaire. Les essais réalisés pour la détermination du dosage optimal de superplastifiant sont : l'essai d'étalement au mini cône et l'essai du temps d'écoulement au mini V-funnel. Les résultats des essais effectués sont récapitulés dans le **Tableau 4. 4** suivant :

Tableau 4. 4. Résultats des essais préliminaires.

Dosage en superplastifiant (%)	Etalement (cm)	Temps d'écoulement (s)
0.8	14.0	10.0
1	20.2	8.0
1.1	25.0	5.2
1.2	38.0	1.6

D'après ces essais préliminaires, nous avons choisi le pourcentage de 1.2 % pour la formulation des mélanges des essais.

4.4.2 Détermination des dosages

Après avoir fixé le dosage en superplastifiant, en se basant sur la méthode japonaise nous avons pu déterminer les différents dosages des constituants de la composition de référence. Ces dosages sont présentés dans le **Tableau 4.5** suivant :

Tableau 4.5. Les dosages des constituants du mortier pour un dosage de 1m³.

Dosage pour 1m ³	
Sable (g)	1000
Ciment (g)	656.7
Filler de calcaire (g)	131.3
Superplastifiant (g)	7.9
Eau (litre)	319.7

4.4.3 Les proportions des mélanges

Quinze compositions selon le plan de mélange ont été préparés pour cette étude (**Tableau 4.6**), pour tous les mélanges les dosages du ciment, filler de calcaire, superplastifiant et eau sont constants (656.7 kg/m³, 131.3 kg/m³, 7.9 kg/m³, 319.7 kg/m³ respectivement). La **Figure 4.16** montre les différentes proportions des sables et de déchet de plastique utilisées lors de la confection de chaque mélange qui ont été obtenues grâce au plan de mélange (plan d'expérience).

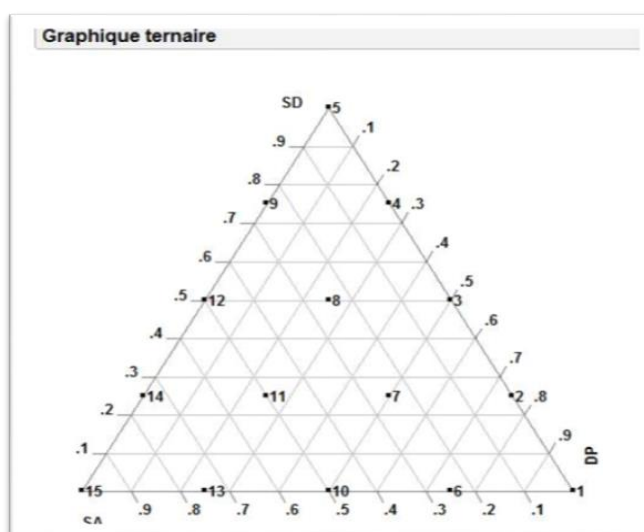


Figure 4.16. Illustration de graphique ternaire et des 15 mélanges d'essai.

Tableau 4.6. Les différentes proportions des granulats.

N° de mélange	Proportions des granulats pour 1m ³					
	SA		SD		DP	
	Pourcentage (%)	Masse (g)	Pourcentage (%)	Masse (g)	Pourcentage (%)	Masse (g)
1	0	0	0	0	100	364
2	0	0	25	252.6	75	273
3	0	0	50	505.2	50	182
4	0	0	75	757.8	25	91
5	0	0	100	1010.4	0	0
6	25	250	0	0	75	273
7	25	250	25	252.6	50	182
8	25	250	50	505.2	25	91
9	25	250	75	757.8	0	0
10	50	500	0	0	50	182
11	50	500	25	252.6	25	91
12	50	500	50	505.2	0	0
13	75	750	0	0	25	91
14	75	750	25	252.6	0	0
15	100	1000	0	0	0	0

4.5 Procédure de malaxage

Les propriétés rhéologiques varient énormément selon le mode de malaxage et le dosage des constituants employés. Avant tout travail, le mode de malaxage doit être désigné selon les moyens disponibles et la quantité de mortiers à préparer. Un malaxeur à axe vertical de capacité 3 litres (**Figure 4.17**) est utilisé pour la confection des mortiers autoplaçants. Cet appareil normalisé (EN 196-1), sur lequel se basent pratiquement toutes les normes pour la préparation du mortier, est caractérisé par deux vitesses de rotation selon le mode de préparation choisi.

La procédure de malaxage et le mode d'introduction de l'adjuvant utilisé pour fabriquer les mortiers autoplaçants sont décrits ci-dessous. Tous les mélanges ont été confectionnés selon les étapes suivantes :

1. Introduire en premier le ciment, le sable et l'addition dans la cuve du malaxeur et mélanger le tout à sec pendant 1 min à vitesse lente.
2. Ajouter les 2/3 de l'eau de gâchage et malaxer pendant 1 min à vitesse lente.
3. Introduire le 1/3 de l'eau de gâchage plus la quantité du superplastifiant progressivement en malaxant pendant 1 min.
4. Malaxer pendant 2 minutes à vitesse rapide.
5. Préparer le mortier à l'essai d'étalement et de rhéologie.



Figure 4.17. Malaxeur à axe vertical.

4.6 Procédures des essais

Dans ce qui suit, nous allons décrire les procédures des expériences menées dans notre travail en deux parties. Dans la première partie, nous présentons les procédures d'essais réalisées sur les mortiers autoplaçants à l'état frais. La deuxième partie est consacrée aux procédures des essais réalisées à l'état durci.

4.6.1 Essais sur mortier autoplaçant à l'état frais

4.6.1.1 Essai d'étalement au Mini-Cône

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur une surface horizontale lisse, une fois le moule soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaire (**Figure 4.18**), la moyenne est retenue [**Belaidi, 2013**].

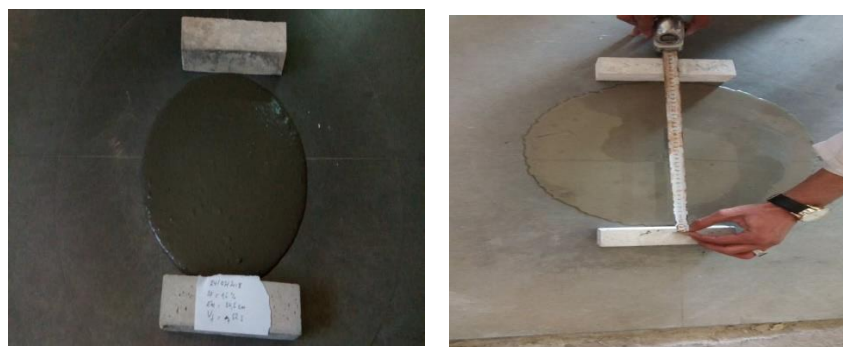


Figure 4.18. Essai d'étalement au mini cône.

4.6.1.2 Essai d'écoulement au mini v-funnel

Dans l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), l'entonnoir est rempli de mortier (1,1 litre). Le temps d'écoulement est calculé entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir (Figure 4.19) [Belaidi, 2013].



Figure 4.19. Essai d'écoulement au mini v-funnel.

4.6.1.3 Essai de mesure de la masse volumique apparente

C'est la masse de l'unité de volume (y compris les vides), elle est notée ρ_{app} et donnée par :

$$\rho_{app} = \frac{M}{V} \quad \text{Eq (4.18)}$$

Où **M** : Masse du mortier autoplaçant.

V : Volume total de l'échantillon.

La détermination de la masse volumique apparente peut se faire en utilisant un récipient standard de volume connu 1l (1dm³) et on pèse la masse totale M_T .

La masse de l'échantillon M sera :

$$M = M_T - M_R \quad \text{Eq (4.19)}$$

Où M_R est la masse du récipient.

Pour chaque mélange, on a mesuré la masse volumique apparente comme le montre la **Figure 4.20**.



Figure 4.20. Essai de mesure de la masse volumique apparente.

4.6.1.4 Essai au rhéomètre

Pour déterminer, expérimentalement, le comportement rhéologique des mortiers, on a utilisé un agitateur rotatif, Heidolph-RZR 2102 Control Z.



a) Dispositif d'essai.



b) Agitateur RZR-2102.



c) Croisillon

d) Récipient

Figure 4.21. Dispositif du rhéomètre utilisé (a, b, c, d).

Ce rhéomètre présenté sur la (Figure 4.21) est composé d'un agitateur, un croisillon de dimensions 5×10 cm et d'un récipient cylindrique de dimension 10×15 cm.

L'essai rhéologique s'effectue avec un profil de vitesse de rotation décroissante. Au début de l'essai, la vitesse maximale est appliquée pour éliminer l'influence de la thixotropie plus rapidement toutes les secondes, le logiciel enregistre le moment de rotation (M) correspond à la vitesse de rotation (Ω) imposée.

L'essai rhéologique se déroule selon les étapes suivantes :

- 1^{ère} étape : mesure des couples à vide (M_{vide}). Ils correspondent aux couples à imposer pour maintenir les vitesses en phase de palier lorsque le récipient est vide.
- 2^{ème} étape : positionnement de la pale. Elle est centrée (suivant le diamètre du récipient) puis plongée au milieu de la pale jusqu'à l'arase du MAP.
- 3^{ème} étape : mesure des couples totaux (M_{totale}). Ils correspondent aux couples à imposer pour maintenir les vitesses en phase de palier lorsque le récipient est rempli.
- 4^{ème} étape : calcul des couples finals (M). Les couples finals s'obtiennent par la différence entre les couples totaux et les couples à vides pour chaque palier de vitesse.
- 5^{ème} étape : exploitation des mesures et calcul des paramètres rhéologiques.

4.6.2 Essais sur mortier autoplaçant à l'état durci

4.6.2.1 Confection et conservation des éprouvettes des mortiers autoplaçants (MAP)

Lorsque la procédure de malaxage est achevée, et après avoir fait tous les essais relatifs aux mortiers à l'état frais, des éprouvettes de types prismatiques (4×4×16) sont coulées (Figure 4.22) sans compactage pour réaliser les essais relatifs aux mortiers à l'état durci. Après 24 heures, les éprouvettes ont été démoulés, et immergés ensuite dans l'eau jusqu'à l'échéance de l'essai.

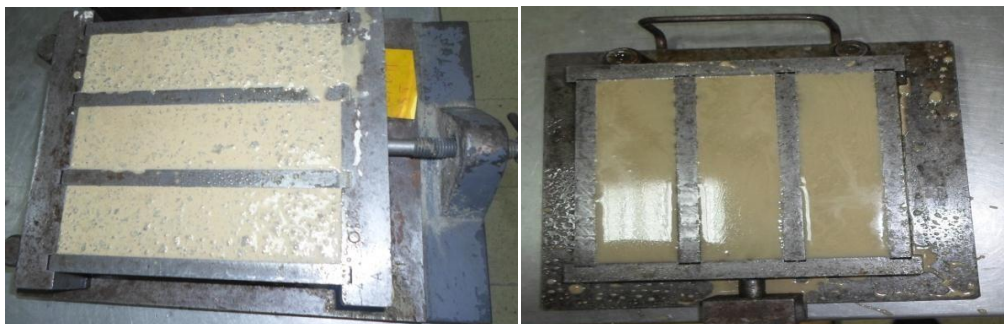


Figure 4.22. Confection des éprouvettes.

4.6.2.2 Essais de Résistance à la flexion (flexion 3 points)

L'essai est réalisé sur des éprouvettes prismatiques (4×4×16) cm³ selon la norme NF P. 18-407 [Daligang, 2000], La machine d'essais de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 100 KN avec une vitesse de mise en charge de 50 N/sec ± 10N/sec.

La machine doit être pourvue d'un dispositif de flexion tel que celui schématisé sur la Figure 4.23.

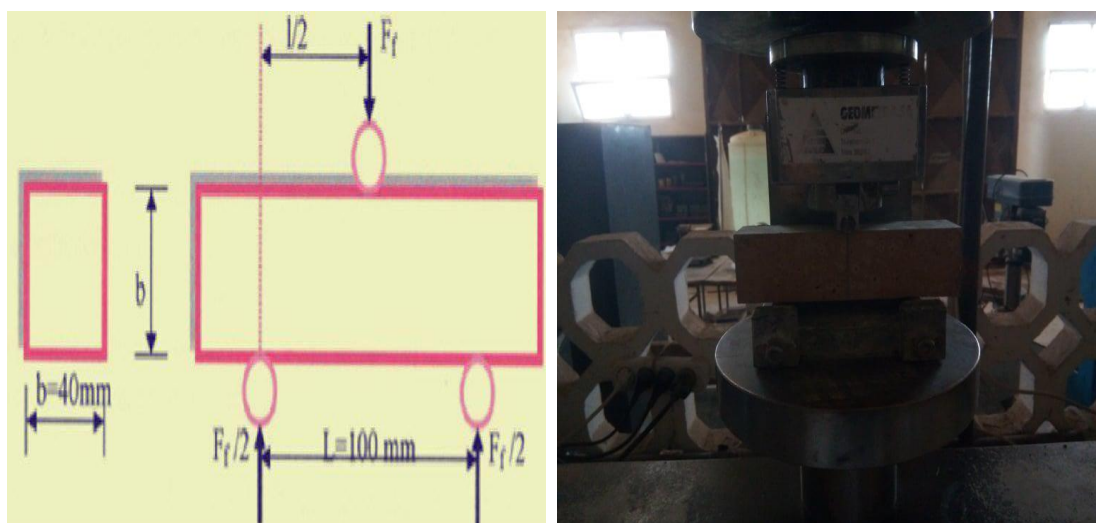


Figure 4.23. Schématisation du dispositif de flexion 3 points.

La résistance à la flexion est calculée par la formule de la R.D.M suivante :

$$R_f \text{ (MPa)} = \frac{1.5 F l}{b^3} \quad \text{Eq (4.20)}$$

- **L** : Distance entre axe des rouleaux d'appuis de l'éprouvette 40x40x160 mm³ (L= 100 mm).

- R_f : Résistance à la flexion en MPa.
- F : Charge à la rupture en N.
- b : Largeur de la section carrée du prisme en mm ($b = 40$ mm).

4.6.2.3 Essais de Résistance à la compression

Les essais de résistance à la compression par écrasement ont été effectués sur les six morceaux d'éprouvettes obtenus après rupture en flexion conformément à la norme NFP 18-406 [Daligang, 2000].

L'écrasement des morceaux est fait sur une presse hydraulique de vitesse de chargement force 2400 N/s \pm 200 N/s.

La résistance à la compression est calculée par la formule suivante :

$$R_c = \frac{F_c}{A} \text{ en (MPa)} \quad \text{Eq (4.21)}$$

- R_c : Résistance à la compression en MPa.
- F_c : Charge à la rupture en N.
- A : l'aire des plateaux ou des plaques auxiliaires en mm^2 (1600 mm^2).

La **Figure 4.24** montre le dispositif de l'écrasement par compression :



Figure 4.24. Schématisation du dispositif de compression.



CHAPITRE 5:

Résultats et interprétations.

Chapitre 5 : Résultats et interprétations

5.1 Introduction

Dans cette partie, nous présentons les résultats des essais et la discussion de ces résultats. L'influence de différents paramètres étudiés (sable alluvionnaire (SA), sable de dune (SD) et déchet de plastique (DP)) sur les propriétés à l'état frais des mélanges de MAP (l'étalement, le temps d'écoulement, la masse volumique apparente, les paramètres rhéologiques : seuil de cisaillement (τ) et la viscosité plastique (V_p)) (selon trois modèles : Bingham, Bingham modifié et Hershel-bulkely) et les propriétés à l'état durci (la résistance mécanique à la flexion (R_f) et la résistance mécanique à la compression (R_c)) en appliquant la méthode basée sur les plans d'expériences.

5.2 Préparation de l'étude

Le travail consiste à étudier l'influence des paramètres de formulation (proportions de SA, SD et DP) sur les propriétés rhéologique et physico-mécanique et d'établir les relations entre ces propriétés et les facteurs étudiés du mortier autoplaçant.

5.3 Choix des réponses

On désigne par réponse toutes grandeurs mesurées en variant les paramètres de l'étude. Comme cité ci-dessus, Les réponses choisies sont :

- Etalement (cm).
- Temps d'écoulement (s).
- Masse volumique apparente (kg/m^3).
- Seuil de cisaillement, selon trois modèles (τ) en (Pa).
- Viscosité plastique, selon trois modèles (V_p) en (cP).
- Résistance mécanique à la flexion (R_f) en (MPa).
- Résistance à la compression (R_c) en (MPa).

5.4 Choix des facteurs

Les facteurs étudiés, qui seront utilisés dans les modèles mathématiques des réponses sont:

- Sable alluvionnaire (SA).
- Déchet de plastique (DP).
- Sable de dune (SD).

5.5 Résultats des essais

Les résultats des essais sur les mortiers autoplaçants en fonction de paramètres étudiés sont récapitulés dans les **Tableau 5.1** et **Tableau 5.2** suivants:

Tableau 5.1. Résultats des essais physico-mécaniques.

Résultats des essais physico-mécaniques					
N°	Etalement (cm)	Temps d'écoulement (s)	Masse volumique apparente (kg/m ³)	Résistance à la compression Rc 28j (MPa)	Résistance à la flexion Rf 28j (MPa)
1	39.5	7	1550	0	0
2	38.1	6.4	1780	2	2.78
3	33	4.1	1900	7.52	4.47
4	30.1	4.8	2020	20.28	6.72
5	26.5	16.6	2190	39.06	8.45
6	38.2	9.3	1640	1.88	2.92
7	36	4.6	1870	10.29	4.91
8	32	3.6	2030	23.59	7.16
9	29.8	3.8	2190	45.03	8.7
10	38.5	4.6	1870	18.65	5.52
11	34	2.6	2040	20.17	7.2
12	31	3.3	2200	51.9	8.9
13	38.1	2.1	2030	22.27	7.65
14	31.8	3	2210	52.49	9.23
15	38	1.6	2190	59.5	9.594

Tableau 5.2. Résultats des essais rhéologiques.

Résultats des essais rhéologiques						
N°	Bingham		Bingham modifié		Herschel-Bulkley	
	Tau B (Pa)	Vp B (cP)	Tau Bm (Pa)	Vp Bm (cP)	Tau HB (Pa)	Vp HB (cP)
1	.	.	2.564	0.202	.	.
2	13.637	0.154	10.704	0.397	0	8.527
3	0.705	0.24	1.783	0.151	2.673	0.031
4	-2.587	0.387	-0.416	0.208	0.679	0.045
5	-6.981	0.851	1.118	0.181	2.049	0.034
6	14.613	0.075	11.941	0.296	0	10.997
7	4.872	0.117	3.848	0.201	2.703	0.835
8	-0.246	0.201	.	.	2.666	0
9	-4.358	0.493	-2.125	0.308	0	0.025
10	4.296	0.095	4.804	0.053	4.999	0.022
11	0.105	0.166	0.189	0.159	0.465	0.113
12	-2.75	0.326	0.129	0.087	0.581	0.016
13	1.081	0.045	1.196	0.035	1.307	0.014
14	-1.29	0.265	0.388	0.126	1.03	0.026
15	-1.435	0.1	-0.319	0.007	0	0

La préparation et l'analyse des résultats des expériences, réalisées selon les compositions du **Tableau 5.1** et **Tableau 5.2**, sont effectuées à l'aide du logiciel statistique **JMP7**. Nous présentons ci-dessous les résultats des modélisations effectuées :

5.5.1 Modèles mathématiques

Les coefficients issus de la modélisation, les coefficients de corrélation (R^2), les rapports-t et les probabilités p-value des réponses sont regroupés dans les **Tableau 5.3**, **Tableau 5.4** et **Tableau 5.5** Erreur ! Source du renvoi introuvable. D'après ces tableaux, les modèles retenus des réponses s'écrivent respectivement comme suit :

$$\begin{aligned} \text{Eta (cm)} = & 37.354286 * SA + 26.975714 * SD + 39.768571 * DP - 6.371429 * SA \\ & * SD - 1.371429 * SA * DP + 1.4571429 * SD * DP \end{aligned} \quad \text{Eq (5.1)}$$

$$\begin{aligned} V - \text{Funnel (s)} = & 1.76 * SA + 13.86 * SD + 8.86 * DP - 20.17143 * SA * SD \\ & + 0.9714286 * SA * DP - 28.8 * SD * DP \end{aligned} \quad \text{Eq (5.2)}$$

$$MV \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) = 2.2056429 * SA + 2.1745714 * SD + 1.5499286 * DP + 0.0385714 * SA * SD - 0.14 * SA * DP + 0.17 * SD * DP \quad \text{Eq (5.3)}$$

$$Rc \text{ 28j (MPa)} = 56.553871 * SA + 39.887371 * SD + 1.9522643 * DP + 3.0377143 * SA * SD - 73.43186 * SA * DP - 54.77443 * SD * DP \quad \text{Eq (5.4)}$$

$$Rf \text{ 28j (MPa)} = 9.5782371 * SA + 8.4632943 * SD + 0.0916943 * DP - 0.358057 * SA * SD + 2.4362286 * SA * DP + 1.7021714 * SD * DP \quad \text{Eq (5.5)}$$

$$\text{Tau B (Pa)} = -1.336861 * SA - 6.809147 * SD + 26.461235 * DP + 7.3971429 * SA * SD - 27.95897 * SA * DP - 27.92126 * SD * DP \quad \text{Eq (5.6)}$$

$$Vp \text{ B(Cp)} = 0.1294034 * SA + 0.8014034 * SD + 0.2194118 * DP - 0.506286 * SA * SD - 0.445277 * SA * DP - 1.199563 * SD * DP \quad \text{Eq (5.7)}$$

$$\text{Tau Bm (Pa)} = -0.858095 * SA + 0.562548 * SD + 7.1483333 * DP + 1.230571 * SA * SD + 10.118095 * SA * DP + 0.7425714 * SD * DP \quad \text{Eq (5.8)}$$

$$Vp \text{ Bm(Cp)} = -0.014201 * SA + 0.1941366 * SD + 0.2890852 * DP + 0.3606165 * SA * SD + 0.073303 * SA * DP - 0.0034737 * SD * DP \quad \text{Eq (5.9)}$$

$$\text{Tau BH (Pa)} = 0.0078697 * SA + 1.2923697 * SD - 2.681706 * DP - 1.299714 * SA * SD + 16.713496 * SA * DP + 9.5223529 * SD * DP \quad \text{Eq (5.10)}$$

$$Vp \text{ BH (Cp)} = 0.0696429 * SA + 0.4443571 * SD + 20.515 * DP + 0.5211429 * SA * SD - 32.22486 * SA * DP - 36.50429 * SD * DP \quad \text{Eq (5.11)}$$

Tableau 5.3. Coefficients et paramètres des modèles des réponses physico-mécaniques

Facteurs du modèle	Etalement (cm)			Temps d'écoulement (s)			Résistance à la compression Rc 28j (MPa)			Résistance à la flexion Rf 28j (MPa)		
	R ² =0.96			R ² =0.78			R ² =0.97			R ² =0.99		
	Estim.	Rapport t	Prob.> t	Estim.	Rapport t	Prob.> t	Estim.	Rapport t	Prob.> t	Estim.	Rapport t	Prob.> t
SA	37.354286	41.91	<.0001	1.76	0.92	0.3802	56.553871	14.89	<.0001	9.5782371	71.15	<.0001
SD	26.975714	30.27	<.0001	13.86	7.27	<.0001	39.887371	10.50	<.0001	8.4632943	62.87	<.0001
DP	39.768571	44.62	<.0001	8.86	4.65	0.0012	1.9522643	0.51	0.6197	0.0916943	0.68	0.5129
SA*SD	-6.371429	-1.68	0.1273	-20.17143	-2.48	0.0347	3.0377143	0.19	0.8551	-0.358057	-0.62	0.5475
SA*DP	-1.371429	-0.36	0.7260	0.9714286	0.12	0.9074	-73.43186	-4.54	0.0014	2.4362286	4.25	0.0021
SD*DP	1.4571429	0.38	0.7098	-28.8	-3.55	0.0062	-54.77443	-3.39	0.0080	1.7021714	2.97	0.0157

Tableau 5.4. Coefficients et paramètres des modèles des réponses selon Bingham et masse volumique.

Facteurs du modèle	Masse volumique apparente (kg/m ³)			Tau B (Pa)			Vp B (cP)		
	R ² = 0.99			R ² =0.98			R ² =0.97		
	Estim.	Rapport t	Prob.> t	Estim.	Rapport t	Prob.> t	Estim.	Rapport t	Prob.> t
SA	2205.4286	92.82	<.0001	-1.336861	-1.33	0.2200	0.1294034	3.01	0.0168
SD	2173.2857	91.47	<.0001	-6.809147	-6.78	0.0001	0.8014034	18.63	<.0001
DP	1550.4286	65.26	<.0001	26.461235	13.04	<.0001	0.2194118	2.53	0.0354
SA*SD	42.857143	0.42	0.6816	7.3971429	1.74	0.1203	-0.506286	-2.78	0.0239
SA*DP	-140	-1.38	0.1996	-27.95897	-4.79	0.0014	-0.445277	-1.78	0.1126
SD*DP	165.71429	1.64	0.1357	-27.92126	-4.78	0.0014	-1.199563	-4.80	0.0014

Tableau 5.5. Coefficients et paramètres des modèles des réponses selon rhéologiques.

Facteurs du modèle	Tau Bm (Pa)			Vp Bm (cP)			Tau HB (Pa)			Vp HB (cP)		
	R ² =0.56			R ² =0.58			R ² =0.44			R ² =0.90		
	Estim.	Rapport t	Prob.> t	Estim.	Rapport t	Prob.> t	Estim.	Rapport t	Prob.> t	Estim.	Rapport t	Prob.> t
SA	-0.858095	-0.28	0.7864	-0.014201	-0.18	0.8635	0.0078697	0.01	0.9951	0.0696429	0.06	0.9567
SD	-0.562548	-0.19	0.8578	0.1941366	2.44	0.0403	1.2923697	1.05	0.3248	0.4443571	0.36	0.7299
DP	7.1483333	2.33	0.0478	0.2890852	3.61	0.0068	-2.681706	-1.08	0.3124	20.515	8.18	<.0001
SA*SD	-1.230571	-0.09	0.9288	0.3606165	1.03	0.3313	-1.299714	-0.25	0.8095	0.5211429	0.10	0.9236
SA*DP	10.118095	0.77	0.4625	-0.073303	-0.21	0.8360	16.713496	2.34	0.0478	-32.22486	-4.46	0.0021
SD*DP	0.7425714	0.06	0.9570	0.0034737	0.01	0.9923	9.5223529	1.33	0.2200	-36.50429	-5.06	0.0010

5.5.2 Analyse de la variance

Les analyses de la variance de chacune des réponses modélisées sont présentées dans les **Tableau 5.6** et **Tableau 5.7** suivants :

Tableau 5.6. Analyse de la variance des réponses.

Réponse	Source de variation	Degré de liberté (DDL)	Somme des carrés des écarts (SCE)	Rapport <i>F</i>
Eta (cm)	Modèle	5	218.84762	41.7218
	Résidus	9	9.44171	Prob. > F
	Total	14	228.28933	<.0001
V-Funnel (s)	Modèle	5	152.57429	6.3511
	Résidus	9	43.24171	Prob. > F
	Total	14	195.81600	0.0086
Mv apparente (kg/m³)	Modèle	5	608183.33	163.1490
	Résidus	9	6710.00	Prob. > F
	Total	14	614893.33	<.0001
R_c 28j (MPa)	Modèle	5	5403.0882	56.6965
	Résidus	9	171.5373	Prob. > F
	Total	14	5574.6255	<.0001
R_f 28j (MPa)	Modèle	5	109.25098	912.9731
	Résidus	9	0.21540	Prob. > F
	Total	14	109.46638	<.0001

Tableau 5.7. Analyse de la variance des réponses.

Réponse	Source de variation	Degré de liberté (DDL)	Somme des carrés des écarts (SCE)	Rapport <i>F</i>
Tau B (Pa)	Modèle	5	490.96513	74.3705
	Résidus	8	10.56258	Prob. > F
	Total	13	501.52771	<.0001
Vp B (cP)	Modèle	5	0.58128844	48.0590
	Résidus	8	0.01935249	Prob. > F
	Total	13	0.60064093	<.0001
Tau Bm (Pa)	Modèle	5	123.44479	2.0265
	Résidus	8	97.46453	Prob. > F
	Total	13	220.90932	0.1788
Vp Bm (cP)	Modèle	5	0.09117774	2.1923
	Résidus	8	0.06654262	Prob. > F
	Total	13	0.15772036	0.1548
Tau HB (Pa)	Modèle	5	12.456243	1.2554
	Résidus	8	15.874893	Prob. > F
	Total	13	28.331136	0.3682
Vp HB (cP)	Modèle	5	147.64113	14.6207
	Résidus	8	16.15689	Prob. > F
	Total	13	163.79802	0.0008

5.5.3 Présentation des résultats

5.5.3.1 Etalement (cm)

La **Figure 5.1** montre un exemple de la variation de diamètre d'étalement (cm) du mortier autoplaçant en fonction du dosage de sable alluvionnaire, sable de dune et déchet de plastique.

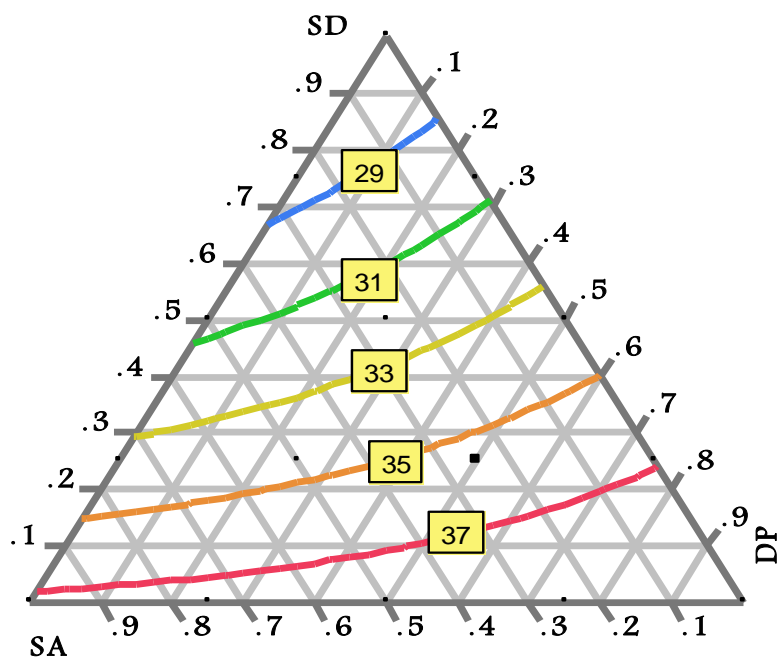


Figure 5.1. Graphique ternaire de l'étalement (cm) en fonction des dosages de SD, SA et DP.

L'étalement est trop influencé par ordre, par le dosage du DP, SA et SD et l'interaction entre le SD et le DP comme le montre **Tableau 5.3**. D'après la **Figure 5.1**, l'augmentation de DP dans le système binaire SD-DP et SA-DP ou dans le système ternaire SA-SD-DP mène à l'augmentation du diamètre d'étalement, ainsi qu'on remarque que le SD cause une diminution du diamètre d'étalement. Le même effet remarquable dans le système binaire SD-SA et SD-DP ou dans le système ternaire SA-SD-DP avec des pourcentages de 50% ou plus.

L'augmentation de l'étalement en fonction du déchet de plastique, est peut être due à l'absorption nul du déchet de plastique. Par contre, l'augmentation du sable de dune diminue le diamètre d'étalement, cette diminution de l'étalement est probablement due à la finesse de sable de dune qui nécessite une quantité plus importante en eau et en pâte afin d'atteindre une grande fluidité [Bouziyani , 2013].

5.5.3.2 Temps d'écoulement au mini V-Funnel (s)

La variation du temps d'écoulement au mini v-Funnel (s) du mortier autoplaçant est présenté par la Figure 5.2 .

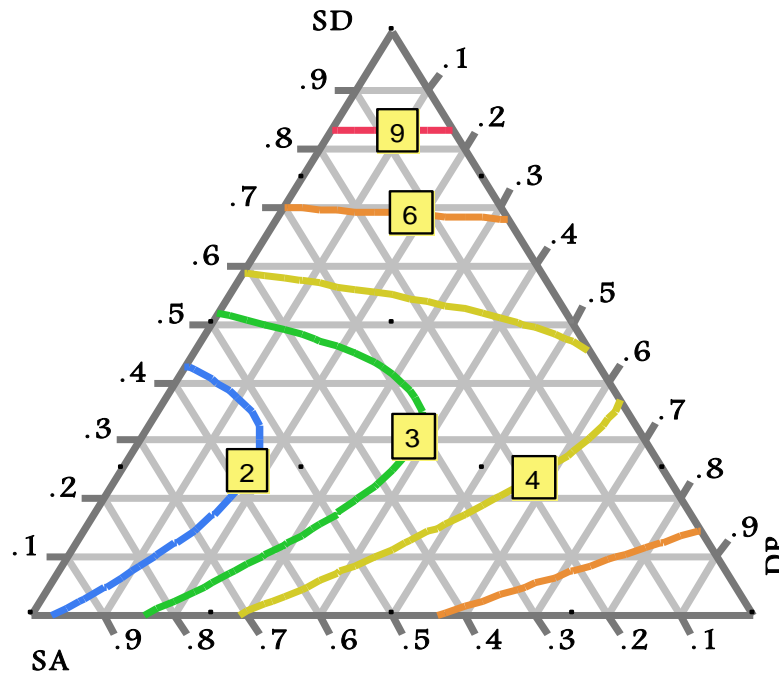


Figure 5.2. Graphique ternaire du temps d'écoulement au mini v-Funnel (s) en fonction du dosage de SD, SA et DP.

D'après cette figure, On remarque que tous les mortiers enregistrent des valeurs du temps d'écoulement dans le domaine recommandé de 2 à 10 secondes [Benabed et al, 2012]. Par contre, le mortier autoplaçant qui contient 100% de sable dunaire, on a observé un blocage du mortier à travers l'entonnoir et une perte totale de fluidité. Ainsi on remarque que l'augmentation du SA dans les mélanges binaires SA-SD conduit à une diminution du temps d'écoulement.

L'augmentation du temps d'écoulement causé par l'augmentation du dosage de sable dunaire est peut être due à la perte de fluidité cela est probablement due à la grande finesse (0.85) du sable de dune [Benabed et al, 2012 ; Bouziani , 2013 ; Tobes et al , 2007].

Par contre, l'augmentation du sable alluvionnaire diminue le temps d'écoulement. Cette diminution est probablement due à la granulométrie du sable alluvionnaire parce qu'il est plus grossier que le sable de dune ce qui est en accord avec les constatations de [Tobes et al , 2007].

5.5.3.3 Masse volumique apparente (kg/m³)

La Figure 5.3 représente le graphique ternaire de la masse volumique apparente (kg/m³) en fonction du dosage SD, SA et DP.

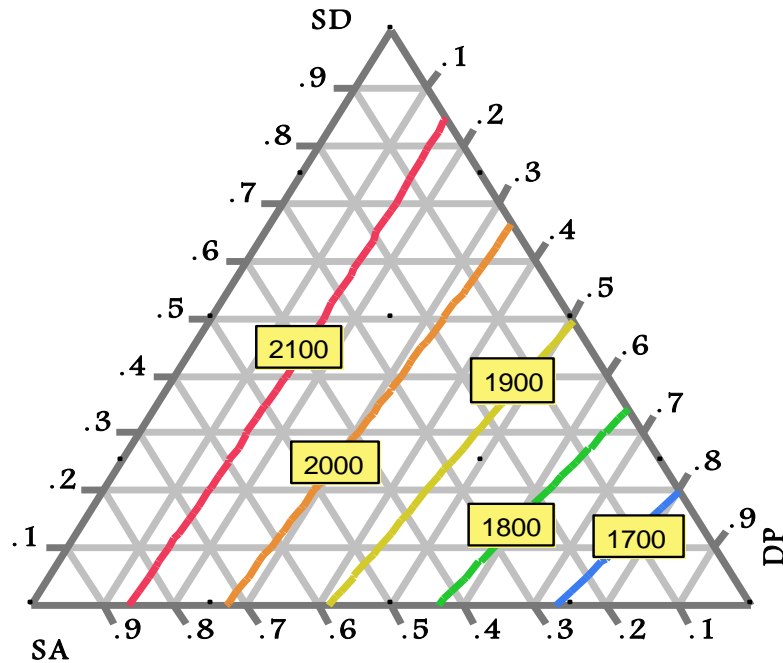


Figure 5.3. Graphique ternaire de la masse volumique apparente (g/cm³) en fonction du dosage de SD, SA et DP.

Nous constatons d'après cette figure que la masse volumique apparente augmente en fonction du dosage du sable alluvionnaire et diminue en fonction du déchet de plastique. Ainsi, on remarque que l'augmentation du déchet de plastique dans les mélanges binaires SD-DP et SA-DP conduit à la diminution de la masse volumique apparente, ce qui mène à l'allègement du mortier autoplaçant [Hannawi et al, 2010 ; Safi, 2013].

La diminution et l'augmentation de la masse volumique apparente en fonction des différents facteurs est probablement due à leurs propre masse volumique apparente et peut être aussi à la variation de la porosité du mélange.

5.5.3.4 Résistance à la flexion R_f 28j (MPa)

Les résultats de la résistance à la flexion des mortiers autoplaçants à 28j confectionnés avec les deux types de sables et le déchet de plastique sont représentés sur la Figure 5. 4.

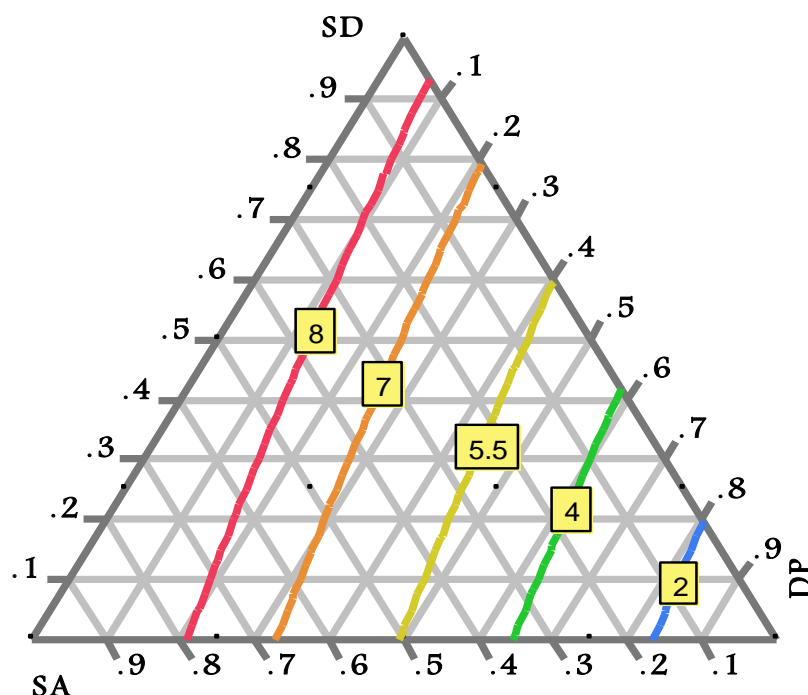


Figure 5. 4. Graphique ternaire de la résistance à la flexion $R_f 28j$ (MPa) en fonction du dosage de SD, SA et DP.

D'après cette figure on remarque que l'augmentation de SA conduit à l'augmentation de la résistance à la flexion. Par contre, dans les mélanges binaires SD-SA et SA-DP l'augmentation du DP et SD conduit à la diminution de la résistance à la flexion.

La diminution de la résistance à la flexion causée d'une part, par le sable de dune est peut être liée à sa finesse et d'autre part, l'accroissement du déchet de plastique augmente la porosité du mélange, ce qui influe négativement sur la résistance mécanique ce qui est en accord avec les constatations de [Safi, 2013].

5.5.3.5 Résistance à la compression $R_c 28j$ (MPa)

Les résultats de la résistance à la compression des mortiers autoplaçants à 28j confectionnés avec les différents types des granulats étudiés sont représentés sur la Figure 5.5.

On constate d'après ces résultats que les mortiers autoplaçants contenant des proportions élevées du sable alluvionnaire ont des résistances supérieures par rapport à ceux contenant des proportions élevé du sable dunaire et déchet de plastique. Les résultats montrent aussi une réduction de la résistance en compression avec l'augmentation du pourcentage de sable dunaire dans les mélanges binaires et ternaires. Ainsi qu'on remarque une diminution de la

Chapitre 5: Résultats et interprétation

résistance mécanique à la compression à 28 j en fonction de l'augmentation du dosage de déchet de plastique.

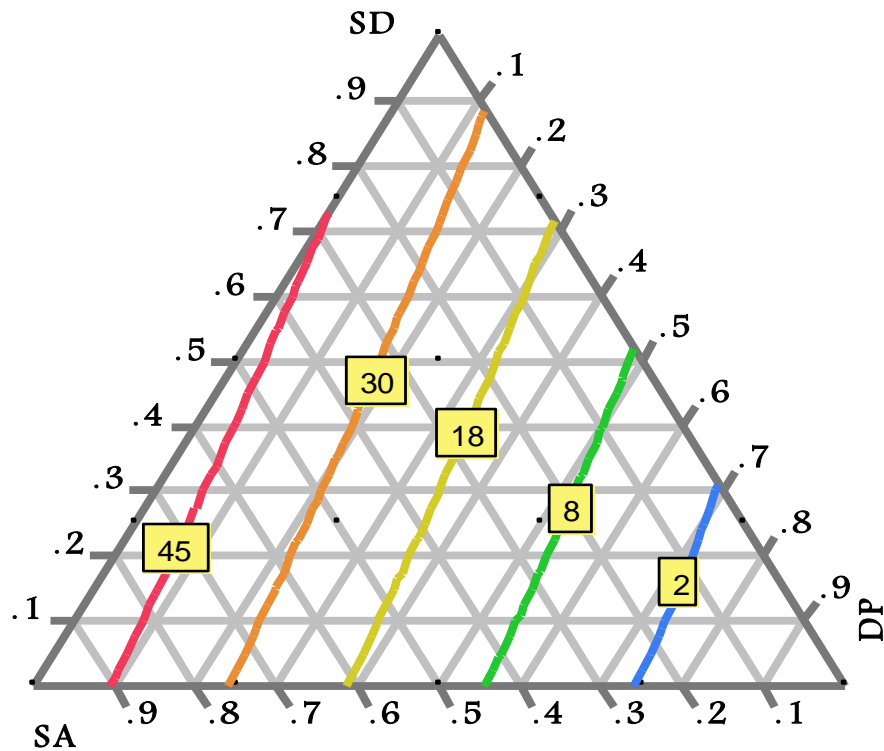


Figure 5.5. Graphique ternaire de la résistance à la compression R_c 28j (MPa) en fonction du dosage de SD, SA, DP.

La chute de la résistance résultant de l'ajout de sable dunaire est peut être liée à sa finesse, ce qui diminue la compacité des mortiers et par conséquent la résistance du matériau chute.

La diminution de la résistance mécanique à la compression en fonction de l'augmentation de déchet de plastique est probablement liée à la forme homométrique de ces grains (environ 74% classe 3.15mm) ce qui crée à son rôle de la porosité dans mélange granulaire ce qui est en accord avec les constatations de [Safi, 2013].

5.5.3.6 Seuil de cisaillement modèle de Bingham, Bingham modifié et Herschel-Bulkley (Pa)

La Figure 5.6 représente le graphique ternaire du seuil de cisaillement obtenus par les trois modèles Bingham, Bingham modifié et Herschel-Bulkley.

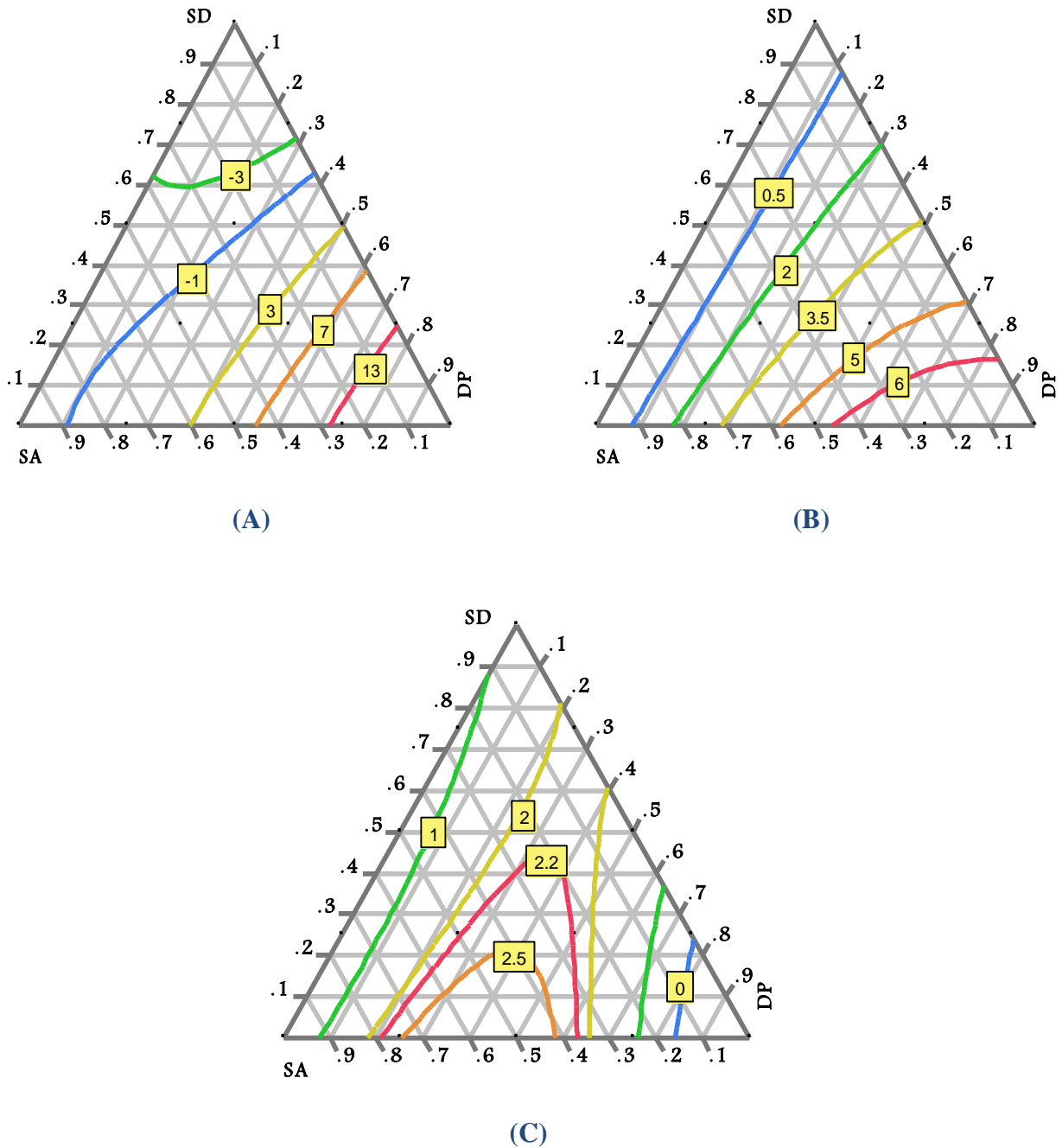


Figure 5.6. Graphique ternaire du seuil de cisaillement selon le modèle de Bingham (A), Bingham modifié (B) et Herschel-Bulkley (C) en fonction du dosage de SD, SA, DP.

Chapitre 5: Résultats et interprétation

D'après la **Figure 5.6(A)**, on constate que le seuil de cisaillement augmente avec l'augmentation de déchet de plastique et diminue avec l'augmentation du sable alluvionnaire, ainsi que l'augmentation du SD et SA dans les mélanges binaires SA-DP et SD-DP mène à une diminution du seuil de cisaillement.

Les mêmes constatations ont été faites pour les résultats obtenues par le modèle de Bingham modifié (**Figure 5.6(B)**).

Concernant le modèle de Herschel-Bulkley (**Figure 5.6(C)**), on remarque que le seuil de cisaillement augmente avec l'augmentation du déchet de plastique jusqu'à une valeur maximale (environ 2.5 Pa), ensuite elle diminue. Cette valeur maximale correspond à 30 jusqu'à 40% du déchet de plastique en systèmes binaire et ternaire avec les sables alluvionnaires et dunaire.

Les valeurs négatives du seuil de cisaillement trouvées (notamment dans le cas du Bingham et Bingham modifiée) sont probablement dues aux erreurs expérimentales (lors des mesures) et à la double modélisation. Plusieurs auteurs ont justifié ces valeurs négatives, parmi eux Heirman et al [2009] qui ont dit que ces valeurs négatives n'ont aucun sens physiquement et Hu et al [1996] qui ont supposé que les valeurs négatives abouti sont peut être attribué à l'extrapolation déterminée par l'équation de Bingham.

L'augmentation du seuil de cisaillement en fonction du déchet de plastique est peut être due à l'augmentation de la porosité du mélange ainsi que la diminution du seuil de cisaillement en fonction de sable de dune est probablement liée à sa finesse.

5.5.3.7 Viscosité plastique modèle de Bingham, Bingham modifié et Herschel-Bulkley (cP).

Les résultats de la viscosité plastique des différents mélanges issus des trois modèles sont représentés sur la **Figure 5.7**.

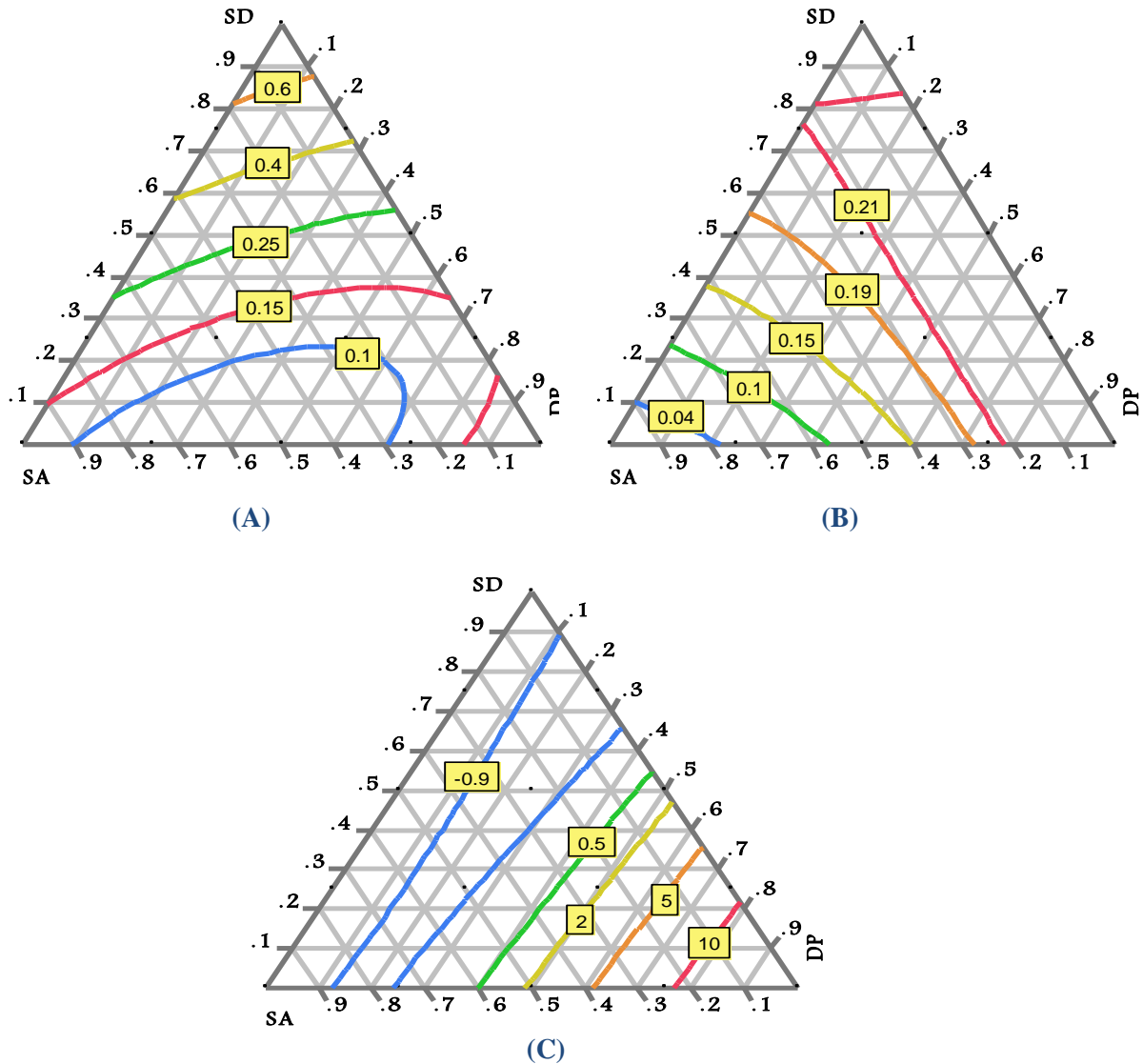


Figure 5.7. Graphique ternaire de la viscosité plastique modèle de Bingham (A), Bingham modifié (B) et Herschel-Bulkley (C) en fonction du dosage de SD, SA, DP.

Concernant les résultats obtenus par le modèle de Bingham, on constate que la viscosité plastique augmente en fonction de l'augmentation du sable dunaire dans les mélanges binaires SA-SD et SD-DP et ternaires SD-SA-DP. Par contre, l'augmentation de DP, dans le système binaire DP-SD conduit à la diminution de la viscosité plastique, mais dans le système binaire DP-SA conduit à la diminution de la viscosité plastique jusqu'à une valeur minimale (qui correspond à environ 60% SA et 40% DP), puis elle augmente (**Figure 5.7(A)**).

D'après les résultats obtenus par le modèle de Bingham modifié (**Figure 5.7(B)**), on remarque que l'augmentation du SD dans les mélanges binaires SA-SD et SD-DP conduit à une augmentation de la viscosité plastique.

Chapitre 5: Résultats et interprétation

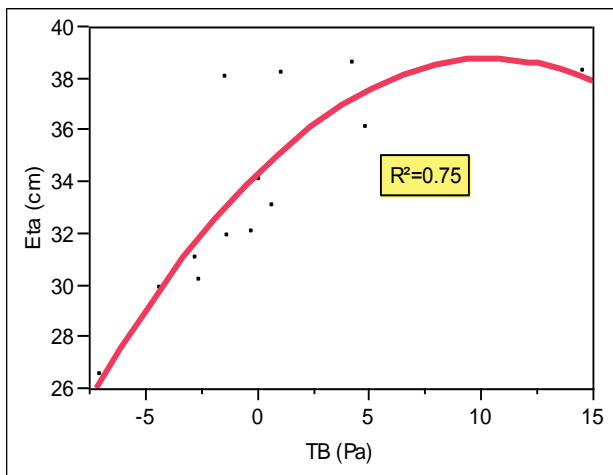
Le dernier graphique ternaire obtenu par le modèle de Herschel-Buckley (**Figure 5.7(C)**) montre que l'augmentation du SA dans le mélange binaire DP-SA conduit à la diminution de la viscosité plastique. De la même manière, l'augmentation de DP dans le mélange binaire SD-DP conduit à l'augmentation de la viscosité plastique.

L'augmentation de la viscosité plastique en fonction du sable de dune est peut-être due à la perte de fluidité cela est probablement due à la grande finesse du sable de dune qui demande de son rôle une grande quantité d'eau.

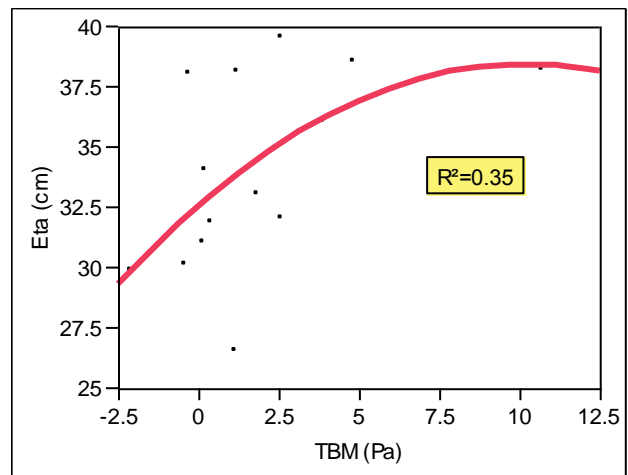
Les faibles valeurs des paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité plastique) obtenues sont probablement dues à l'excès de pâte.

5.5.3.8 Corrélations entre l'étalement et le seuil de cisaillement obtenu selon trois modèles

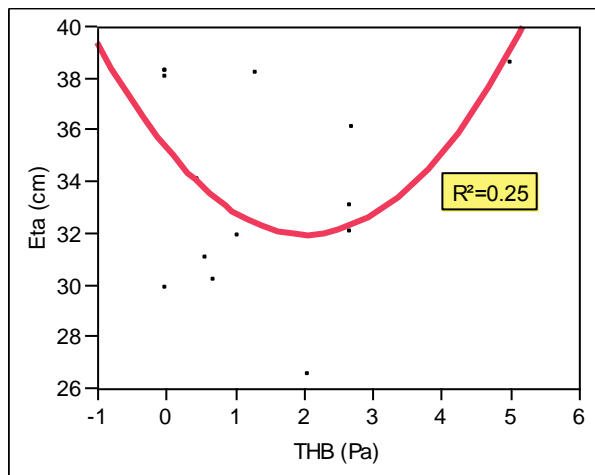
La représente les résultats de corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement obtenu par les trois modèles.



(A)



(B)



(C)

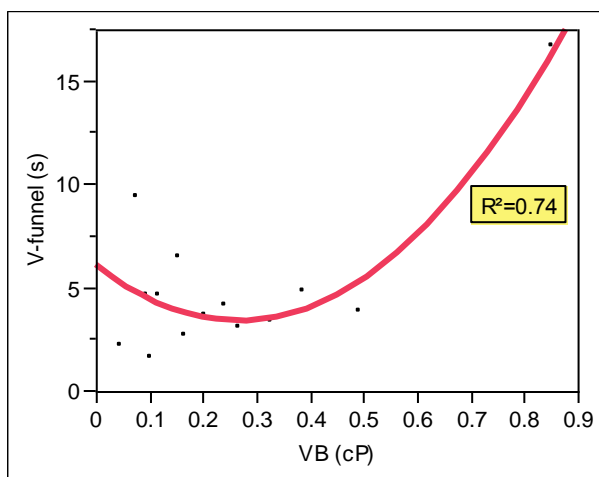
Figure 5.8. Corrélation entre étalement et le seuil de cisaillements obtenus par les trois modèles (A, B, C).

Les relations de corrélation sont données par :

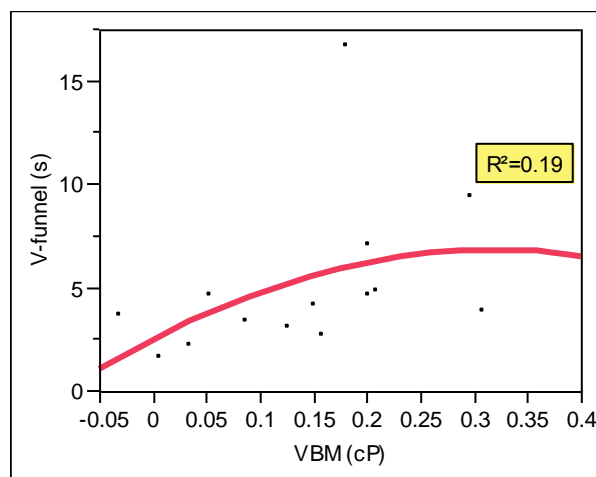
$$\text{Eta (cm)} = 34.373836 + 0.7421497 \cdot \text{TB (Pa)} - 0.041126 \cdot (\text{TB (Pa)} - 1.40443)^2 \quad \text{Eq (5.12)}$$

5.5.3.9 Corrélation entre le temps d'écoulement la viscosité plastique obtenues selon trois modèles

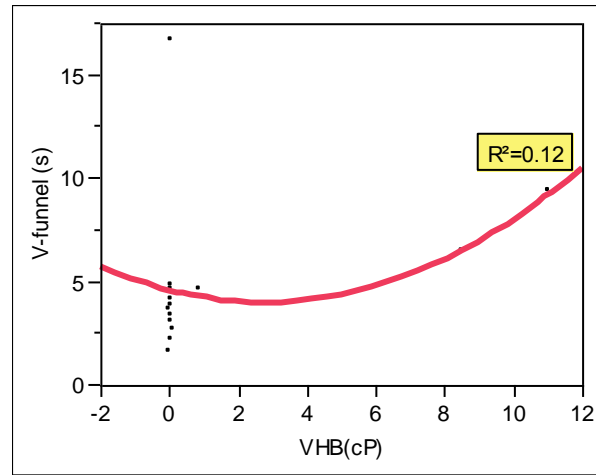
La Figure 5. 9 représente les résultats de corrélation entre le temps d'écoulement et la viscosité plastique obtenue par les trois modèles.



(A)



(B)



(C)

Figure 5. 9. Corrélation entre V-Funnel et la viscosité plastique obtenues par les trois modèles (A, B, C).

Les relations de corrélation sont données par :

$$V\text{-funnel (s)} = 3.7223558 - 1.2837207 \cdot VB \text{ (cP)} + 37.95828 \cdot (VB \text{ (cP)} - 0.25107)^2 \quad \text{Eq (5.13)}$$

D'après la Figure 5.8 et Figure 5. 9, et concernant le modèle de Bingham on remarque que le temps d'écoulement au mini v-funnel et l'étalement au mini cône augmente avec l'augmentation de la viscosité plastique et le seuil de cisaillement respectivement.

D'après les deux figures Figure 5.8 et Figure 5. 9 et les coefficients de corrélation, les paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement et la viscosité plastique) dérivés du modèle de Bingham sont mieux corrélés avec les étalements et les temps d'écoulement au V-Funnel avec des coefficients de corrélation de $R^2=0.75$ et $R^2=0.74$ pour le seuil de cisaillement et la viscosité plastique respectivement.

Conclusions générales

Ce travail avait pour objectif de déterminer les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques des mortiers autoplaçants contenant des granulats issus de déchet de plastique, en combinaison avec différents types de sables (sable dunaire et alluvionnaire) en systèmes binaire et ternaire. Pour la réalisation de ce travail expérimental, nous avons utilisé une modélisation statistique basée sur les plans d'expériences, selon un plan de mélange, qui permettent de tirer le maximum d'informations sur les réponses en faisant le minimum d'essais.

Les outils statistiques du plan de mélange permettent d'analyser les résultats trouvés, d'établir des modèles mathématiques, de donner toutes les interactions possibles sur les réponses et d'offrir aussi une représentation graphique ternaire très claire de la variation des réponses étudiées en fonction des dosages de sable de dune, sable alluvionnaire et déchet de plastique.

Afin d'atteindre notre objectif, on a subdivisé ce travail en deux parties: la première consiste à déterminer le dosage optimal en superplastifiant à partir des essais d'étalement et de mini V-funnel. La deuxième consiste à étudier, en premier lieu, les propriétés des mélanges à l'état frais : l'étalement, l'écoulement, les masses volumiques apparentes et les caractéristiques rhéologiques en utilisant un agitateur RZR-2102, et en deuxième lieu à les propriétés à l'état durci à travers les essais mécaniques (essai de flexion par trois points et essai de compression).

Les résultats trouvés à l'issu de cette étude expérimentale montrent que:

- L'étalement augmente en fonction de l'augmentation de déchet de plastique et diminue en fonction de l'augmentation du sable dunaire.
- L'augmentation de dosage du sable de dune influe négativement sur la fluidité par l'augmentation du temps d'écoulement mesuré par le v-funnel. Par contre le sable alluvionnaire influe positivement par la diminution du temps d'écoulement.
- Le temps d'écoulement augmente avec l'augmentation de la finesse du sable.
- La masse volumique apparente a été abaissée en augmentant le pourcentage du déchet de plastique ajouté.
- Le seuil de cisaillement augmente en fonction de l'augmentation de déchet de plastique et diminue avec l'augmentation du sable alluvionnaire.

Conclusions générales et perspectives

- La viscosité plastique augmente en fonction de l'augmentation du sable de dune et diminue en fonction du sable alluvionnaire et déchet de plastique.
- La résistance à la compression augmente avec l'augmentation du sable alluvionnaire et elle diminue en fonction de pourcentage de déchets de plastique ajoutés. Les mêmes constatations sont remarquées pour la résistance à la flexion.
- Les paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité plastique) dérivés du modèle de Bingham sont mieux corrélés, par rapport aux autres modèles étudiés (Bingham modifié et Hershel-bulkely) avec les étalements et les temps d'écoulement au V-funnel (les coefficients de corrélation par le modèle de Bingham sont $R^2=0.75$ et $R^2=0.74$ pour le seuil de cisaillement et la viscosité plastique respectivement).

Perspectives et recommandations

Vu que ce travail a été réalisé dans une durée limitée, notre étude a été limitée seulement sur quelques paramètres. Pour cela, nous recommandons, pour des futurs travaux, ce qui suit :

- Elargir l'étude rhéologique pour déterminer les mêmes caractéristiques telles que, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique en utilisant un rhéomètre à béton.
- Etudier la durabilité des mortiers autoplaçants contenant des granulats issus de déchet de plastique.
- Etudier le comportement rhéologique et physico-mécanique des bétons autoplaçants contenant des granulats issus de déchets de plastique.
- Etudier le retrait et le fluage des mortiers autoplaçants contenant des granulats issus de déchet de plastique.

Finalement, dans notre travail nous avons utilisé trois modèles (modèle de Bingham, modèle de Bingham modifié et modèle de Herschel-Bulkley) pour déterminer les paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité plastique), nous recommandons d'utiliser d'autres modèles tel que (Casson, Yahia and Khayat, De Kee, ...etc).

Références bibliographiques

- Adjoudj M'hamed (2015) : Effet Des Additions Minérales Et Organiques Sur Le Comportement Rhéologique Du Béton. Thèse De Doctorat. Université De Chlef, Algérie, 162 Pages.
- AFGC (2008) , Association française de Génie civil. Recommandations for use of self-compacting Concrete, Scientific and technical documents,P N B@P 2008.
- Agani, B. S., & Tchehouali, A. D. (2014). Perméabilité Et Caractéristiques Physiques Et Mécaniques Du Béton Contenant Des Granulats Enrobés Du Fondu De Sachets Plastiques. Epac/Uac.
- Aiad I., "Influence Of Time Addition Of Superplasticizers On The Rheological Properties Of Fresh Cement Pastes, Cement And Concrete Research, Vol. 33,2003,Pp. 1229 – 1234.
- Asakura E., Yoshida H., Nakae H., "Influence Of Superplasticizer On Fluidity Of Fresh Cement Paste With Different Clinker Phase Composition", Proceedings Of The 9th International Congress On The Chemistry Of Cements, New Delhi IV; 1992, Pp.570-576.
- BAP 2000, Projet National, Impacts Socio-Economiques, Rapport De Synthèse Du Groupe D, 2000, P. 39.
- Baron J., Ollivier J.P., Les Bétons, Bases Et Données Pour Leur Formulation, Ed.Eyrolles. 1996, P. 570.
- Beaupré D., Mindess S.,"Rheology Of Fresh Concrete": Principles, Measurements, And Applications, Materials Science Of Concrete V, Ed. By J. Skalny And S. Mindess, Acers, 1998,149-190.
- Belaidi, A. S. E.; « Contribution A L'étude Rhéologique Et Durabilité De Béton Autoplaçant : Apport Des Ajouts Cimentaires Ternaires Et Fillers Locaux Et Industriels » Thèse De Doctorat, Université Saâd Dahleb De Blida, Algérie, 2013.
- Benabed, B., Kadri, E. H., Azzouz, L., & Kenai, S. (2012). Properties Of Self-Compacting Mortar Made With Various Types Of Sand. Cement And Concrete Composites, 34(10), 1167-1173.

Références bibliographiques

- Benimam, S., Debieb, F., Bentchikou, M., & Guendouz, M. (2014). Valorisation Et Recyclage Des Déchets Plastiques Dans Le Béton. In MATEC Web Of Conferences (Vol. 11, P. 01033). EDP Sciences.
- Bethmont, S. (2005). Mécanismes De Segregation Dans Les Bétons Autoplacants (BAP): Etude Expérimentale Des Interactions Granulaires. Thèse De Docteur De L'école Nationale Des Ponts Et Chaussées, Spécialité: Structures Et Matériaux.
- BHP 2000, Synthèse Des Travaux Du Projet National Bhp 2000 Sur Les Bétons A Hautes Performances, Presses De L'école Nationale Des Ponts Et Chaussées, 2000, P. 298
- Billberg, P. (1999). Fine Mortar Rheology In Mix Design Of SCC. In Proceedings Of The First International RILEM Symposium On Self-Compacting Concrete, Edited By Å. Skarendahl And Ö. Petersson, Stockholm (Pp. 47-58).
- Bjömström J Et Chandra S., "Effect Of Superplasticizers On The Rheological Properties Of Cements", Materials And Structures / Matériaux Et Constructions, Vol. 36, 2003, Pp.685-692.
- Bouziani T., Abdelbaki, B., Madani, B., & Mohamed, L. (2011). Effect Of Marble Powder On The Properties Of Self-Compacting Sand Concrete. The Open Construction And Building Technology Journal, 5(1).
- Bouziani, T. (2013). Assessment Of Fresh Properties And Compressive Strength Of Self-Compacting Concrete Made With Different Sand Types By Mixture Design Modelling Approach. Construction And Building Materials, 49, 308-314.
- Brahim, S. (2012). Formulation Et Caractérisation Rhéologique Et Physico-Mécanique Des Pâtes Cimentaires Et Mortiers Autoplacants (Doctoral Dissertation, Université De Boumerdès-M'hamed Bougara).
- Bui, V. K., & Montgomery, D. (1999, September). Mixture Proportioning Method For Self-Compacting High Performance Concrete With Minimum Paste Volume. In Proceedings Of The 1st International RILEM Symposium On SCC (Pp. 373-384).
- Chanvillard, G., & Basuyaux, O. (1996). Une Méthode De Formulation Des Bétons De Sable Maniabilité Et Résistance Fixées. BULLETIN-LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES, 49-64.

Références bibliographiques

- Clergue, C., Cussigh, F., Fontaine, J., Hu, C., Jaffre, Y., Laplante, P., ... & Sedran, T. (2000). *Betons Auto-Plaçant: Recommandations Provisoires*.
- Courrazé G., Grossiord JL., "Initiation A La Rhéologie ", Tec& Doc, (2000).
- Coussot P., "Rhéologie Des Boues Et Laves Torrentielles - Etudes De Dispersions Et Suspensions Concentrées", Thèse De Doctorat De l'Institut National Polytechnique De Grenoble, Et Etudes Du Cemagref, 1993.182p.
- Coussot P., Grossiord J., "Comprendre La Rhéologie, De La Circulation Du Sang A La Prise Du Béton", EDP Science, 2002.
- Daligang Daniel. Plâtre. Techniques De L'ingénieur, 'Traité Construction' (C910): 24 P, Jan 2002
- De Larrard F., Belloc A., "L'influence Du Granulat Sur La Résistance A La Compression Des Bétons", Bulletin Des Laboratoires Des Ponts Et Chaussées – 219 – Janvier –Février 1999 – REF, 4246 – PP.41-52.
- De Larrard, F., BOSCH, F., CATHERINE, C., & DEFLORENNE, F. (1996). La Nouvelle Méthode Des Coulis De L'afrem Pour La Formulation Des Bétons A Hautes Performances. Bulletin Des Laboratoires Des Ponts Et Chaussées, (202), 61-69.
- Domone P., Xu Y. And Banfill P., "Developments Of The Two-Point Workability Test For High-Performance Concrete", Magazine Of Concrete Research Vol. 51, 1999, Pp. 181-190.
- Edamatsu, Y., Nishida, N., & Ouchi, M. (1999, September). A Rational Mix-Design Method For Self-Compacting Concrete Considering Interaction Between Coarse Aggregate And Mortar Particles. In Proceedings Of The First International RILEM Symposium On Self-Compacting Concrete, Stockholm. Sweden (Pp. 309-320).
- Fares, H. (2009). Propriétés Mécaniques Et Physico-Chimiques De Bétons Autoplaçants Exposés A Une Température Elevée (Doctoral Dissertation, Université De Cergy Pontoise).
- Fergusson J., Kembrowski Z. (1991): Applied Fluid Rheology. Elsevier, Applied Science. London, P 323.

Références bibliographiques

- Ferraris CF., "Measurement Of The Rheological Properties Of High Performance Concrete: State Of The Art Report", *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol*, Vol. 104 (5), 1999, Pp. 461-478.
- Gbèdo, A. V. (2009). *Problématique De La Valorisation Des Déchets Plastiques A Cotonou*. Cotonou: Thèse De Doctorat Université d'Abomey-Calavi, Faculté Des Lettres Arts Et Sciences Humaines, 237
- Ghernouti, Y., Rabehi, B., Bouziani, T., Ghezraoui, H., & Makhloufi, A. (2015). Fresh And Hardened Properties Of Self-Compacting Concrete Containing Plastic Bag Waste Fibers (WFSCC). *Construction And Building Materials*, 82, 89-100.
- Ghernouti, Y., Rabehi, B., Safi, B., & Chaid, R. (2011). Use Of Recycled Plastic Bag Waste In The Concrete. *Journal Of International Scientific Publications: Materials, Methods And Technologies*, 8.
- Golaszewski JG., Szwabowski J., "Influence Of Superplasticizers On Rheological Behaviour Of Fresh Cement Mortars", *Cement And Concrete Research*, Vol. 34,2004, Pp. 235-248.
- Goupy, Jacques Et Creighton, Lee. *Introduction To Design Of Experiments With Jmp Examples*. Sas Publishing, 2007.
- Griesser A., "Cement-Superplasticizer Interactions At Ambient Temperatures: Rehology, Phase Composition, Pore Water And Heat Of Hedration Of Cimentitiouse Systemes", *Thèse De Doctorat De l'Institut De Technologie Fédéral, Suisse*; 2002, 147p.
- Hafid H., "Influence Des Paramètres Morphologiques Des Granulats Sur Le Comportement Rhéologique Des Bétons Frais", *Thèse De Doctorat De l'Université Paris Paris-Est*, 2012.162p.
- Hannawi, K., Kamali-Bernard, S., & Prince, W. (2010). Physical And Mechanical Properties Of Mortars Containing PET And PC Waste Aggregates. *Waste Management*, 30(11), 2312-2320.
- Heirman G., Hendrickx R., Vandewalle L., Van Gemert D., Feys D. De Schutter G., Desmet B., Vantomme J. (2009): Integration Approach Of The Couette Inverse Problem Of Powder Type Self Compacting Concrete In A Wide – Gape Concentric Cylinder Rheometer : Part II : Influence Of Mineral Additions And Chemical Admixtures Of The Shear Thickening Flow Behavior. *Cement And Concrete Research*, 39, 171 – 181.

- Hu C., De Larrard F., "The Rheology Of Fresh High Performance Concrete", *Cement And Concrete Research*, Vol. 26, 1996, Pp. 283-294.
- Jacobs, F., & Hunkeler, F. (1999, September). Design Of Self-Compacting Concrete For Durable Concrete Structures. In *Proceedings Of The First International RILEM Symposium*, Stockholm, Sweden, Eds. A. Skarendahl & O. Petersson (Pp. 397-407).
- Jin, J. (2002). *Properties Of Mortar For Self-Compacting Concrete* (Doctoral Dissertation, University Of London).
- Khayat, K. H., & Guizani, Z. (1997). Use Of Viscosity-Modifying Admixture To Enhance Stability Of Fluid Concrete. *Materials Journal*, 94(4), 332-340.
- Khayat, K. H., Ghezal, A., Et Hadriche, M. S. Factorial Design Model For Proportioning Self-Consolidating Concrete. *Materials And Structures*, 1999, Vol. 32, No 9, P. 679-686.
- Kumar, K. B. V., & Prakash, P. (2006). Use Of Waste Plastic In Cement Concrete Pavement. *Adv. Mater. Res. J*, 15, 1-21.
- Kuroiwa, S., Matsuoka, Y., Hayakawa, M., & Shindoh, T. (1993). Application Of Super Workable Concrete To Construction Of A 20-Story Building. *Special Publication*, 140, 147-162.
- Marzouk, O. Y., Dheilily, R. M., & Queneudec, M. (2007). Valorization Of Post-Consumer Waste Plastic In Cementitious Concrete Composites. *Waste Management*, 27(2), 310-318.
- Nguyen HM., "Comportement Rhéologique Des Suspensions Concentrées " *Memoire DEA*, INSA Rennes, 1996, 82p.
- Oh, S. G., Noguchi, T., & Tomosawa, F. (1999, September). Toward Mix Design For Rheology Of Self-Compacting Concrete. In *Proc. Of First International RILEM Symposium On Self-Compacting Concrete* (Eds. Skarendahl, Å. And Peterson, O.), Stockholm (Pp. 361-372).
- Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). Self-Compacting Concrete. *Journal Of Advanced Concrete Technology*, 1(1), 5-15.
- Ouchi, M., & Edamatsu, Y. (1999). A Simple Evaluation Method For Interaction Between Coarse Aggregate And Mortar Particles In Self-Compacting Concrete. In *First*

- International RILEM Symposium On Self-Compacting Concrete (Pp. 121-130). RILEM Publications SARL.
- Ouchi, M., Nakamura, S. A., Osterberg, T., Hallberg, S., & Lwin, M. (2003). Applications Of Self-Compacting Concrete In Japan, Europe And The United States. Kochi University Of Technology, Kochi, Japan.
- Ozawa, K., Maekawa, K., & Okamura, H. (1990). High Performance Concrete With High Filling Capacity. *Admixtures For Concrete, Improvement Of Properties*, 51-62.
- Poitou A And Racineux G. «A Squeezing Experiment Showing Binder Migration In Concentrated Suspension», *J. Rheol*, 2001; 45: 609.
- Roshavelov, Theodore T. Concrete Mixture Proportioning With Optimal Dry Packing. In : First International Rilem Symposium On Self-Compacting Concrete. Rilem Publications Sarl, 1999. P. 385-396.
- Roussel, Y. (2002). *Betons Autoplacants Avec Fibres Comme Materiau De Reparation Du Beton* (French Text).
- Safi, B., Saidi, M., Aboutaleb, D., & Maallem, M. (2013). The Use Of Plastic Waste As Fine Aggregate In The Self-Compacting Mortars: Effect On Physical And Mechanical Properties. *Construction And Building Materials*, 43, 436-442.
- Sedran T., De Larrard F., Manuel D'utilisation De RENE-LCPC, Logiciel D'optimisation Granulaire, Version 6.1d, LCPC, 2000
- Sedran, T. (1995). LES BETONS AUTONIVELANTS (BAN)-SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE. *Bulletin De Liaison Des Laboratoires Des Ponts Et Chaussées*, (196).
- Sedran, T. (1999). *Rhéologie Et Rhéométrie Des Bétons. Application Aux Bétons Autonivelants* (Doctoral Dissertation, Marne-La-Vallée, ENPC).
- Shindoh, T., Matsuoka, Y., Tangtermsirikul, S., & Sakamoto, J. (1992). Effect Of Variation Of Material Quality On Properties Of Super Workable Concrete. *Transactions Of Japan Concrete Institute*, 14, 71-78.

Références bibliographiques

- Siahmed Hamza, Oualit Mehenna « Formulation Et Caractérisation Rhéologique D'un Bap : Action De Différents Superplastifiants Sur Les Propriétés Rhéologique ».Pfe Université De Boumerdes .Juin 2007.
- Sonebi, M. (2001). Factorial Design Modelling Of Mix Proportion Parameters Of Underwater Composite Cement Grouts. *Cement And Concrete Research*, 31(11), 1553-1560.
- Tangtermsirikul, S., & Bui, V. K. (1995, December). Blocking Criteria For Aggregate Phase Of Self-Compacting High Performance Concrete. In *Proceedings Of Regional Symposium On Infrastructure Development In Civil Thailand Engineering* (Pp. 58-69).
- Tangtermsirikul, S., Sakamoto, J., Shindoh, T., & Matsuoka, Y. (1991). Evaluation Of Resistance To Segregation Of Super Workable Concrete And The Role Of A New Type Of Viscosity Agent. *Reports Of The Technical Research Institution*, 24, 369-376.
- Tanigawa, Y., Mori, H., Yonezawa, T., Izumi, I., & Mitsui, K. (1989). Evaluation Of The Flowability Of High-Strength Concrete By L-Flow Test. In *Proceedings Of The Annual Conference Of The Architectural Institute Of Japan* (Vol. 1990)
- Tattersall GH., "Workability And Quality Control Of Concrete" , London, E & FNSPON, 1991,262 P.
- Tchehouali, D. A., Kowanou, H., Amey, K. B., Sanya, E. A., & Tosse, F. (2014). Mise Au Point Et Caractérisation Physique Et Mécanique D'un Matériau A Base Du Sable Argileux Lie Par Des Déchets Plastiques Fondus. *Journal De La Recherche Scientifique De l'Université De Lomé*, 16(2), 593-600.
- Tchehouali, D., Kowanou, H., & Sanya, E. (2012). Mise Au Point Et Caractérisation Physique Et Mécanique D'un Nouveau Matériau À Base De Granulats Et De Déchets Plastiques Fondus. *Rev. Cames. Série A*, 13, 1-4.
- Tobes, J. M., López, A., Giaccio, G., Barragán, B. E., & Zerbino, R. (2007, September). 23. Effect Of Sand Particle Size Distribution On Fluidity And Passing Ability Of Highly Flowable Mortars. In *5th International RILEM Symposium On Self-Compacting Concrete*(Pp. 163-168). RILEM Publications SARL
- Turcry, Philippe. *Retrait Et Fissuration Des Bétons Autoplaçants: Influence De La Formulation*. 2003. Thèse De Doctorat. Nantes.

Références bibliographiques

Walraven J., Structural Aspect Of Self-Compacting Concrete, Proceedings Of The Third International RILEM Conference On SCC, Editors: Wallevik O., Nielsson I, Reykjavik,Iceland, August 2003, Pp. 15 – 22.

Yahia, A. Et Khayat, K. H. Experiment Design To Evaluate Interaction Of High-Range Water-Reducer And Antiwashout Admixture In High-Performance Cement Grout. Cement And Concrete Research, 2001, Vol. 31, No 5, P. 749-757.

Yurugi, M., Sakata, N., Iwai, M., & Sakai, G. (2000). Mix Proportion For Highly Workable Concrete. Proceedings Of Concrete, 579-589.

Zhang X., Han J., "The Effect Of Ultra-Fine Admixture On The Rheological Propertyof Cement Paste", Cement And Concrete Research, Vol. 30(5),:2000, Pp. 827–30.

Normes Afnor Européennes

NFP18-560. Analyse granulométrique par tamisage.

NFP 18-555. Mesure de masses volumiques (absolues et apparentes), coefficient d'absorption, la compacité et la porosité.

NFP 18-598. Equivalent de sable.

NF EN 933-1. Module de finesse.

Annexes

A.1 Fiche technique du superplastifiant

NOTICE TECHNIQUE

2 1 1 9

MEDAFLOW 30Conforme à la norme EN 934-2: TAB 1, TAB 3.1
ET TAB 3.2 NA 774.**Super plastifiant
Haut réducteur d'eau****DESCRIPTION**

Le **MEDAFLOW 30** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

Le **MEDAFLOW 30** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.

Le **MEDAFLOW 30** ne présente pas d'effet retardateur.

DOMAINES D'APPLICATION

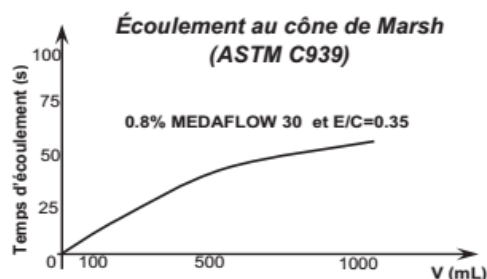
- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - plaçant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux.

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet :

Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très faible
- Amélioration considérable de la fluidité
- Une très bonne maniabilité
- Éviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton



Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration

Désignation	Rc (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1.4%)	39.2	54.7	62.2

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Brun clair
- pH 6 – 6,5
- Densité 1,07 ± 0,01
- Teneur en chlore < 0,1 g/l
- Extrait sec 30%

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 30** est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.46 à 1.85 litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

58

**Granitex**

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



A.2. Etapes d'analyse avec logiciel JMP

- Analyse des résultats

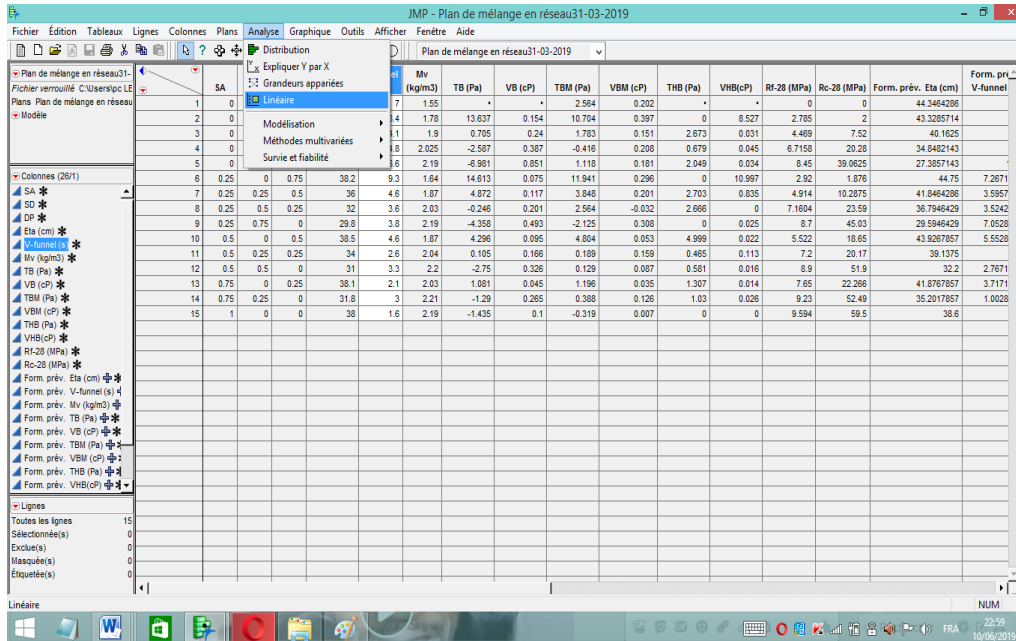


Figure A.2. 1. Représentation de l'étape de l'analyse des résultats.

- Construction des modèles

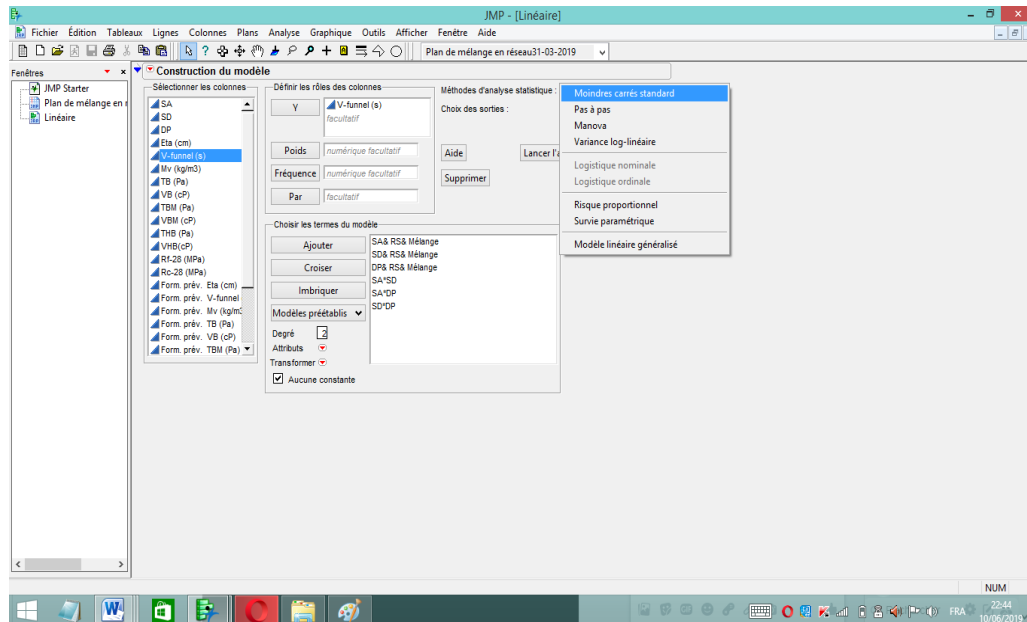


Figure A.2. 2. Représentation de l'étape de construction des modèles.

- Exemple de résultats (réponse V-Funnel)

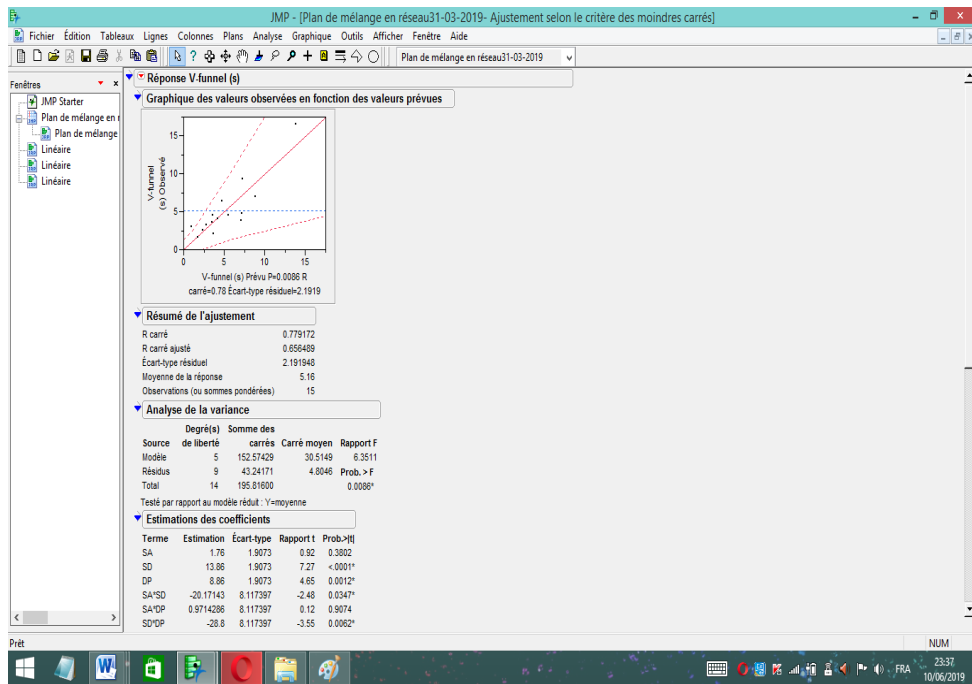
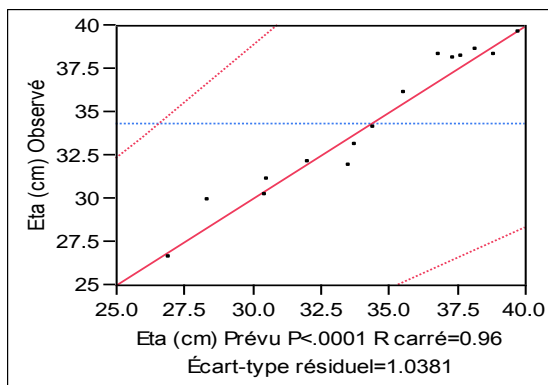
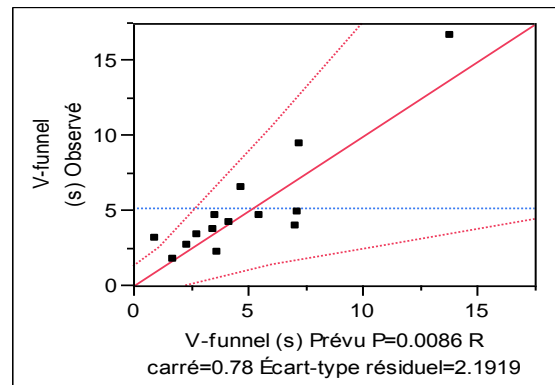


Figure A.2. 3. Représentation des réponses.

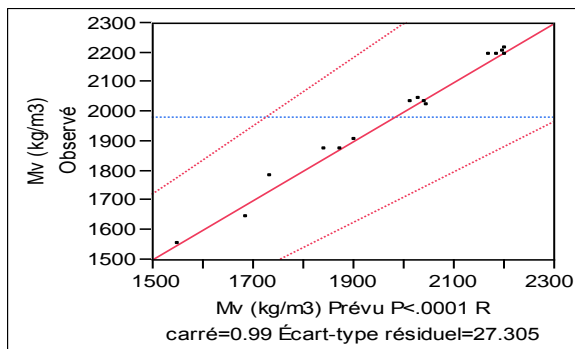
A.3. Graphiques quelques réponses (Valeurs prévues en fonction de celles Observées)



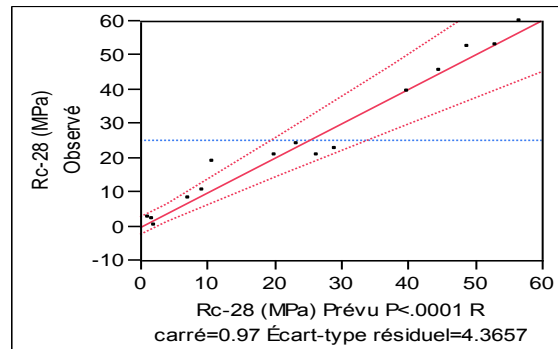
a- Réponse d'étalement.



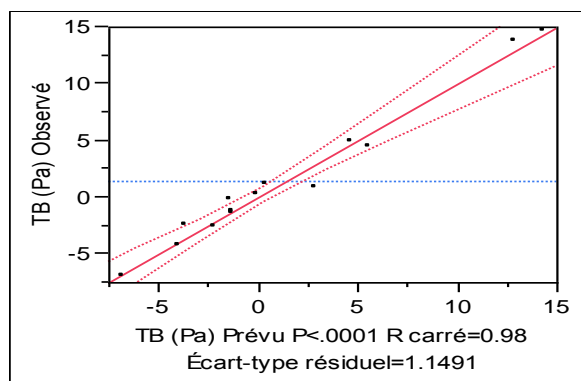
b- Réponse du temps d'écoulement.



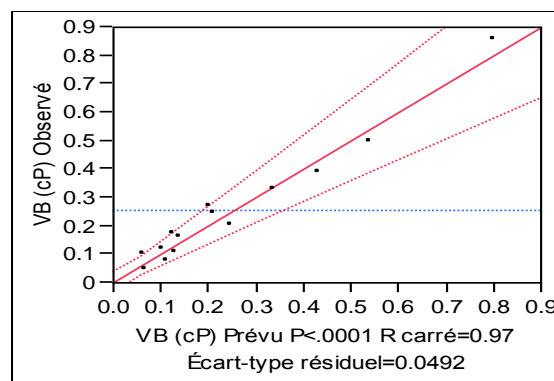
c- Réponse de la masse volumique apparente.



d- Réponse de la Rc 28j.



E- Réponse du seuil de cisaillement (modèle de Bingham).



F- Réponse de la viscosité plastique (modèle de Bingham).

Figure A.3. 1. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.

A.4. Résultats d'analyse granulométrique

Sable alluvionnaire

Analyse granulométrique par tamisage du sable alluvionnaire NFP 18-560

A.4. 1. Analyse granulométrique du sable alluvionnaire.

Analyse granulométrique du sable MT=1500 g				
Diamètre des tamis (mm)	Refus partiel (g)	Masse des refus cumulée (g)	Refus cumulé (%)	Passant (%)
6.3	0	0	0	100
5	8	8	0.53	99.47
3.15	74	82	5.46	94.54
2.5	44	126	8.4	91.6
1.6	84	210	14	86
1.25	44	254	16.93	83.07
0.630	258	512	34.13	65.87
0.315	420	932	62.13	37.87
0.160	418	1350	90	10
0.125	60	1410	94	6
0.08	52	1462	97.47	2.53
Fond	34	1496	99.73	0.27

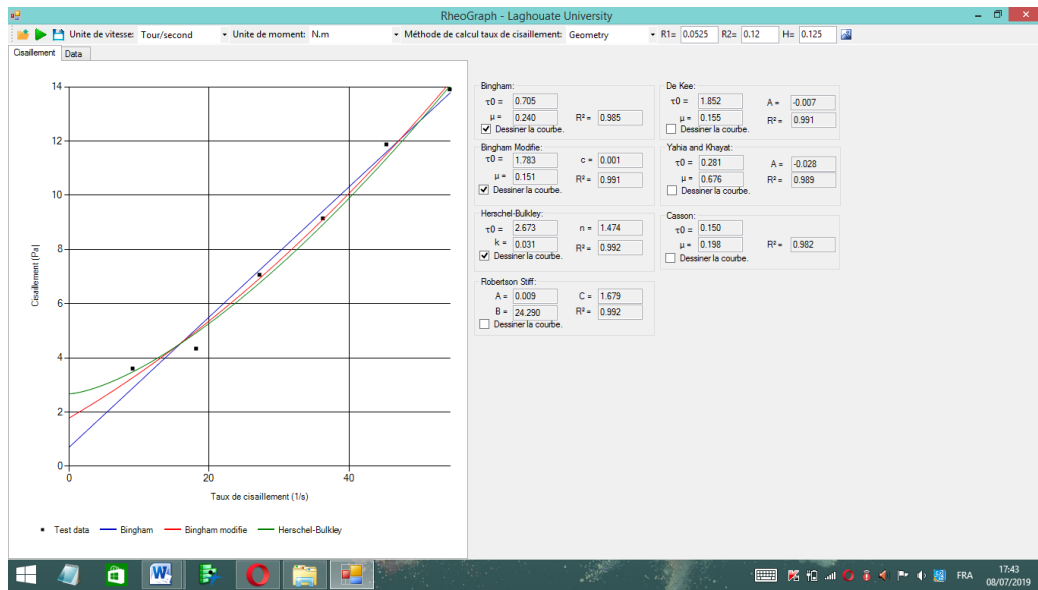
Sable de dune

Analyse granulométrique par tamisage du sable de dune NFP 18-560

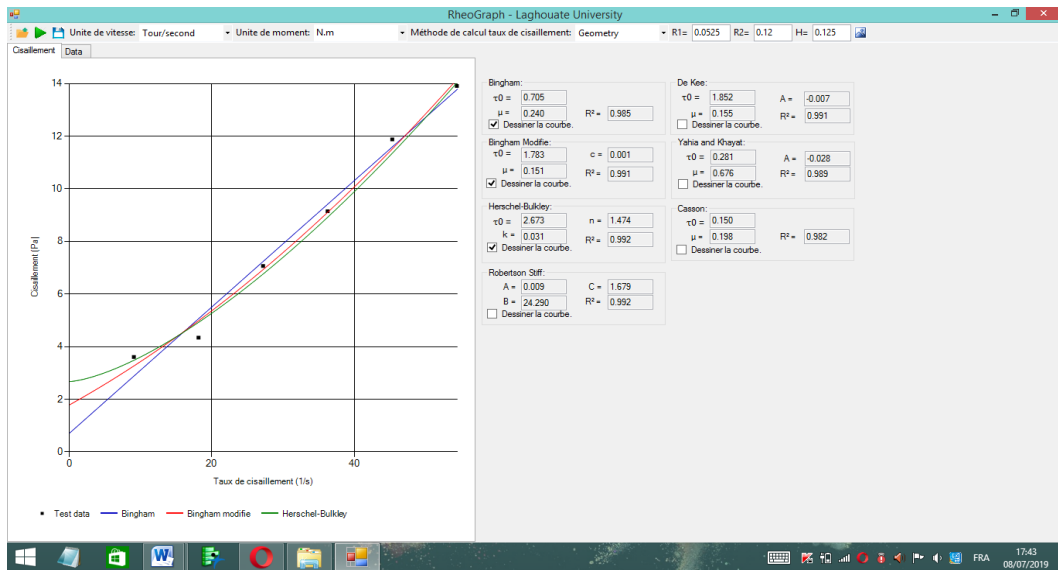
A.4. 2. Analyse granulométrique du sable de dune.

Analyse granulométrique du sable MT=2000 g				
Diamètre des tamis (mm)	Refus partiel (g)	Masse des refus cumulée (g)	Refus cumulé (%)	Passant (%)
0.63	0	0	0	100
0.5	20	20	1	99
0.4	72	92	4.6	95.4
0.315	148	240	12	88
0.250	382	622	31.1	68.9
0.200	410	1032	51.6	48.4
0.160	438	1470	73.5	26.5
0.125	256	1726	86.3	13.7
0.1	152	1878	93.9	6.1
0.08	62	1940	97	3
Fond	40	1980	99	1

A.5. Exemple de quelques résultats rhéologiques obtenues à l'aide du RhéoGraph



A.5 1. Résultats rhéologiques du mélange deux.



A.5 2. Résultats rhéologiques du mélange trois.