

UNIVERSITÉ AMAR TELIDJI DE LAGHOUAT
Faculté de Génie Civil et d'Architecture
Département de Génie Civil



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT 3^e cycle LMD

en Génie Civil

Option: Matériaux & Sols

Présentée par

Mohamed SAHRAOUI

Thème

Étude de l'influence des sables locaux sur la stabilité
statique à l'état frais des bétons autoplaçants

Soutenue le 15 / 06 / 2020 devant le jury composé de

Mr. Idriss GOUAL	Professeur, Université de Laghouat	Président
Mr. Brahim SAFI	Professeur, Université de Boumerdès	Examineur
Mr. Youcef GHERNOUTI	Professeur, Université de Boumerdès	Examineur
Mr. Benchaa BENABED	Maître de conférences A, Université de Laghouat	Examineur
Mr. Tayeb BOUZIANI	Professeur, Université de Laghouat	Directeur de thèse

Année Universitaire 2019-2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

En tout premier lieu, je remercie ALLAH le tout puissant de m'avoir donné le courage et la volonté de mener à terme ce présent travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes remerciements les plus sincères à Monsieur Tayeb Bouziani ; Professeur à l'Université de Laghouat, de m'avoir confié cette thèse et de l'avoir encadrée. Je le remercie également pour la confiance qu'il m'a témoignée tout au long de ces années et pour tous ses conseils et remarques constructives.

J'adresse aussi mes remerciements à chacun des membres du jury.

Monsieur Idriss Goual ; professeur à l'Université de Laghouat, qui a accepté de présider ce Jury ; de même Monsieur Youcef Ghernouti ; professeur à l'Université de Boumerdès, Monsieur Benchaa Benabed ; Maître de conférences à l'Université de Laghouat, Monsieur Brahim Safi ; professeur à l'Université de Boumerdès, qui ont accepté d'examiner ce travail.

Je voudrais aussi adresser mes plus vifs remerciements à Monsieur Idriss Goual, directeur du laboratoire « LRGC » et responsable de la formation doctorale « Matériaux et sols » pour nous avoir permis de réaliser ce travail au sein du laboratoire.

J'adresse également tous mes remerciements à mes amis Zine El Abidine LAIDANI et Younes OULDKHAOUA. On a passé ensemble un agréable moment au laboratoire.

À titre plus personnel, je tiens à témoigner ma reconnaissance à mes parents et mes proches, qui ont toujours cru en moi et qui m'ont soutenu dans ce projet de thèse et tout au long de ses nombreuses années d'études. J'ai une pensée particulière pour ma mère et ma grande mère qui auraient été très fières de voir l'aboutissement de ce travail.

Un grand merci à l'ensemble des membres du laboratoire de génie civil de l'Université de Laghouat, pour l'ambiance et leur accueil chaleureux.

ملخص

تعرف الخرسانة ذاتية التوضع على أنها خرسانة ذات سيولة عالية، متجانسة ومستقرة، قادرة على التوضع بفضل ثقلها فقط. يتم اعداد هذه الخرسانة وفق طريقة خاصة تتطلب ايجاد المقادير المناسبة لكل مكوناتها وذلك للحصول على مزيج يلبي الخصائص والمتطلبات التقنية الموصى بها.

يستند عمل هذه الاطروحة إلى محورين رئيسيين. يهدف المحور الأول الى دراسة تأثير نسب مكونات الخليط المتمثلة في نسبة الحصى الى الرمل (G/S)، نسبة حصى 3/8 الى حصى 8/15 (G1/G2)، نسبة مسحوق الرخام الى الاسمنت (PM/C)، نسبة الماء الى الاسمنت (E/C) و نسبة الملدن (SP) على الخصائص الريولوجية للخرسانة ذاتية التوضع. وبموازاة ذلك تم تطوير جهاز تجريبي جديد يسمى « K-Slump modifié » لقياس الانفصال الحبيبي العمودي و سيولة الخرسانة ذاتية التوضع. ويكرس المحور الثاني لدراسة تأثير الجمع بين ثلاثة أنواع من الرمال (رمل الواد، رمل الكتبان ورمل المحاجر) في شكل مزيج ثنائي أو ثلاثي على السلوك الريولوجي وبالخصوص الاستقرار الستاتيكي للخرسانة ذاتية التوضع.

لقد بينت النتائج المتحصل عليها أن الخرسانة ذاتية التوضع التي تم اعدادها بنسبة G1/G2 من 40 الى 60% ونسبة G/S قريبة من 1 أظهرت أداء أفضل من حيث التراص ومقاومة الانفصال الحبيبي. كما يمكن اعتبار الجهاز الجديد « K-Slump modifié » على أنه اختبار بسيط وسريع يتيح تقييم مقاومة الانفصال الحبيبي و سيولة الخرسانة ذاتية التوضع بطريقة مرضية.

أظهرت النتائج المتعلقة بتأثير نوع الرمال على الخصائص الريولوجية أن زيادة نسبة كل من رمل الكتبان ورمل المحاجر في مزيج ثنائي أو ثلاثي مع رمل الواد يؤدي الى تحسن ملحوظ في مقاومة الانفصال الحبيبي وزيادة لزوجة الخرسانة المدروسة.

كلمات مفتاحية : خرسانة ذاتية التوضع، نسب مكونات الخليط، جهاز جديد، نوع الرمل، الخصائص الريولوجية، الاستقرار الستاتيكي، اللزوجة.

Résumé

Le béton autoplaçant (BAP) est défini comme un béton très fluide, homogène et stable, capable de se mettre en place sous le seul effet de la pesanteur. Ce béton est élaboré selon une formulation spécifique qui nécessite de trouver un dosage convenable de chacun de ses constituants afin d'obtenir une composition répondant aux propriétés et aux exigences techniques préconisées.

Le travail de cette thèse s'articule autour de deux l'étude de l'influence de la combinaison de trois types de sable (alluvionnaire, dunaire et concassé) dans axes principaux. Le premier axe concerne l'étude de l'effet des paramètres de formulation tel que le rapport gravier/sable (G/S), le rapport gravier (3/8)/gravier (8/15) (G1/G2), le rapport de poudre de marbre/ciment (MP/C), le rapport eau/ciment (E/C) et le dosage du superplastifiant (SP) sur le comportement rhéologique des BAP, parallèlement, un nouveau dispositif expérimental appelé « K-Slump modifié » a été mise au point pour contrôler la ségrégation verticale et l'ouvrabilité des BAP. Le deuxième axe est consacré à des mélanges binaires et ternaires sur le comportement rhéologique et notamment la stabilité statique des BAP.

Les résultats obtenus montrent que les BAP confectionnés avec un rapport G1/G2 de l'ordre de 40 à 60% et un rapport G/S proche de 1 ont montrés de meilleures performances en termes d'empilement granulaire et de résistance à la ségrégation. Le nouveau dispositif « K-Slump modifié » peut-être considéré comme un essai simple et rapide qui permet d'évaluer la résistance à la ségrégation ainsi que l'ouvrabilité des BAP d'une manière satisfaisante.

Les résultats d'essais concernant l'influence de types de sables sur le comportement rhéologique montrent que l'augmentation des proportions SD et SC dans les mélanges binaires ou ternaires avec SA entraîne une amélioration significative de la résistance à la ségrégation et de la viscosité plastique des BAP étudiés.

Mots clés : BAP, paramètres de formulation, nouveau dispositif, types de sable, comportement rhéologique, stabilité statique, viscosité plastique.

Abstract

Self-compacting concrete (SCC) is defined as a very fluid concrete, homogeneous and stable, that take place only by means of its own weight. This concrete is performed according to a specific formulation which requires a suitable dosage of each component in order to obtain a composition that meets the recommended properties and technical requirements.

The work presented in this thesis is based on two main axes. The first axis concerns the study of the influence of formulation parameters such as the effect of gravel to sand ratio (G/S), gravel 3/8 to gravel 8/15 ratio (G1/G2), water to cement ratio (W/C), marble powder to cement ratio (MP/C) and superplasticizer content (SP) on the rheological behavior of SCC, in parallel, a new experimental apparatus called “modified K-Slump” is proposed for evaluation of static stability and workability of SCC. The second axis is devoted to the study of the effect of three kinds of sands (river sand, dune sand and crushed sand) in binary and ternary combinations on rheological behaviour and in particular the static stability of SCC.

The obtained results show that G1/G2 ratio in the range of 40 to 60% and G/S ratio close to 1 present the best performance in terms of compactness and segregation resistance. The new experimental apparatus “modified K-Slump” can be considered as a simple and fast test to assess segregation resistance and workability of SCC satisfactorily.

The results of the influence of sand types on rheological properties indicate that the increase of dune and crushed sand proportions in binary or ternary mixtures with a river sand leads to a significant improvement of segregation resistance and plastic viscosity of the studied SCC.

Key words: SCC, formulation parameters, new apparatus, sand types, rheological behaviour, static stability, plastic viscosity.

Table des matières

Remerciements	I
ملخص	II
Résumé.....	III
Abstract.....	IV
Table des matières	V
Liste des tableaux.....	VIII
Liste des figures.....	VIII
Introduction Générale	1
CHAPITRE 1 : Étude bibliographique	3
1.1 Généralité sur les bétons autoplaçants	3
1.1.1 Historique.....	3
1.1.2 Définition	3
1.1.3 Avantages techniques	3
1.1.4 Domaines d'Emploi	4
1.1.5 Mise en œuvre.....	4
1.1.6 Matériaux constituant un BAP	5
1.2 Comportement des BAP a l'état frais	9
1.2.1 Capacité de passage	9
1.2.2 Capacité au remplissage	10
1.2.3 La résistance à la ségrégation	10
1.2.4 Rhéologie des bétons	16
1.3 Influence des paramètres de composition sur le comportement des BAP	29
1.3.1 Influence du volume de pâte.....	29
1.3.2 Influence de types de sable	29
1.3.3 Influence des propriétés des gros granulats.....	37
1.3.4 Influence du rapport G/S	37
1.3.5 Influence du rapport E/C	38
1.3.6 Influence des additions minérales	39
1.3.7 Influence des superplastifiants	40

1.4	Caractérisation des BAP a l'état frais	42
1.4.1	Essai d'étalement au cône d'Abrams (<i>NF EN 12350-8</i> , 2010)	42
1.4.2	Essai d'écoulement à l'anneau (J-ring) (<i>NF EN 12350-12</i> , 2010)	43
1.4.3	Essai à la boîte en L (L-box) (<i>NF EN 12350-10</i> , 2010).....	43
1.4.4	Essai d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel) (<i>NF EN 12350-9</i> , 2010)...	44
1.4.5	Essai à la boîte en U (U-Box).....	45
1.4.6	Essai de l'écoulement au caisson (Fill Box).....	45
1.4.7	Essai de stabilité au tamis (<i>NF EN 12350-11</i> , 2010)	46
1.4.8	Essai de ségrégation au cylindre (<i>ASTM C1712-17</i> , 2017)	47
1.4.9	Essai de ségrégation à la colonne (<i>ASTM C1610</i> , 2017)	48
1.4.10	Essai de K-slump (<i>ASTM C1362 - 09</i> , 2014)	49
1.5	Caractérisation des BAP a l'état durci	49
1.5.1	Résistance à la compression	49
1.5.2	Résistance à la traction.....	50
1.6	Méthodes de formulation des BAP	50
1.6.1	Méthode Japonaise (La Méthode Générale).....	50
1.6.2	Méthode Suédoise (Approche CBI)	52
1.6.3	Méthode Française (Formulation LCPC)	52
1.6.4	Méthode basée sur le plan d'expérience (méthode statistique)	53
1.7	Conclusion	61
CHAPITRE 2 : Matériaux utilisés et méthodes d'essais		62
2.1	Introduction	62
2.2	Matériaux utilisés.....	62
2.2.1	Le ciment.....	62
2.2.2	La poudre de marbre.....	63
2.2.3	Les sables	63
2.2.4	Gravier	68
2.2.5	Superplastifiant	69
2.3	Méthodes, procédures et formulations adoptés.....	70
2.3.1	Choix et préparation des plans d'expérience.....	71
2.3.2	Procédures des essais.....	79
2.4	Conclusion	93

CHAPITRE 3 : Résultats et Interprétations	94
3.1 Introduction	94
3.2 Influence des paramètres de composition	95
3.2.1 Relation entre les paramètres rhéologiques des modèles étudiés	102
3.2.2 Influence des rapports G1/G2 et G/S sur l'étalement et la capacité de passage	106
3.2.3 Influence des rapports G1/G2 et G/S sur le temps d'écoulement.....	108
3.2.4 Influence des rapports G1/G2 et G/S sur la stabilité statique	110
3.2.5 Influence des rapports G/S et G1/G2 sur le seuil de cisaillement	113
3.2.6 Influence des rapports G/S et G1/G2 sur la viscosité plastique.....	115
3.2.7 Corrélations entre les essais empiriques et le K-Slump modifié	118
3.3 Influence de types de sable	120
3.3.1 Influence des sables sur l'étalement et la capacité de remplissage ..	124
3.3.2 Influence des sables sur le temps d'écoulement.....	125
3.3.3 Influence des sables sur la variation du seuil de cisaillement	128
3.3.4 Influence des sables sur la variation de la viscosité plastique	129
3.3.5 Influence des sables sur la stabilité statique	130
3.3.6 Influence des sables sur la résistance à la traction	133
3.3.7 Influence des sables sur la résistance à la compression	135
3.3.8 Corrélations entre les paramètres rhéologiques et les essais empiriques.....	137
3.3.9 Corrélations entre la viscosité plastique et la stabilité statique	140
3.4 Conclusion	142
Conclusion générale et perspectives.....	144
Références bibliographiques.....	146
Annexe	156
Annexe A : Fiches techniques des matériaux utilisés.....	156
Annexe B : Feuille de calcul des différents constituant du BAP	158
Annexe C : Logiciel de modélisation statistique JMP.....	159
Annexe D : Agitateurs à hélice électroniques Heidolph RZR 2102 control Z	162
Annexe E : Logiciel d'acquisition « Hei-control V2.01 »	164
Annexe F : Logiciel d'acquisition « <i>RheoGraph</i> »	165

Liste des tableaux

Tableau 1. 1 Critères de stabilité pour la sonde de ségrégation modifiée.....	12
Tableau 1. 2 Équations et formules de transformation pour Bingham, Bingham modifié et Herschel-Bulkley.....	28
Tableau 2. 1 Caractéristiques du ciment	62
Tableau 2. 2 Caractéristiques physiques et chimiques de la poudre de marbre...	63
Tableau 2. 3 Caractéristiques des sables utilisés	66
Tableau 2. 4 Caractéristiques physiques et chimiques.....	68
Tableau 2. 5 Caractéristiques du MEDAFLOW 30	69
Tableau 2. 6 Variable codée et les niveaux correspondants	73
Tableau 2. 7 Compositions du plan d'expérience choisi.....	74
Tableau 2. 8 Composition pour 1 m ³ des compositions étudiées	75
Tableau 2. 9 Compositions du plan de mélange.....	77
Tableau 2. 10 Composition pour 1 m ³ du plan de mélange étudié	78
Tableau 2. 11 Classes des BAP selon l'étalement.....	80
Tableau 2. 12 Critères de stabilité au tamis.....	83
Tableau 2. 13 Critères de stabilité au cylindre.....	84
Tableau 3. 1 Résultats des essais empiriques et de la stabilité statiques	96
Tableau 3. 2 Résultats des essais rhéologiques	97
Tableau 3. 3 Coefficients et paramètres des modèles des essais empiriques et de la stabilité statiques	98
Tableau 3. 4 Coefficients et paramètres des modèles des essais rhéologiques	99
Tableau 3. 5 Analyse de la variance des réponses.....	100
Tableau 3. 6 Répétitivité des points centraux du test proposé.....	101
Tableau 3. 7 Résultats des essais empiriques et de la stabilité statiques	121
Tableau 3. 8 Résultats des essais rhéologiques et à l'état durci	122
Tableau 3. 9 Coefficients et paramètres des modèles des essais empiriques et de la stabilité statiques.....	123
Tableau 3. 10 Coefficients et paramètres des modèles des essais rhéologiques et à l'état durci.....	123

Liste des figures

Figure 1. 1 Composition d'un béton autoplaçant et un béton ordinaire (Okamura et Ouchi, 2003).....	5
Figure 1. 2 Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures (El Barrak, 2003).....	9
Figure 1. 3 L'essai de ségrégation au cylindre (Bui <i>et al.</i> , 2002)	12
Figure 1. 4 L'essai de ségrégation a la sonde (Shen <i>et al.</i> , 2014)	13
Figure 1. 5 Dispositif expérimental (Bethmont <i>et al.</i> , 2005)	14
Figure 1. 6 Colonne d'un béton frais pour mesurer l'indice.....	15
Figure 1. 7 Relation entre l'étalement et l'indice de ségrégation (Bensebti <i>et al.</i> , 2015).....	15
Figure 1. 8 Forces exercé par la couche (1) sur la couche (2) (Guy <i>et al.</i> , 2014).....	17
Figure 1. 9 Mouvement de cisaillement entre deux surfaces planes (Guy <i>et al.</i> , 2014).	18
Figure 1. 10 Schéma glissement des couches (Adjoudj, 2015)	18
Figure 1. 11 Comportements rhéologiques des fluides	20
Figure 1. 12 Évolution de la viscosité d'un fluide thixotrope (Quantifying Viscosity Recovery Using Thixotropy Assessment, 2018).....	21
Figure 1. 13 Rhéomètre IBB (Ferraris <i>et al.</i> , 2001)	22
Figure 1. 14 Rhéomètre ICAR (Ferraris <i>et al.</i> , 2001).....	23
Figure 1. 15 Le rhéomètre du LGCGM (Estelle et Lanos, 2012)	23
Figure 1. 16 Rhéomètre à béton BT Rhéom (Cordeiro <i>et al.</i> , 2016).....	24
Figure 1. 17 Rhéomètre BML (Contec, 2018).....	25
Figure 1. 18 Dispositif du rhéomètre utilisé (Soualhi <i>et al.</i> , 2016).....	26
Figure 1. 19 Étalement en fonction des différentes combinaisons de sable(Rmili <i>et al.</i> , 2009).....	30
Figure 1. 20 Résistance a la compression en fonction des différentes combinaisons de sable(Rmili <i>et al.</i> , 2009).....	31
Figure 1. 21 Capacité de passage (H1/H2) en fonction de SA, SC et SD (Bouziani, 2013).....	31
Figure 1. 22 Stabilité au tamis (%) en fonction de SA, SC et SD (Bouziani, 2013)...	32
Figure 1. 23 Résistance à la compression a 28 jours en fonction de SA, SC et SD (Bouziani, 2013).....	32
Figure 1. 24 Temps d'écoulement en fonction de type de sable pour les différents BAP (Benabed, 2014).....	33
Figure 1. 25 Résistance à la compression à 28 jours des différents BAP (Benabed, 2014).....	33

Figure 1. 26 Étalement en fonction de différentes combinaisons de sables (Zeghichi <i>et al.</i> , 2014).....	34
Figure 1. 27 Évolution de l'indice de ségrégation en fonction de différentes combinaisons de sables (Zeghichi <i>et al.</i> , 2014).....	34
Figure 1. 28 Variation de l'étalement en fonction de sable (Douara et Guettala, 2017).....	35
Figure 1. 29 Évolution de la résistance mécanique à la compression à 7, 14 et 28 jours en fonction de sable (Douara et Guettala, 2017).....	35
Figure 1. 30 Évolution de la compacité en fonction de différentes combinaisons de sables (Nécira <i>et al.</i> , 2017).....	36
Figure 1. 31 Évolution de l'indice de ségrégation en fonction de différentes combinaisons de sables (Nécira <i>et al.</i> , 2017).....	36
Figure 1. 32 Variation de la viscosité plastique en fonction de la forme des granulats (Aissoun, 2015).....	38
Figure 1. 33 Variation du seuil de cisaillement en fonction de la forme des granulats (Aissoun, 2015).....	38
Figure 1. 34 Influence du dosage en addition sur la stabilité au tamis (Behim et Ali Boucetta, 2013).....	39
Figure 1. 35 Influence du dosage des additions sur le taux de remplissage (Behim et Ali Boucetta, 2013).....	40
Figure 1. 36 Schématisation de l'adsorption et de la répulsion pour des particules de ciment (Li <i>et al.</i> , 2014).....	41
Figure 1. 37 Étalement en fonction de dosage en Sp (Bonen et Shah, 2005).....	41
Figure 1. 38 Essai d'étalement au cône d'Abrams (Belaribi, 2015).....	42
Figure 1. 39 L'essai d'écoulement à l'anneau (J-ring) (Benabed, 2014).....	43
Figure 1. 40 Dispositif de l'essai L-Box (Boukendakdji, 2010).....	44
Figure 1. 41 Schématisation de l'essai à l'entonnoir V-funnel (Farih, 2016).....	44
Figure 1. 42 Schématisation de l'essai du tube en U.....	45
Figure 1. 43 Schématisation de l'essai du caisson.....	46
Figure 1. 44 Essai de la stabilité au tamis.....	47
Figure 1. 45 Essai de ségrégation au cylindre (ASTM C1712-17, 2017).....	47
Figure 1. 46 Schématisation de l'essai de ségrégation à la colonne (ASTM C1610, 2017).....	48
Figure 1. 47 L'appareil de k-slump (Controls France, 2017).....	49
Figure 1. 48 Schémas et dimensions en cm du mini-cône (a) et d'entonnoir à mortier (b) (Okamura et Ouchi, 2003).....	51
Figure 1. 49 Le domaine de variation du rapport G/S.....	54
Figure 1. 50 Domaine d'étude délimité par les facteurs G/S et E/C.....	55
Figure 1. 51 Plan composite pour l'étude de deux facteurs (Goupy et Creighton, 2006).....	58
Figure 1. 52 Plan de mélange en réseaux comportant 21 mélanges.....	60

Figure 1. 53 Représentation des mélanges à trios constituants à l'aide d'un triangle équilatéral (Goupy et Creighton, 2006).....	61
Figure 2. 1 Sable alluvionnaire	64
Figure 2.2 Sable de dune	64
Figure 2. 3 Sable concassé.....	65
Figure 2. 4 Courbes granulométriques des sables utilisés.	66
Figure 2. 5 Photo MEB du sable alluvionnaire.....	67
Figure 2. 6 Photo MEB du sable de dunes.	67
Figure 2. 7 Photo MEB du sable concassé.....	68
Figure 2. 8 Courbes granulométriques des graviers utilisés.	69
Figure 2. 9 Logiciel de modélisation statistique JMP.....	71
Figure 2. 10 Le plan utilisé pour l'étude de l'influence des sables	76
Figure 2. 11 Essai d'étalement	81
Figure 2. 12 Essai à l'entonnoir en V	81
Figure 2. 13 L'essai de la boîte en L.....	82
Figure 2. 14 Essai de stabilité au tamis.....	83
Figure 2. 15 Essai de ségrégation au cylindre	84
Figure 2. 16 Essai de ségrégation à la colonne	85
Figure 2. 17 Logiciel d'acquisition Hei-Control V2.01	86
Figure 2. 18 Schéma et Dispositif du rhéomètre utilisé	86
Figure 2. 19 Exemple d'un Profil de vitesse pour BAP.....	88
Figure 2. 20 Exemple d'un Profil de vitesse pour MAP	88
Figure 2. 21 Exemple d'une présentation graphique « RheoGraph »	89
Figure 2. 22 Exemple d'une présentation numérique « RheoGraph ».....	90
Figure 2. 23 Essai de K-slump modifié	91
Figure 2. 24 Description de l'appareil	92
Figure 3. 1 La transformation des résultats rhéologiques selon les 3 modèles ..	102
Figure 3. 2 Les résultats des contraintes de cisaillement	103
Figure 3. 3 Les résultats des viscosités plastiques et des indices de consistanc..	103
Figure 3. 4 Corrélations entre τ_B , τ_{BM} et τ_{HB}	104
Figure 3. 5 Corrélations entre μ_B , μ_{BM} et K_{HB}	104
Figure 3. 6 Corrélations entre C/μ_{BM} et n	105
Figure 3. 7 Évolution de l'étalement (cm) en fonction du G/S et G1/G2.....	107
Figure 3. 8 Évolution du rapport H2/H1 (%) en fonction du G/S et G1/G2	107
Figure 3. 9 Évolution de T50 (s) en fonction du G/S et G1/G2.....	108
Figure 3. 10 Évolution de V-funnel (s) en fonction du G/S et G1/G2.....	109
Figure 3. 11 Évolution de T20 (s) en fonction du G/S et G1/G2.....	109
Figure 3. 12 Évolution de T40 (s) en fonction du G/S et G1/G2.....	110
Figure 3. 13 Évolution de Km (cm) en fonction du G/S et G1/G2	111

Figure 3. 14 Évolution de P_i (%) en fonction du G/S et G1/G2	112
Figure 3. 15 Évolution de P_d (mm) en fonction du G/S et G1/G2	112
Figure 3. 16 Évolution de ISS en fonction du G/S et G1/G2	113
Figure 3. 17 Évolution de τ_B (Pa) en fonction du G/S et G1/G2.....	114
Figure 3. 18 Évolution de τ_{BM} (Pa) en fonction du G/S et G1/G2.....	114
Figure 3. 19 Évolution de τ_{HB} (Pa) en fonction du G/S et G1/G2.....	115
Figure 3. 20 Évolution de μ_B (Pa.s) en fonction du G/S et G1/G2.....	116
Figure 3. 21 Évolution de μ_{BM} (Pa.s) en fonction du G/S et G1/G2	116
Figure 3. 22 Évolution de k_{HB} (Pa.s) en fonction du G/S et G1/G2.....	117
Figure 3. 23 Évolution de TVR (%) en fonction du G/S et G1/G2	117
Figure 3. 24 Relation entre l'étalement et K_m	118
Figure 3. 25 Relation entre la stabilité au tamis et K_m	119
Figure 3. 26 Relation entre la stabilité au cylindre et K_m	119
Figure 3. 27 Diagramme ternaire de l'étalement (cm)	124
Figure 3. 28 Diagramme ternaire du rapport H_2/H_1 (%)	125
Figure 3. 29 Diagramme ternaire de T50 (s).....	126
Figure 3. 30 Diagramme ternaire de V-Funnel (s)	126
Figure 3. 31 Diagramme ternaire de T20 (s).....	127
Figure 3. 32 Diagramme ternaire de T40 (s).....	127
Figure 3. 33 Diagramme ternaire de τ_{BM} (Pa)	129
Figure 3. 34 Diagramme ternaire de μ_{BM} (Pa.s)	130
Figure 3. 35 Diagramme ternaire de P_i (%)	131
Figure 3. 36 Diagramme ternaire de P_d (mm)	132
Figure 3. 37 Diagramme ternaire de k_m (cm)	132
Figure 3. 38 Diagramme ternaire de F_t 7j (MPa)	133
Figure 3. 39 Diagramme ternaire de F_t 14j (MPa)	134
Figure 3. 40 Diagramme ternaire de F_t 28j (MPa)	134
Figure 3. 41 Diagramme ternaire de F_c 7j (MPa).....	135
Figure 3. 42 Diagramme ternaire de F_c 14j (MPa).....	136
Figure 3. 43 Diagramme ternaire de F_c 28j (MPa).....	136
Figure 3. 44 Relation entre τ_{BM} et l'étalement.....	138
Figure 3. 45 Relation entre τ_{BM} et L-Box	138
Figure 3. 46 Relation entre μ_{BM} et V-Funnel.....	139
Figure 3. 47 Relation entre la μ_{BM} et T50.....	140
Figure 3. 48 Relation entre μ_{BM} et P_i	141
Figure 3. 49 Relation entre μ_{BM} et P_d	141

Introduction générale

Introduction générale

Le béton autoplaçant (BAP) est un matériau de construction qui représente une avancée technologique importante. Cette nouvelle famille de béton a été développée afin d'obtenir un matériau capable de se mettre en place par le seul fait de la gravité sans l'apport de vibration. Pour remplir ces conditions, ce type de béton doit être très fluide, stable et homogène et donner à la structure une qualité et une résistance au moins équivalentes aux celles d'un béton classique.

Vu la fluidité importante des BAP, le risque de séparation entre la pâte et les granulats n'est pas des moindres. Cet atout conduit à prendre des dispositions spécifiques pour assurer l'homogénéité de l'ensemble pâte-granulats.

La compréhension des propriétés rhéologiques des bétons fluides représente une étape importante afin d'assurer une meilleure description des propriétés à l'écoulement et celles de la stabilité statique. En outre, la maîtrise de la composition et des paramètres de composition nous permet aussi de comprendre le comportement rhéologique et mécanique des BAP.

Les études rapportées dans la littérature ont montré que le comportement rhéologique et notamment la stabilité statique sont fortement affectés par la réduction du volume des gros granulats et du rapport E/C tout en augmentant le dosage en superplastifiant et de la quantité de fines.

Plusieurs chercheurs ont rapporté aussi que les paramètres de formulation liés à la fraction granulaire telle que la fraction volumique granulaire Gravier+sable (G+S) et le rapport gravier/sable (G/S) influent fortement sur l'ouvrabilité des BAP.

Les BAP intègrent dans leurs formulations une quantité de fines importante pour assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage. Ces fines proviennent du ciment, des additions et des granulats. L'utilisation des sables riches en fines telles que les sables de dune et les sables de carrière peuvent être considérés comme des sources alternatives des fines.

Dans ce contexte, le travail que nous présentons est divisé en deux grandes parties :

Une première partie, dans laquelle on étudie l'effet des paramètres de formulation tel que : le rapport gravier/sable (G/S), le rapport gravier 3-8/gravier 8-15 (G1/G2), le rapport de poudre de marbre/ciment (PM/C), le rapport eau/ciment (E/C) et le dosage du superplastifiant (SP), sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des BAP avec la proposition d'un nouveau test qui permet de contrôler la ségrégation ainsi que l'ouvrabilité des BAP à l'état frais.

Dans une deuxième partie, on s'intéresse à étudier l'influence de divers types de sables (sable alluvionnaire, sable de dune et sable de concassage) en mélanges binaires et ternaires sur la stabilité statique et le comportement rhéologique et mécanique des BAP en s'appuyant sur les résultats de la première partie d'étude.

L'application de la méthode de plan d'expériences, basée sur une approche statistique, nous a fourni des modèles mathématiques permettent de tracer des courbes isoréponses (binaires et ternaires) afin d'optimiser les effets principaux et toute possible interaction entre les facteurs étudiés.

Notre présente thèse est organisée en trois chapitres.

Dans le premier, nous présentons des généralités sur les bétons autoplacants ainsi que l'influence des paramètres de composition sur le comportement rhéologique et mécanique des BAP. Les méthodes de formulation et les différents essais de caractérisation seront aussi présentés dans ce chapitre.

Le deuxième chapitre décrit les différentes caractéristiques des matériaux, les procédures d'essais et les méthodes nécessaires pour la réalisation du programme expérimental. Le choix et la préparation du plan d'expérience utilisé y sont mentionnés.

Le troisième chapitre est dédié à la présentation des résultats expérimentaux suivis par des analyses et des interprétations de ces résultats.

Enfin, nous clôturons cette thèse par une conclusion générale qui résume les principaux résultats trouvés et des recommandations afin de poursuivre le travail dans le cadre de cette recherche.

Chapitre 1 : Étude bibliographique

CHAPITRE 1 : Étude bibliographique

1.1 Généralité sur les bétons autoplaçants

1.1.1 Historique

À partir des années 80, la durabilité du béton est devenue un sujet d'intérêt majeur. Assurer une vibration suffisante au sein des coffrages permet d'avoir des bétons plus compacts et donc plus durables, ce qui nous oblige à tenir compte de la main-d'œuvre suffisante et qualifiée pour assurer un emplacement adéquat et une vibration nécessaire. L'une des solutions proposées consiste à trouver un béton qui se met en place sans effort (autoplaçant). La nécessité d'un béton qui limite la pénibilité de travail des ouvriers a été proposée par le Japonais Okamura en 1986. Le premier prototype des bétons autoplaçant furent développés en 1988 par K. Ozaoua et K. Maekawa de l'université de Kochi (Tokyo), puis a été reprise rapidement par les grands groupes industriels japonais (Taisei, Kajima et Obayashi) grâce à leurs multiples avantages techniques et socio-économiques (Ouchi et Hibino, 2000).

1.1.2 Définition

Le béton autoplaçant (BAP) - aussi nommé autonivelant (BAN) ou autocompactant (BAC) - est un béton de ciment qui s'écoule et se met en place sous l'unique effet de la pesanteur, il est capable de remplir entièrement les coffrages complexes et très encombrés. Ce type de béton demande des dosages élevés en sables ainsi que le volume de pâte et la quantité de fines sont plus importants tout en réduisant la quantité des gros granulats pour assurer l'ouvrabilité et la stabilité (résistance à la ségrégation et au ressuage). L'utilisation des adjuvants tels que les superplastifiants offre une excellente ouvrabilité et une viscosité suffisante et permettent de réduire fortement la quantité d'eau nécessaire, ce qui améliore encore les performances mécaniques.

1.1.3 Avantages techniques

Les bétons autoplaçants offrent de nombreux avantages techniques et socio-économiques par rapport aux bétons traditionnels tels que :

- Facilité de mise en place (couler l'ouvrage en un seul point) ;
- Réduction des délais de réalisation et les coûts de main-d'œuvre nécessaire ;
- Possibilité de bétonner dans des zones à forte densité de ferrailage les coffrages à géométrie complexe ;

- Résistances et durabilité comparables à celles des bétons ordinaires avec un excellent enrobage des armatures ;
- Amélioration de l'esthétique et la qualité des parements ;
- L'amélioration des conditions de travail, la sécurité et la santé des ouvriers ;
- Réduction du bruit et la pénibilité des tâches sur les chantiers.

1.1.4 Domaines d'Emploi

Grâce à leur fluidité importante à l'état frais ainsi que leur durabilité, le béton autoplaçant présente une nouvelle technologie révolutionnaire utilisée dans de nombreux domaines de la construction :

- La construction de bâtiments de grande hauteur et les ouvrages de formes complexes et fortement ferraillés ;
- Très utile pour les opérations de réparation et de renforcement ;
- Il s'adapte sans difficulté aux détails architecturaux particuliers ;
- Les BAP sont aussi adoptés dans les structures et les éléments préfabriqués (prédalles, prémurs, éléments sandwich, escaliers, dalots, etc.).

Nous citons ci-dessous quelques exemples de réalisation d'ouvrage utilisant des bétons autoplaçants.

- Le gratte-ciel de Roppongi Hills Mori de Tokyo (238 m) pour 54 étages, inaugurée en 2003 ;
- Le pont suspendu Bandra-Worli Sea (2010). Le pont le plus long d'Inde (5.6 km) ou 230,000 m³ de béton autoplaçants ont été utilisés ;
- Le nouvel épiceutre Tanjong Pagar au Singapour (290 m) construit en 2016. Le volume du BAP utilisé est 13500 m³ ;
- La centrale nucléaire de Tarapur en Inde (2005).

1.1.5 Mise en œuvre

Les règles de l'art correspondant à la mise en œuvre des bétons autoplaçants sont similaires à ceux connus pour les bétons ordinaires.

D'après les recommandations de L'AFGC (AFGC, 2008), il faut bien respecter les longueurs de cheminement et hauteurs de chute durant la mise en œuvre du béton dans le coffrage. L'absence de ségrégation dommageable sur le type d'élément bétonné doit être vérifiée lors d'essais préalables. Il est primordial aussi que les équipes en charge de la mise en œuvre du béton aient été préalablement formées à la mise en œuvre du BAP.

Le pompage est la méthode de mise en œuvre la plus adaptée aux BAP, étant donné que ces derniers sont obligatoirement pompables du fait de leur principe de formulation.

Compte tenu de la consistance très fluide des BAP, il convient de s'assurer que le coffrage ne présente pas de fuites. Une attention particulière doit être aussi portée sur la propreté des coffrages lorsqu'un aspect soigné de parement est souhaité.

La cure du BAP après le bétonnage requiert aussi une attention particulière afin d'éviter une évaporation trop importante dans les premières heures du durcissement. Il convient donc d'appliquer les règles définies pour la cure des bétons ordinaires pour les BAP d'une manière stricte.

Le BAP doit être transporté au moyen d'un camion-malaxeur pour lequel une vérification périodique des pales est assurée. La réception du béton sur chantier doit permettre de vérifier l'aptitude du béton à être mis en œuvre sans aucune vibration et la conformité à la formule nominale qui est essentiellement basée sur la mesure de l'étalement.

1.1.6 Matériaux constituant un BAP

La composition des bétons autoplaçants est beaucoup plus complexe que celle des bétons ordinaires (cf. Figure 1.1), elle nécessite l'ajustement du dosage de plusieurs constituants (ciment, sable, gravier, additions minérales, l'eau et le superplastifiant) et parfois l'agent de viscosité afin d'obtenir les résultats souhaités.

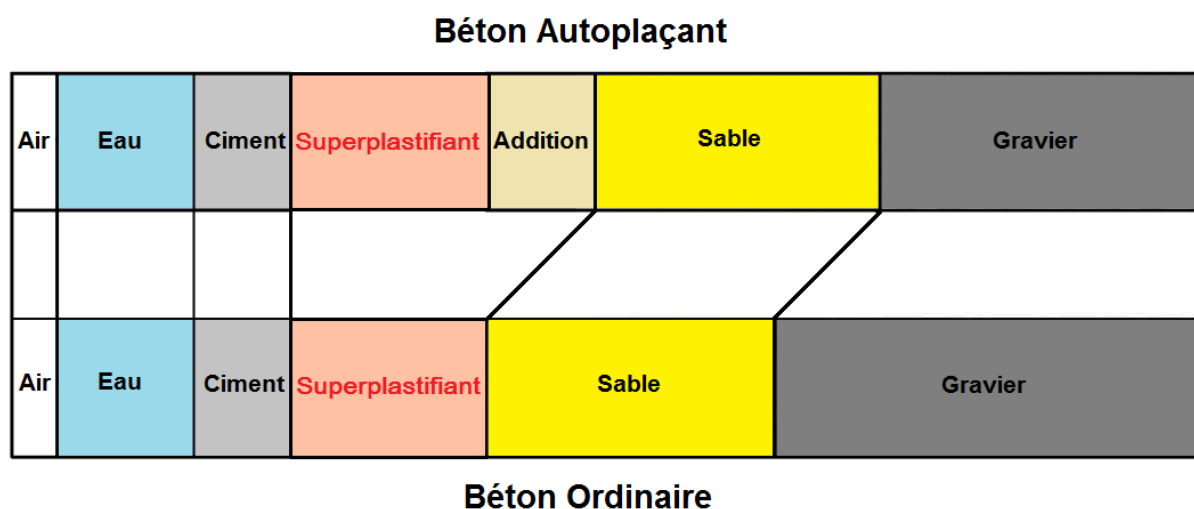


Figure 1. 1 Composition d'un béton autoplaçant et un béton ordinaire (Okamura et Ouchi, 2003)

1.1.6.1 Le ciment

Le ciment est une poudre minérale fine qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation (liant hydraulique). Il résulte du broyage et de l'homogénéisation de divers constituants, dont le plus spécifique, le clinker, est obtenu par cuisson (à 1450°C) d'un mélange de calcaire (environ 80%) et d'argile (environ 20%). On ajoute souvent d'autres constituants tels que du laitier de haut-fourneau, des cendres volantes ou des pouzzolanes.

Les propriétés physico-chimiques du ciment sont inhérentes à son caractère hydraulique : mélangé à l'eau, il forme une pâte qui se solidifie dans l'air ou sous l'eau. Ce phénomène résulte d'un ensemble de réactions très complexes - désignées sous le terme d'« hydratation » - au cours desquelles les silicates et les aluminates se développent, formant un gel cristallin qui marque le début du phénomène de prise (Collectif, 2000).

1.1.6.2 Les granulats

Les granulats représentent environ les deux tiers du béton en volume. Ils sont constitués de différents grains minéraux, naturels ou artificiels. Leurs formes et leurs dimensions (qui peuvent aller jusqu'à 20 mm) jouent un rôle important pour la mise en œuvre et la compacité du béton. Leurs caractéristiques sont définies dans la norme (*NF EN 12620+A1*, 2008).

Les granulats sont classés selon une granulométrie constituée par l'échelonnement des dimensions des grains en fines, sables ou gravillons. L'obtention d'une granulométrie continue nécessite un minimum de trois classes granulaires (par exemple 0/3, 3/8, 8/15) et des dosages bien déterminés.

Le choix des granulats doit se faire en fonction de plusieurs critères technico-économique qui vont de la destination du béton et de l'ouvrage à la simple question des disponibilités locales. Les granulats employés doivent être propres, car les impuretés perturbent l'hydratation du ciment et entraînent des défauts d'adhérence entre les granulats et la pâte (Collectif, 2000).

Les granulats peuvent être classés en 3 catégories principales (Larcher et Gelgon, 2012) :

- **Les granulats naturels :**

- Les granulats naturels alluvionnaires (granulats roulés ou semi concassés) sont de forme arrondie tels que les granulats de rivière, de mer et de dunes ;
- Les granulats naturels de carrière (granulats concassés) sont obtenus par concassage de roches massives et sont de la forme plus anguleuse ;

- **Les granulats artificiels** sont de sous-produits industriels (laitier granulé de haut fourneau) ou des granulats élaborés industriellement pour renforcer la résistance à l'usure (granulats ferreux) ou à la chaleur (granulats réfractaires) ;
- **Les granulats recyclés** ont pour origine des matériaux de démolition qui sont concassés puis criblés.

1.1.6.3 Les additions minérales

Les additions minérales sont des poudres fines d'origine minérale de caractéristiques différentes ajoutées au béton pour modifier certaines de ses propriétés. La formulation des bétons autoplacants doit comporter une grande quantité de fines (de l'ordre de 500 kg/m^3) afin d'assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage.

Les additions minérales peuvent être classées selon la norme (*NF EN 206*, 2014) en fines actives telles que la fumée de silice, les cendres volantes et la pouzzolane naturelle, et en fines inertes telles que les fillers calcaires et la poudre de marbre.

- **Les fillers calcaires**

Les fillers calcaires sont des substances minérales provenant du concassage et broyage de roches des granulats calcaires conformément à la norme (*NF P18-508*, 2012). Ils sont essentiellement constitués de carbonate de calcium (CaCO_3). Ils sont considérés comme une addition inerte (c.-à-d. une matière qui n'est pas chimiquement active).

Une base de 69 publications, issues de journaux internationaux et d'actes de congrès, traitant de tous les aspects du béton autoplacant (formulation, écoulement, résistance, durabilité), et qui incorporent des fillers calcaires (Diederich, 2010). Ces résultats de recherches montrent les effets favorables de ces additions sur les propriétés des BAP.

- **La poudre de marbre**

La poudre de marbre est une poudre de récupération issue des déchets des opérations de sciage et façonnage de la pierre de marbre. L'Algérie dispose d'immenses quantités de sous-produits industriels, tels que la poudre de marbre (carrière de Fil-Fila située à 25 km à l'est du centre-ville de SKIKDA), dont sa valorisation dans les matériaux cimentaires pourrait constituer une alternative écologique et économique intéressante, permettant d'élargir le champ d'emploi de la poudre de marbre et l'élimination de décharges encombrantes.

L'utilisation du déchet poudre de marbre est très nécessaire, d'une part pour éviter la pollution de la nature et d'autre part pour protéger les ressources naturelles. Actuellement, la poudre de marbre est l'une des additions minérales les plus utilisées dans la production du béton dans le monde entier notamment en Turquie. Ce pays est très riche en marbre, il possède 700 carrières, 250 types de marbre et des réserves qui représentent 40% des réserves mondiales (Haddadou, 2015).

1.1.6.4 L'eau de gâchage

Elle est nécessaire à l'hydratation du ciment et facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier. Un excès d'eau diminue la résistance et la durabilité du béton.

L'eau doit être propre et ne peut pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours. Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme (*NF EN 1008*, 2003) (Collectif, 2000).

1.1.6.5 Les superplastifiants

Les superplastifiants permettent d'obtenir une très grande fluidité tout en réduisant, de façon encore plus forte que les plastifiants, l'eau nécessaire au gâchage. La faible teneur en eau du béton diminue sensiblement sa porosité, ce qui améliore sa résistance et sa durabilité. Ces adjuvants sont couramment employés dans les bétons autoplacants et les bétons à haute performance. (Collectif, 2000).

Les superplastifiants sont des molécules appartenant généralement à l'une des trois familles suivantes :

- Les naphthalènes-sulfonates, superplastifiants inventés au Japon à la fin des années 70 ;
- Les mélamines sulfonées, autre catégorie de superplastifiants inventés à la même époque en Allemagne ;
- Les superplastifiants dits « de nouvelle génération » (apparus au cours des années 90) : polyphosphonates, polycarboxylate et polyvinyliques.

Les superplastifiants s'absorbent partiellement sur les surfaces des grains de ciment. Par un effet de répulsion électrostatique, les amas de particules sont brisés : c'est l'effet de défloculation (De Larrard, 2002).

1.2 Comportement des BAP a l'état frais

Les caractéristiques requises pour les bétons autoplaçants à l'état frais sont différentes et définissent si un BAP a de bonnes propriétés à l'état frais telles que les besoins de finition, la capacité de passage, la capacité de remplissage et la stabilité statique (résistance à la ségrégation et au ressuage). Le développement des BAP intensifie le besoin de caractériser encore mieux le comportement du béton et son écoulement. Les tests empiriques conventionnels (Étalement au cône d'Abrams, T50, L-BOX, V-Funnel) 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 (rhéomètres) donne des résultats plus adéquats et reflète bien l'aptitude physique du matériau à se déplacer sous son propre poids (Adjoudj, 2015).

1.2.1 Capacité de passage

Le béton autoplaçant doit posséder une bonne capacité de passage à travers les armatures et dans les endroits confinés. Lorsque les grains de gros granulats se rapprochent les uns aux autres, le risque de blocage sera élevé (cf. Figure 1.2). Pour minimiser ce risque, le choix de la quantité importante de granulats et leurs dimensions maximales doit s'effectuer selon la densité et la géométrie du ferrailage et la pâte doit avoir une viscosité importante afin d'éviter le blocage des gros granulats au niveau des obstacles (Bouziani, 2012).

La capacité de passage peut être déterminée à l'aide de l'essai de la boîte en L, l'essai J-ring et l'essai de la boîte en U.

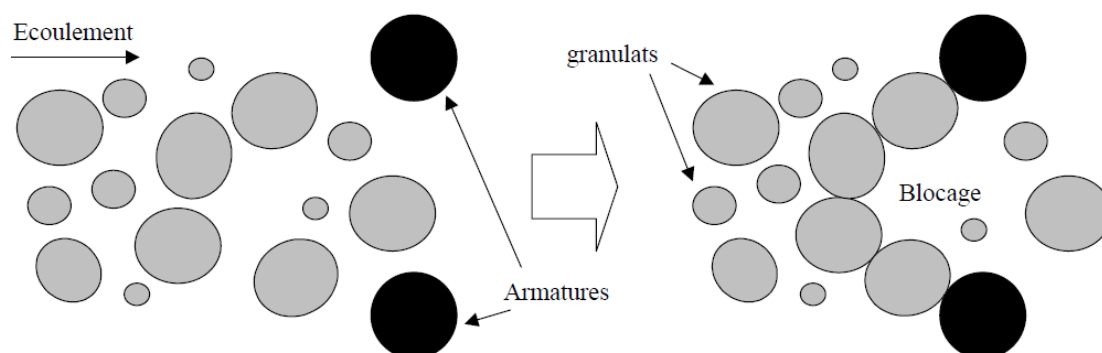


Figure 1. 2 Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures(El Barrak, 2003)

1.2.2 Capacité au remplissage

La capacité de remplissage du béton, ou la déformabilité, est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le béton autoplaçant est capable de remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné, en se déformant sous l'effet de son propre poids, et sans sollicitations (vibrations externes ou internes). Le remplissage est observé sous deux aspects : la capacité de remplissage et la vitesse de remplissage. Le premier aspect est lié à la capacité de déformation du béton, il traduit le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace. Le second est lié à la vitesse de déformation, il traduit ainsi la vitesse d'écoulement du béton (El Barrak, 2003).

La capacité de remplissage dépend de deux facteurs : la déformabilité et la résistance à la ségrégation. Pour avoir une capacité de remplissage maximale, il faut avoir une déformabilité maximale et une ségrégation minimale (Daoud, 2003). Cette capacité au remplissage peut être déterminée à l'aide de l'essai du caisson (Fill Box) et l'essai Orimet (Boukendakdji, 2010).

1.2.3 La résistance à la ségrégation

La ségrégation se définit comme une perte d'homogénéité du béton. Elle peut se produire lors d'un malaxage trop prolongé en phase de transport, de mise en œuvre, voire même dans l'ouvrage après consolidation. Il s'agit d'un phénomène relativement peu étudié, dont les conséquences peuvent être très dommageables. La formation de bouchons lors de l'amorçage des pompes constitue un problème classique de chantier imputable à la ségrégation. La ségrégation compromet l'esthétique des ouvrages, leurs propriétés mécaniques et leur durabilité (De Larrard, 2002).

Les BAP doivent s'écouler et passer à travers des armatures plus ou moins denses. Une fois le remplissage effectué, le matériau est soumis à la gravité jusqu'à la prise. Afin de rester homogène tout au long de ces différentes étapes, le matériau doit répondre à des sollicitations de différentes manières. S'il y a une instabilité, c'est-à-dire une séparation entre les gros granulats et la phase suspendante lors de la mise en œuvre dans le coffrage, on parle de ségrégation dynamique. La ségrégation statique peut apparaître une fois que le matériau est en place et jusqu'à la prise (Bethmont, 2005).

1.2.3.1 La ségrégation dynamique

La ségrégation dynamique est une séparation entre les granulats et la phase suspendante lors de l'écoulement. Cette ségrégation dépend principalement de la viscosité du matériau qui permet d'entraîner correctement les granulats lors de l'écoulement (Bethmont, 2005).

Pour caractériser la ségrégation dynamique, aucun essai de référence n'a encore fait l'unanimité, mais les essais existants ont tous pour objectif d'évaluer la capacité du béton à s'écouler dans une zone confinée. Ils peuvent permettre de déceler des problèmes de blocage (par formation de voûtes des granulats) lors de l'écoulement. L'essai de la boîte en L (L-Box) fait partie de ces essais (Belaidi, 2013). D'autres essais peuvent éventuellement indiquer que le matériau présente un risque de ségrégation dynamique (l'essai de la boîte en U et l'essai J-ring).

1.2.3.2 La Ségrégation statique

Une résistance à la ségrégation statique se traduit par la capacité qu'a un BAP à maintenir ses particules en suspension, sans risque de tassement des particules, ni ressuage (Hermime, 2016). La ségrégation statique est problématique, car elle n'est pas décelable en surface (sauf si elle s'accompagne de ressuage). Il est donc nécessaire de l'appréhender en amont du coulage. Des études portant sur la compréhension des mécanismes du phénomène restent limitées, mais elles ouvrent cependant quelques pistes de recherche (Bethmont, 2005). Les essais permettant de vérifier la résistance à la ségrégation statique des BAP sont peu nombreux. On peut citer l'essai au tamis (*NF EN 12350-11*, 2010), l'essai au cylindre (*ASTM C1712-17*, 2017) et l'essai à la colonne (*ASTM C1610*, 2017).

Van Bui et al (2002) ont développé un appareil simple et rapide pour évaluer la résistance à la ségrégation des BAP (cf. Figure 1.3). Cet appareil ne mesure pas réellement la ségrégation statique, il permet de fournir une information sur l'éventualité de ségrégation statique du béton. Cet essai mesure la profondeur de la pénétration d'un cylindre, avec une masse donnée, placée par-dessus d'un échantillon de béton frais (Naji, 2016). Les résultats montrent que l'appareil développé est très utile pour contrôler la ségrégation du béton. Cet appareil peut faire également une distinction entre différentes formulations avec différents paramètres (quantité des gros granulats, rapport eau sur liants E/L, le changement de l'un des constituants ... etc.).

Le critère de stabilité associé à cet essai est le suivant :

- Si $Pd \leq 10$ mm, alors le béton présente une bonne résistance à la ségrégation
- Si $10 \text{ mm} < Pd < 25$ mm, le béton offre une résistance modérée
- Si $Pd \geq 25$ mm, le béton présente une faible résistance à la ségrégation.

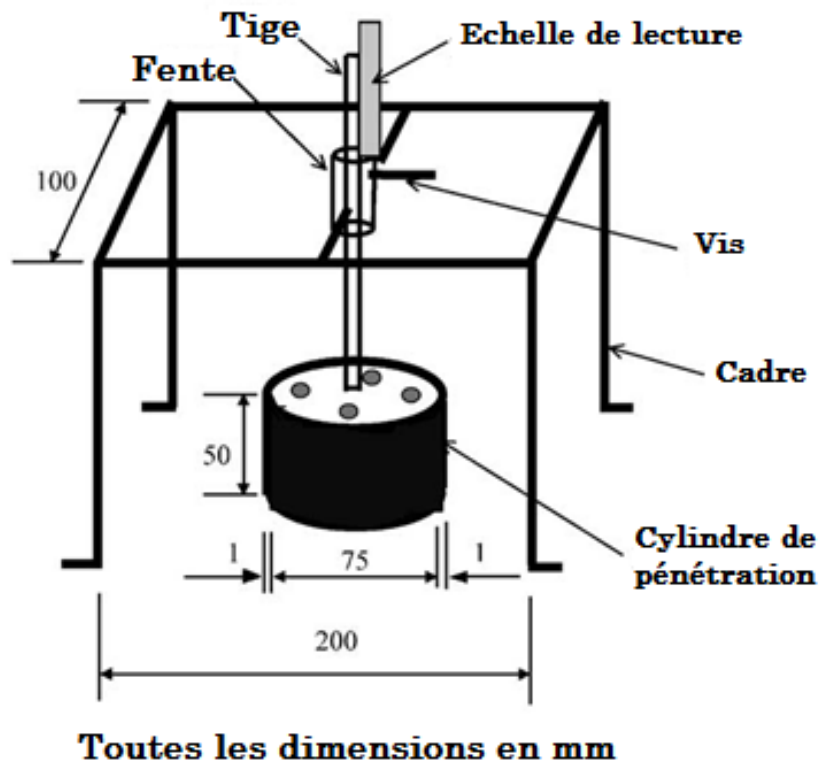


Figure 1. 3 L'essai de ségrégation au cylindre (Bui *et al.*, 2002)

Lin shen et al (2014) ont mesuré la stabilité statique en utilisant une sonde de ségrégation modifiée. La sonde est faite d'un fil d'acier de diamètre 1.6 mm (cf. Figure 1.4). Les résultats montrent qu'il existe une bonne corrélation entre l'essai à la sonde et les autres essais de ségrégation « l'essai au cylindre (*ASTM C1712-17*, 2017) et l'essai à la colonne (*ASTM C1610*, 2017) ». Les critères de stabilité de cet appareil sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 1. 1 Critères de stabilité pour la sonde de ségrégation modifiée

Pénétration (mm)	Critère de stabilité
$4 <$	Très stable
$4 - < 7$	Stable
$7 - 25$	Instable
> 25	Hautement instable

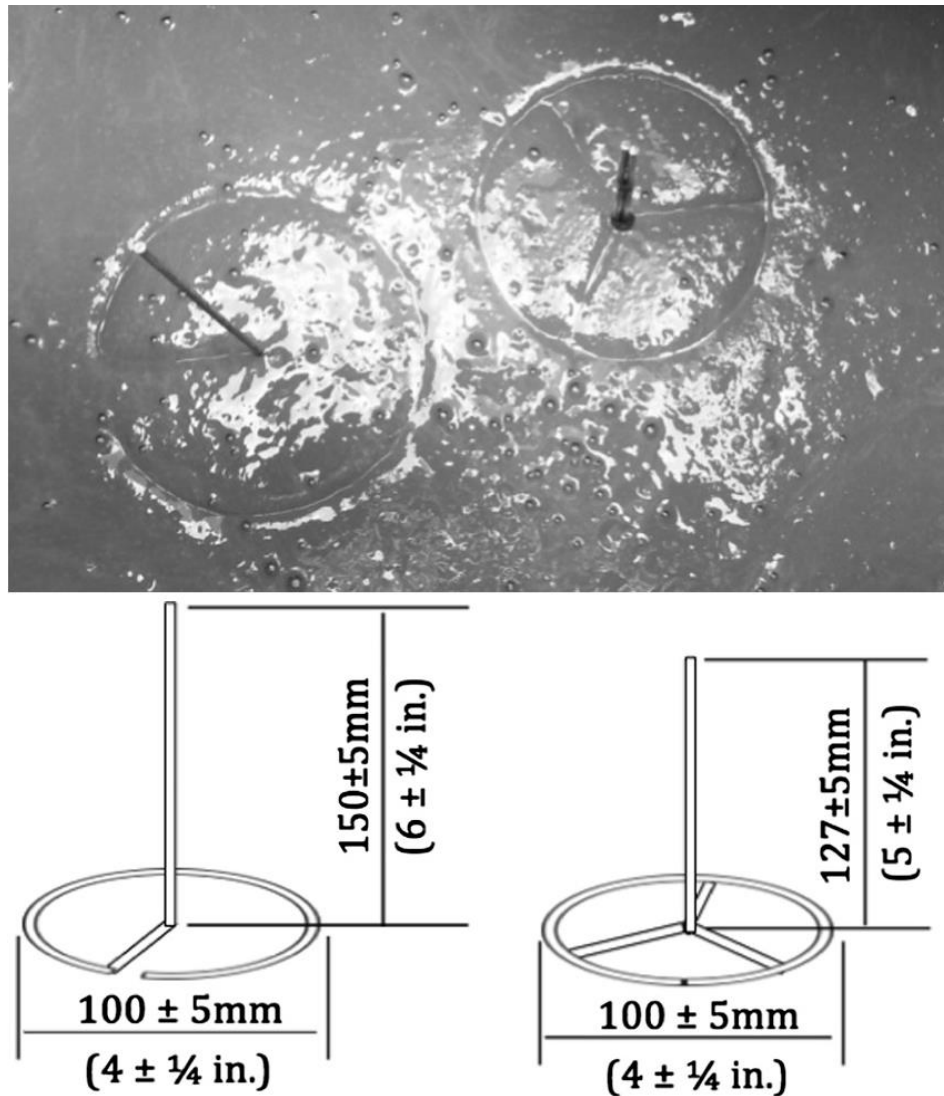


Figure 1. 4 L'essai de ségrégation a la sonde (Shen *et al.*, 2014)

Bethmont (2005) a mis au point un nouveau dispositif expérimental afin d'intégrer l'influence des interactions entre particules, et notamment les effets de groupe des granulats grossiers, à la description des mécanismes d'initiation de la ségrégation dans les BAP (cf. Figure 1.5). Les essais ont montré que la composition de la pâte n'a pas d'influence sur la stabilité d'une bille contenue dans un réseau granulaire. La constante ne dépend que de la fraction volumique du réseau. L'utilisation de réseaux de différentes fractions volumiques a mis en évidence une diminution de la valeur de la constante de stabilité lorsque la fraction volumique augmente. Cependant, bien que l'effet de groupe s'atténue pour les réseaux de fraction volumique élevée, il reste positif vis-à-vis de la stabilité. Ainsi, les résultats obtenus avec le dispositif d'essai constituent une première étape dans la compréhension des mécanismes de ségrégation statique des BAP : il existe bien un effet de groupe dans une gamme de fractions volumiques représentative de celle des gros granulats d'une formulation de BAP.

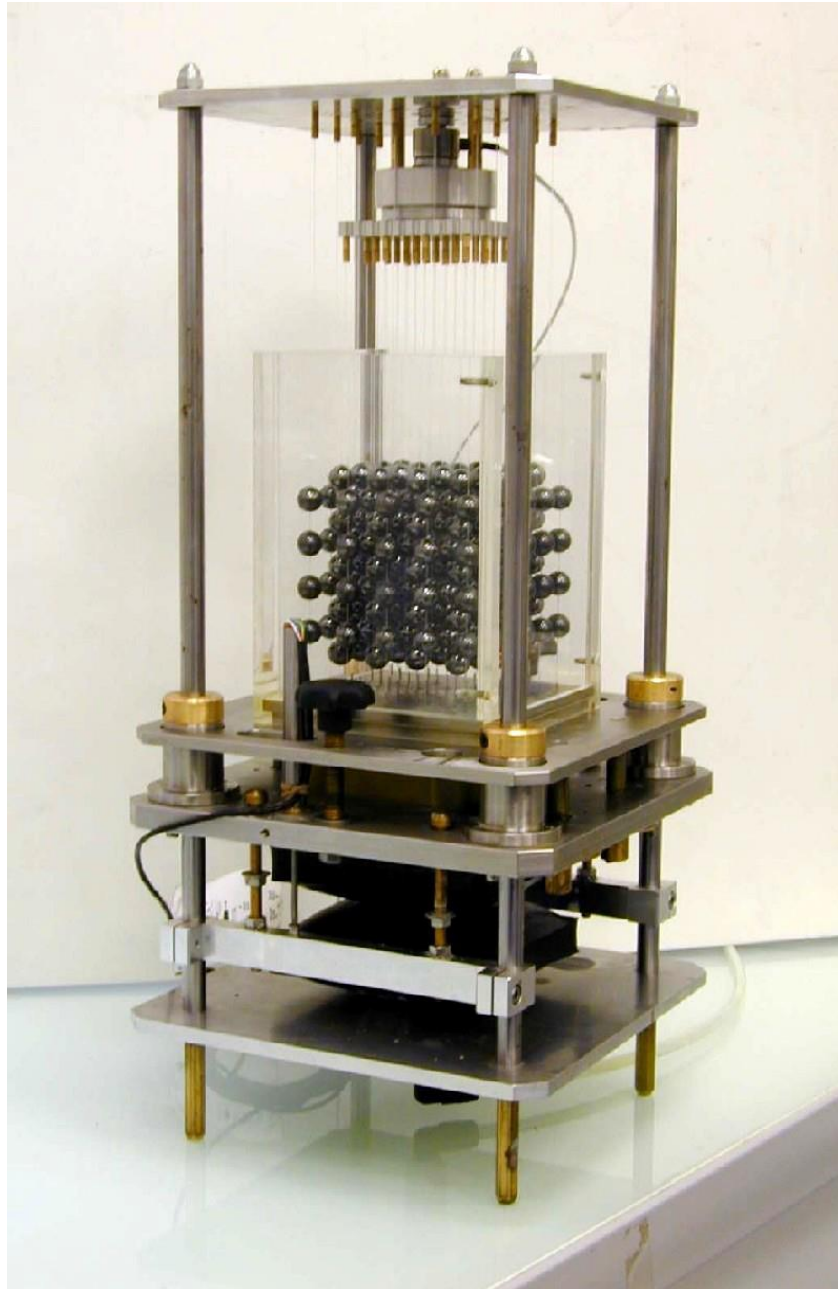


Figure 1. 5 Dispositif expérimental (Bethmont *et al.*, 2005)

Bensebti et al (2015) présentent une étude portant sur la résistance à la ségrégation statique des bétons autoplaçants. La procédure proposée permet de mesurer un Indice de Ségrégation Statique « ISS » exprimé par le pourcentage de la différence de teneur en granulats entre la section inférieure et supérieure $ISS = (G_{inf} - G_{sup}) \times 100$ (voir Chapitre II, § 2.3.2.3.f). L'intérêt de cet essai réside dans le fait que l'opération de séparation des différentes couches de béton se fait après la stabilisation complète du système granulaire (cf. Figure 1.6). Les résultats montrent que le risque de ségrégation statique est très minime quand l'étalement est inférieur à 70 cm. Il ressort aussi que pour obtenir un bon BAP il faudrait avoir un ISS inférieur ou égal à 5 (cf. Figure 1.7).



Figure 1. 6 Colonne d'un béton frais pour mesurer l'indice de ségrégation statique (Bensebti *et al.*, 2015)

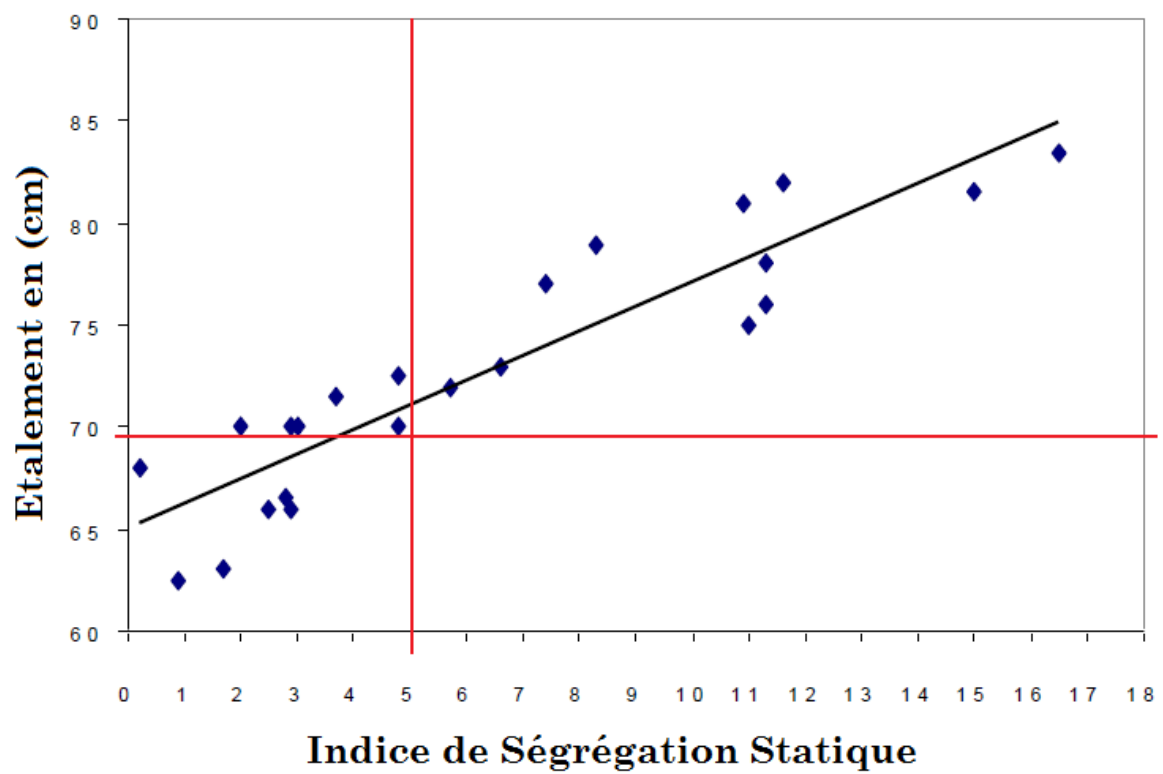


Figure 1. 7 Relation entre l'étalement et l'indice de ségrégation (Bensebti *et al.*, 2015)

1.2.4 Rhéologie des bétons

La rhéologie est une discipline qui traite l'écoulement et des déformations des matériaux sous l'action de contraintes. Elle est constituée de façon autonome à partir de 1928 et c'est développé très rapidement depuis. Son intérêt est rendu chaque jour plus évident par l'apparition d'un nombre sans cesse croissant de substances au comportement complexe : pâtes, boues, suspensions, émulsions et polymères (Guy *et al.*, 2014).

La rhéologie du béton frais est une science relativement jeune. Tattersall (1991) a été l'un des pionniers de la rhéologie de béton, en proposant, au moyen d'un malaxeur instrumenté, une caractérisation plus complète de l'écoulement de ce matériau. Il a proposé de décrire le comportement du béton frais au moyen de modèle de Bingham (De Larrard, 1998).

1.2.4.1 Paramètres rhéologiques

Généralement, les propriétés rhéologiques peuvent être mesurées par des rhéomètres à géométrie rotative. L'obtention de la contrainte de cisaillement « τ » et de la vitesse de cisaillement ou taux de déformation « $\dot{\gamma}$ » dans ces géométries 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 (Taleb, 2017).

Les principaux paramètres rhéologiques dans le domaine du béton sont :

a) La contrainte de cisaillement

Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, les couches sont animées de mouvement relatif les unes par rapport aux autres : deux couches successives au contact l'une de l'autre se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre. Il en résulte l'apparition de forces de frottement qui s'exercent tangentielllement à la surface de la couche : ces forces tangentielles sont appelées force de cisaillement (cf. Figure 1.8). Il est commode de rapporter ces forces de cisaillement à l'unité de surface sur laquelle elles s'exercent (Guy *et al.*, 2014).

La contrainte de cisaillement est définie comme suit :

$$\tau = \frac{dF}{dS} \quad (1.1)$$

Où :

dF : projection de la force de frottement tangentielle

dS : surface élémentaire d'une couche cisailée.

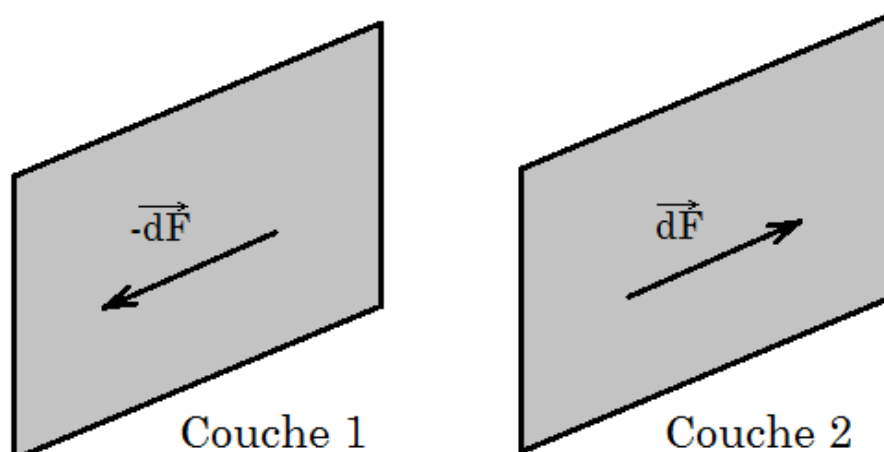


Figure 1. 8 Forces exercées par la couche (1) sur la couche (2)
(Guy *et al.*, 2014)

b) Le seuil de cisaillement

Le seuil de cisaillement « τ_0 » est couramment associé à un potentiel minimum d'interaction entre particules solides au repos qui serait influencé par la disposition des particules les unes par rapport aux autres, leur taille, le potentiel chimique du fluide suspendant, etc. Le seuil de cisaillement est une manifestation soit des interactions particulières électrostatiques du type Van der Waals entre grains colloïdaux de tailles de l'ordre du micromètre, soit du frottement solide entre grains de tailles de l'ordre du millimètre. Lorsqu'un effort est appliqué au fluide, de l'énergie est fournie aux éléments, capable de les faire sortir de leur position d'équilibre et permet au fluide de s'écouler macroscopiquement (Coussot et Ancey, 1999).

Le béton autoplaçant doit avoir un seuil d'écoulement suffisant pour maintenir une résistance à la ségrégation. D'autre part, le seuil de cisaillement doit être proche de zéro pour maintenir une capacité de remplissage suffisante pour l'autoplaçance (Yamine, 2007).

c) La vitesse de cisaillement

La vitesse de cisaillement, encore appelée « gradient de vitesse », qu'on notera $\dot{\gamma}$: elle caractérise la variation de la vitesse entre les couches limites et est égale au quotient de la vitesse V et de l'épaisseur e de l'échantillon (cf. Figure 1.9). La vitesse étant une longueur divisée par un temps, ce quotient s'exprime donc en inverse de seconde (s^{-1}) (Coussot et Grossiord, 2002).

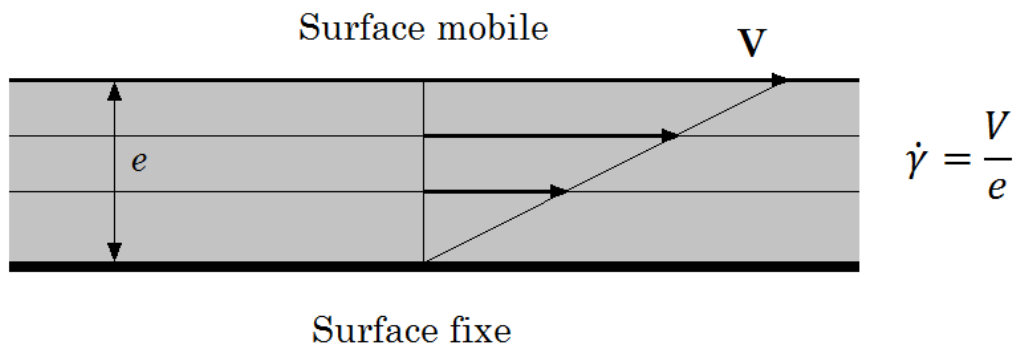


Figure 1. 9 Mouvement de cisaillement entre deux surfaces planes (Guy *et al.*, 2014).

d) La viscosité

On considère idéalement un liquide au repos comme un ensemble de couches moléculaires parallèles soumises à une contrainte tangentielle. Si une des couches du liquide se déplace par rapport à celle qui lui est sous-jacente (cf. Figure 1.10), 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 (Couarraze et Grossiord, 2000).

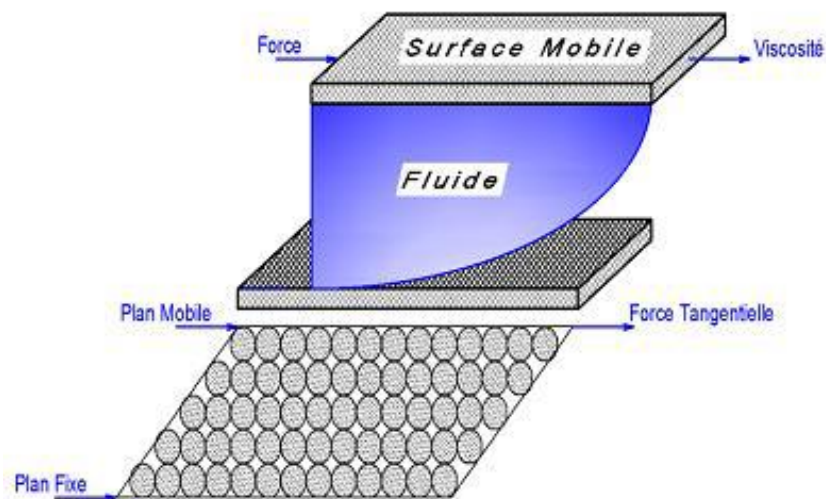


Figure 1. 10 Schémas glissement des couches (Adjoudj, 2015)

1.2.4.2 Différents comportements rhéologiques

1.3.4.2.1 Fluide newtonien

Quand un fluide est soumis à une contrainte de cisaillement, le fluide change continument de forme (déformation). Si le fluide est newtonien, la vitesse de déformation est proportionnelle à la contrainte de cisaillement appliquée (cf. Figure 1.11) et la constante de proportionnalité est appelée viscosité. La plupart des fluides communs (eau, huile, essence, air) sans particules ou de larges molécules en suspension sont newtoniens (Cengel et Cimbala, 2017).

Le comportement rhéologique des fluides newtoniens décrit comme suit :

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (1. 2)$$

Où :

τ : La contrainte de cisaillement [Pa]

μ : La viscosité [Pa. s]

$\dot{\gamma}$: Le taux de cisaillement [s⁻¹]

1.3.4.2.2 Fluide non newtonien

Un fluide non newtonien est un fluide qui se déforme à une vitesse qui n'est pas linéairement proportionnelle à la contrainte causant la déformation (cf. Figure 1.11). Selon la façon avec laquelle la viscosité varie avec la vitesse de déformation (Cengel et Cimbala, 2017).

a) Fluide Binghamien

Les fluides de Bingham sont caractérisés par le fait qu'ils n'accusent pas d'écoulement tant que la contrainte de cisaillement reste inférieure à une valeur seuil (Denis *et al.*, 1997). Pour des forces inférieures à ce seuil, la mixture 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 (Adjoudj, 2015). Il répond donc à l'équation ci-dessous :

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (1. 3)$$

Où :

τ : La contrainte de cisaillement [Pa]

τ_0 : Le seuil de cisaillement [Pa]

μ : La viscosité [Pa.s]

$\dot{\gamma}$: Le taux de cisaillement [s^{-1}]

b) Fluide rhéoépaississant ou fluide dilatant

Qualifie un fluide dont la viscosité augmente quand on lui applique une contrainte de cisaillement. On parle aussi de fluide dilatant (Taillet *et al.*, 2018).

Certains auteurs ont montré que les bétons autoplaçants avaient généralement un comportement rhéoépaississant (Geiker *et al.*, 2002) (Feys *et al.*, 2009). Le comportement rhéologique des pâtes très fluides dépend fortement des ajouts (nature et dosage en superplastifiant, type et dosage en agent de viscosité, des additions minérales) (Cyr *et al.*, 2000) (Helnan-Moussa, 2009).

c) Fluide rhéofluidifiant

Ce type de fluide a une viscosité qui diminue quand on lui applique une contrainte de cisaillement. On parle aussi de fluide pseudo-plastique. Ce comportement est beaucoup plus fréquent que le comportement opposé (rhéoépaississant). C'est le cas par exemple du sang et de certaines peintures dont cette propriété facilite l'application (Taillet *et al.*, 2018).

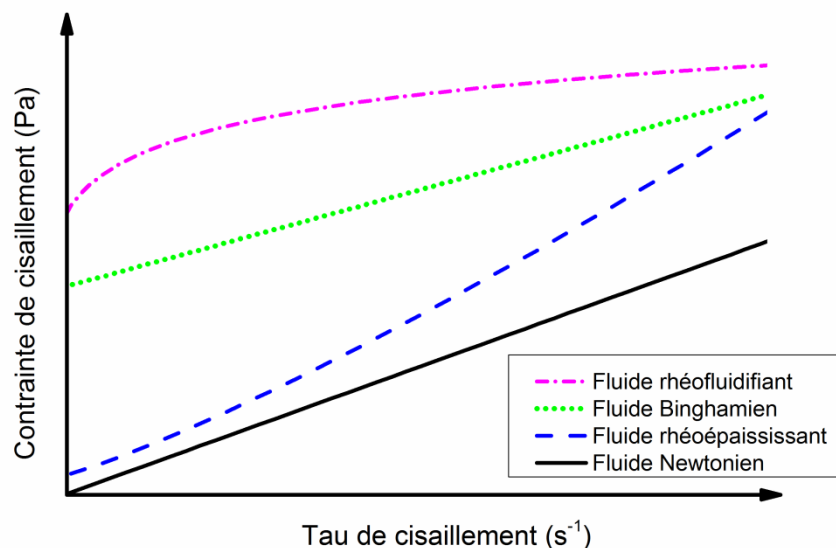


Figure 1. 11 Comportements rhéologiques des fluides

1.2.4.3 La thixotropie

La thixotropie est une propriété complexe que l'on retrouve dans certains fluides, c'est une variation réversible de la viscosité lorsqu'un fluide est soumis à une sollicitation. La viscosité des fluides diminue d'abord avec le temps lorsqu'une contrainte constante leur est appliquée. Cependant, la viscosité du matériau augmente de nouveau jusqu'à atteindre sa valeur d'origine dès que la contrainte appliquée est annulée (cf. Figure 1.12). Ce comportement s'explique par des changements de structures internes du fluide voire une destruction progressive de cette microstructure. La modification résulte alors de la compétition entre les forces hydrodynamiques (qui détruisent la microstructure) et les forces de cohésion et le mouvement brownien (description mathématique du mouvement aléatoire) qui reforment la microstructure (Barnes, 1997) (Taleb, 2017).

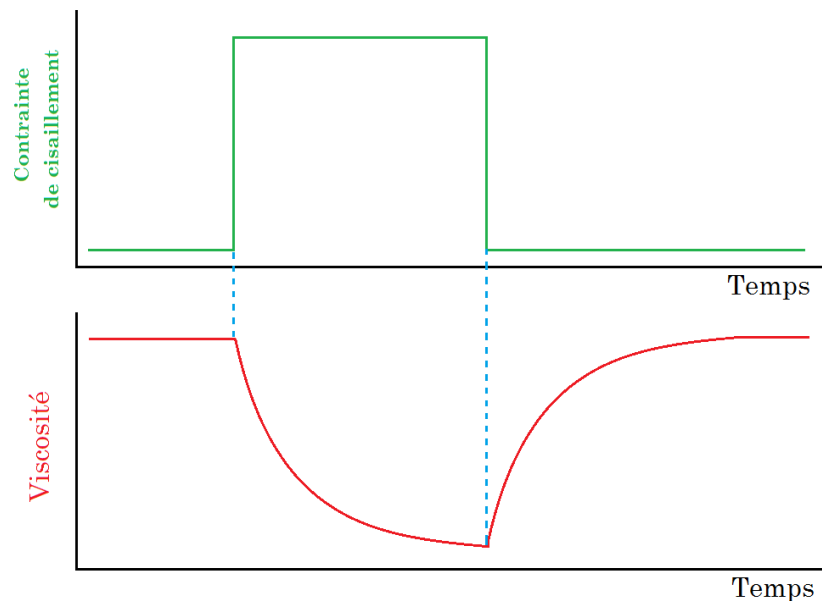


Figure 1. 12 Évolutions de la viscosité d'un fluide thixotrope (Quantifying Viscosity Recovery Using Thixotropy Assessment, 2018)

1.2.4.4 Appareils de mesures rhéologiques

Le développement des nouveaux bétons tels que les BAP intensifie le besoin de caractériser encore mieux le comportement du béton et son écoulement. L'importance de la maniabilité et de sa mesure ont pris du même coup une importance primordiale (Adjoudj, 2015).

Les essais empiriques donnent des résultats numériques, relevant d'échelles arbitraires, qui n'ont aucun rapport simple avec des propriétés physiques bien définies telles que le seuil de cisaillement et la viscosité.

De plus, ils ne peuvent pas fournir de mesures sur toute la gamme des consistances possibles, contrairement à ceux réalisés avec des rhéomètres à fluides et suspensions. Par ailleurs, les différentes études bibliographiques qui traitent de l'existence de corrélation entre les essais empiriques et les essais à l'aide de rhéomètre affirment une bonne corrélation entre la viscosité et le temps d'écoulement d'une part et le seuil d'écoulement et leur étalement d'autre part des BAP (Farih, 2016).

Il existe une grande variété de rhéomètres qui permettent de mesurer les paramètres rhéologiques du béton. Nous nous limiterons dans notre étude aux rhéomètres rotationnels qui sont plus adaptés aux matériaux granulaires, et qui peuvent être classifiés en trois catégories en fonction de leurs géométries de mesure (Taleb, 2017).

a) Rhéomètres malaxeurs – agitateurs

Ce type de rhéomètre est en fait un malaxeur instrumenté qui permet de déterminer la relation entre le couple de malaxage et la vitesse de rotation de la pale. Le principe de l'appareil a été modifié en changeant la géométrie de l'agitateur où deux versions ont été développées (le MK2 et le MK3). Le MK2, plus connu sous le nom de "two-point test" ou appareil de Tattersall, il est conçu pour les bétons de grandes maniabilités. Le MK3 est utilisé pour les bétons de faibles maniabilités. L'agitateur en forme de H effectue lors des essais d'un mouvement planétaire. Ce mouvement permet de conserver l'échantillon homogène lors des essais. Cet appareil est complètement automatisé et commercialisé sous le nom de "IBB" (cf. Figure 1.13) (Adjoudj, 2015).



Figure 1. 13 Rhéomètre IBB (Ferraris *et al.*, 2001)

Les deux rhéomètres à bétons développés au début des années 2000 sont le rhéomètre ICAR (cf. Figure 1.14) et le rhéomètre du LGCGM (cf. Figure 1.15). Ce sont deux rhéomètres de type agitateurs-malaxeurs avec une géométrie vane. Leur principale différence réside dans leur taille. Le rhéomètre ICAR possède une géométrie vane de taille plus petite (13 cm de diamètre comparée à celle du LGCGM, 15 cm) et un bol plus grand (41 cm à comparer au 28 cm de diamètre pour le LGCGM) (Mokéddem, 2012).

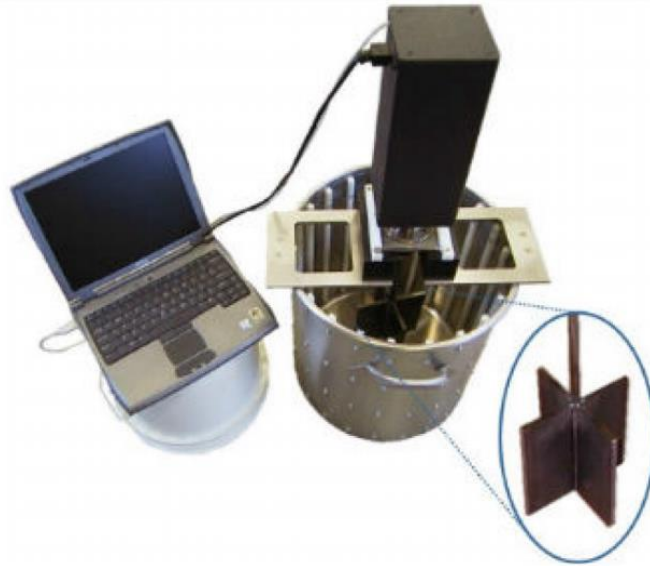


Figure 1. 14 Rhéomètre ICAR (Ferraris *et al.*, 2001)



Figure 1. 15 Le rhéomètre du LGCGM (Estelle et Lanos, 2012)

b) Rhéomètre plan-plan

La géométrie plan-plan est utilisée dans le cas d'étude de fluides très visqueux ou dans le cas de fluides ayant de gros grains. En effet, le principal avantage de cette géométrie est la possibilité de régler l'entrefer de mesure à la taille que l'on souhaite. La géométrie plan-plan est composée d'un plateau inférieur fixe et d'un plateau supérieur entraîné en rotation. Dans cette configuration, le fluide qui est placé entre les deux plateaux va être cisailé suivant des plans parallèles aux deux plateaux avec une vitesse nulle au niveau du plateau inférieur et une vitesse maximale correspondant à la vitesse du plateau supérieur (Gibouin, 2015).

Le Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) a développé un rhéomètre à béton (nommé BT RHEOM) au début des années 1990. Un outil plan-plan est inséré dans ce rhéomètre (cf. Figure 1.16). Il peut contenir environ 7 litres de béton pour l'essai. L'avantage de ce rhéomètre est que les paramètres rhéologiques sont calculés et obtenus directement en unité fondamentale. Il n'est pas nécessaire de calibrer l'appareil. Il est donc le seul rhéomètre susceptible de mesurer la viscosité plastique d'un béton. Les inconvénients sont liés à la géométrie de mesure qui entraîne une usure du joint d'étanchéité (à changer lors de chaque essai), de la mise en place et de la difficulté d'utilisation de ce rhéomètre (Adjoudj, 2015).



Figure 1. 16 Rhéomètre à béton BT Rhéom (Cordeiro *et al.*, 2016)

c) Rhéomètres à cylindres coaxiaux

Les Rhéomètres à cylindres coaxiaux, autrement appelés " Couette" (du nom de son inventeur, Maurice Couette) sont très souvent utilisés en rhéométrie. Ce type des rhéomètres est composé d'une cuve (cylindre extérieur) et d'un cylindre intérieur. Le cylindre extérieur était en rotation alors que le cylindre intérieur était fixe. Par la suite, cette géométrie a été plus couramment utilisée en fixant le cylindre extérieur et en entraînant en rotation le cylindre intérieur. Il est aussi possible que les deux cylindres soient entraînés en rotation, soit dans le même sens, soit dans des sens contraires (Gibouin, 2015).

Au fil du temps, plusieurs versions de cet appareil ont été développées en fonction du diamètre maximal de la suspension à tester dont le "ConTec BML 5" (cf. Figure 1.17) qui reste généralement le plus utilisé pour les bétons (Taleb, 2017).



Figure 1. 17 Rhéomètre BML (Contec, 2018)

Soualhi et al (2016) ont développé un nouveau rhéomètre coaxial de type vane au niveau de laboratoire L2MGC. L'appareil est équipé d'un agitateur mécanique de marque (Heidolph- RZR 2102 Control Z) piloté avec un logiciel à l'aide d'un ordinateur « Watch and control », un récipient cylindrique et un croisillon (cf. Figure 1.18). Ce rhéomètre est validé d'abord sur les mortiers, ensuite sur les bétons. Plusieurs chercheurs tels que Adjoudj et al (2014) et Taleb et al (2017) ont adopté le même rhéomètre pour leurs études.



Figure 1. 18 Dispositif du rhéomètre utilisé (Soualhi *et al.*, 2016)

1.2.4.5 Détermination des paramètres rhéologique (cas des rhéomètres coaxiaux)

Un rhéomètre coaxial impose sur l'axe de rotation un couple (M). Le croisillon tourne et sa vitesse angulaire (ω) est mesurée à l'aide des capteurs de vitesse et de moment. Grâce à ces deux mesures (M) et (ω), le rhéomètre calcule, grâce à un modèle, le seuil de cisaillement (τ_0) et la viscosité plastique (μ). Les hypothèses du modèle sont les suivantes (Taleb, 2017):

- L'écoulement dans l'échantillon est considéré homogène.
- L'écoulement entre les deux cylindres doit être stable et laminaire ;
- Il n'y a pas de glissement entre le béton et les parois verticales ;
- Les effets d'inertie sont négligeables ;
- Les équations sont indépendantes de l'emplacement du cylindre mobile (le cylindre mobile peut être celui de l'intérieur ou de l'extérieur) ;
- La vitesse tangentielle de l'échantillon à l'interface est égale à celle de la paroi du cylindre.

Selon le principe de la contrainte de Cauchy, la contrainte de cisaillement (τ) est liée au couple (M) par la relation suivante :

$$\tau = \frac{M}{2\pi r^2 h} \quad (1.4)$$

Où r est le rayon et h est la hauteur du cylindre.

La vitesse de cisaillement ($\dot{\gamma}$) dépend de la variation de la vitesse angulaire dans la couche de fluide cisailée. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\dot{\gamma} = r \frac{d\omega}{dr} \quad (1.5)$$

La connaissance de la vitesse angulaire appliquée au cylindre mobile ne suffit donc pas pour déterminer la vitesse de cisaillement, il faut de plus connaître la loi de répartition de la vitesse à chaque point du matériau en fonction du rayon qui lors de la caractérisation est inconnue. Il est alors nécessaire dans ce cas d'émettre des hypothèses sur la forme de rhéogramme et de les vérifier. On retrouve plusieurs hypothèses dans la littérature : modèle de Bingham, d'Herschel-Bulkley ou de Bingham modifié. Ces modèles sont souvent utilisés pour décrire le comportement des bétons (Aissoun, 2015).

En particulier, les recherches ont montré que le modèle de Bingham peut être utilisé pour décrire le comportement des BAP. Toutefois, les modèles non linéaires, spécialement celui d'Herschel-Bulkley qui suit une loi puissance ou de Bingham modifié qui suit une loi polynomiale du second degré serait mieux adaptés à cette nouvelle famille des bétons (Taleb, 2017).

Les équations et les formules de transformation des trois modèles étudiés sont regroupées dans le tableau 1.2.

Tableau 1. 2 Équations et formules de transformation pour Bingham, Bingham modifié et Herschel-Bulkley
(Singh *et al.*, 2017)

Modèle	Bingham	Bingham modifié	Herschel-Bulkley
Comportement	Linéaire	Polynomiale du second degré	Puissance
Equations	$T=G+HN$ $\tau=\tau_0+\mu\gamma$ Avec, T=couple (Nm). N=vitesse (tr/s). τ= contrainte de cisaillement (Pa). τ_0= seuil de cisaillement (Pa). μ= viscosité plastique (Pa.s).	$T=G+HN+CN^2$ $\tau=\tau_0+\mu\gamma+c\gamma^2$ Avec, T=couple (Nm). N= vitesse (tr/s). C= paramètre de second ordre. τ= contrainte de cisaillement (Pa). τ_0= seuil de cisaillement (Pa). μ= viscosité plastique (Pa.s). c= Paramètre de second ordre (Pa.s²)	$T=G+H N^n$ $\tau=\tau_0+K\gamma^n$ Avec, T=couple (Nm). N= vitesse (tr/s). τ= contrainte de cisaillement (Pa). τ_0= seuil de cisaillement (Pa). K=facteur de consistance (Pa.sⁿ). n= l'indice de fluidité
Formules de transformation	$\tau_0 = \frac{G}{4\pi h} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) \frac{1}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$ $\mu = \frac{H}{8\pi^2 h} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right)$ Avec, G= l'intercepte de la courbe $(T - N)$ (Nm s) R_1= Rayon interne (m) R_2=Rayon externe (m) H= hauteur du croisillon (m)	$\tau_0 = \frac{G}{4\pi h} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) \frac{1}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$ $\mu = \frac{H}{8\pi^2 h} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right)$ $c = \frac{C}{8\pi^3 h} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) \left(\frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1} \right)$ Avec, G, H, C= Paramètres obtenus de l'ajustement d'une loi polynomiale du second degré à partir de la courbe $(T - N)$ R_1= Rayon interne (m) R_2=Rayon externe (m) H= hauteur du croisillon (m)	$\tau_0 = \frac{G}{4\pi h} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) \frac{1}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$ $K = \frac{H}{2^{2n+1} \pi^{n+1} h} n^n \left(\frac{1}{R_1^{2/n}} - \frac{1}{R_2^{2/n}} \right)^n$ Avec, G, H= paramètres prédits par le modèle Herschel-Bulkley à partir de la courbe $(T - N)$ R_1= Rayon interne (m) R_2=Rayon externe (m) H= hauteur du croisillon (m)

1.3 Influence des paramètres de composition sur le comportement des BAP

Les bétons autoplaçants sont toutefois encore marginaux. Leur composition est en effet beaucoup plus complexe que celle des bétons ordinaires, dont ils se distinguent par leurs propriétés à l'état frais. Formuler un BAP, c'est trouver l'arrangement optimal entre six constituants différents (sables, ciment, graviers, additions minérales, eau, superplastifiant) permettant l'obtention des propriétés souhaitées (capacités de remplissage, de passage et la résistance à la ségrégation) (Turcry et Loukili, 2003).

Les possibilités de variation des paramètres d'étude pour les BAP sont nombreuses (variation du volume de pâte, utilisation de différents types et classes granulaires, dosages en ciment et additions minérales, variation du rapport gravier/sable (G/S), du rapport eau/ciment (E/C) et de dosage en superplastifiant, etc.). Tout ceci engendre une vision au cas par cas de chaque propriété étudiée et ne permet pas de généraliser les observations effectuées à une gamme de résistance mécanique étendue. Cela étant, la meilleure façon d'assurer et d'atteindre au mieux les propriétés visées d'un BAP à l'état frais est sans doute d'attacher une importance toute particulière à l'influence des paramètres de composition et aboutir à une formulation optimale (Bouhamou *et al.*, 2008)

1.3.1 Influence du volume de pâte

Le volume de pâte (ciment + additions + adjuvants + eau efficace + air) est supposé jouer deux rôles dans un BAP. D'abord, il fluidifie le matériau en limitant les contacts entre les granulats, ensuite, il écarte suffisamment les gravillons pour éviter la formation d'amas contre les armatures, responsables de blocage de l'écoulement. Les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons (Bouhamou *et al.*, 2008). C'est pourquoi, les BAP contiennent un volume de pâte important, typiquement de 330 à 400 l/m³ (AFGC, 2008).

1.3.2 Influence de types de sable

Un sable avec une bonne distribution granulométrique et un faible coefficient d'absorption convient parfaitement à la fabrication du béton, par ailleurs, l'utilisation de différents types de sable avec différents modules de finesse a certainement un effet important sur les propriétés des BAP.

L'utilisation des sables concassés riches en éléments fins peut considérer comme une source alternative des fillers, ce type de sable apporte une amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton. Par ailleurs, l'abondance de sable de dune dans les déserts du Sahara qui occupe une grande partie du territoire Algérien, l'idée de promouvoir sa valorisation dans la fabrication des bétons est d'une grande importance économique (Benabed, 2014).

Plusieurs recherches se sont intéressées à l'influence de différents types de sable avec différentes combinaisons (binaires et ternaires) sur le comportement rhéologique, mécanique et de durabilité des BAP.

Rmili et al (2009) montrent que les caractéristiques rhéologiques sont améliorées lorsque le sable de concassage (SC) est partiellement remplacé par le sable de dune (SD). Cependant, à une teneur en SD élevée (au-dessus de 30%), un besoin en eau supplémentaire est nécessaire, pour répondre aux exigences rhéologiques d'un BAP (cf. Figure 1.19). Les résistances à la compression et à la traction des BAP ont diminué en ajoutant le sable de désert. Mais ces résistances atteignent un optimum pour 15% de sable de désert. Cependant à 30% de sable de dune, la résistance à la compression a atteint 38 MPa (cf. Figure 1.20).

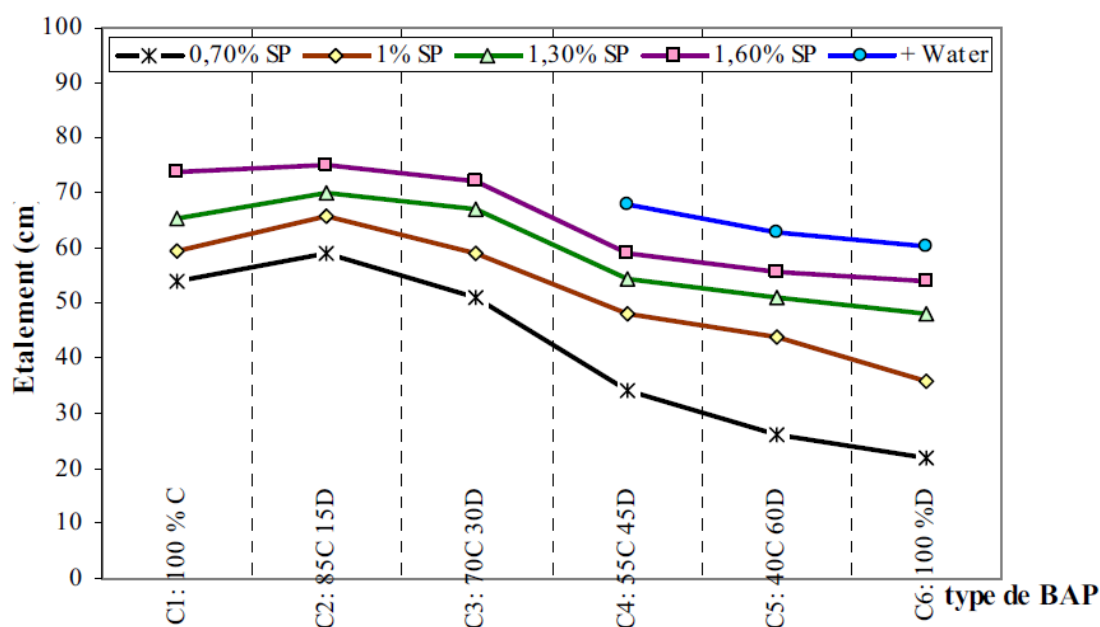


Figure 1. 19 Étalements en fonction des différentes combinaisons de sable (Rmili *et al.*, 2009)

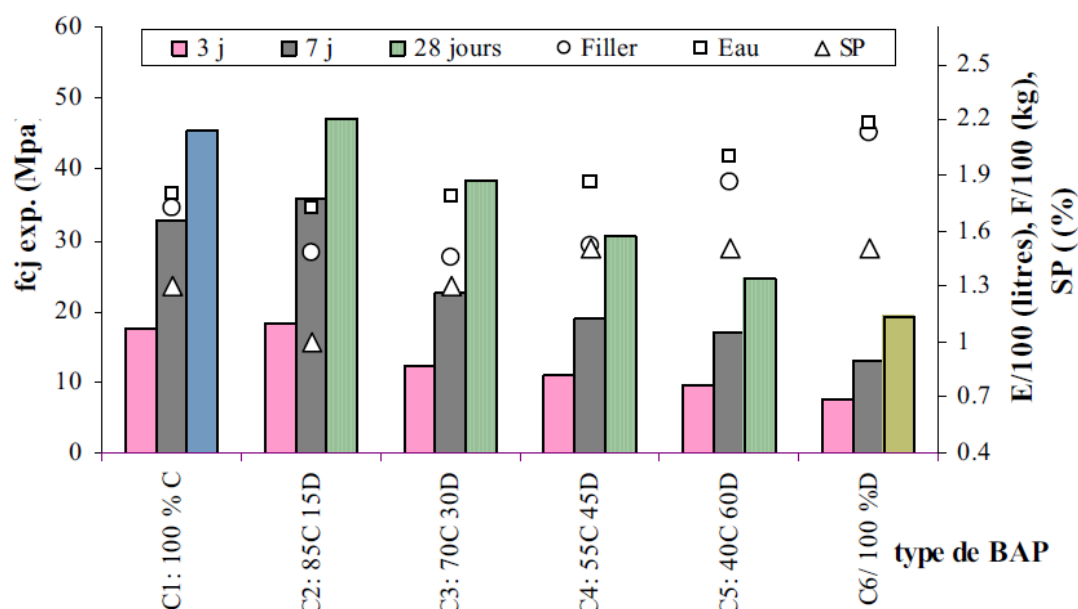


Figure 1. 20 Résistance à la compression en fonction des différentes combinaisons de sable(Rmili *et al.*, 2009)

Bouziani (2013) a évalué les propriétés à l'état frais et à l'état durci d'un béton autoplaçant à base de trois types de sable « alluvionnaire (SA), dunaire (SD) et concassé (SC) » en utilisant les plans de mélange (diagrammes ternaires). Les résultats montrent que les sables de concassage et de dune ont un effet bénéfique sur la capacité de passage et la résistance à la ségrégation (cf. Figures 1.21 et 1.22). Les résultats indiquent également que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la proportion du sable concassé et diminue avec l'augmentation de sable de dune dans les systèmes binaires et ternaires (cf. Figure 1.23).

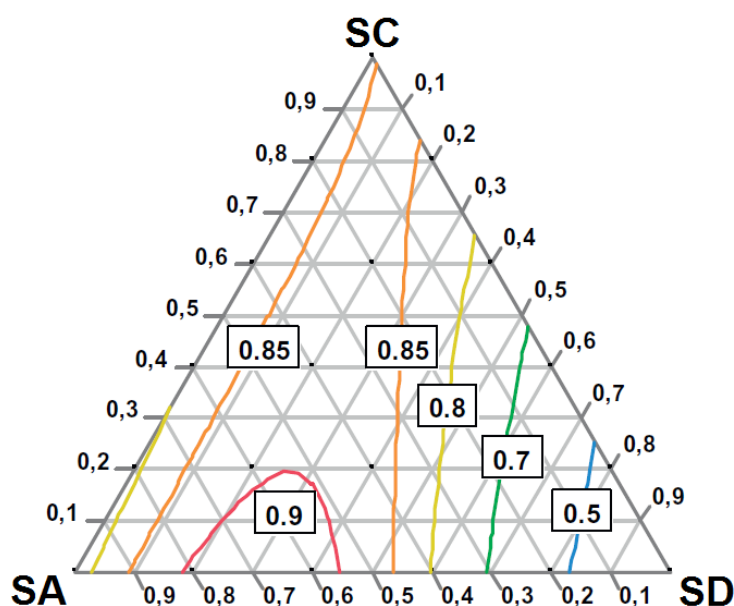


Figure 1. 21 Capacité de passage (H1/H2) en fonction de SA, SC et SD (Bouziani, 2013)

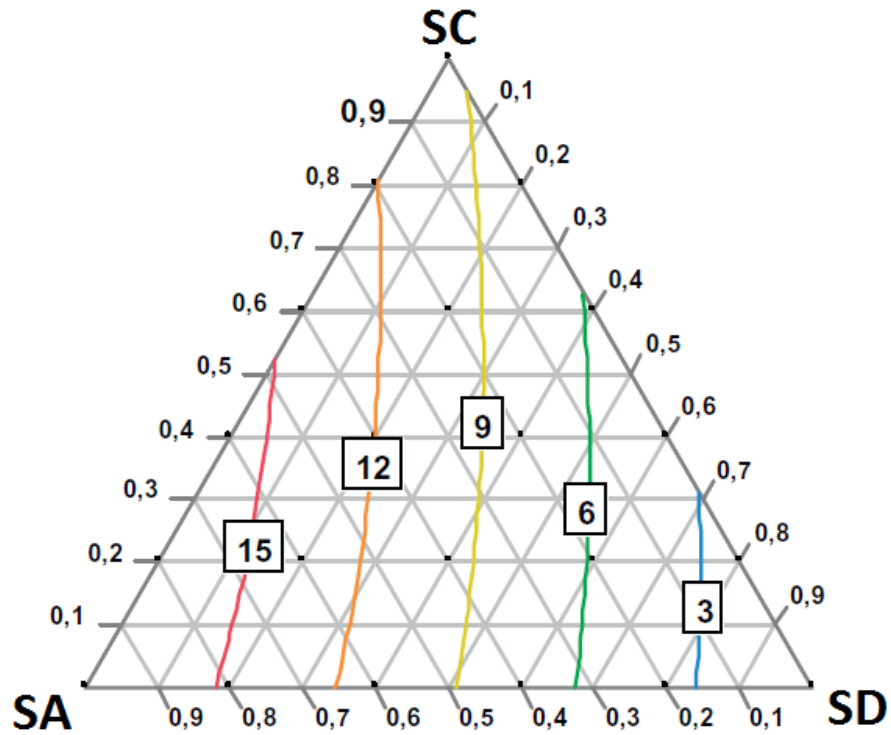


Figure 1. 22 Stabilité au tamis (%) en fonction de SA, SC et SD (Bouziani, 2013)

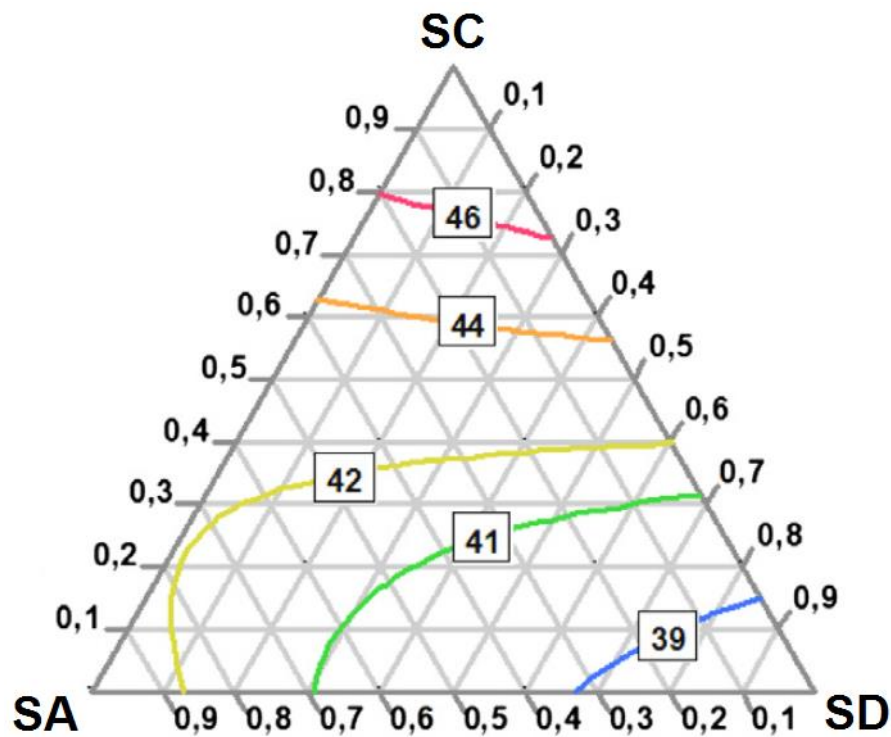


Figure 1. 23 Résistance à la compression a 28 jours en fonction de SA, SC et SD (Bouziani, 2013)

Benabed (2014) a étudié l'influence de la qualité et de la nature des sables sur les performances et la durabilité des BAP. Leurs résultats montrent que les performances rhéologiques et mécaniques des bétons à base des sables binaires concassés et alluvionnaires sont meilleures que celles obtenues en utilisant des sables binaires concassés et dunaires essentiellement pour des teneurs plus élevées en sable de dunes (cf. Figures 1.24 et 1.25).

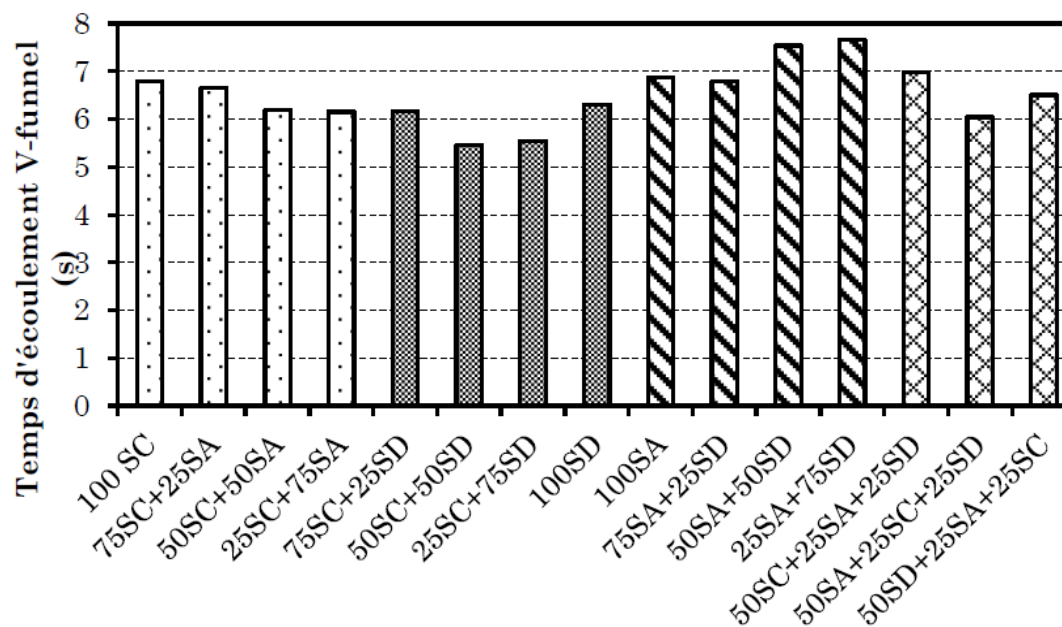


Figure 1. 24 Temps d'écoulement en fonction de type de sable pour les différents BAP (Benabed, 2014)

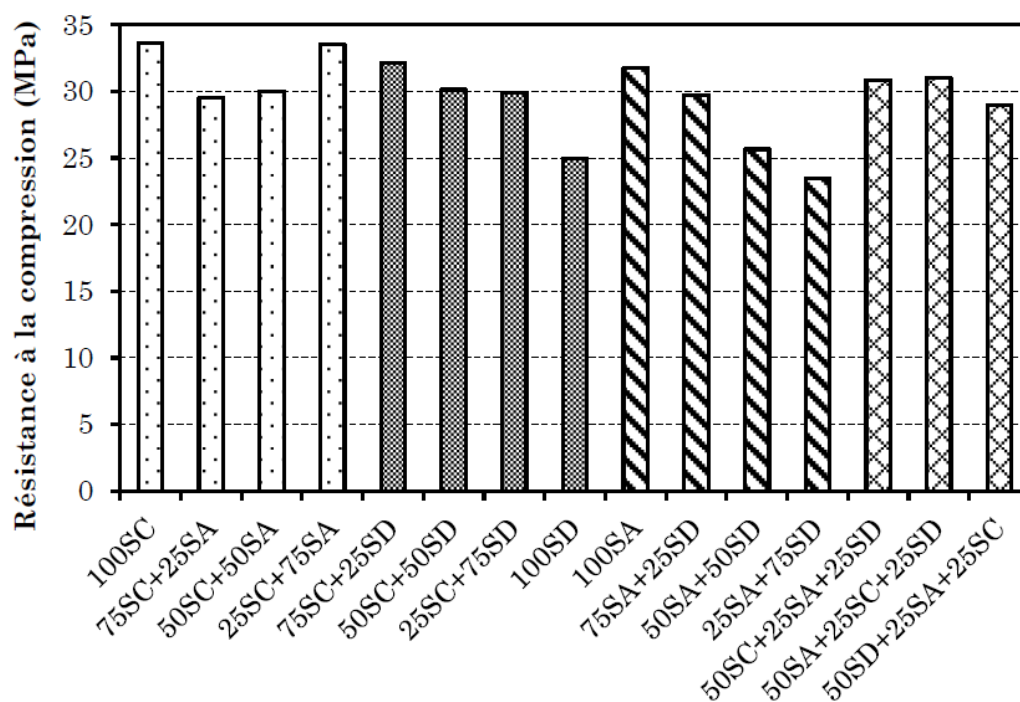


Figure 1. 25 Résistance à la compression à 28 jours des différents BAP (Benabed, 2014)

Zeghichi et al (2014) ont étudié l'effet du type de sable et des ajouts sur le comportement des BAP. Les résultats montrent que les propriétés rhéologiques favorisent l'utilisation de sables dunaires (SD) (cf. Figure 1.26), par ailleurs, le mélange contenant du sable concassé seul (100 SC) ne présente aucun risque de ségrégation (cf. Figure 1.27).

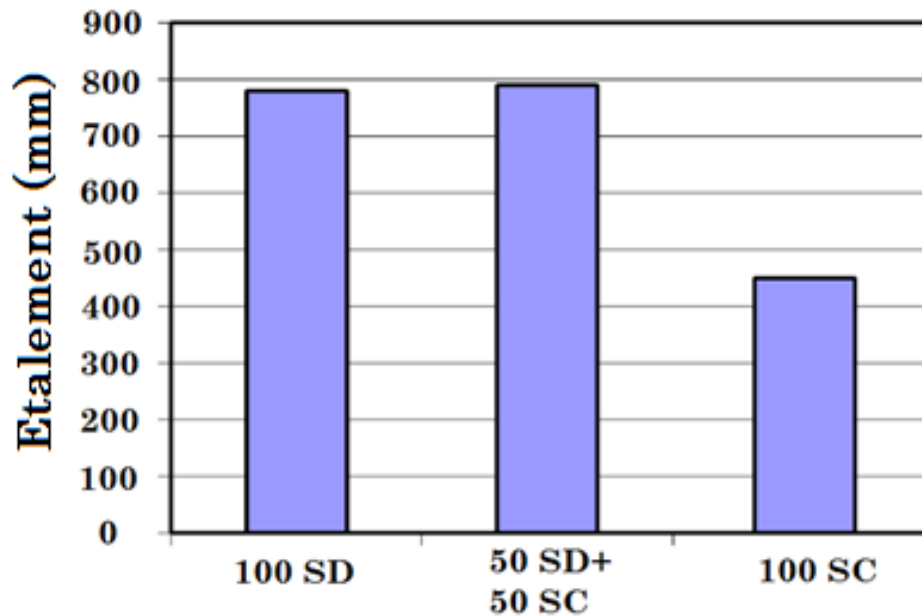


Figure 1. 26 Étalement en fonction de différentes combinaisons de sables (Zeghichi *et al.*, 2014)

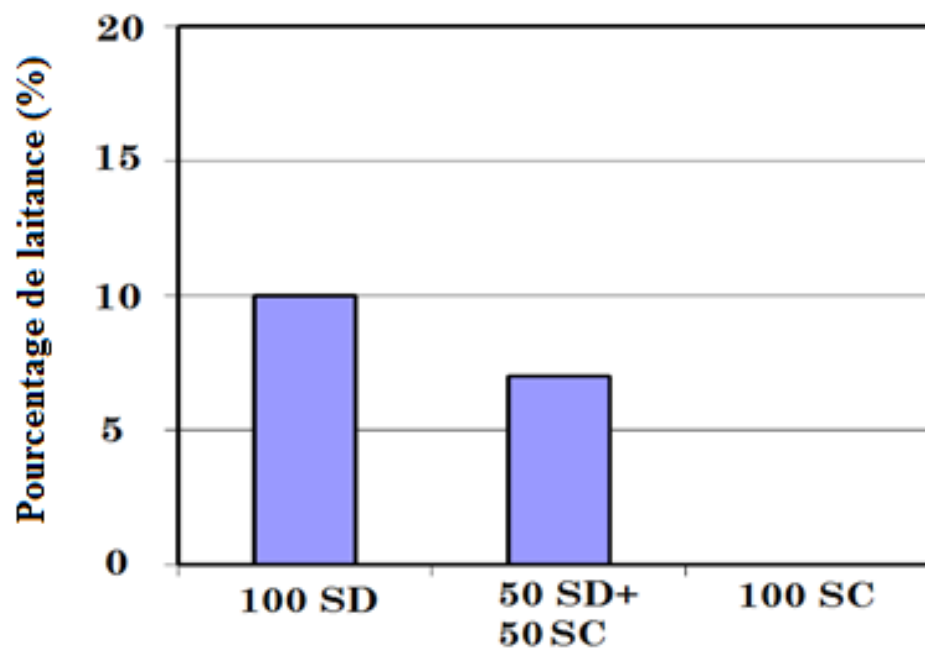


Figure 1. 27 Évolution de l'indice de ségrégation en fonction de différentes combinaisons de sables (Zeghichi *et al.*, 2014)

Douara et Guettala (2017) montrent que La substitution jusqu'à 50% de sable d'oued (SO) par sable de dune (SD) ou sable de carrière (SC) donne un béton autoplaçant qui respecte toutes les recommandations proposées par l'association française de génie civil AFGC (cf. Figures 1.28 et 1.29).

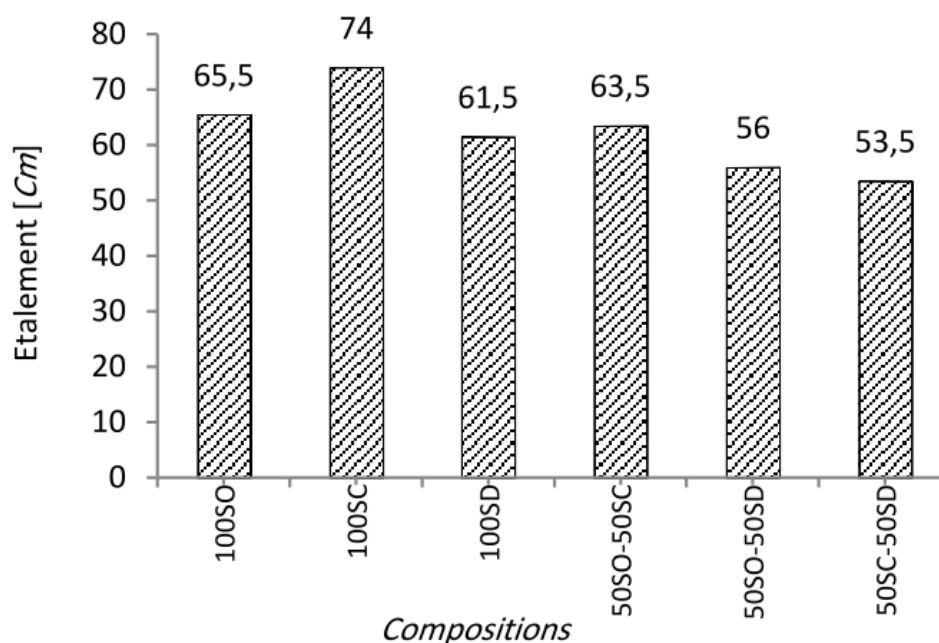


Figure 1. 28 Variation de l'étalement en fonction de sable (Douara et Guettala, 2017)

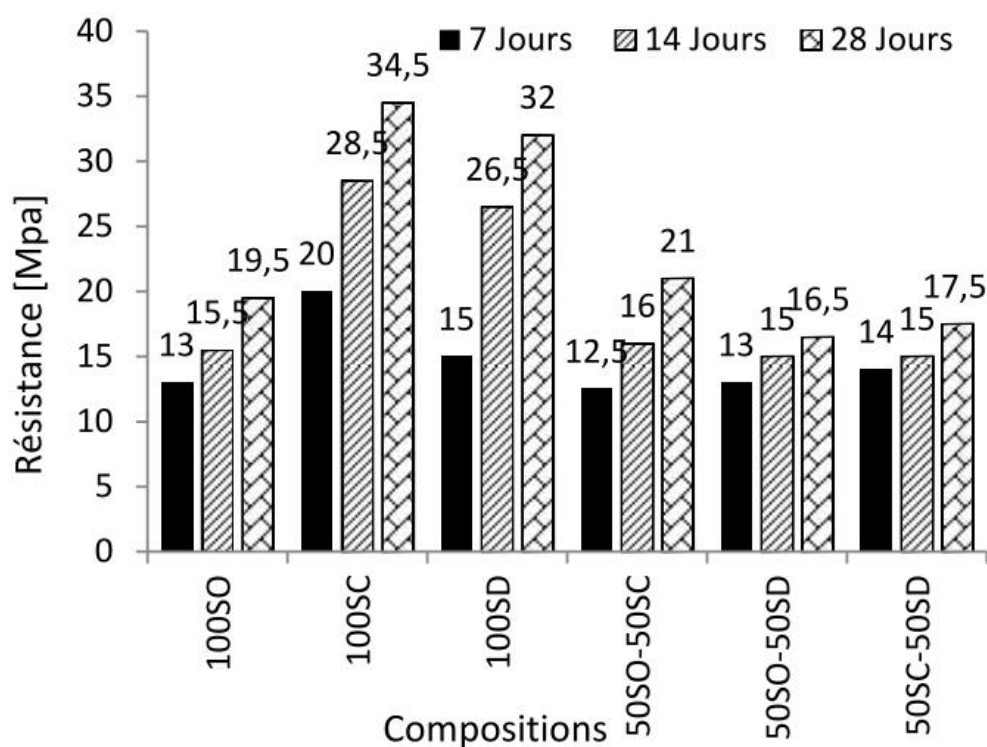


Figure 1. 29 Évolution de la résistance mécanique à la compression à 7, 14 et 28 jours en fonction de sable (Douara et Guettala, 2017)

Nécira et al (2017) ont étudié l'effet combiné de différents types de sable sur les propriétés des BAP à haute performance. Les résultats obtenus montrent que les combinaisons binaires de différents sables ont un effet positif sur la compacité (cf. Figure 1.30). En outre, une amélioration de la résistance à la ségrégation est observée dès que le taux en sable de concassage (CS) augmente (cf. Figure 1.31).

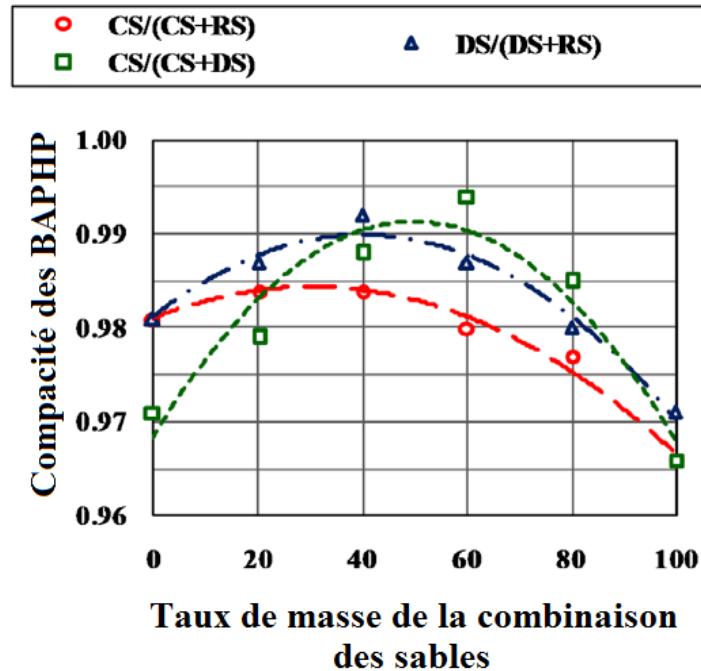


Figure 1. 30 Évolution de la compacité en fonction de différentes combinaisons de sables (Nécira *et al.*, 2017)

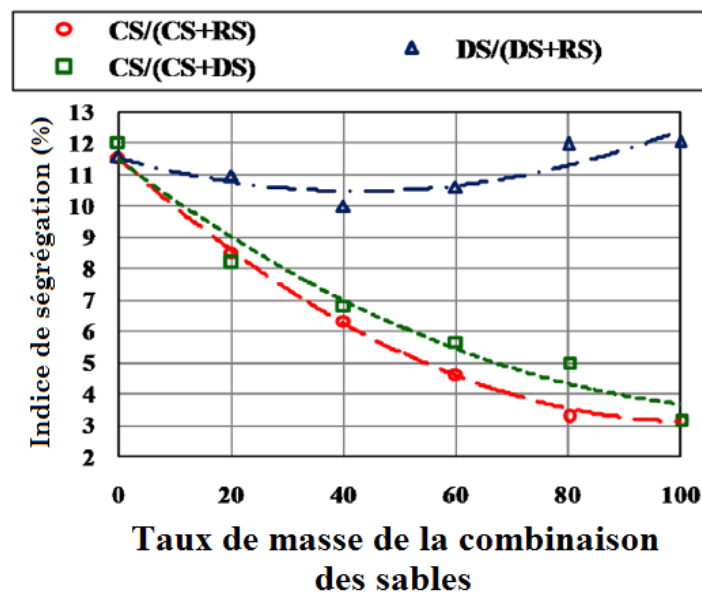


Figure 1. 31 Évolution de l'indice de ségrégation en fonction de différentes combinaisons de sables (Nécira *et al.*, 2017)

1.3.3 Influence des propriétés des gros granulats

L'influence des caractéristiques et des paramètres morphologiques des granulats sur le comportement rhéologique des bétons autoplaçants est extrêmement forte, mais peu étudiée dans la littérature (Hafid, 2012).

En général le diamètre maximal $D_{\max}$ des gravillons dans un BAP est compris entre 10 et 20 mm. Les risques de blocage pour un confinement donné augmentent lorsque $D_{\max}$ augmente, ce qui conduit à diminuer le volume de gravillon. Le choix d'un $D_{\max}$ plus important est donc possible, mais ne se justifie que lorsque le confinement est faible (AFGC, 2008).

Bouhamou et al (2008) montrent que les BAP formulés avec des granulats de $D_{\max} = 15\text{mm}$ ont favorisé les meilleures maniabilités et déformabilités par rapport à d'autres combinaisons granulaires. Ils constatent aussi que les BAP formulés avec des granulats de $D_{\max} = 20\text{ mm}$ sont dans une limite autoplaçante basse ; ils sont homogènes et ne présentent pas de risques de ségrégation statique et de ressuage, mais par contre ils ont un faible taux de remplissage et un étalement inférieur à 60 cm.

Aissoun (2015) a étudié l'influence des caractéristiques des granulats sur la performance des bétons fluides à rhéologie adaptée. Les résultats montrent que la viscosité plastique des bétons formulés avec des granulats concassés diminue avec l'augmentation de $D_{\max}$ des gros granulats contrairement aux bétons confectionnés avec des granulats roulés. La viscosité plastique des bétons formulés avec des granulats concassés est supérieure à la viscosité plastique des bétons formulés avec des granulats roulés (cf. Figure 1.32).

Les résultats montrent aussi que le seuil de cisaillement augmente avec l'augmentation de diamètre maximal des gros granulats (concassés ou roulés). Par ailleurs, le seuil de cisaillement des bétons formulés avec les gros granulats concassés est supérieur à celui des bétons formulés avec les gros granulats roulés (cf. Figure 1.33).

1.3.4 Influence du rapport G/S

La présence de gravillons permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton et donc de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées. En général, ces considérations conduisent à adopter un rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 dans les BAP (AFGC, 2008).

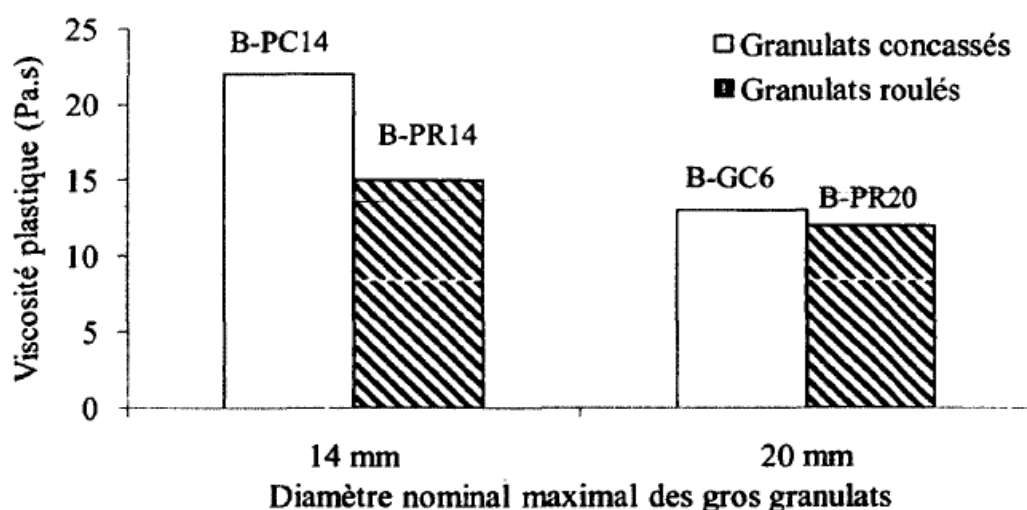


Figure 1. 32 Variation de la viscosité plastique en fonction de la forme des granulats (Aissoun, 2015)

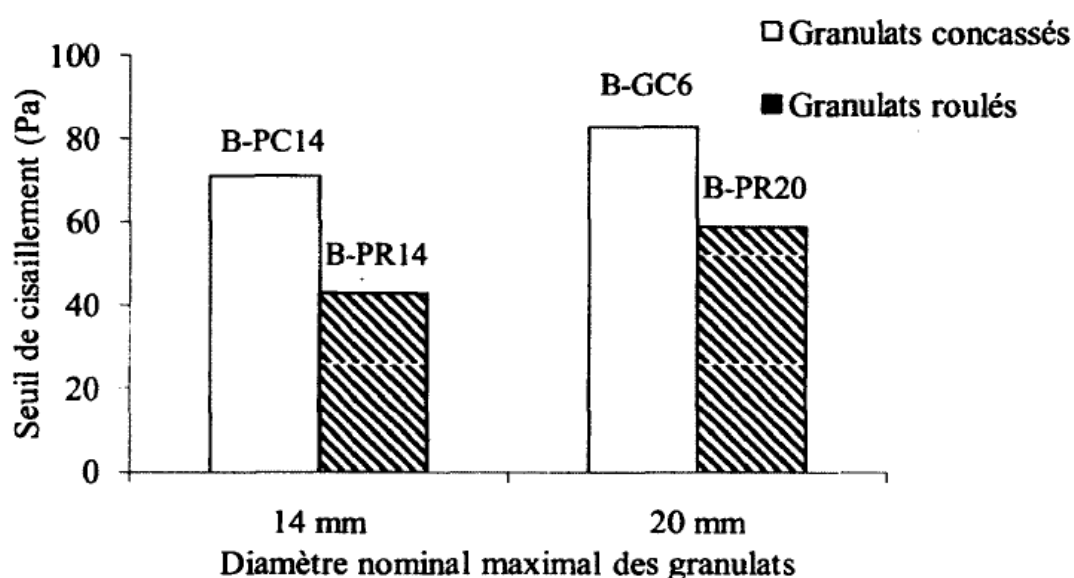


Figure 1. 33 Variation du seuil de cisaillement en fonction de la forme des granulats (Aissoun, 2015)

1.3.5 Influence du rapport E/C

Felekoglu et al (2007) ont étudié l'effet du rapport eau/ciment sur le comportement des bétons autoplaçants (BAP) à l'état frais et durci. Ils ont montré que le rapport E/C optimum pour produire un BAP est de l'ordre de 0.84–1.07 en volume et qui correspond à l'intervalle 0,28 et 0,45 en masse. Les rapports E/C supérieurs ou inférieurs de cet intervalle peuvent causer une ségrégation ou un blocage du mélange (Belaidi, 2013) .

Bouhamou et al (2008) montrent que la diminution du rapport E/C a influé directement sur l'étalement du BAP. Ils observent pour un BAP de rapport E/C = 0,4, une diminution de diamètre d'étalement de 13 % et 16 % par rapport à ceux des BAP de E/C = 0,5 et 0,6 respectivement. L'introduction excessive d'eau provoque la chute de la résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi que l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais.

1.3.6 Influence des additions minérales

Les additions minérales engendrent des modifications significatives sur les propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires à l'état frais et durci. 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 cimentaire pour former de nouveaux produits hydratés qui présentent un caractère liant supplémentaire (Adjoudj, 2015).

Behim et Ali Boucetta (2013) montrent que la poudre de verre améliore la stabilité du béton autoplacant au même titre que les fillers calcaires. Cependant, l'augmentation du volume de pâte au-delà d'une certaine quantité peut entraîner une résistance à la ségrégation trop importante (cf. Figures 1.34 et 1.35).

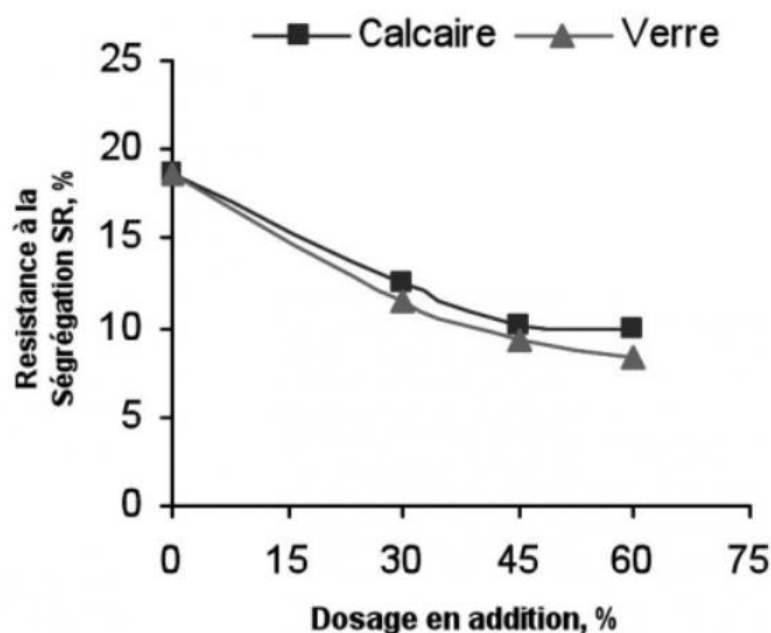


Figure 1. 34 Influence du dosage en addition sur la stabilité au tamis (Behim et Ali Boucetta, 2013)

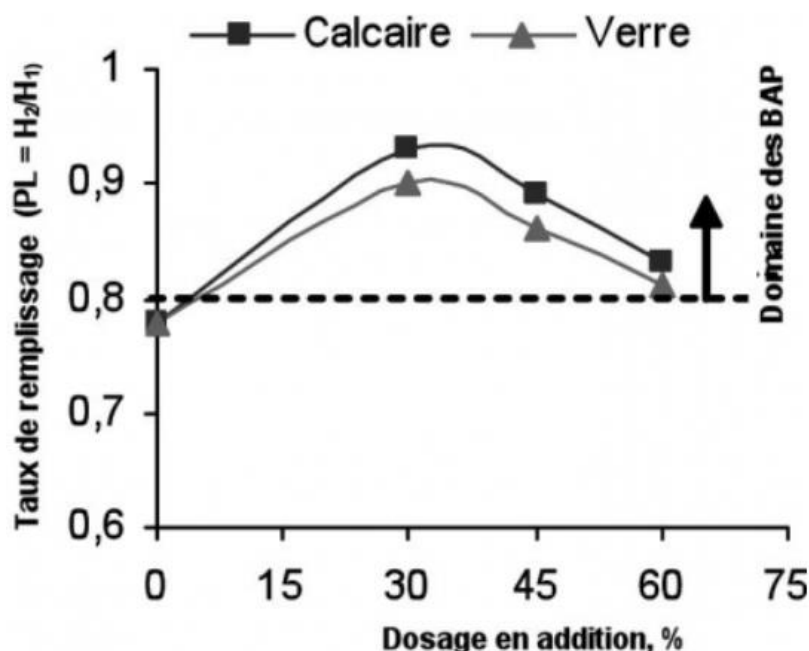


Figure 1. 35 Influence du dosage des additions sur le taux de remplissage (Behim et Ali Boucetta, 2013)

1.3.7 Influence des superplastifiants

Les superplastifiants permettent de défloculer les grains de ciment par répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues (cf. Figure 1.36). L'ajout d'un superplastifiant permet ainsi d'augmenter significativement la fluidité des BAP que ce soit du point de vue de leur étalement ou du point de vue de leur seuil d'écoulement (Belaribi, 2015).

Les superplastifiants sont utilisés à des dosages proches des dosages de saturation (le dosage au-delà duquel l'adjuvant ne permet plus de modifier de façon significative la rhéologie du mélange) afin de limiter le phénomène de perte de rhéologie dans le temps (Adjoudj, 2015).

Bonen et Shah (2005) ont étudié l'influence du dosage en superplastifiant, du rapport gros granulats /liant (agg : b) et du rapport gros granulats / granulats fins (c : f agg) sur les propriétés d'écoulement du BAP. Les résultats montrent que les paramètres d'ouvrabilité sont améliorés lorsque le dosage en superplastifiant augmente (cf. Figure 1.37).

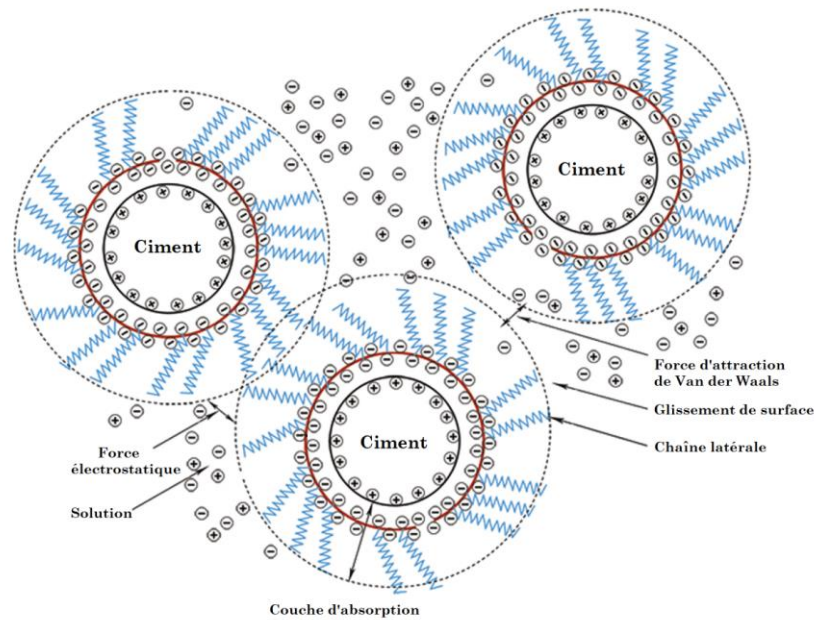


Figure 1. 36 Schématisation de l'adsorption et de la répulsion pour des particules de ciment (Li *et al.*, 2014)

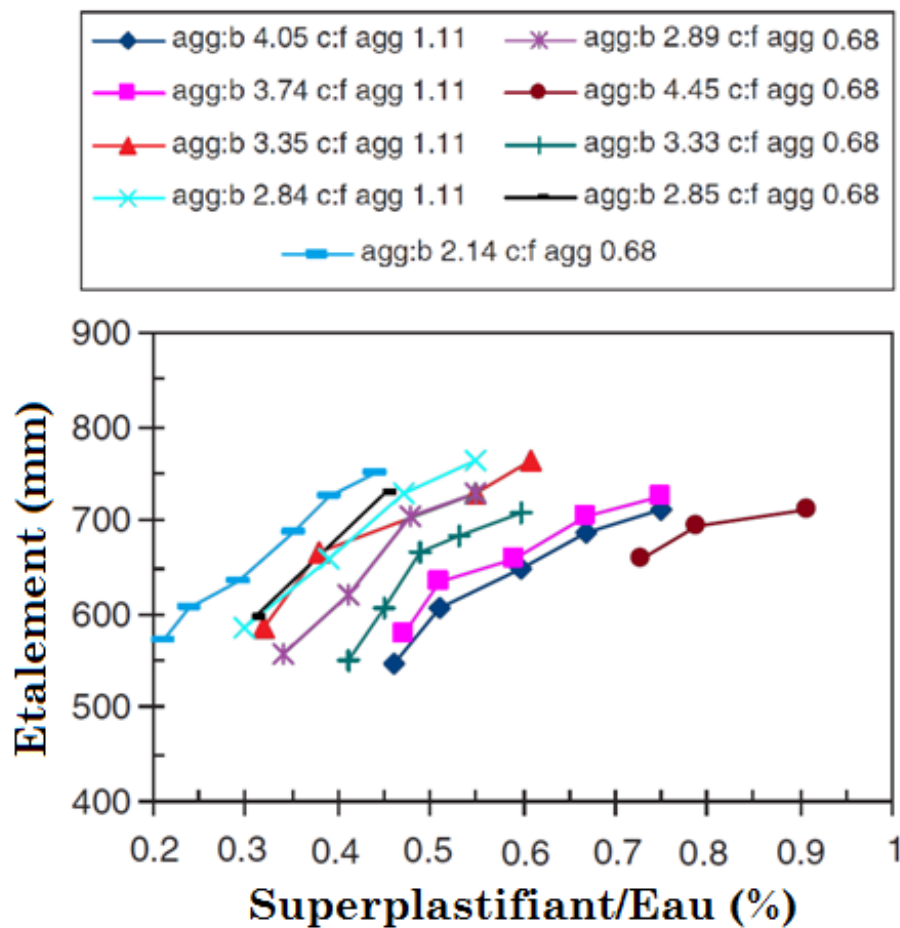


Figure 1. 37 Étalement en fonction de dosage en Sp (Bonen et Shah, 2005)

1.4 Caractérisation des BAP a l'état frais

Les BAP sont caractérisés principalement par les propriétés à l'état frais et par conséquent, la caractérisation et le contrôle des propriétés à l'état frais sont essentiels pour assurer les performances souhaitées. Le comportement d'un BAP à l'état frais se différencie notablement de celui d'un béton ordinaire vibré. La caractérisation d'un tel béton est donc plus complexe que celle d'un béton traditionnel et implique des essais spécifiques. Des recommandations de caractérisation ont été préconisées par l'AFGC (AFGC, 2008). D'abord provisoires, ces recommandations sont devenues in situ les essais de référence pour valider une formulation de BAP (Belaribi, 2015).

1.4.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams (NF EN 12350-8, 2010)

C'est l'essai le plus courant, car le plus facile à mettre en œuvre, permettant de caractériser la mobilité en milieu non confiné. L'essai d'étalement est utilisé pour caractériser la fluidité du béton. C'est une variante de l'essai d'affaissement sur cône d'Abrams qui consiste à mesurer (en utilisant le même matériel) le diamètre d'étalement de la galette de béton sur deux côtés perpendiculaires et les valeurs sont relevées en millimètres (cf. Figure 1.38). La vitesse d'étalement du béton est également une indication souvent prise en compte (T500: temps pour atteindre une galette de diamètre 500 mm) (Belaribi, 2015).

La fourchette d'étalement à la réception peut être définie sur la base de la valeur cible (avec une tolérance de plus ou moins 50 mm) ou bien par désignation d'une classe d'étalement selon l'AFGC (AFGC, 2008)

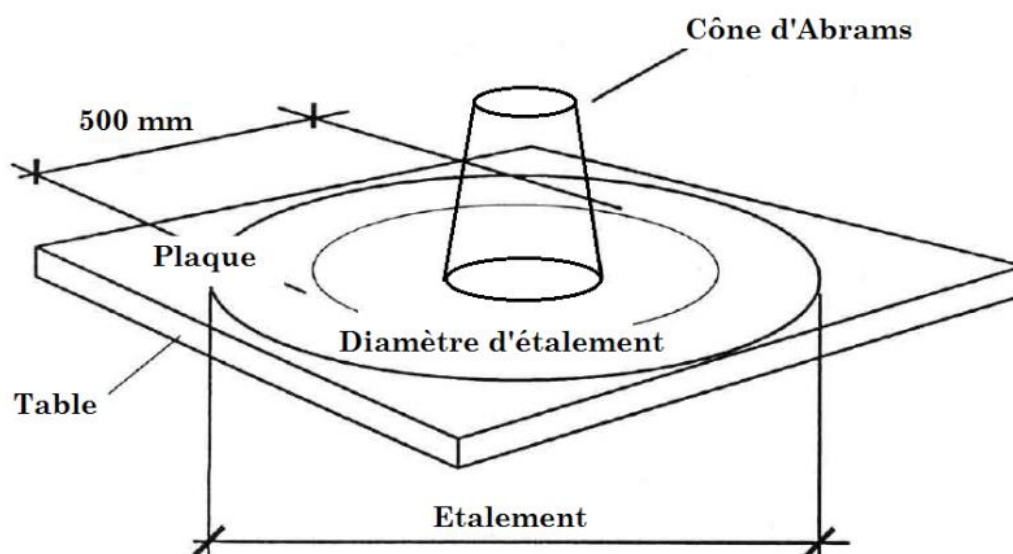


Figure 1. 38 Essai d'étalement au cône d'Abrams (Belaribi, 2015)

1.4.2 Essai d'écoulement à l'anneau (J-ring) (NF EN 12350-12, 2010)

L'essai d'écoulement à l'anneau (J-ring) consiste à investiguer la capacité au remplissage et la capacité de passage du béton autoplaçant. Il peut aussi être utilisé pour étudier la résistance à la ségrégation dynamique d'un BAP en comparant les résultats de deux essais différents. Il fut développé au Japon et consiste à faire écouler le béton au travers de barres d'armature afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. À cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300 mm de diamètre sont soudées des barres d'armature f16 à 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre (cf. Figure 1.39). Le béton BAP satisfait pleinement aux performances recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau (Benabed, 2014).

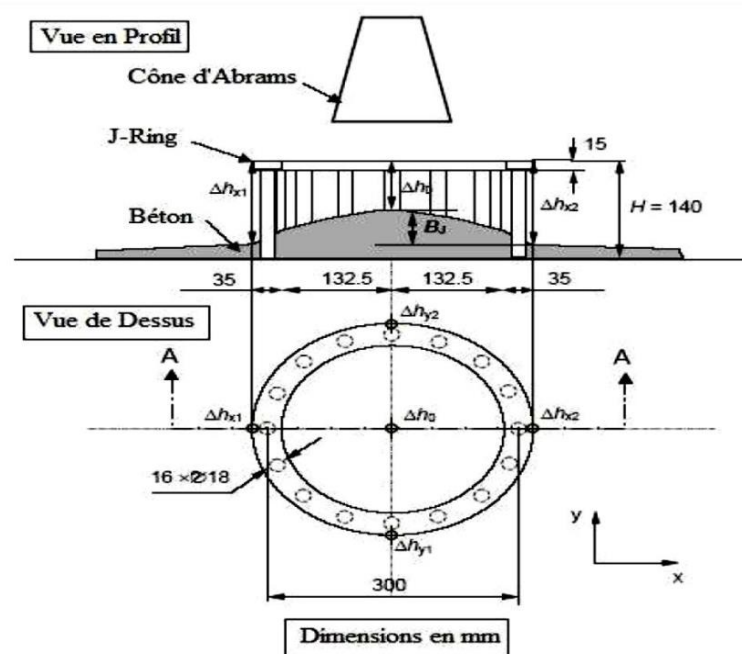


Figure 1. 39 L'essai d'écoulement à l'anneau (J-ring) (Benabed, 2014)

1.4.3 Essai à la boîte en L (L-box) (NF EN 12350-10, 2010)

La boîte en L permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables (cf. Figure 1.40). Deux variantes existent : l'essai à 2 barres et l'essai à 3 barres (ce dernier est représentatif de structures fortement armées). Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en amont de la grille, c'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation (AFGC, 2008).

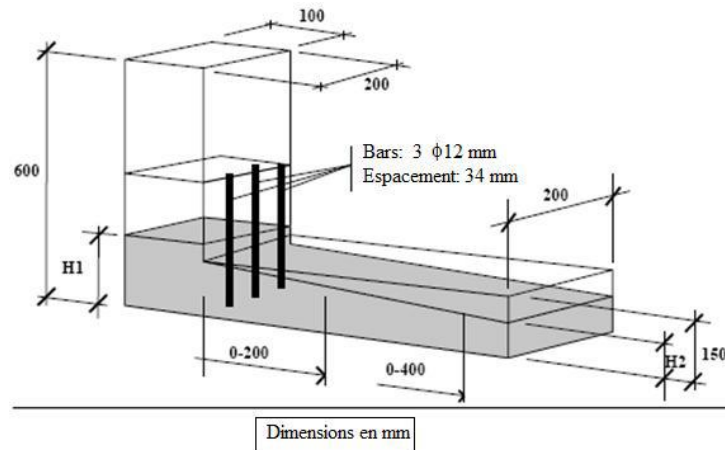


Figure 1. 40 Dispositif de l'essai L-Box (Boukendakdji, 2010)

1.4.4 Essai d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel) (NF EN 12350-9, 2010)

Cet essai consiste à observer l'écoulement du béton à travers l'entonnoir et à mesurer le temps d'écoulement entre le moment où la trappe est libre et le moment où on aperçoit le jour par l'orifice (cf. Figure 1.41). Le béton autoplaçant doit s'écouler avec une vitesse constante ; un simple changement de vitesse de l'écoulement est un signe de blocage, donc de ségrégation dans le béton. Le temps mesuré fournit une indication sur la viscosité du béton : pour des bétons de même étalement au cône d'Abrams par exemple, la viscosité est d'autant plus élevée que la durée de l'écoulement à l'entonnoir est longue. Le temps d'écoulement du béton autoplaçant à l'entonnoir doit être généralement inférieur à 12 secondes. Quelques recommandations visent un temps compris entre 5 secondes et 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisante (EFNARC, 2002) (Belaidi, 2013) .

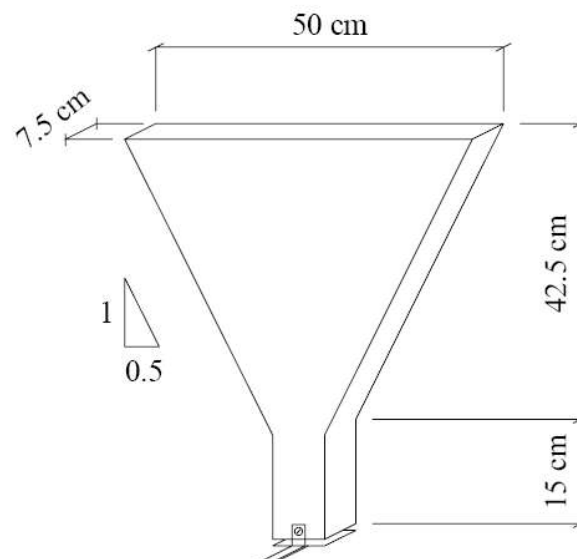


Figure 1. 41 Schématisation de l'essai à l'entonnoir V-funnel (Farih, 2016)

1.4.5 Essai à la boîte en U (U-Box)

L'essai à la boîte en U permet de tester la capacité de passage du béton à travers des armatures, et le taux de remplissage du béton. Le dispositif d'essai est composé de deux compartiments R1 et R2, séparés par une grille d'armatures et une trappe coulissante. Différentes dimensions et espacements existent pour les armatures entre les deux compartiments (cf. Figure 1.42). Le béton est versé dans la partie R1 de façon continue, on ouvre la trappe laissant passer le béton à travers la grille d'armatures, jusqu'à l'arrêt de l'écoulement (équilibre atteint). La hauteur de remplissage atteinte correspond à la facilité du béton à se mettre en place dans un milieu confiné. Si le béton coule aussi librement que l'eau, au repos on aura une surface horizontale ($h_2 - h_1 = 0$). Un béton peut être considéré comme autoplaçant si cette différence de hauteur se rapproche le plus de cette valeur nulle (Boukendakdji, 2010) (The European Project Group, 2005).

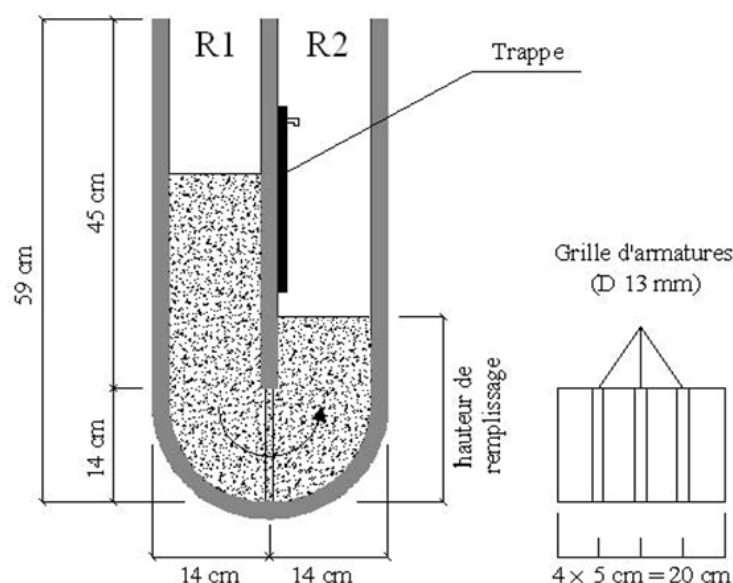


Figure 1. 42 Schématisation de l'essai du tube en U

1.4.6 Essai de l'écoulement au caisson (Fill Box)

Cet essai simule le comportement d'un béton dans un milieu fortement ferraillé, et consiste à évaluer le taux de remplissage dans ce milieu (cf. Figure 1.43). Il est généralement destiné au test des bétons très fluides, ne contenant pas de gravier de taille supérieure à 25 mm. Son avantage principal réside en la visualisation du comportement autoplaçant du béton (Belaidi, 2013).

L'appareillage consiste en un container (transparent) avec une surface plate et lisse. À l'intérieur du container, il y a 35 obstacles en PVC de 20 mm de diamètre et distances axiales de 50 mm.

Pour faciliter l'opération de remplissage, le container est muni d'un tube terminé par un entonnoir. Il s'agit de remplir à débit constant (remplir le tube en ajoutant chaque 5 secondes environ 1,5 litre de béton) le caisson jusqu'à ce que le béton commence à couvrir la ligne supérieure des obstacles, pour cela il faut environ 45 litres de béton. Une fois le béton stabilisé, on mesure la hauteur du béton du côté du tube (hauteur h_1) ainsi que la hauteur du côté opposé (hauteur h_2). Le pourcentage de remplissage moyen R est calculé selon la formule suivante :

$$R(\%) = 100\% \frac{h_1 + h_2}{2h_1} \quad (1.6)$$

Si le béton coule aussi librement que l'eau, au repos on aura une surface horizontale ($h_1=h_2$) et donc $R(\%)=100\%$. Un béton peut être considéré comme autoplçant si le rapport est supérieur à 90% (Boukendakdji, 2010) (The European Project Group, 2005).

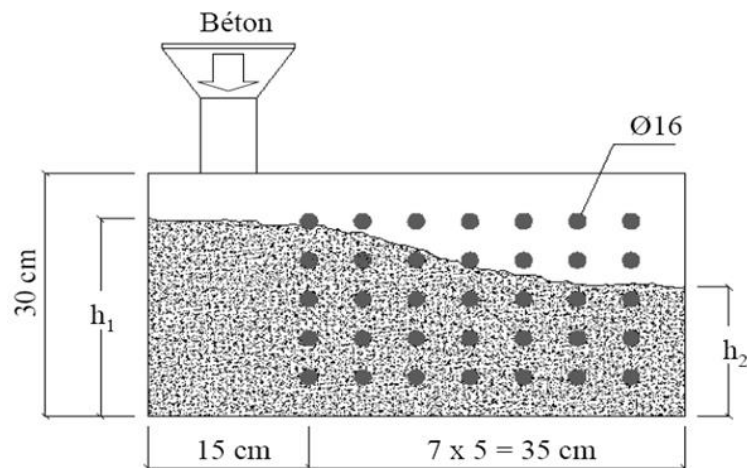


Figure 1. 43 Schématisation de l'essai du caisson

1.4.7 Essai de stabilité au tamis (NF EN 12350-11, 2010)

L'essai de stabilité au tamis vise à qualifier les bétons autoplçants vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplçant 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 (AFGC, 2008).

L'essai au tamis est utilisé pour caractériser la stabilité du béton, soit son caractère à résister à la ségrégation statique : descente des gros gravillons par l'effet de la gravité et remontée de la pâte qui est légère. De plus, par cet essai on peut distinguer s'il y a un problème de ressuage primaire.

L'essai est développé par la société « GTM construction ». Il consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (II) d'un échantillon de béton (environ 5 kg) passant à travers un tamis d'une ouverture de maille de 5 mm comme le montre la figure 1.44 (Hermime, 2016).

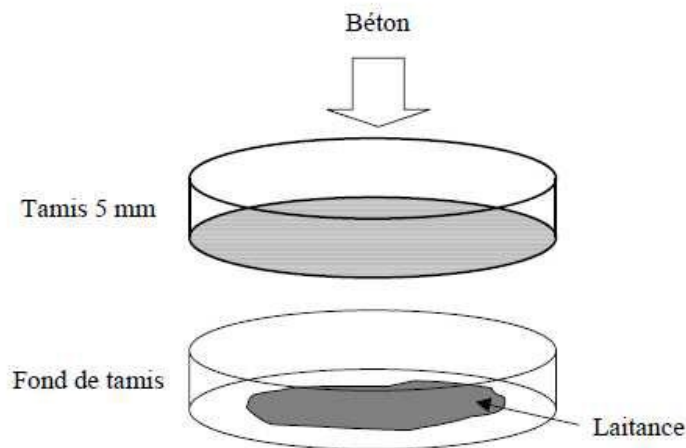


Figure 1. 44 Essai de la stabilité au tamis

1.4.8 Essai de ségrégation au cylindre (ASTM C1712-17, 2017)

L'essai de ségrégation au cylindre a été proposé par Van Bui et al (2002). Cet essai présente l'avantage d'être très simple à réaliser et les résultats sont obtenus directement. De plus, l'appareillage est peu cher et peu encombrant (cf. Figure 1.45). Il s'agit d'un appareillage assez simple, donc utilisable éventuellement sur chantier (Bethmont, 2005).

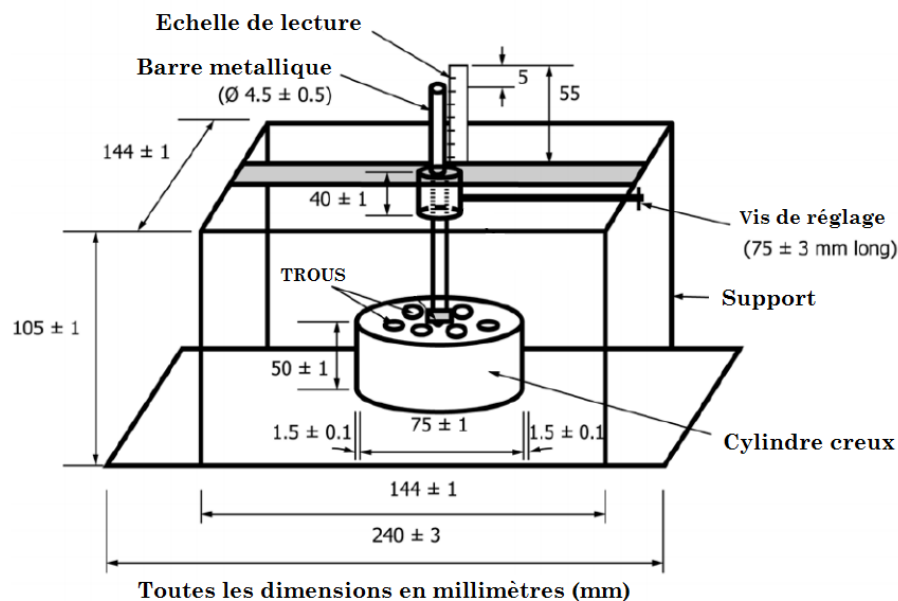


Figure 1. 45 Essai de ségrégation au cylindre (ASTM C1712-17, 2017)

1.4.9 Essai de ségrégation à la colonne (ASTM C1610, 2017)

La norme ASTM C1610 propose une procédure particulière pour évaluer le risque de ségrégation (sur la base d'un indice). Elle consiste à remplir, une colonne de 660 mm de hauteur divisée en 3 compartiments. Au bout de 15 minutes de repos, le béton dans les deux compartiments qui se trouvent en haut et en bas de la colonne est récupéré, pesé et lavé de manière à extraire tous les gros granulats de diamètre supérieur à 5 mm (cf. Figure 1.46). L'indice de ségrégation S est donné par la formule :

$$S = \begin{cases} 2 \times \left(\frac{GG_b - GG_h}{GG_b + GG_h} \right) & \text{si } GG_b > GG_h \\ S = 0 & \text{si } GG_b \leq GG_h \end{cases} \quad (1.7)$$

Où :

GG_b : la masse des granulats dans le compartiment qui se trouvent en bas.

GG_h : la masse des granulats dans le compartiment qui se trouvent en haut.

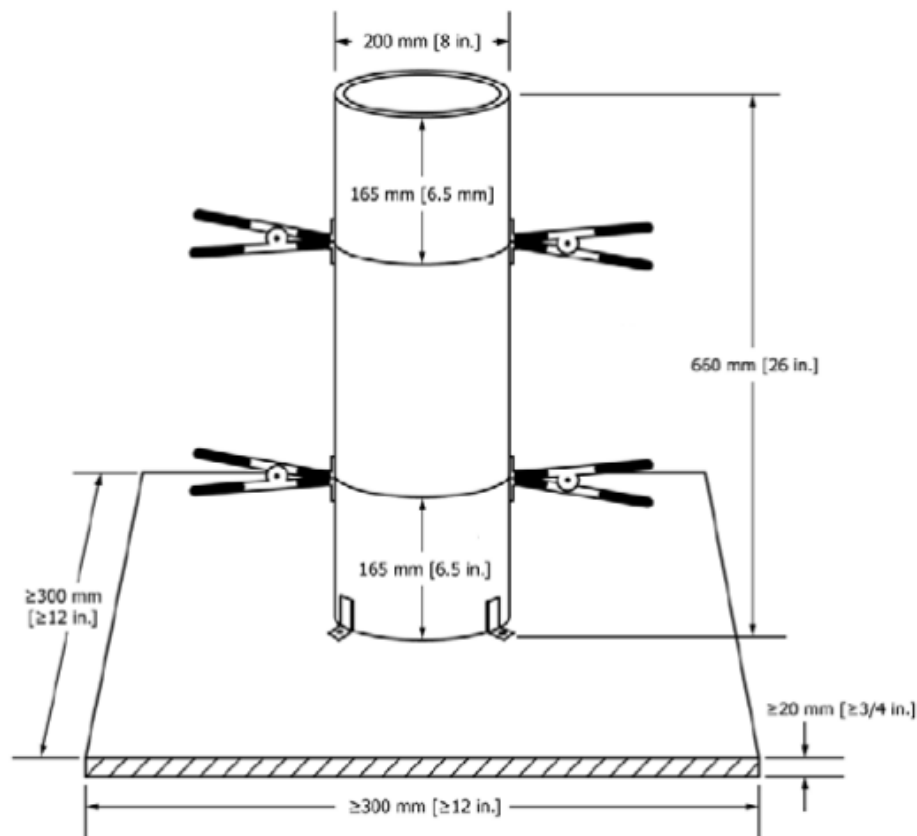


Figure 1. 46 Schématisation de l'essai de ségrégation à la colonne (ASTM C1610, 2017)

1.4.10 Essai de K-slump (ASTM C1362 - 09, 2014)

Cet appareil est utilisé pour déterminer le degré de compactage et la maniabilité d'un béton frais placé dans un moule (cf. Figure 1.47). Il peut être mis en œuvre sur chantier ou à l'intérieur de moules. Les résultats peuvent être corrélés avec l'essai d'affaissement au cône d'Abrams. L'essai consiste simplement à insérer l'appareil dans le béton jusqu'au niveau du disque ; après 60 secondes, une tige de mesure est mise en contact avec le béton et la valeur K-slump lue directement sur l'échelle graduée. Le tube calibré creux a un diamètre de 20 mm (*Controls France*, 2017).



Figure 1. 47 L'appareil de k-slump (*Controls France*, 2017)

1.5 Caractérisation des BAP a l'état durci

Les résistances mécaniques ont été longtemps considérées comme les qualités essentielles pour un béton tout comme le BAP, car elles généralement une image globale de la qualité d'un béton puisqu'elles sont directement reliées à la structure de la pâte de ciment hydraté. C'est la meilleure optimisation qui nous permet d'avoir un meilleur BAP avec des résistances qui peuvent aller de 60 à 100 MPa à 28 jours (Boukendakdji, 2010).

1.5.1 Résistance à la compression

La principale propriété du béton durci est sa résistance à la compression. En règle générale, on la mesure par un essai de compression sur des éprouvettes confectionnées à cet effet (cubes, prisme ou cylindre) ou, dans des cas spéciaux, sur des carottes prélevées directement dans la structure. L'essai de compression est normalisé d'une manière assez détaillée qui englobe également les conditions de conservation des éprouvettes et les caractéristiques des machines d'essais (Kind-Barkauskas, 2006).

1.5.2 Résistance à la traction

Étant connu que le béton est largement utilisé grâce à sa résistance à la compression, la connaissance de ses propriétés en traction est importante pour une description complète de son comportement matériel. En effet, le béton est souvent endommagé lorsque les granulats à l'échelle micro sont soumis à un chargement en traction. Il est donc important de déterminer la résistance du béton en traction simple σ_t . On peut faire la remarque ici sur la difficulté de la réalisation de ce type d'essais, c'est pourquoi on fait souvent appel à des essais indirects. Les essais les plus courants sont les essais de traction par flexion (Shiu, 2008).

1.6 Méthodes de formulation des BAP

La formulation des BAP se distingue des bétons ordinaires par le volume élevé de la pâte, l'ajout d'une grande quantité d'addition minérale et l'emploi de superplastifiants. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr la méthode de formulation choisie et les performances souhaitées. Malgré les différentes méthodes de formulation existantes, certaines caractéristiques demeurent intrinsèques aux BAP, mais peuvent légèrement varier d'une approche à l'autre (Belaribi, 2015).

Les bétons autoplacants contiennent deux propriétés qui sont contradictoires : une bonne fluidité pour assurer une bonne mise en place ; et une bonne viscosité pour éviter les problèmes des ségrégations (Farih, 2016).

Plusieurs approches ont été conçues pour l'optimisation de la formulation des BAP, à savoir :

1.6.1 Méthode japonaise (La Méthode générale)

Cette méthode a été développée à l'Université de Tokyo par Okamura et Ouchi (2003). Le principe est de fixer le dosage de gravier dans le béton et celui du sable dans le mortier, ensuite de procéder à l'optimisation de la pâte de ciment afin de donner au béton résultant les meilleures performances (Boukendakdji, 2010). Le principe de cette méthode de formulation se base sur les critères suivants :

- La teneur volumique G en gravillons du béton est fixée à 50% du volume du solide afin de minimiser les risques de blocage.

$$G = \frac{50}{100} G_{lim}(1 - A) \quad (1.8)$$

Où :

A est la quantité d'air choisie en fonction de la résistance au gel-dégel

G_{lim} est le volume absolu d'un mètre cube de gros agrégats.

- Le volume du sable est par ailleurs limité à 40% du volume du mortier :

$$S = \frac{40}{100} \frac{(1 - A - G)}{(1 - K_{sf})} \quad (1.9)$$

Où : K_{sf} est le taux des particules fines dans le sable (<0.09 mm).

- Les dosages en eau et superplastifiant sont déterminés expérimentalement en fonction de la fluidité de la pâte (un étalement relatif « Γ_m », déterminé par l'essai de mini-cône à mortier et une vitesse d'écoulement relative « R_m », déterminée par l'essai d'entonnoir à mortier) (cf. Figure 1.48).

$$\Gamma_m = \frac{(d_1 \cdot d_2 - d_0^2)}{d_0^2} \quad (1.10)$$

$$R_m = \frac{10}{t} \quad (1.11)$$

Où :

d_1 et d_2 sont les diamètres d'étalement, de la galette de mortier, dans deux directions perpendiculaires.

d_0 est le diamètre inférieur du cône.

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.

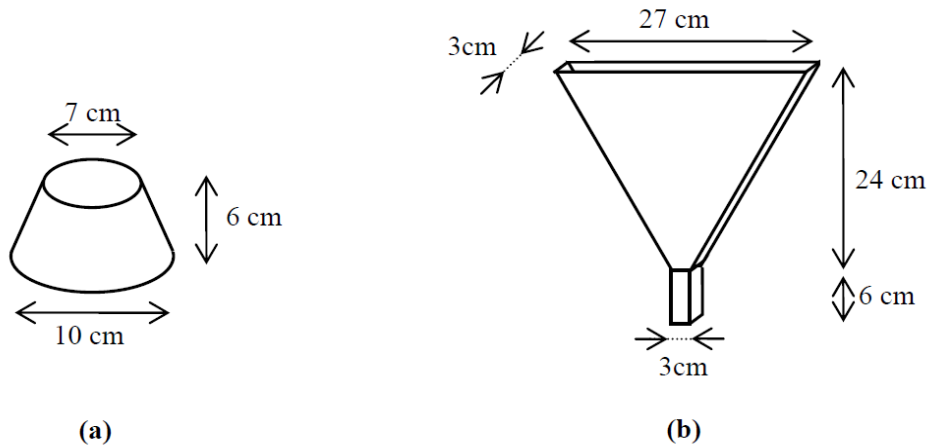


Figure 1. 48 Schémas et dimensions en cm du mini-cône (a) et d'entonnoir à mortier (b) (Okamura et Ouchi, 2003)

1.6.2 Méthode suédoise (Approche CBI)

C'est une développée par le CBI (Cement och Betong Institutet), cette approche est basée sur l'évaluation des risques de blocage des granulats dans les milieux ferraillés. Elle permet d'optimiser la taille maximale des granulats par rapport à l'espacement entre les armatures, et le volume des granulats dans le béton (Hermime, 2016).

Tangtermsirikul et VK Bui (1995) ont proposé une approche d'évaluation du risque de blocage du béton en utilisant l'essai de la boîte en L (L-box). Ils ont fait l'hypothèse que le phénomène de blocage était indépendant de la nature de la pâte pourvu que celle-ci soit suffisamment fluide (Daoud, 2003).

L'expression du risque de blocage R_b s'écrit :

$$R_b = (1 - V_p) \sum_i \frac{y_i}{V_{cri,i}} \quad (1.12)$$

Y_i est la proportion volumique de grains de taille i rapportée au volume de granulat

V_p est la proportion volumique de la pâte dans le béton

$V_{cri, i}$ est la fraction en volume en grain de taille i induisant un blocage

À partir de cette relation, on peut déduire, pour chaque rapport gravier sur sable (G/S), le volume minimal de pâte pour éviter le risque de blocage, en écrivant $R_b=1$. Le rapport E/C de la pâte et le type du ciment sont choisis en fonction de la gamme de résistance visée, le dosage du superplastifiant est optimisé pour obtenir un écoulement autoplaçant caractérisé essentiellement par le cône d'Abrams (un étalement de 700 mm est jugé adéquat) et la boîte en L (un rapport de hauteurs H_2/H_1 doit rester au dessus de 0,8) (Boukendakdji, 2010).

1.6.3 Méthode française (Formulation LCPC)

Le principe de cette méthode est basé principalement sur l'analyse granulaire du mélange. De Larrard (2000) a développé un modèle d'optimisation des mélanges granulaires appelé « Modèle d'Empilement Compressible (MEC) ». Ce modèle permet de prévoir la compacité du squelette granulaire à partir des caractéristiques des constituants telles que la densité apparente, les proportions du mélange, les distributions granulaires et la compacité propre.

Pour un béton autoplacant, les grandeurs exigées à l'état frais sont :

- Un étalement au cône d'Abrams supérieur à 600 mm ;
- Un seuil de cisaillement inférieur à 500 Pa ;
- Une viscosité plastique comprise entre 100 et 200 Pa.s.

Cette approche, basée sur la synthèse d'une quinzaine d'années de recherches, est simplifiée par la mise en œuvre d'un logiciel (Bétonlabpro) (De Larrard et Sedran, 1999). Grâce à ce logiciel, les dosages des constituants sont déterminés, en prenant en compte tous les paramètres de calcul, et de l'effet de paroi. Le dosage du superplastifiant peut être ajusté pour obtenir les critères d'ouvrabilité désirés, celui de l'eau pour obtenir la résistance à la compression ciblée (Boukendakdji, 2010).

1.6.4 Méthode basée sur le 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 (Bouziani, 2012).

Khayat et al (2000) ont réalisé une telle étude avec les facteurs suivants : le volume de gravillons, la masse de fines (C+A), le rapport massique eau sur fines $E/(C+A)$, la masse de superplastifiant et la masse d'agent de viscosité. Chaque facteur a été varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre de compositions testées à 25. Au final, les auteurs fournissent les modèles obtenus, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs. Ces modèles ne sont exploitables que pour les constituants utilisés dans l'étude. Plus qu'une méthode de formulation, cette approche fournit surtout un support pour corriger une formule ne répondant pas, par exemple, aux critères de l'AFGC (2008) (Benabed, 2014).

1.6.4.1 Notions sur les plans d'expériences

La grandeur d'intérêt, qui est généralement notée Y , porte le nom de réponse. Les variables qui peuvent modifier la réponse sont appelées facteurs. On parle donc des facteurs qui influent sur une réponse. Les termes facteur et réponse sont universellement employés dans le domaine des plans d'expériences. On distingue plusieurs types de facteurs (les facteurs continus, les facteurs discrets, les facteurs ordonnables...etc.). La valeur donnée à un facteur pour réaliser une expérience est appelée niveau. L'expression des niveaux donne lieu à une codification des valeurs réelles et à un déplacement de l'origine de mesure. Le déplacement de l'origine crée aussi un nouveau paramètre qui est le pas, qui représente la moitié de la différence entre la valeur réelle du niveau haut et celle du niveau bas (cf. Figure 1.49). Le passage des variables d'origine A aux variables codées x , et inversement, est donné par la formule suivante (A_0 est la valeur centrale en unités courantes) :

$$x = \frac{A - A_0}{Pas} \quad (1.13)$$

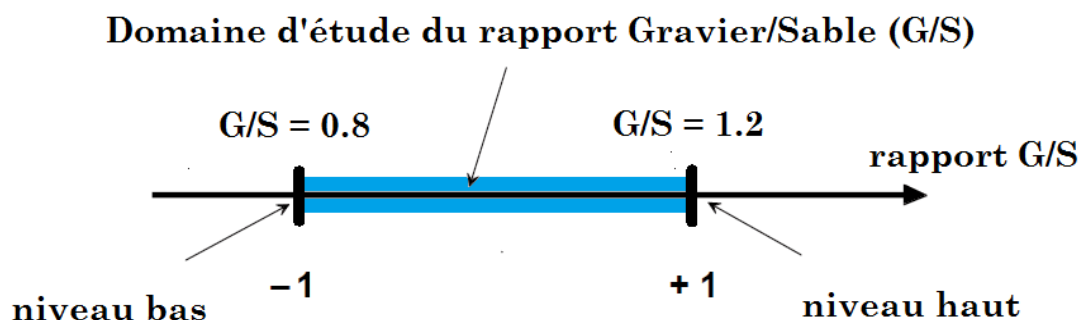


Figure 1. 49 Le domaine de variation du rapport G/S

Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre une borne inférieure (niveau bas) et une borne supérieure est (niveau haut). Ces deux niveaux sont définis en fonction des spécificités de l'étude. L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut s'appelle le domaine de variation du facteur (cf. Figure 1.50).

S'il y a plusieurs facteurs, chacun d'eux à son domaine de variation. Afin d'avoir une représentation commune pour tous les facteurs (Goupy et Creighton, 2006).

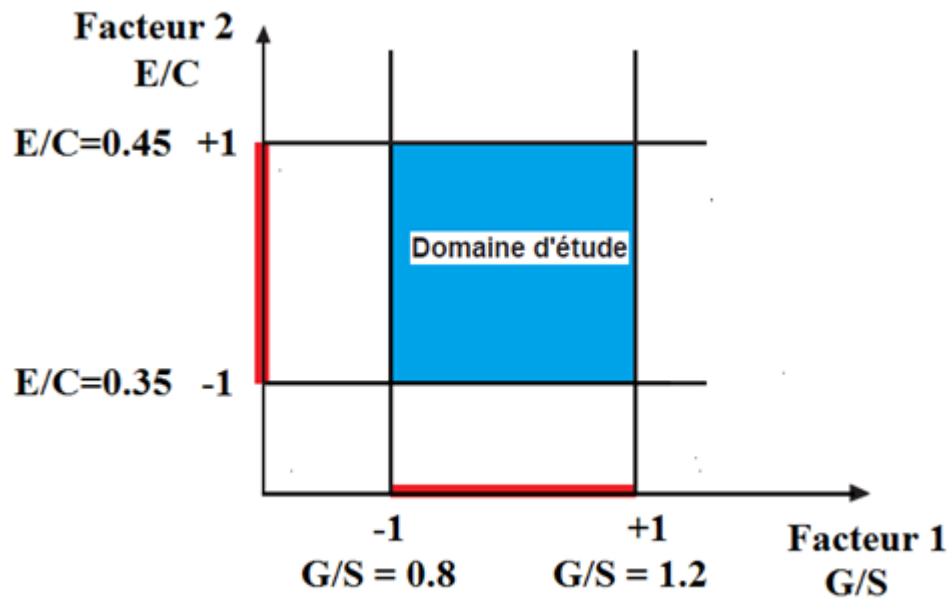


Figure 1. 50 Domaine d'étude délimité par les facteurs G/S et E/C

1.6.4.2 Modélisation mathématique de la réponse

La modélisation mathématique donne une prévision dans le domaine d'étude, que l'on doit toujours préciser. En l'absence de toute information sur la fonction qui lie la réponse aux facteurs, la variation de la réponse (y) est, d'une manière générale, liée aux facteurs ($x_1, x_2, \dots$) par la relation suivante :

$$y = f(x_1, x_1, x_1, \dots, x_n) \quad (1.14)$$

Cette fonction est trop générale, pour en faire une approximation, il est d'usage de prendre un développement limité de Taylor-Mac Laurin. Si les dérivées peuvent être considérées comme des constantes, on peut réécrire la forme générale comme suit :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ii} x_i^2 + \dots \quad (1.15)$$

Où :

- y est la grandeur à laquelle s'intéresse l'expérimentateur (la réponse ou la grandeur d'intérêt) ;
- x_i représente un niveau du facteur i ;
- x_j représente un niveau du facteur j ;
- a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} sont les coefficients du polynôme.

Ce modèle est appelé le modèle a priori ou le modèle postulé. C'est un modèle de prévision valable dans un 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 manque d'ajustement (Δ), qui représente l'écart entre le modèle théorique et le modèle réel qui régit le phénomène étudié.
- L'erreur expérimentale (ε), qui traduit la dispersion des résultats dans un même point expérimental.

La modélisation mathématique 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) (Goupy et Creighton, 2006; Bouziani, 2012).

1.6.4.3 Analyse de la variance

En statistique, l'analyse de la variance consiste à rechercher les sources de variation des réponses pour comparer les moyennes d'échantillons.

La représentation de l'analyse de la variance est généralement effectuée sous la forme de tableau. Les plus simples de ces tableaux comportent 5 colonnes (source de variation, somme des carrés, degrés de liberté, carré moyen et statistique de Fisher) et 4 lignes (titre, modèle corrigé de la moyenne, résidus et réponses mesurées corrigées de la moyenne) (Goupy et Creighton, 2006).

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 soient pas égales (si le rapport F est élevé, faible probabilité que le modèle soit celui de la moyenne) (Bouziani, 2012).

1.6.4.4 Le coefficient de détermination R^2

Le coefficient de détermination (R^2 , soit le carré du coefficient de corrélation linéaire r) est défini par le rapport :

$$R^2 = \frac{\text{Somme des carrés des réponses calculées}}{\text{Somme des carrés des réponses mesurées}} \quad (1.16)$$

Si le modèle permet de retrouver exactement la valeur des réponses mesurées, la somme des carrés des réponses calculées est égale à la somme des carrés des réponses mesurées. Le R^2 est égal à 1.

Si le modèle fournit des réponses calculées égales à la moyenne, la somme des carrés des réponses calculées est égale à 0. Le R^2 est égal à 0. On dit que le modèle n'a pas de puissance d'explication.

Le R^2 est donc une mesure de la qualité du modèle. S'il est égal à 1, le modèle permet de retrouver la valeur des réponses mesurées. S'il est égal à 0, le modèle n'en dit pas plus que la moyenne des réponses. Dans la pratique, il est difficile d'indiquer la valeur d'un bon R^2 car les valeurs varient beaucoup d'une discipline à l'autre.

Par exemple, un R^2 de 0,8 peut être considéré comme mauvais par un ingénieur et un R^2 de 0,3 peut être vu comme bon par un psychologue.

Le R^2 joue véritablement son rôle d'indicateur de la qualité du modèle à condition que les résidus ne soient pas nuls. Si les résidus sont nuls, le R^2 est égal à 1 quelle que soit la qualité du modèle. On observe un tel cas lorsqu'il n'y a pas de degrés de liberté. Le R^2 est donc un bon indicateur de la qualité du modèle s'il y a plus de points expérimentaux différents que de coefficients dans le modèle postulé (Goupy et Creighton, 2006).

1.6.4.5 La probabilité p-value

Pour évaluer l'importance d'un coefficient, la théorie des statistiques compare ce coefficient à son écart-type. Ce rapport est appelé le *t de Student*. À partir du *t de Student*, on peut évaluer la probabilité que le coefficient soit nul, important ou peu significatif (Goupy et Creighton, 2006). Cette probabilité est la p-value .

- Si la p-value est proche de 0, le coefficient est influent
- Si la p-value est proche de 1, le coefficient est proche de 0 et donc négligeable
- Si la p-value possède une valeur intermédiaire, le coefficient est peut-être légèrement significatif ou non significatif.

1.6.4.6 Plans pour surfaces de réponse

Les plans pour surfaces de réponse sont les plus employés, car ils permettent le criblage des facteurs et conduisent parfois à des modélisations simples, mais suffisantes. Plusieurs plans factoriels sont employés par cette technique pour l'analyse des résultats à savoir les plans composites centrés, les plans de Box-Behnken et les plans de Doehlert.

Les plans composites centrés se prêtent bien au déroulement séquentiel d'une étude. La première partie de l'étude est un plan factoriel complet ou fractionnaire complété par des points au centre pour vérifier la validité du modèle PDAI (termes du premier degré et termes d'interactions).

Si les tests de validation sont positifs (la réponse mesurée au centre du domaine est statistiquement égale à la réponse calculée au même point), l'étude s'achève le plus souvent, mais s'ils sont négatifs, on entreprend des essais supplémentaires pour établir un modèle du second degré.

Les essais supplémentaires sont représentés par des points d'expériences situés sur les axes de coordonnées et par de nouveaux points centraux. Les points situés sur les axes de coordonnées sont appelés les points en étoile (cf. Figure 1.51). Le nombre total n d'essais à réaliser est la somme des essais du plan factoriel (n_f), des essais du plan en étoile (n_a) et des essais au centre (n_0) (Goupy et Creighton, 2006).

Le nombre n des essais d'un plan composite est donné par la relation suivante :

$$n = n_f + n_a + n_0 \quad (1. 17)$$

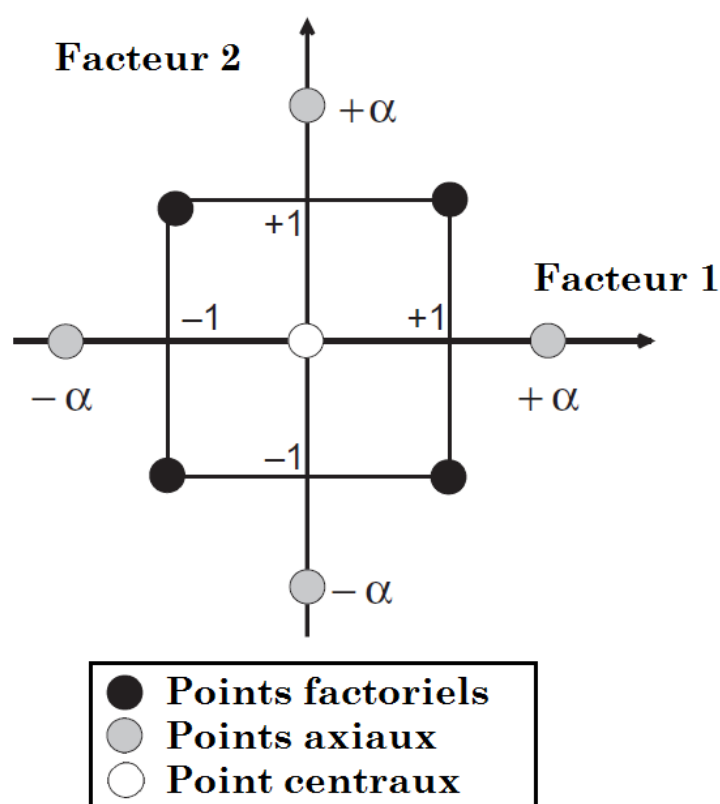


Figure 1. 51 Plan composite pour l'étude de deux facteurs (Goupy et Creighton, 2006)

1.6.4.7 Les plans de mélanges

Les plans de mélange sont des plans d'expériences conçus pour optimiser l'étude des mélanges composés de plusieurs constituants. Les plans de mélanges classiques supposent que les produits purs ont la propriété d'usage recherchée et qu'il n'y a aucune contrainte qui pèse sur eux.

L'usage est de classer les principaux types de plans de mélanges suivant l'emplacement des points représentatifs des compositions. On distingue :

- Les plans en réseaux ;
- Les plans de mélanges centrés ;
- Les plans de mélanges centrés augmentés.

Les plans en réseaux (Simplex lattice designs) sont les premiers plans de mélanges qui ont été introduits. Les points de composition sont régulièrement répartis 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 (cf. Figure 1.52). Le plan qui ne fait intervenir que les produits purs peut être enrichi par les points de composition moyenne. Ces points de composition moyenne se situent au milieu des côtés du triangle. Si l'on désire un réseau de points plus serré, il faut diviser la longueur des côtés par trois. On peut continuer à construire ainsi des réseaux de plus en plus serrés en divisant l'unité par m . Pour nommer ces plans, on adopte la convention suivante : on utilise deux chiffres (q et m), 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. 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 (Goupy et Creighton, 2006). Pour un plan $\{q, m\}$, le nombre total de compositions différentes est égal à :

$$C_{q+m-1}^m = \frac{(q+m-1)!}{(m)!(q-1)!} \quad (1.18)$$

Les produits purs sont aux sommets du triangle équilatéral, les mélanges binaires sont représentés par les côtés du triangle. 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 AC parallèlement à AB (côté opposé à C) comme le montre la figure 1.53 (Goupy et Creighton, 2006).

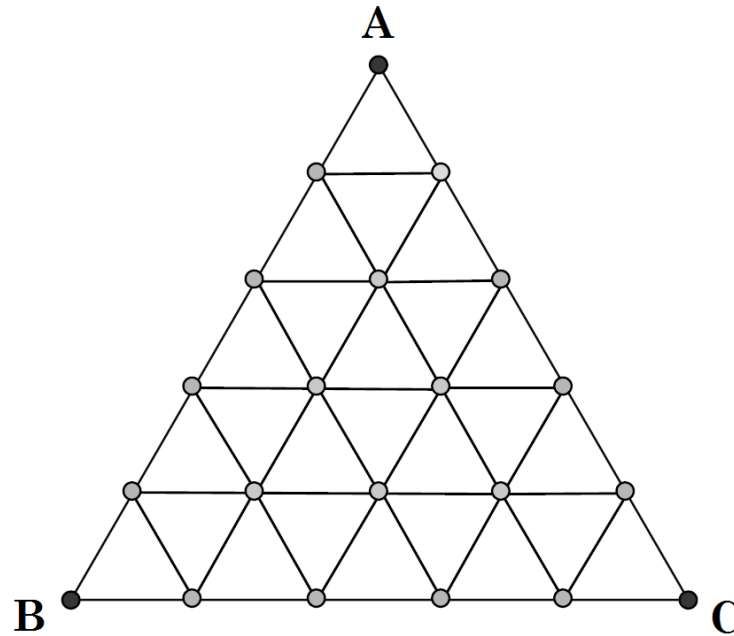


Figure 1. 52 Plan de mélange en réseaux comportant 21 mélanges
Ce plan est noté {3, 5} (Goupy et Creighton, 2006)

Les modèles mathématiques appliqués aux plans de mélanges sont les mêmes modèles que ceux des plans factoriels classiques, en tenant compte de la contrainte fondamentale des mélanges. Par exemple, pour un mélange à trois types de sables (sable alluvionnaire « SA », le sable de dune « SD » et le sable de concassage « SC ») on pourrait écrire :

$$Y = b_1 \times SA + b_2 \times SD + b_3 \times SC + b_4 \times (SA \cdot SD) + b_5 \times (SA \cdot SC) + b_6 \times (SD \cdot SC) \quad (1. 19)$$

Où :

- Y est la réponse,
- $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$ sont les coefficients du modèle.

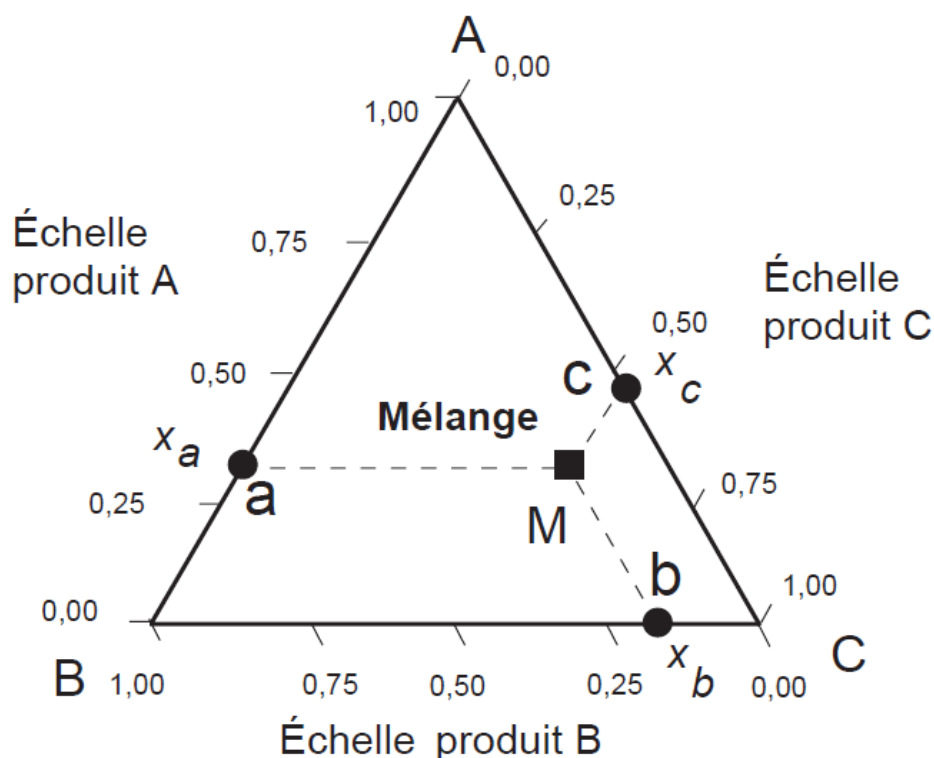


Figure 1. 53 Représentation des mélanges à trios constituants à l'aide d'un triangle équilatéral (Goupy et Creighton, 2006)

1.7 Conclusion

Ce premier chapitre a été effectué pour faire le point sur l'influence des paramètres de formulation et le comportement rhéologique des BAP, tout en mettant en évidence la stabilité statique et en s'appuyant sur la méthode de plan d'expérience.

Le béton autoplaçant est un matériau de construction qui fait l'objet actuellement d'un grand intérêt et qui contribue aussi à une meilleure maîtrise de la construction des ouvrages.

La maîtrise du comportement rhéologique des BAP constitue une étape essentielle pour garantir les propriétés souhaitées.

La formulation d'un béton autoplaçant est une opération complexe qui nécessite de trouver l'ajustement du dosage de plusieurs constituants afin d'obtenir un mélange conforme aux exigences techniques préconisées.

L'utilisation des méthodes des plans d'expériences nous permet d'obtenir des modèles statistiques donnant l'effet de chaque paramètre de formulation et leurs effets combinés, tout en minimisant le nombre d'essais à réaliser.

Chapitre 2 : Matériaux utilisés et méthodes d'essais

CHAPITRE 2 : Matériaux utilisés et méthodes d'essais

2.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les caractéristiques physico-chimiques des matériaux ainsi que les techniques expérimentales utilisées et la méthode de formulation adoptée. Ensuite, on présente les essais réalisés sur les mortiers et les bétons à l'état frais et à l'état durci.

2.2 Matériaux utilisés

2.2.1 Le ciment

Le ciment utilisé est un ciment portland CEM I 42.5 de la société de S.P.A BISKRIA. La composition minéralogique et chimique ainsi que les propriétés physiques du ciment sont données dans le Tableau 2.1 (Annexe A). L'analyse minéralogique montre que le ciment utilisé est fortement allitique (pourcentage élevé en C_3S et C_2S) et résistant aux sulfates (pourcentage faible du C_3A).

Tableau 2. 1 Caractéristiques du ciment

Caractéristiques chimiques (%)	
CaO	64.2
SiO ₂	19.43
Al ₂ O ₃	5.04
Fe ₂ O ₃	6.57
MgO	1.49
K ₂ O	0.46
SO ₃	2.35
Na ₂ O	0.17
Cl	0.028
Perte au feu	2.75
Composition minéralogique (%)	
C ₃ S	62
C ₂ S	13
C ₃ A	1.5
C ₄ AF	17
Caractéristiques physiques	
Masse spécifique	3.1
Surface Blaine (cm ² /g)	3420
Début de prise (min)	180
Expansion a chaud (mm)	0.5
Consistance (%)	25.7

2.2.2 La poudre de marbre

L'addition minérale utilisée dans cette étude est la poudre de marbre commercialisé par la société de fabrication de marbre carrelage & aggro-marbre (MCA). Les caractéristiques chimiques et physiques de la poudre de marbre sont résumées dans le tableau 2.2. L'analyse chimique montre que la poudre de marbre contient principalement de l'oxyde de calcium (CaO).

Tableau 2. 2 Caractéristiques physiques et chimiques de la poudre de marbre

Composant (%)	Poudre de marbre
CaO	56.01
SiO ₂	0.42
Al ₂ O ₃	0.13
Fe ₂ O ₃	0.06
MgO	0.12
K ₂ O	0.01
SO ₃	0.01
CaCO ₃	90
Na ₂ O	0.43
Cl	0.1
Perte au feu	42.78
Densité spécifique	2.7
Surface Blaine (cm ² /g)	3600

2.2.3 Les sables

Dans notre étude, nous nous intéresserons à étudier l'influence de type de sable sur la stabilité statique à l'état frais des bétons autoplaçants.

Pour mener à bien cette étude, nous avons choisi trois types de sables :

a. Sable alluvionnaire (SA)

Le sable alluvionnaire utilisé est un sable local prélevé d'Oued M'Zi (région de Laghouat), il se caractérise par sa forme arrondie (cf. Figure 2.1).

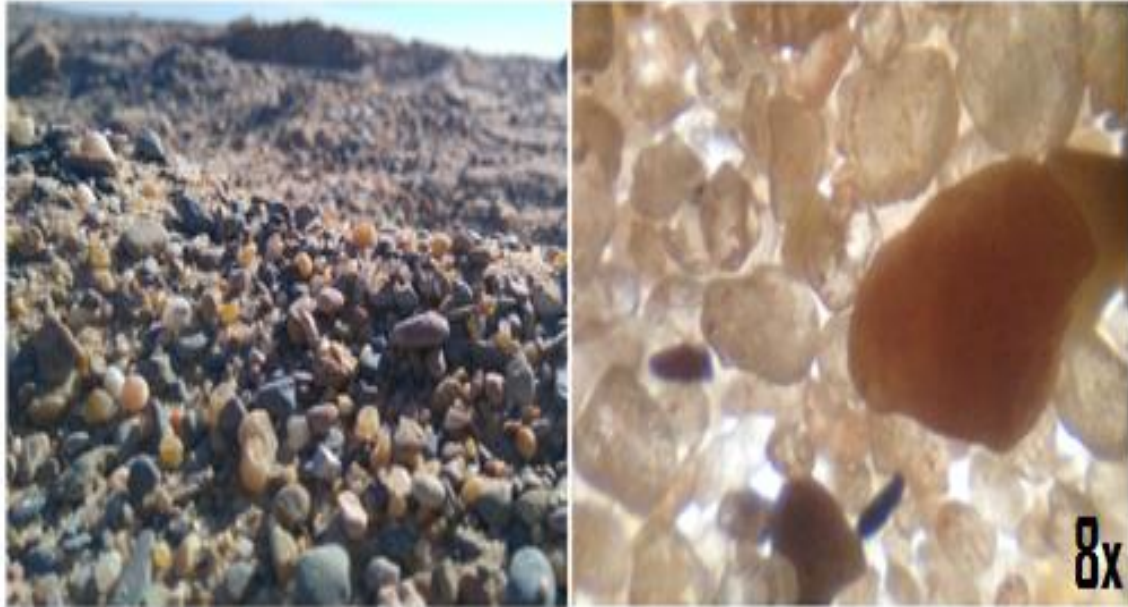


Figure 2. 1 Sable alluvionnaire

b. Sable de dune (SD)

Le Sud algérien dispose des réserves naturelles importantes en sable de dune. C'est un sable extra-fin et très propre (cf. Figure 2.2). Le sable de dune utilisé provient aussi de la région de Laghouat.



Figure 2.2 Sable de dune

c. Sable concassé (SC)

C'est un sable artificiel obtenu par un processus de concassage et broyage des roches, dont les arrêtes des grains sont vives (forme angulaire). Ces sables sont riches en particules fines (cf. Figure 2.3). Le sable de carrière utilisé provenant de la région de Djelfa.



Figure 2. 3 Sable concassé

Les résultats d'essais de caractérisation des sables utilisés sont donnés dans le tableau 2.3 et la courbe de l'analyse granulométrique des différents sables est présentée dans la figure 2.4. Les photos MEB (obtenues par Microscope électronique à Balayage) présentées dans les figures 2.5, 2.6 et 2.7.

Les photos MEB montrent que les sables alluvionnaire et dunaire sont de forme arrondie (roulé) avec une surface lisse. Alors que, les grains du sable concassé sont de forme cubique et angulaire (texture rugueuse). Nous constatons que le sable de dunes à une finesse et une granularité serrée par rapport au sable alluvionnaire. Nous observons aussi une quantité de fines reste collée à la surface des grains du sable concassé.

L'analyse granulométrique révèle que le sable alluvionnaire possède une granularité moyenne tandis que le sable concassé est considéré comme un sable grossier. Ces deux sables présentent une granulométrie étalée tandis que le sable de dune présente une granulométrie assez fine et une granularité très serrée avec une forte proportion des grains qui ont le même diamètre (forme homo métrique).

Tableau 2. 3 Caractéristiques des sables utilisés

Caractéristiques	SA	SC	SD
Origine	Naturel	Artificiel	Naturel
Forme	Roulée	Angulaire	Roulée
Composition chimique	Siliceux (SiO_2)	Calcaire (CaCO_3)	Siliceux (SiO_2)
Taille (mm)	0/5	0/4	0/0.8
Densité	2.65	2.68	2.67
Coefficient d'absorption (%)	1.39	4.75	2.1
Module de finesse	2.69	3.2	1.3
Équivalent de sable	0.71	0.85	0.9

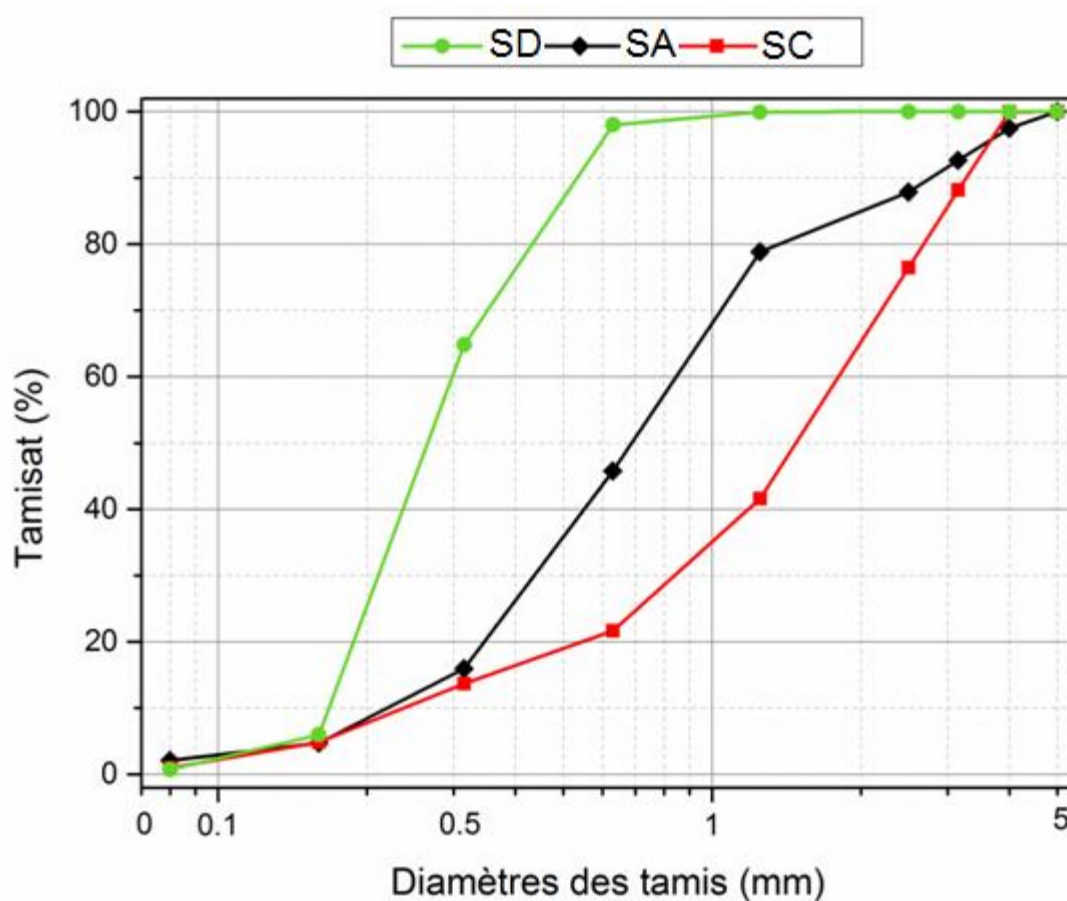


Figure 2. 4 Courbes granulométriques des sables utilisés.

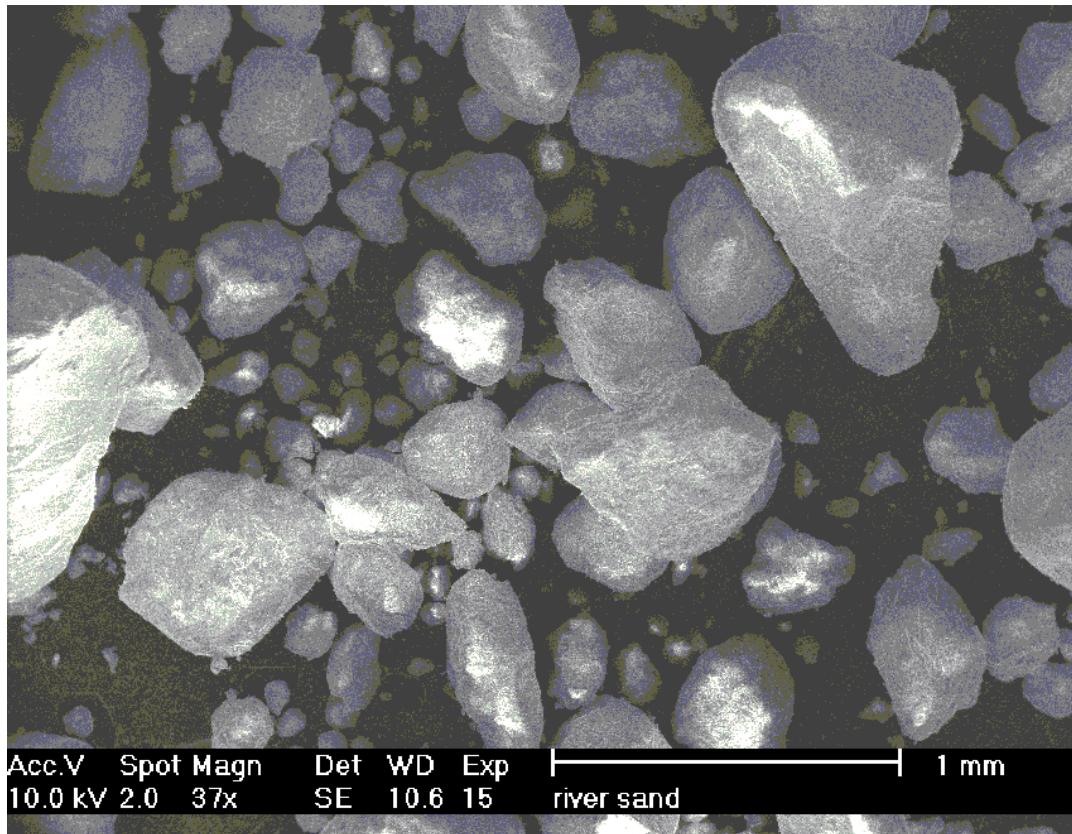


Figure 2. 5 Photo MEB du sable alluvionnaire.

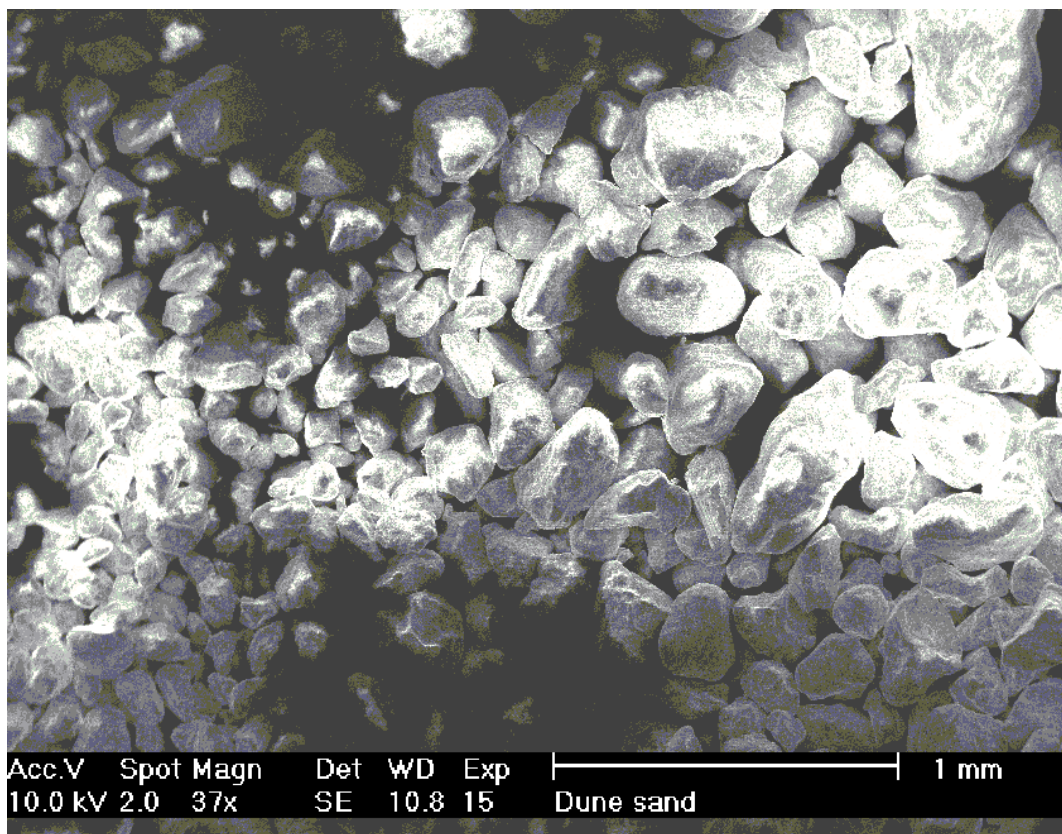


Figure 2. 6 Photo MEB du sable de dunes.

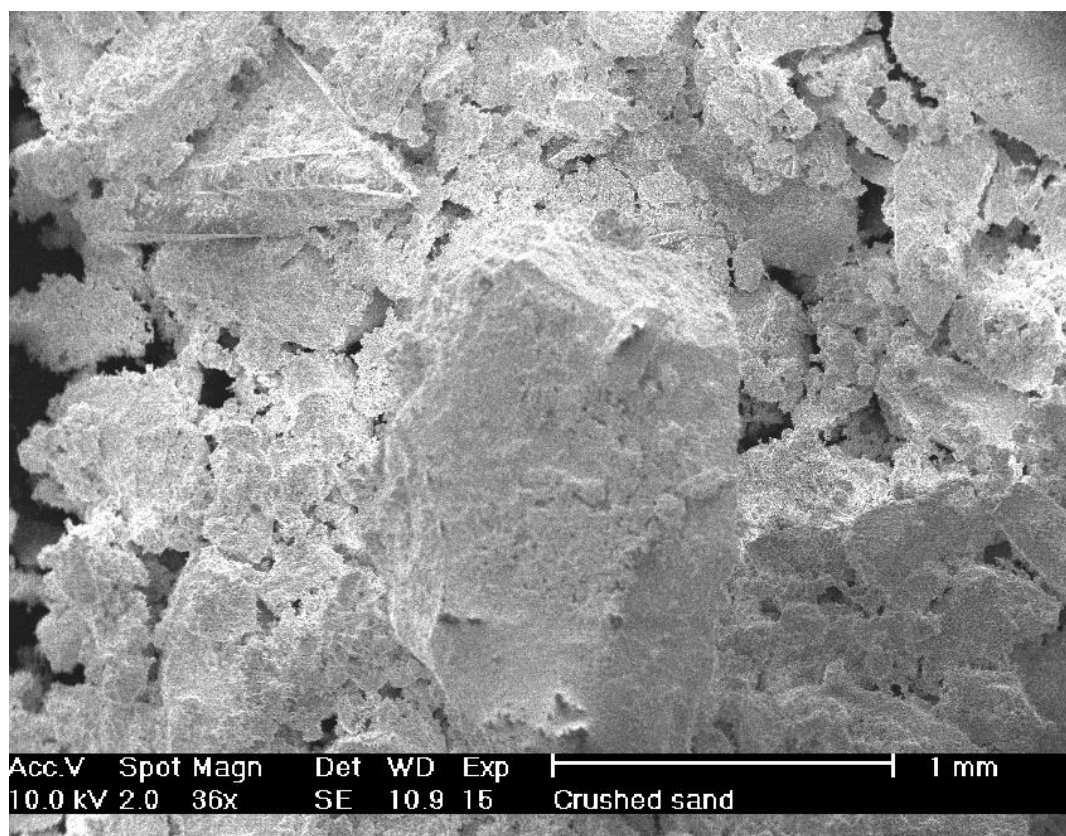


Figure 2. 7 Photo MEB du sable concassé.

2.2.4 Gravier

Dans cette étude deux classes de gravier calcaire (provenant de la région de Djelfa) ont été utilisées : Gravier G₁ (3/8) et Gravier G₂ (8/15). Les résultats de l'analyse physico-chimique des graviers utilisés ainsi que les courbes granulométriques du gravier utilisé sont donnés dans le tableau 2.4 et la figure 2.8.

Tableau 2. 4 Caractéristiques physiques et chimiques

Composant (%)	G ₁ (3/8)	G ₂ (8/15)
CaO	54.55	48.48
SiO ₂	1.17	6.06
Al ₂ O ₃	0.30	0.44
Fe ₂ O ₃	0.19	0.50
MgO	0.94	3.37
K ₂ O	0.07	0.09
SO ₃	0.10	0.17
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2.66	2.64
Coefficient d'absorption	3.1	0.7

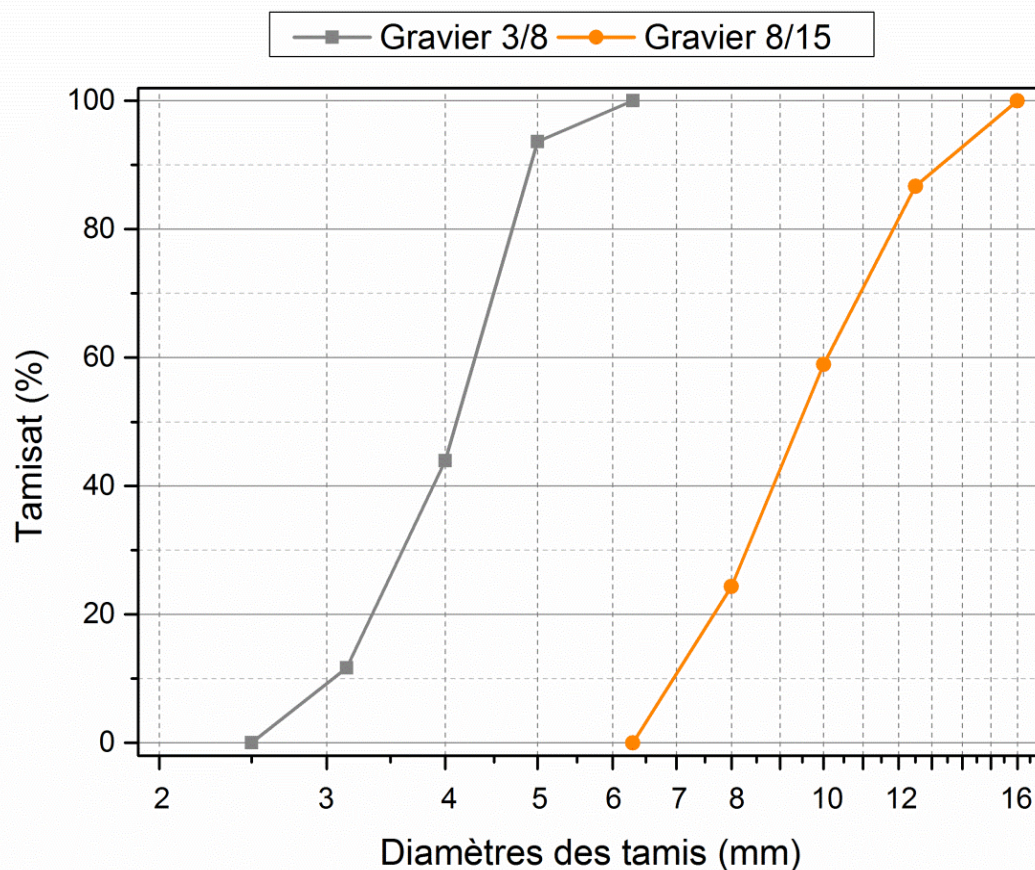


Figure 2. 8 Courbes granulométriques des graviers utilisés.

2.2.5 Superplastifiant

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération fabriqué par la société « Granitex NP » et commercialisé sous le nom MEDAFLOW 30 (voir annexe A). Il est fait de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons et permet de réduire fortement la teneur en eau. Ses caractéristiques sont données dans le tableau 2.5.

Tableau 2. 5 Caractéristiques du MEDAFLOW 30

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

2.3 Méthodes, procédures et formulations adoptées

Cette étude a été scindée en deux parties :

La première partie consiste d'étudier l'effet des paramètres de formulation tels que : le rapport gravier/sable (G/S), le rapport gravier 3-8/gravier 8-15 (G1/G2), le rapport de poudre de marbre/ciment (PM/C), le rapport eau/ciment (E/C) et le dosage du superplastifiant (SP), sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des BAP avec la proposition d'un nouveau test simple appelé « K-Slump modifié » qui permet de contrôler l'ouvrabilité et la ségrégation verticale des BAP à l'état frais.

La deuxième partie de cette étude portait sur l'influence de l'incorporation du sable de concassage et du sable de dune dans des mélanges binaires et ternaires avec le sable alluvionnaire sur la stabilité statique et le comportement rhéologique et mécanique des BAP en se basant sur les résultats des expériences de la première partie.

Afin de comprendre le rôle joué par les différents paramètres de formulation de la première partie d'étude, il est nécessaire d'adopter une démarche expérimentale capable de prendre en considération l'effet de chaque paramètre et l'effet des interactions entre plusieurs paramètres sur les propriétés étudiées, tout en effectuant le nombre minimum d'essais aux laboratoires. L'une des méthodes les plus connues est la méthode de plan d'expérience qui permet de déterminer un nombre bien déterminé d'essais dont la réalisation permet de dévoiler l'effet des paramètres étudiés séparément et en interactions.

En plus, l'apparition des logiciels statistiques rend la construction des plans d'expériences et les calculs nécessaires à leur interprétation une tâche simple. Ces logiciels favorisent aussi des représentations graphiques qui illustrent de manière claire les résultats et améliorent la compréhension des phénomènes étudiés (Bouziani, 2012). Dans notre étude, la construction et l'analyse des plans d'expérience sont effectuées à l'aide du logiciel statistique JMP7 (cf. Figure 2.9) (voir annexe C).

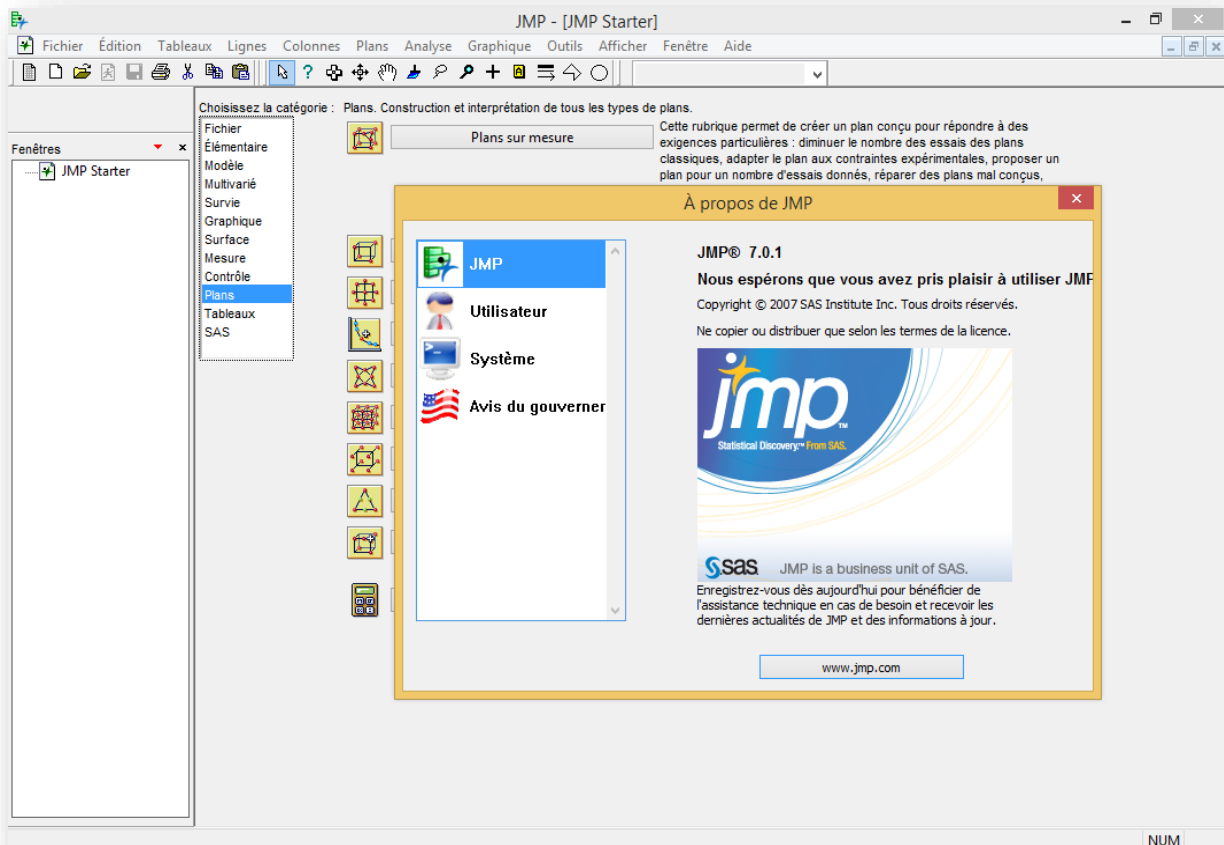


Figure 2. 9 Logiciel de modélisation statistique JMP

2.3.1 Choix et préparation des plans d'expérience

a) Influence des paramètres de formulation

La première partie de notre travail est une étude paramétrique basée sur la variation de chaque paramètre (facteur) séparément afin d'observer son influence sur l'évolution des propriétés rhéologiques (réponses).

Les cinq facteurs étudiés et qui seront utilisés dans les modèles mathématiques des réponses citées ci-dessus, sont :

- Le rapport gravier/sable (G/S) ;
- Le rapport gravier₃₋₈/gravier₈₋₁₅ (G1/G2) ;
- Le rapport de poudre de marbre/ciment (MP/C) ;
- Le rapport eau/ciment (E/C) ;
- Le dosage du superplastifiant (SP).

Les réponses choisies sont :

- ❖ L'étalement au cône d'Abrams ;
- ❖ Le temps d'écoulement T_{50} ;
- ❖ Le rapport H_2/H_1 de l'essai L-box ;
- ❖ Le temps d'écoulement T_{20} et T_{40} de l'essai L-box ;
- ❖ Le temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel) ;
- ❖ L'essai de stabilité au tamis ;
- ❖ L'essai de ségrégation au cylindre ;
- ❖ L'essai de ségrégation à la colonne ;
- ❖ Les paramètres rhéologiques du BAP (seuil de cisaillement et viscosité plastique) ;
- ❖ L'essai de K-slump modifié.

Pour pouvoir présenter les plans d'expériences de la même manière quels que soient les domaines d'étude retenus et quels que soient les facteurs, deux modifications importantes doivent être effectuées :

Chaque facteur sera limité entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas (codé -1) et la borne supérieure est le niveau haut (codé +1). Par l'attribution des valeurs -1 au niveau bas et +1 au niveau haut, on déplace l'origine (0) des mesures et on change les unités de mesure (Goupy et Creighton, 2006). Le passage des variables d'origine aux variables codées est donné par la formule (1.13).

Il convient de noter que les essais expérimentaux préliminaires sont nécessaires pour délimiter le domaine d'étude du plan d'expérience. La formulation du centre que nous avons adoptée est basée sur les recommandations de l'association française de génie civil (AFGC, 2008).

La méthodologie du plan de surface de réponse est un ensemble de techniques de plan d'expériences souvent utilisées pour mettre au point des modèles suite à la détermination de facteurs importants à l'aide de plans factoriels ou de plans de criblage.

Les plans composites centrés peuvent ajuster un modèle quadratique complet. Ils sont souvent utilisés lorsque le plan demande une expérimentation séquentielle, car ces plans peuvent intégrer des informations provenant d'une expérience factorielle correctement planifiée (*Minitab*, 2018).

De ce fait, nous avons choisi un plan central composite ($2^{5-1}=16$) augmenté par 5 points centraux pour estimer l'erreur expérimentale et 10 points axiaux (ou étoiles) qui permettent d'estimer la courbure. Soit donc 31 essais à réaliser dans notre cas.

Le plan central composite est rendu orthogonal par le choix du nombre de points centraux et la distance axiale α qui représente la distance des points en étoile au centre du plan. Dans notre cas $\alpha=1.607$.

Le domaine d'étude, qui est constitué de 05 facteurs définis par leurs niveaux bas et hauts, est donné par le tableau suivant :

Tableau 2. 6 Variable codée et les niveaux correspondants

Variable codée	Niveau -1.607	Niveau -1	Niveau 0	Niveau +1	Niveau +1.607
G_1/G_2	0	18.89	50	81.11	100
G/S	0.68	0.8	1	1.2	1.32
MP/C (%)	0	4.72	12.5	20.28	25
W/C	0.35	0.36	0.375	0.39	0.40
Sp (%)	0.8	0.84	0.9	0.96	1

Les compositions des points factoriels fractionnaires, des points axiaux et des points centraux du plan d'expérience choisie sont récapitulées dans le tableau 2.7.

Tableau 2. 7 Compositions du plan d'expérience choisi
(1^{re} partie d'étude)

N°	Type	G1/G2 (%)	G/S	PM/C (%)	E/C (%)	Sp (%)
1	Axial	0	1	12.5	37.5	0.9
2	Factoriels	18.89	0.8	4.72	36	0.84
3		18.89	0.8	4.72	39	0.96
4		18.89	0.8	20.28	36	0.96
5		18.89	0.8	20.28	39	0.84
6		18.89	1.2	4.72	36	0.96
7		18.89	1.2	4.72	39	0.84
8		18.89	1.2	20.28	36	0.84
9		18.89	1.2	20.28	39	0.96
10	Axiaux	50	0.68	12.5	37.5	0.9
11		50	1	0	37.5	0.9
12		50	1	12.5	35	0.9
13		50	1	12.5	37.5	0.8
14	Centraux	50	1	12.5	37.5	0.9
15		50	1	12.5	37.5	0.9
16		50	1	12.5	37.5	0.9
17		50	1	12.5	37.5	0.9
18		50	1	12.5	37.5	0.9
19	Axiaux	50	1	12.5	37.5	1
20		50	1	12.5	40	0.9
21		50	1	25	37.5	0.9
22		50	1.32	12.5	37.5	0.9
23	Factoriels	81.11	0.8	4.72	36	0.96
24		81.11	0.8	4.72	39	0.84
25		81.11	0.8	20.28	36	0.84
26		81.11	0.8	20.28	39	0.96
27		81.11	1.2	4.72	36	0.84
28		81.11	1.2	4.72	39	0.96
29		81.11	1.2	20.28	36	0.96
30		81.11	1.2	20.28	39	0.84
31	Axial	100	1	12.5	37.5	0.9

Le tableau 2.8 résume le calcul des proportions de chaque constituant pour tous les mélanges de la première phase de cette étude. Le dosage du ciment est maintenu constant (420 kg/m³) et la quantité d'eau est calculée selon les rapports E/C donnés.

Tableau 2. 8 Composition pour 1 m³ des compositions étudiées
(1re partie d'étude)

N°	G ₂ 8/15 (kg/m ³)	G ₁ 3/8 (kg/m ³)	Sable (kg/m ³)	Ciment (kg/m ³)	PM (kg/m ³)	Eau (kg/m ³)	Sp (%)
1	874.50	0.00	874.50	420	52.50	157.50	3.78
2	630.50	146.84	971.67	420	19.82	151.20	3.53
3	630.50	146.84	971.67	420	19.82	163.80	4.03
4	630.50	146.84	971.67	420	85.18	151.20	4.03
5	630.50	146.84	971.67	420	85.18	163.80	3.53
6	773.79	180.21	795.00	420	19.82	151.20	4.03
7	773.79	180.21	795.00	420	19.82	163.80	3.53
8	773.79	180.21	795.00	420	85.18	151.20	3.53
9	773.79	180.21	795.00	420	85.18	163.80	4.03
10	353.96	353.96	1041.07	420	52.50	157.50	3.78
11	437.25	437.25	874.50	420	0.00	157.50	3.78
12	437.25	437.25	874.50	420	52.50	147.00	3.78
13	437.25	437.25	874.50	420	52.50	157.50	3.36
14	437.25	437.25	874.50	420	52.50	157.50	3.78
15	437.25	437.25	874.50	420	52.50	157.50	3.78
16	437.25	437.25	874.50	420	52.50	157.50	3.78
17	437.25	437.25	874.50	420	52.50	157.50	3.78
18	437.25	437.25	874.50	420	52.50	157.50	3.78
19	437.25	437.25	874.50	420	52.50	157.50	4.20
20	437.25	437.25	874.50	420	52.50	168.00	3.78
21	437.25	437.25	874.50	420	105.00	157.50	3.78
22	497.56	497.56	753.88	420	52.50	157.50	3.78
23	146.84	630.50	971.67	420	19.82	151.20	4.03
24	146.84	630.50	971.67	420	19.82	163.80	3.53
25	146.84	630.50	971.67	420	85.18	151.20	3.53
26	146.84	630.50	971.67	420	85.18	163.80	4.03
27	180.21	773.79	795.00	420	19.82	151.20	3.53
28	180.21	773.79	795.00	420	19.82	163.80	4.03
29	180.21	773.79	795.00	420	85.18	151.20	4.03
30	180.21	773.79	795.00	420	85.18	163.80	3.53
31	0.00	874.50	874.50	420	52.50	157.50	3.78

b) Influence de types de sable

L'objectif de cette étude consiste à étudier l'influence de divers types de sables (sable alluvionnaire, sable de dune et sable de concassage) en mélanges binaires et ternaires sur le comportement rhéologique et mécanique des BAP, en mettant plus de lumière sur la stabilité statique et en s'appuyant sur la méthode de plan d'expérience et les résultats de la première partie d'étude.

Dans le cas d'un plan central composite (comme celui utilisé pour la première partie d'étude) 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. Cette liberté n'existe pas lorsque l'on étudie des mélanges, car les facteurs d'étude sont les proportions des constituants du mélange et la somme de ces proportions est toujours égale à 100 % (Goupy et Creighton, 2006).

Le plan choisi pour notre cas d'étude est un plan de mélange en réseaux noté {3, 5} qui comporte 21 mélanges. On peut représenter ce plan à l'aide d'un triangle équilatéral comme le montre la figure 2.10 ou sous forme d'un tableau qui donne toutes les combinaisons possibles (tableau 2.9).

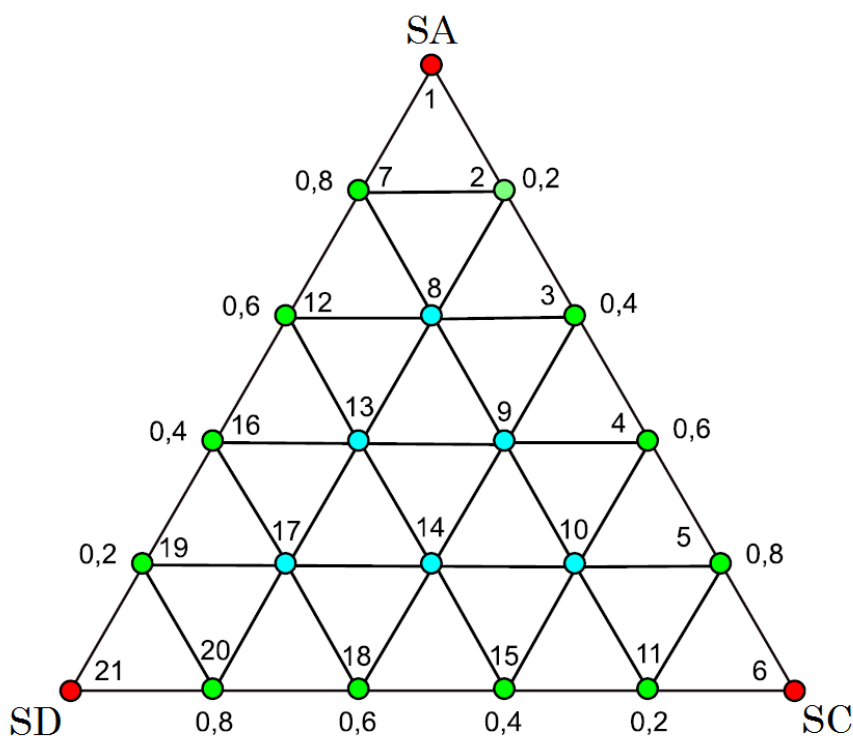


Figure 2. 10 Le plan utilisé pour l'étude de l'influence des sables

Tableau 2. 9 Compositions du plan de mélange

N°	SA	SC	SD
1	1	0	0
2	0.8	0.2	0
3	0.6	0.4	0
4	0.4	0.6	0
5	0.2	0.8	0
6	0	1	0
7	0.8	0	0.2
8	0.6	0.2	0.2
9	0.4	0.4	0.2
10	0.2	0.6	0.2
11	0	0.8	0.2
12	0.6	0	0.4
13	0.4	0.2	0.4
14	0.2	0.4	0.4
15	0	0.6	0.4
16	0.4	0	0.6
17	0.2	0.2	0.6
18	0	0.4	0.6
19	0.2	0	0.8
20	0	0.2	0.8
21	0	0	1

Les résultats des expériences de la première phase d'étude nous ont permis de trouver une formulation qui contribue à étudier l'influence de la combinaison des trois différents types de sable sur les caractéristiques des BAP selon les recommandations établies par l'EFNARC (The European Project Group, 2005) . Ces considérations conduisent à adopter un rapport G/S de l'ordre de 1, un rapport $G1/G2 = 40\%$, le dosage en ciment est pris égale à 420 kg/m^3 , le dosage en PM est de 20% de la masse du ciment, un rapport E/C égale à 0.37 et le dosage en Sp est pris 0.95% du poids de ciment.

Les différentes compositions des BAP obtenus pour les différents types de sable utilisés sont présentées dans le tableau 2.10.

Tableau 2. 10 Composition pour 1 m³ du plan de mélange étudié
(2^e partie d'étude)

N°	SA (kg/m ³)	SC (kg/m ³)	SD (kg/m ³)	G1 (kg/m ³)	G2 (kg/m ³)	Sable (kg/m ³)	Ciment (kg/m ³)	PM (kg/m ³)	Eau (kg/m ³)	Sp (kg/m ³)
1	877.15	0	0	350.86	526.29	877.15	420	84	155.4	3.99
2	701.72	175.43	0							
3	526.29	350.86	0							
4	350.86	526.29	0							
5	175.43	701.72	0							
6	0	877.15	0							
7	701.72	0	175.43							
8	526.29	175.43	175.43							
9	350.86	350.86	175.43							
10	175.43	526.29	175.43							
11	0	701.72	175.43							
12	526.29	0	350.86							
13	350.86	175.43	350.86							
14	175.43	350.86	350.86							
15	0	526.29	350.86							
16	350.86	0	526.29							
17	175.43	175.43	526.29							
18	0	350.86	526.29							
19	175.43	0	701.72							
20	0	175.43	701.72							
21	0	0	877.15							

Les réponses choisies sont :

- ❖ L'étalement au cône d'Abrams ;
- ❖ Le temps d'écoulement T₅₀ ;
- ❖ Le rapport H₂/H₁ de l'essai L-box ;
- ❖ Le temps d'écoulement T₂₀ et T₄₀ de l'essai L-box ;
- ❖ Le temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel) ;
- ❖ L'essai de stabilité au tamis ;
- ❖ L'essai de ségrégation au cylindre ;
- ❖ L'essai de K-slump modifié ;
- ❖ Les résistances à la compression et à la traction ;
- ❖ Les paramètres rhéologiques du mortier autoplacant (MAP) ;
- ❖ Les résistances à la compression et à la traction.

2.3.2 Procédures des essais

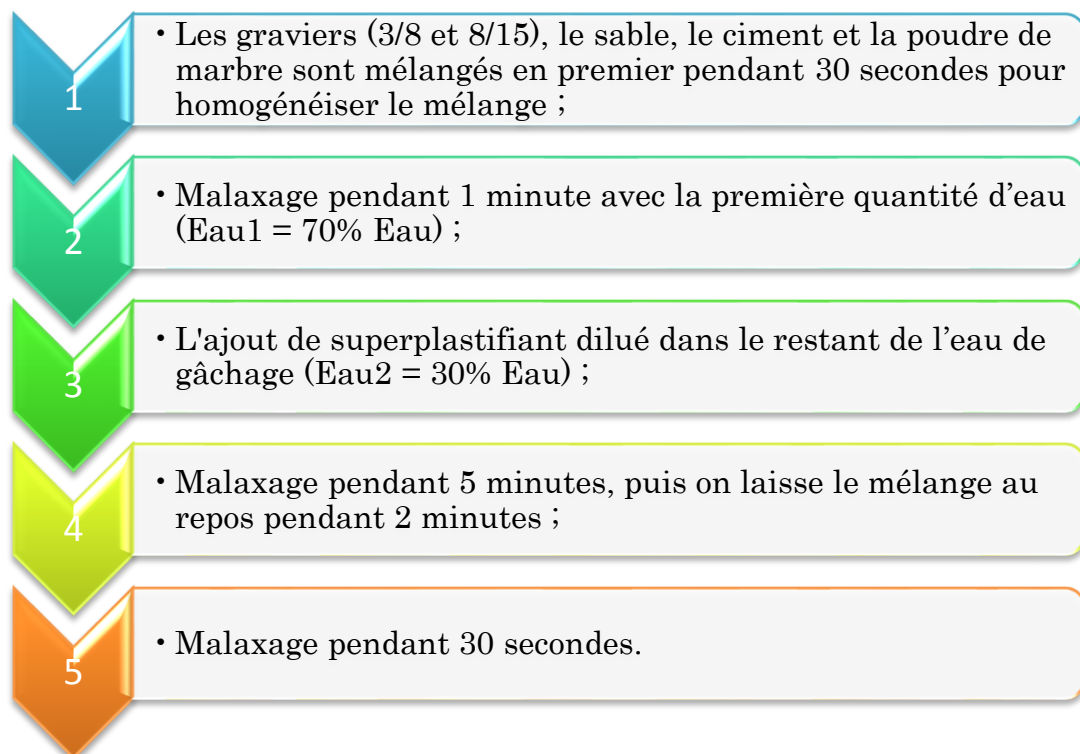
Le mode de malaxage doit être adapté de façon à ce que les constituants du mortier et du béton frais soient correctement dispersés, sans présence d'agglomérats d'éléments fins (AFGC, 2008). La procédure de malaxage et le mode d'introduction de l'adjuvant utilisés pour tous les mélanges sont ceux proposés par Domone et Jin (1999) et adoptés par plusieurs chercheurs (Boukendakdji, 2010) (Benabed, 2014) (Belaidi, 2013).

La quantité d'eau à ajouter est calculée selon les rapports E/C donnés en prenant en compte la teneur en eau et l'absorption des granulats ainsi que l'eau contenue dans l'adjuvant

$$E_{eff} = E_{totale} - E_{teneur\ en\ eau} - E_{superplastifiant} + E_{absorbée\ par\ granulats} \quad (2.1)$$

2.3.2.1 Confection des BAP

Les BAP ont été confectionnés dans un malaxeur d'une capacité de 160 litres. La procédure de malaxage est la suivante :

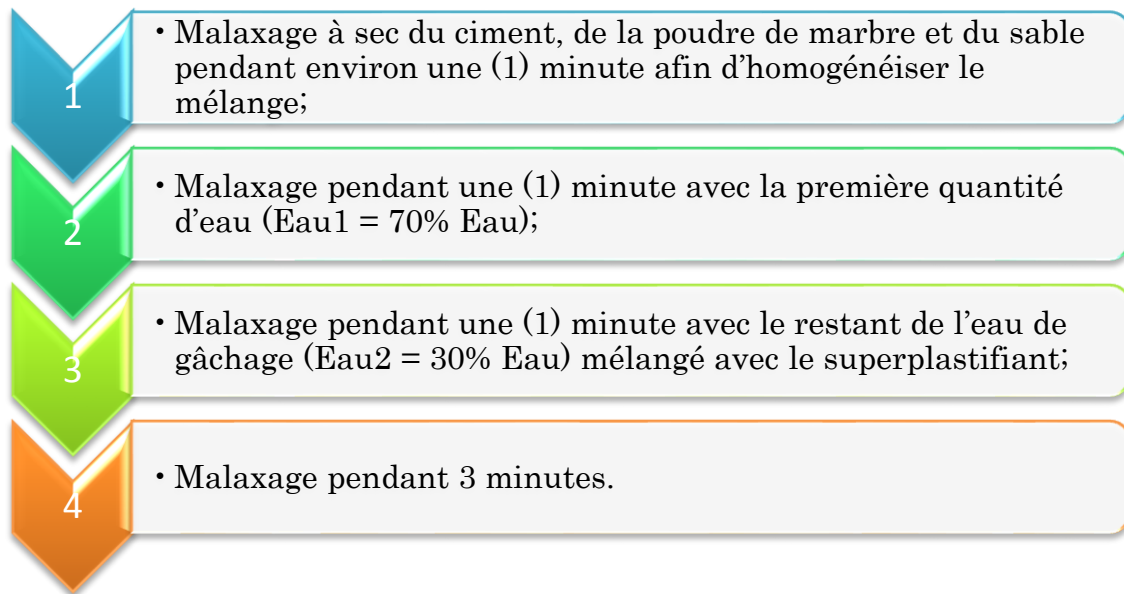


2.3.2.2 Confection des MAP

Les MAP utilisés pour cette étude ont les mêmes compositions des BAP donnés dans le tableau 2.10 en vue de simplifier l'étude rhéologique, car l'étude de l'influence des sables n'impose pas l'utilisation des granulats 3/8 et 8/15.

De plus, le caractère hétérogène du BAP ne fournit donc pas d'informations précises sur le comportement rhéologique.

Les MAP sont préparés dans un malaxeur à mortier d'une capacité de 5 L, le cycle de fabrication est le suivant :



2.3.2.3 Essais sur BAP à l'état frais

a) Essai d'étalement (Slump Flow test)

L'essai d'étalement consiste à mesurer le diamètre moyen final de la galette du BAP après le soulèvement vertical du cône d'Abrams, ainsi que le temps au passage à un diamètre de 50 cm (cf. Figure 2.11). La norme (*NF EN 12350-8*, 2010) décrit cet essai. Les valeurs cibles d'étalement sont généralement comprises entre 60 cm et 75 cm. La fourchette d'étalement peut être définie sur la base des valeurs cibles (avec une tolérance de plus ou moins 5 cm) ou bien par désignation d'une classe d'étalement selon le tableau suivant :

Tableau 2. 11 Classes des BAP selon l'étalement

Classe	Étalement (cm)
SF1	55 à 65
SF2	66 à 75
SF3	76 à 85

En parallèle on mesure la valeur du temps d'écoulement T_{50} , qui correspond au temps mesuré, à partir du commencement de l'étalement de la galette jusqu'à atteindre un diamètre de 50 cm. Ce temps d'écoulement T_{50} peut donner des informations concernant l'uniformité et la résistance à la ségrégation du mélange (Belaidi, 2013)(The European Project Group, 2005).



Figure 2. 11 Essai d'étalement

b) Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

L'essai de l'entonnoir en V permet d'évaluer la capacité du béton à passer à travers les zones confinées en mesurant le temps d'écoulement entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et le temps que met le BAP pour s'écouler complètement (cf. Figure 2.12). Cette procédure est décrite dans la norme (*NF EN 12350-9*, 2010).



Figure 2. 12 Essai à l'entonnoir en V

c) Essais de la boîte en L (L-Box test)

L'essai de la boîte en L consiste à investiguer la capacité au remplissage et la capacité de passage du BAP. Cet essai consiste à mesurer l'écoulement du béton dans une boîte en en forme de L.

On place le béton dans la partie verticale de la boîte. On peut éventuellement laisser le béton au repos pendant une (1) minute pour voir s'il y a de la ségrégation. Après avoir soulevé la trappe on mesure le temps d'écoulement du béton T_{20} pour arriver à la distance 20 cm et le temps d'écoulement du béton T_{40} pour arriver à la distance 40 cm dans la partie horizontale (cf. Figure 2.13).

Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure la différence de hauteur dans la partie verticale H_1 (côté intérieur de la partie verticale de la boîte) et la hauteur du béton dans l'extrémité de la partie horizontale H_2 . On peut alors calculer le rapport H_2/H_1 (Boukendakdji, 2010). La norme qui définit cet essai porte la référence (*NF EN 12350-10*, 2010).



Figure 2. 13 L'essai de la boîte en L

d) Essai de stabilité au tamis (Sieve test)

L'essai de la stabilité au vise à qualifier les BAP vis-à-vis du risque de ségrégation (cf. Figure 2.14). Il consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (P_i) d'un échantillon de BAP ($4,8 \pm 0,2$ kg) passant à travers un tamis de 5 mm avec une hauteur de chute de 50 cm. Le pourcentage P de laitance traversant le tamis par rapport à la masse de l'échantillon est donné par la relation suivante :

$$Pi = \frac{P_{laitance} \times 100}{P_{\text{échantillon}}} \quad (2. 2)$$

Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont divisés en trois classes récapitulées dans le tableau 2.12 :

Tableau 2. 12 Critères de stabilité au tamis

Conditions	Critères de stabilité	Remarques
$Pi < 15\%$	Satisfaisante	Béton homogène et stable
$15\% < Pi < 30\%$	Critique	Il est nécessaire de procéder à des essais spécifiques de ségrégation.
$Pi > 30\%$	Très mauvaise	Béton inutilisable



Figure 2. 14 Essai de stabilité au tamis

e) Essai de ségrégation au cylindre (Penetration Test)

L'essai consiste à placer un cylindre (en aluminium ou en plastique) sur la surface de l'échantillon de béton à tester et à le laisser pénétrer dans le matériau (cf. Figure 2.15). Au bout de 45 s on mesure la hauteur de pénétration (P_d) (Bethmont, 2005) .

Le critère de stabilité associé à cet essai est décrit dans le tableau suivant :

Tableau 2. 13 Critères de stabilité au cylindre

Pénétration (mm)	Critères de stabilité
$Pd \leq 10$	Bonne résistance
$10 < Pd < 25$	Résistance modérée
$Pd \geq 25$	Non résistant



Figure 2. 15 Essai de ségrégation au cylindre

f) Essai de ségrégation à la colonne

Pour notre étude, nous avons choisi un essai analogue à celui recommandé par la norme ASTM C1610 (2017) sauf que la différence réside dans l'opération de séparation des différentes couches du béton, qui se fait juste après le temps de fin de prise.

La procédure proposée par Bensebti et al (2015) permet de mesurer un Indice de Ségrégation Statique « ISS » caractérisant le risque de ségrégation. Ceci offre une grande facilité à l'opérateur étant donné que le béton ne risque pas de s'écouler et les erreurs dues aux pertes de matériaux lors des opérations de séparation, de pesage sont donc relativement très minimales.

Le béton est introduit dans un tube PVC de dimension 110 x 400 mm en une seule opération d'une hauteur de 20 cm. Une fois le tube rempli il est arasé à l'aide d'une règle métallique.

Juste après le temps de fin de prise, le moule est séparé en trois parties plus ou moins égales (partie supérieure, partie du milieu et partie inférieure) (cf. Figure 2.16). Pour chaque partie, après pesage puis lavage et séchage, on détermine le rapport de la masse granulats secs (>5mm) sur la masse totale de la partie considérée, les teneurs en granulats de chaque partie (G_{sup} supérieure, G_{milieu} milieu et G_{inf} inférieure) sont calculées : (Bensebti *et al.*, 2015).

L'indice de ségrégation statique « ISS » est défini comme suit :

$$ISS = (G_{inf} - G_{sup}) \times 100 \quad (2.3)$$

Avec :

G_{inf} : Teneur en gros granulats dans la partie inférieure,

G_{sup} : Teneur en gros granulats dans la partie supérieure.



Figure 2. 16 Essai de ségrégation à la colonne

g) Essais au rhéomètre

Afin d'étudier le comportement rhéologique des BAP et des MAP, on a utilisé un agitateur mécanique de marque Heidolph- RZR 2102 Control Z (voir annexe D). Piloté par un logiciel Hei-Control V2.01 (voir annexe E) illustré dans la figure 2.17. Nous avons utilisé deux récipients cylindriques avec deux différentes palettes, un récipient pour béton de dimensions 25x30 cm et un récipient pour mortier de 12x15 cm, un croisillon composé de deux plaques perpendiculaires (vane à 4 faces) de dimensions 10x12.5 cm pour béton et un autre croisillon de 5x10 cm pour mortier. Les récipients contiennent des baguettes sur la face intérieure afin de réduire le risque de glissement du matériau étudié (figure 2.18).

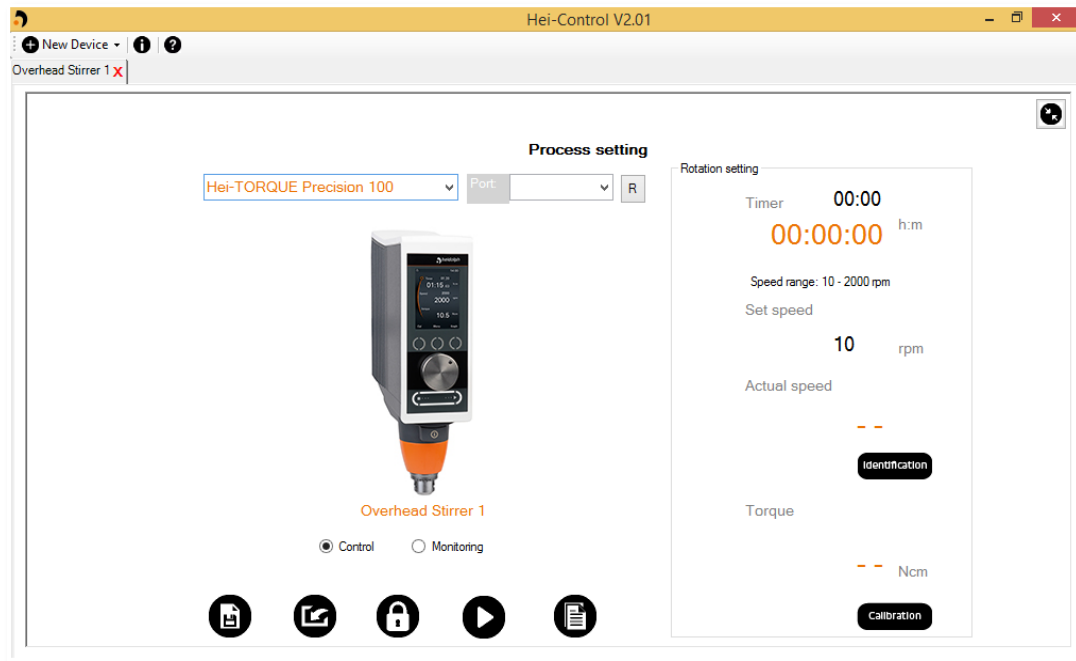


Figure 2. 17 Logiciel d'acquisition Hei-Control V2.01

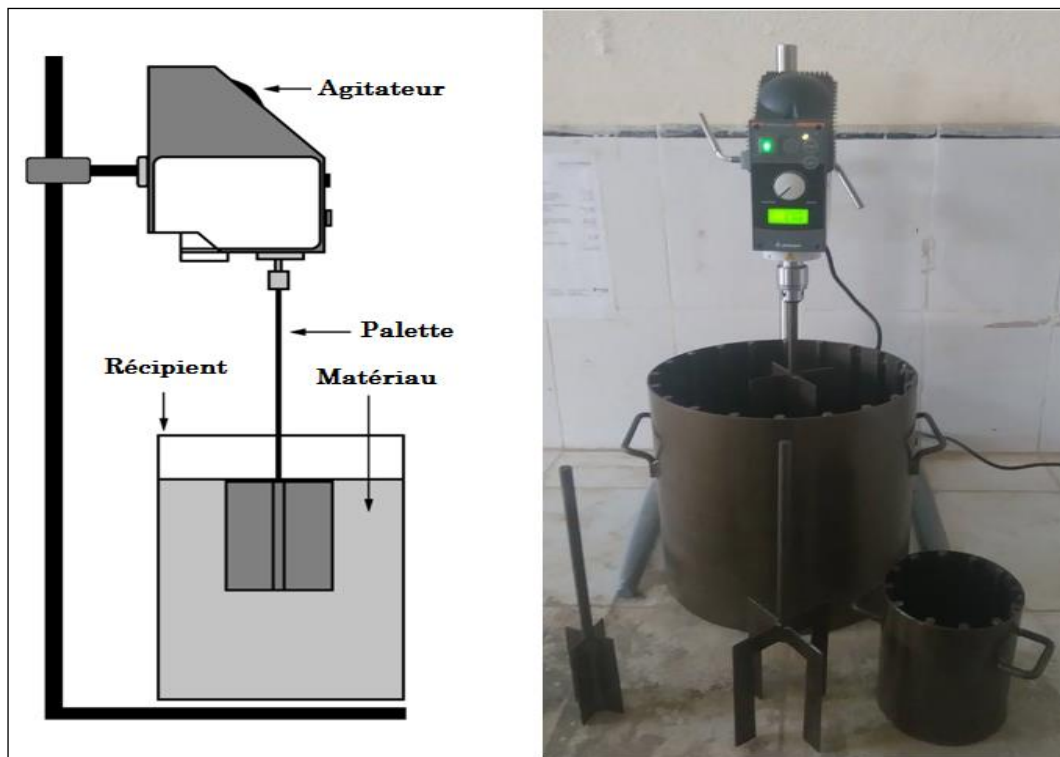
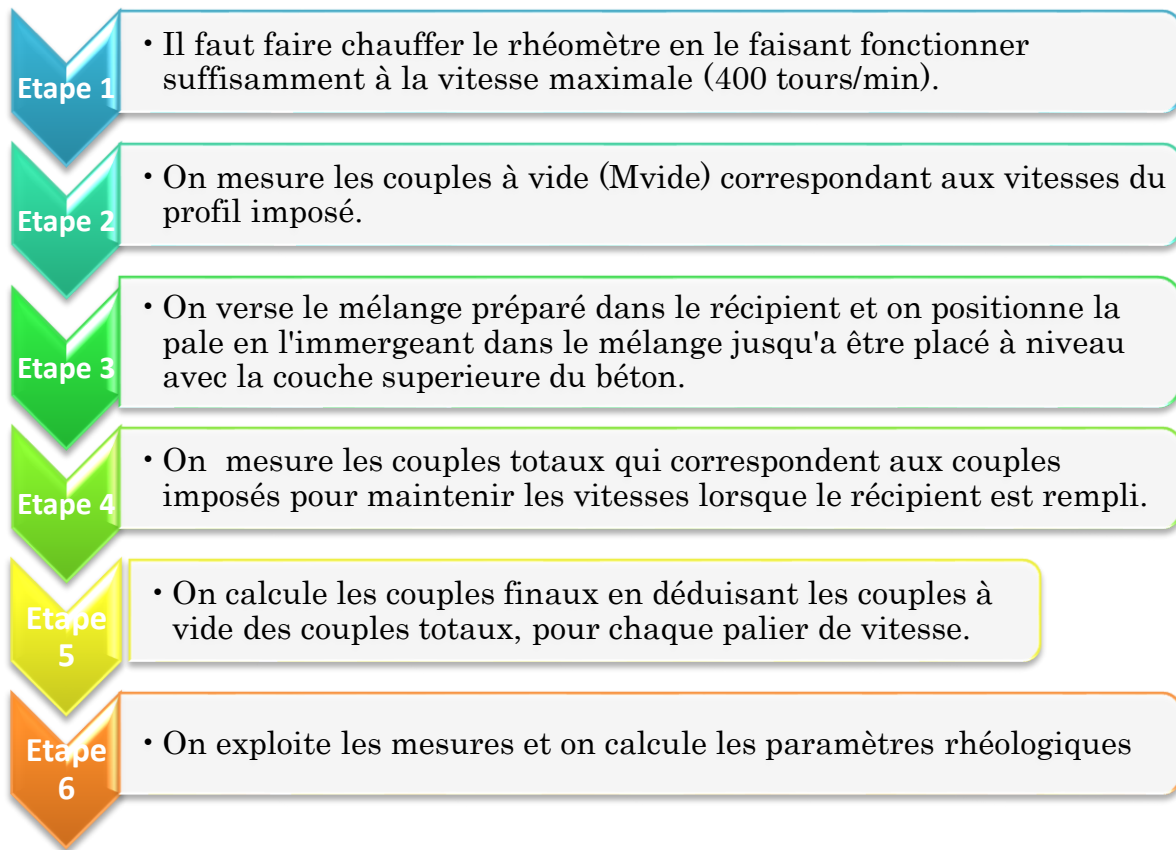


Figure 2. 18 Schéma et Dispositif du rhéomètre utilisé

Afin de s'assurer de la bonne fiabilité des essais rhéologiques, il est nécessaire de garantir les mêmes conditions par rapport au malaxage des mélanges cimentaires et la procédure liée aux essais rhéologiques. Pour étudier le comportement rhéologique des différents bétons et mortiers, il convient de prendre les étapes suivantes (Taleb, 2017):



Le profil de vitesse utilisé est choisi sur la base d'une série d'essais afin de s'affranchir du comportement et des propriétés dépendantes du temps telles que la thixotropie et de trouver le profil de vitesse permettant d'avoir les mesures les plus stables en minimisant le phénomène de ségrégation. Le profil utilisé doit avoir aussi un nombre suffisant de points pour pouvoir bien caractériser le comportement rhéologique des mélanges testés (Adjoudj, 2015) (Taleb, 2017). Le couple retenu pour l'analyse rhéologique (M) correspond à la moyenne des couples mesurés dans la seconde moitié de chaque palier de vitesse. Les figures 2.19 et 2.20 illustrent les profils de vitesse choisis pour les bétons et les mortiers respectivement.

Le profil de vitesse choisi pour le BAP est composé d'une deuxième phase de précisaillement pour évaluer le risque de ségrégation lors des mesures rhéologiques (Van Der Vurst *et al.*, 2017). le phénomène de ségrégation s'est produit si le couple maximal mesuré après la première phase de précisaillement (M_1) est bien supérieur à celui calculé après la deuxième phase de précisaillement (M_2). On désigne par le (TVR) le taux de variation entre M_1 et M_2 , cette relation est exprimée comme suit :

$$TVR (\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \quad (2. 4)$$

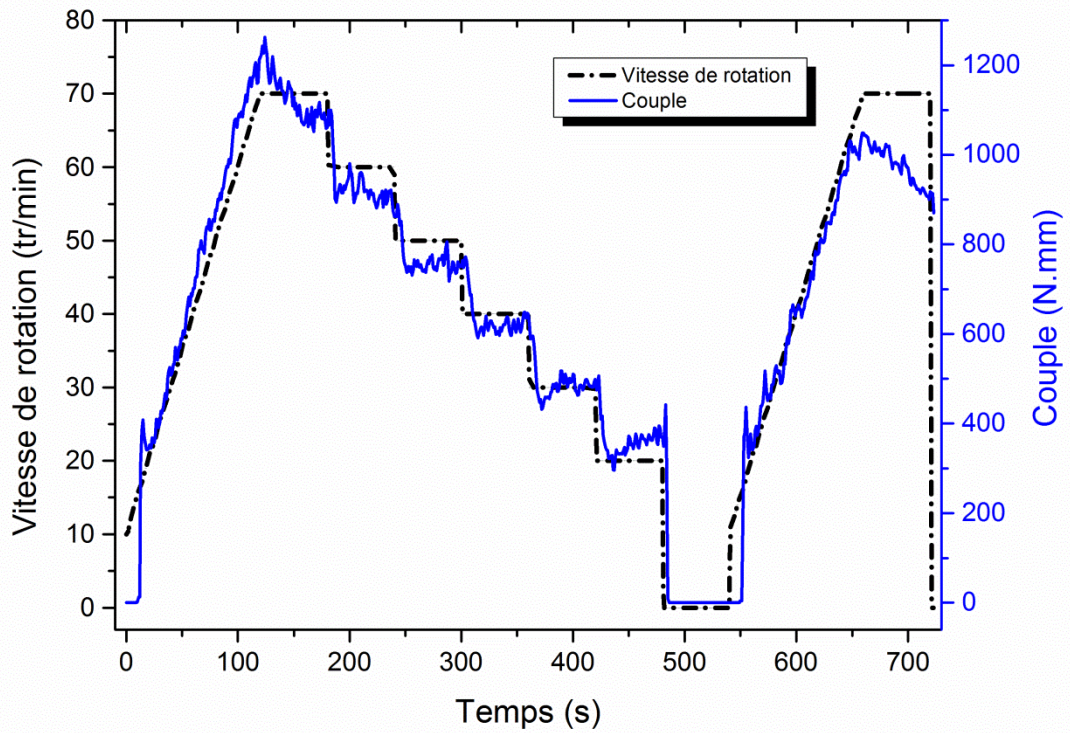


Figure 2. 19 Exemple d'un Profil de vitesse pour BAP

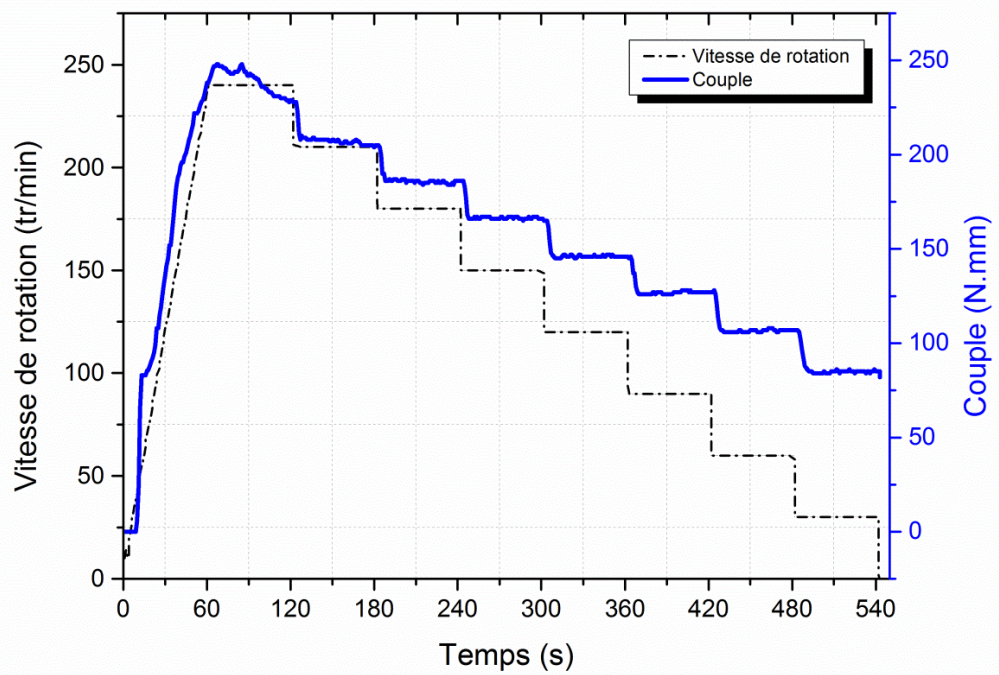


Figure 2. 20 Exemple d'un Profil de vitesse pour MAP

Les résultats bruts obtenus à l'aide du logiciel (Hei-Control) donnent les relations entre les couples de malaxage (T) et les vitesses de rotation (N) et la relation $T(N)$ dépend du modèle rhéologique que nous avons choisi. L'exploitation des mesures rhéométriques consiste à déterminer l'évolution de la contrainte de cisaillement (τ) en fonction du taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$) à partir de la paire (T - N) mesurée (Taleb, 2017) (Aissoun, 2015). Le seuil de cisaillement (τ_0) et la viscosité plastique (μ) peuvent ainsi être calculés à partir de la régression des points mesurés en utilisant l'équation de Reiner-Riwlin (Feys et al., 2013).

Nous avons utilisé un outil d'acquisition numérique (logiciel *RheoGraph*) développé dans le cadre d'un projet de fin d'études (voir annexe F) pour la transformation des résultats issus du logiciel (Hei-Control) selon trois modèles rhéologiques (Bingham, Bingham modifié et Herschel-Bulkley) comme le montre les figures 2.21 et 2.22

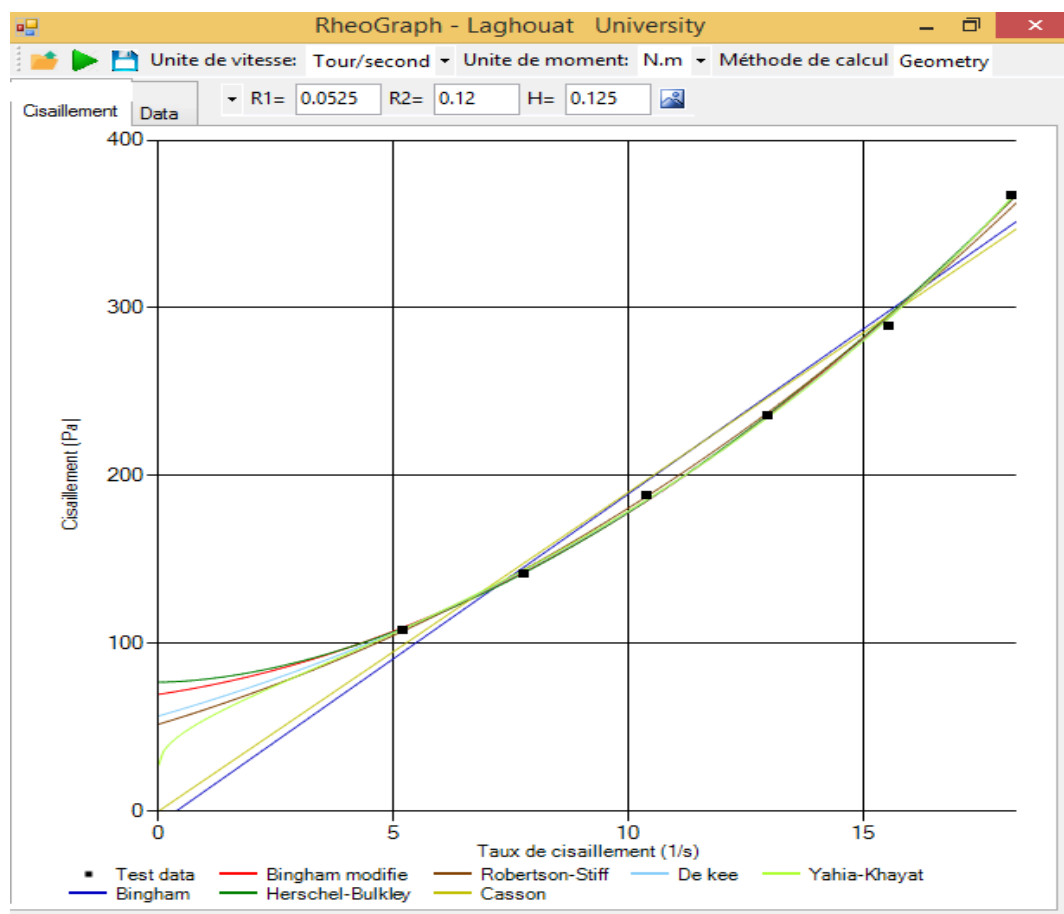


Figure 2. 21 Exemple d'une présentation graphique « RheoGraph »

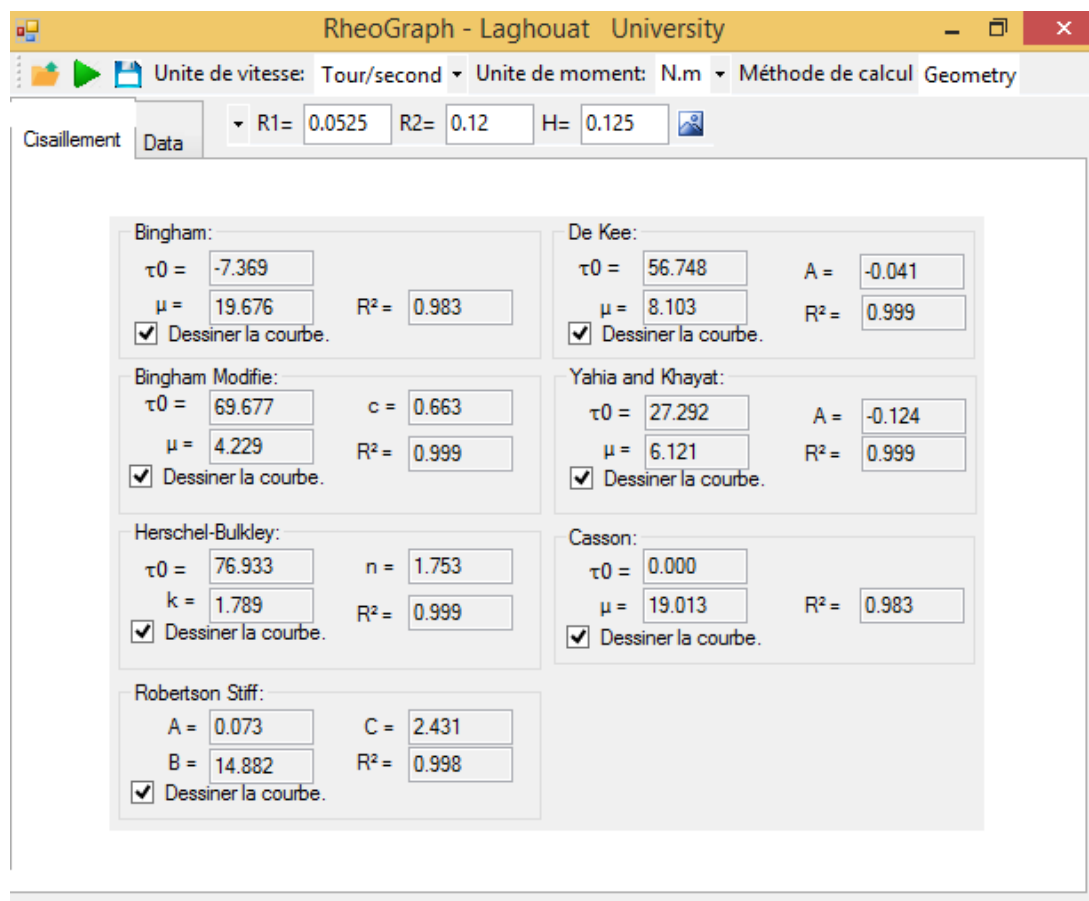


Figure 2. 22 Exemple d'une présentation numérique « RheoGraph »

h) Essai de K-slump modifié (Essai proposé)

Contrairement à la fluidité, un nombre limité de méthodes d'essai traitent l'évaluation de la stabilité statique à l'état frais de BAP. Les essais d'évaluation de la stabilité statique les plus utilisés sont l'essai au tamis (*NF EN 12350-11*, 2010), l'essai au cylindre (*ASTM C1712-17*, 2017) et l'essai à la colonne (*ASTM C1610*, 2017). Le principe de ces essais consiste à évaluer la cohésion et l'homogénéité du mélange : granulats – pâte, pour vérifier l'aptitude des granulats à rester stables et suspendus dans la pâte.

Malgré la simplicité de ces essais, ils ont montré des inconvénients, notamment en ce qui concerne leur applicabilité aux chantiers et leur rapidité d'exécution. Dans le cas de l'essai au tamis, il est impératif d'utiliser une balance, de réserver au moins 15 litres du BAP et d'attendre plus de 15 min pour avoir une idée sur la stabilité du BAP. De plus, dans le cas de l'essai à la colonne, où il est aussi nécessaire d'utiliser une balance, de réaliser l'essai sur une quantité d'environ 15 litres du BAP et il faut attendre jusqu'au début de prise pour faire les mesures. Quant à l'essai au cylindre et malgré la rapidité de son exécution, il manque de précision, car l'estimation de la ségrégabilité des granulats se fait juste au niveau de la couche supérieure du BAP testé.

À cet effet, nous proposons un nouveau test pour évaluer la ségrégation statique des BAP. Cet essai est inspiré d'un appareil développé par K. W. Nasser (1976) et validé par (ASTM C1362 - 09, 2014).

Cet appareil permet d'évaluer rapidement la stabilité d'un BAP à travers la hauteur du mortier passé à l'intérieur de l'anneau d'armature. L'appareil se compose d'un anneau d'armature (50 mm de diamètre), les diamètres d'armatures et leur espacement sont de 5 mm, un cône d'acier plein et une tige d'acier (2mm de diamètre) pour mesurer la hauteur du mortier.

Le principe de cet essai est de remplir partiellement un moule cylindrique 16x32 (au niveau de 28 cm), on égalise la surface supérieure du béton et on insère l'appareil lentement en position verticale, après 1 minute on mesure le niveau $k_{\max}$ et $k_{\min}$ (Nasser et Biswas, 1996) à l'aide d'une tige d'acier comme le montrent les figures 2.22 et 2.23 . La valeur de K_m est calculée comme suit :

$$k_m = k_{\max} - k_{\min} \quad (2. 5)$$



Figure 2. 23 Essai de K-slump modifié

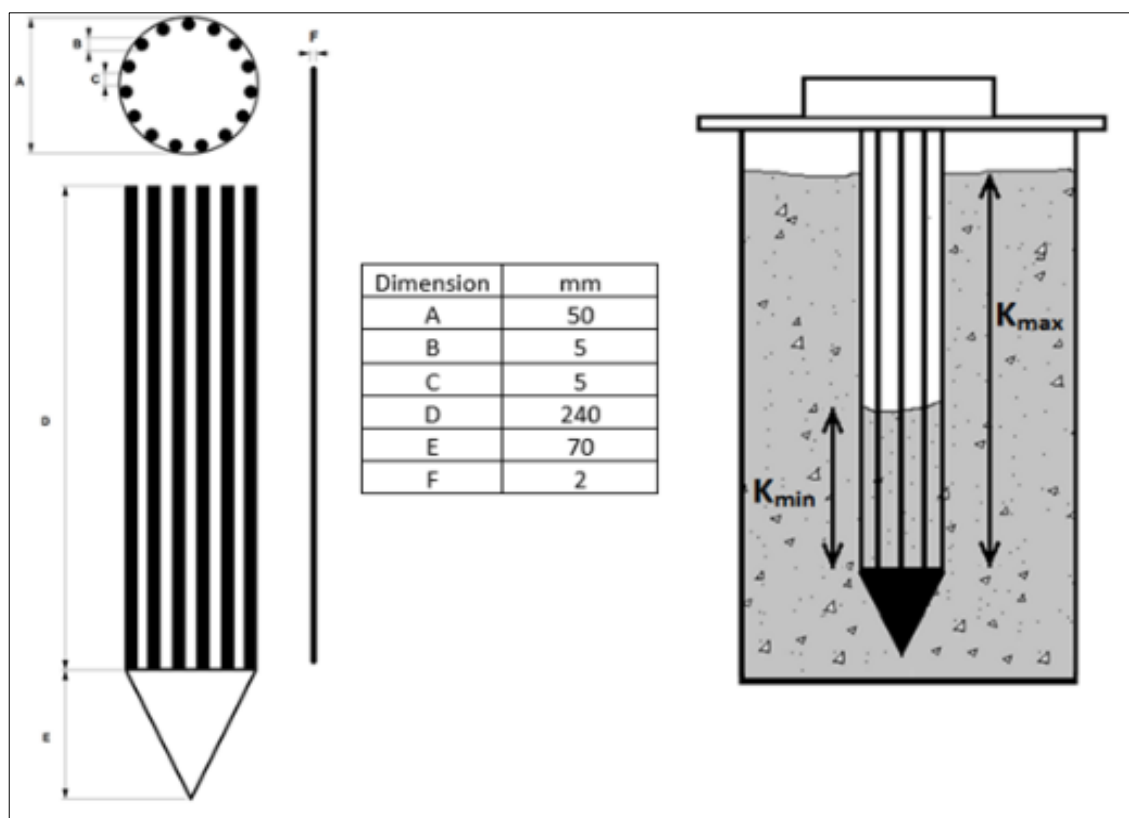


Figure 2. 24 Description de l'appareil

2.3.2.4 Essais sur BAP à l'état durci

Les essais de résistance à la compression et à la traction de tous les mélanges du BAP ont été effectués sur des éprouvettes prismatiques ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$) à l'âge de 7, 14 et 28 jours. Les éprouvettes sont conservées dans un bac d'eau ($20 \pm 2^\circ \text{C}$) jusqu'à l'échéance considérée. Les résultats d'essai doivent être obtenus à partir d'une moyenne des résultats individuels de trois éprouvettes.

a) Résistance à la compression

Les essais de compression simple ont été réalisés au laboratoire sur des demi-prismes (obtenus après la rupture en flexion) au moyen d'une presse hydraulique d'une capacité de 2000 kN et la vitesse de chargement ($2,5 \text{ kN/s}$). La norme (NF EN 12390-3, 2012) décrit cet essai.

b) Résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction par flexion a été effectuée selon la méthode décrite dans la norme (NF EN 12390-5, 2012). La résistance en flexion est donnée par l'équation suivante :

$$\sigma_t = \frac{3 \cdot F_f \cdot l}{2 \cdot a^3} \quad (2.6)$$

Où :

σ_t est la résistance en flexion, en MPa (N/mm²) ;

F_f est la charge maximale, en newtons ;

l est l'écartement entre les rouleaux d'appui, en millimètres ;

a est la dimension latérale de l'éprouvette, en millimètres ;

La comparaison entre la résistance obtenue en traction par flexion et celle mesurée en traction directe montre que cette dernière est en général inférieure de 40% par rapport aux premières ; ceci peut s'expliquer par la plastification du béton dans la phase de prérupture. On affecte donc d'un coefficient 0.6 la valeur trouvée en traction par flexion et le calcul dans ce cas se fait par la formule suivante (George et Jean, 1998):

$$\sigma_t = 0.9 \frac{F_f \cdot l}{a^3} \quad (2.7)$$

2.4 Conclusion

Ce travail présente une contribution à l'étude de l'influence de la combinaison de trois types de sable afin d'observer son influence sur l'évolution des propriétés rhéologiques et mécaniques des BAP.

Le présent chapitre a successivement traité les points suivants :

- Les caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisés
- Les techniques expérimentales utilisées, y compris le choix et la préparation des plans d'expériences sélectionnés
- Les modes de malaxages et les procédures des essais, notamment les profils de vitesse choisie pour les mesures rhéologiques et le mode d'emploi de nouveau test proposé.

Chapitre 3 : Résultats et Interprétations

CHAPITRE 3 : Résultats et Interprétations

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons exposer et analyser les résultats des différents essais à l'état frais et à l'état durci effectués sur les mélanges étudiés.

Dans un premier temps, nous nous intéressons à étudier l'effet des paramètres de formulation sur le comportement rhéologique et mécanique des BAP. Parallèlement à ce travail, nous proposons un nouveau test simple et rapide qui permet de contrôler l'ouvrabilité et la stabilité statique des BAP. La validation de ce nouveau test a été effectuée sur la base de plusieurs essais où on a comparé et corrélé les résultats du nouveau test avec les autres essais, la validité des résultats de cet essai est démontrée également par une étude statistique (analyse de la variance).

La seconde étape concernera l'étude de l'influence de types de sable sur le comportement rhéologique et mécanique des BAP. La formulation adoptée pour cette partie a été choisie à partir des résultats et des expériences de la première phase d'étude.

Une modélisation statistique basée sur l'utilisation de la méthode des plans d'expériences a été choisie. L'application de cette méthode s'est avérée très utile dans l'étude de l'influence des paramètres de composition (plan composite) et la valorisation des différents types de sable (plan mélange).

3.2 Influence des paramètres de composition

Cette partie d'étude consiste à étudier l'effet des paramètres de formulation (tel que : le rapport gravier/sable (G/S), le rapport gravier (3/8)/gravier (8/15) (G1/G2), le rapport de poudre de marbre/ciment (MP/C), le rapport eau/ciment (E/C) et le dosage du superplastifiant (SP) en utilisant les modèles issus du plan d'expérience (plan pour surfaces de réponse) pour formuler 31 compositions des BAP.

Les essais empiriques, rhéologiques et celles de la stabilité statique choisis pour notre étude sont :

- ❖ Étalement au cône d'Abrams ;
- ❖ Le temps d'écoulement T50 ;
- ❖ Le rapport H2/H1 de l'essai à la boîte en L ;
- ❖ Le temps d'écoulement à travers l'entonnoir V-funnel ;
- ❖ Les Temps d'Ecoulement T20 et T40 de la boîte en L ;
- ❖ L'essai de stabilité au tamis Pi ;
- ❖ L'essai de stabilité au cylindre Pd ;
- ❖ L'indice de Ségrégation Statique ISS ;
- ❖ La stabilité mesurée à l'aide du test proposé km ;
- ❖ Le seuil de cisaillement (τ_B) et la viscosité plastique (μ_B) du modèle de Bingham ;
- ❖ Le seuil de cisaillement (τ_{BM}) et la viscosité plastique (μ_{BM}) du modèle de Bingham modifié ;
- ❖ Le seuil de cisaillement (τ_{HB}) et le facteur de consistance (k) du modèle d'Herschel Bulkley ;
- ❖ L'indice de fluidité (n) ;
- ❖ La viscosité différentielle (c/ μ_{BM}) ;
- ❖ Le taux de variation (TVR) ;

Les résultats des essais sont rassemblés dans les tableaux 3.1 et 3.2 et les coefficients issus de la modélisation (en valeurs codées), les coefficients de corrélation (R^2) et les probabilités p-value des réponses sont regroupés dans les tableaux 3.3 et 3.4.

Tableau 3. 1 Résultats des essais empiriques et de la stabilité statiques

N°	G ₁ /G ₂ (%)	G/S	PM/C (%)	E/C (%)	Sp (%)	Étalement (cm)	T50 (s)	L-Box (%)	V-funnel (s)	T20 (s)	T40 (s)	Pi (%)	Pd (mm)	SSI	Km (cm)
1	0	1	12.5	37.5	0.9	83	1.21	85	6.39	0.72	1.45	56.81	50	16.4	0
2	18.89	0.8	4.72	36	0.84	66	2.09	58	7.54	1.46	2.95	8.22	3	0.7	12.5
3	18.89	0.8	4.72	39	0.96	75	1.72	74	5.63	1.42	2.27	40.21	40	14.9	1
4	18.89	0.8	20.28	36	0.96	85	1.2	90	6.52	1.34	2.68	60.82	50	15.5	0
5	18.89	0.8	20.28	39	0.84	73	1.58	77	5.4	1.07	1.81	20.88	4	7.6	8
6	18.89	1.2	4.72	36	0.96	51	1.32	0	8.74	1.57	3.06	0	0	0.4	13
7	18.89	1.2	4.72	39	0.84	72	1.73	68	7.74	1.83	3.32	22.82	16	10.6	6
8	18.89	1.2	20.28	36	0.84	73	3.28	75	12.27	2.86	5.95	4.31	3	6.4	5
9	18.89	1.2	20.28	39	0.96	86	1.17	96	6.96	1.46	2.73	37.54	37	7.1	0
10	50	0.68	12.5	37.5	0.9	75	1.55	81	6.81	1.82	3.3	20.65	30	10	4
11	50	1	0	37.5	0.9	72	1.48	67	8.06	1.58	3.42	14.65	19	5.6	8
12	50	1	12.5	35	0.9	75	3.77	81	12.16	2.47	5.66	12.17	17	9.6	4.5
13	50	1	12.5	37.5	0.8	78	2.34	83	10.35	2.03	4.87	12.63	21	3.1	4
14	50	1	12.5	37.5	0.9	77	2.46	86	7.56	1.71	3.65	9.03	25	3.4	5
15	50	1	12.5	37.5	0.9	77	2.54	80	8.65	2.02	4.09	14.99	24	2.6	4
16	50	1	12.5	37.5	0.9	82	1.37	87	7.52	1.63	3.7	11.72	40	10.3	0
17	50	1	12.5	37.5	0.9	81	1.61	93	7.9	2.25	4.13	16.87	29	7.4	3
18	50	1	12.5	37.5	0.9	79	1.57	89	7.47	2.27	4.36	23.61	25	5.4	1
19	50	1	12.5	37.5	1	78.5	1.26	90	7.52	1.63	3.15	15.13	33	3.2	3.5
20	50	1	12.5	40	0.9	77	2.17	86	6.75	1.81	2.76	8.21	24	0.3	5
21	50	1	25	37.5	0.9	78	1.23	95	5.64	0.73	1.31	19.72	35	9.3	2.5
22	50	1.32	12.5	37.5	0.9	74	0.91	86	4.87	0.87	1.77	14.26	16	2.8	6
23	81.11	0.8	4.72	36	0.96	74.5	1.52	81	5.89	0.96	1.83	7.04	4	9.1	7.5
24	81.11	0.8	4.72	39	0.84	77	0.96	86	5.72	0.97	2.22	10.72	6	3.3	5
25	81.11	0.8	20.28	36	0.84	71	3.21	83	9.6	2.46	4.69	10.14	13	6.8	7
26	81.11	0.8	20.28	39	0.96	79	1.46	81	7.08	1.51	3.17	12.89	34	6.8	0
27	81.11	1.2	4.72	36	0.84	73.5	1.16	68	6.33	1.01	2.21	28.95	19	0.2	4
28	81.11	1.2	4.72	39	0.96	78	1.01	76	5.34	1.23	2.15	16.91	27	7.8	2
29	81.11	1.2	20.28	36	0.96	76	1.31	98	7.78	1.64	2.72	16.96	16	7.6	6
30	81.11	1.2	20.28	39	0.84	73	1.62	95	7.31	1.39	2.35	15.33	14	2.4	7
31	100	1	12.5	37.5	0.9	76	1.29	90	6.04	1.04	1.96	7.68	6	10	8

Tableau 3. 2 Résultats des essais rhéologiques

N°	G ₁ /G ₂ (%)	G/S	PM/C (%)	E/C (%)	Sp (%)	τ_B (Pa)	μ_B (Pa.s)	τ_{MB} (Pa)	μ_{MB} (Pa.S)	τ_{HB} (Pa)	K _{HB} (Pa.S)	n	c/ μ_{MB} (S 10 ⁻²)	TVR (%)
1	0	1	12.5	37.5	0.9	6.30	24.92	56.52	14.85	73.92	7.43	1.37	2.91	13.193
2	18.89	0.8	4.72	36	0.84	43.99	31.80	94.35	21.71	113.87	12.62	1.281	1.99	7.44
3	18.89	0.8	4.72	39	0.96	-5.58	31.14	71.75	15.64	92.12	7.08	1.456	4.25	11.911
4	18.89	0.8	20.28	36	0.96	10.00	21.58	48.81	13.80	61.64	7.68	1.315	2.42	13.217
5	18.89	0.8	20.28	39	0.84	8.46	33.68	83.21	18.69	106.14	8.94	1.407	3.44	6.485
6	18.89	1.2	4.72	36	0.96	62.27	33.70	109.2	24.29	129.15	14.93	1.247	1.66	5.985
7	18.89	1.2	4.72	39	0.84	21.03	28.11	73.10	17.67	92.52	9.26	1.339	2.54	6.847
8	18.89	1.2	20.28	36	0.84	20.98	34.68	69.48	24.95	91.01	15.12	1.251	1.67	7.063
9	18.89	1.2	20.28	39	0.96	-8.66	26.87	50.26	15.05	68.58	7.25	1.402	3.37	11.015
10	50	0.68	12.5	37.5	0.9	5.00	30.37	73.34	16.67	91.97	8.20	1.402	3.53	9.368
11	50	1	0	37.5	0.9	43.63	26.89	89.00	17.80	108.88	9.51	1.316	2.19	6.346
12	50	1	12.5	35	0.9	13.44	31.03	59.23	21.85	79.42	12.83	1.268	1.80	6.636
13	50	1	12.5	37.5	0.8	-9.43	32.25	56.19	19.09	77.87	9.63	1.37	2.95	7.875
14	50	1	12.5	37.5	0.9	-1.12	33.72	72.21	19.02	95.13	9.21	1.398	3.32	8.254
15	50	1	12.5	37.5	0.9	14.71	29.08	67.64	18.47	84.56	10.28	1.317	2.46	8.867
16	50	1	12.5	37.5	0.9	-9.70	30.26	55.78	17.13	76.41	8.31	1.396	3.29	8.37
17	50	1	12.5	37.5	0.9	8.69	28.72	51.49	20.14	69.69	11.87	1.268	1.83	7.106
18	50	1	12.5	37.5	0.9	24.04	27.42	73.83	17.44	90.97	9.52	1.323	2.45	8.404
19	50	1	12.5	37.5	1	25.40	24.92	62.06	17.57	78.88	10.21	1.27	1.79	9.56
20	50	1	12.5	40	0.9	15.12	28.84	57.49	20.35	75.52	12.10	1.263	1.79	9.357
21	50	1	25	37.5	0.9	15.42	29.47	68.63	18.80	86.80	10.33	1.32	2.44	8.942
22	50	1.32	12.5	37.5	0.9	9.06	31.68	68.69	19.72	89.18	10.47	1.338	2.60	9.291
23	81.11	0.8	4.72	36	0.96	15.49	36.25	67.99	25.72	90.48	15.41	1.259	1.76	8.033
24	81.11	0.8	4.72	39	0.84	17.11	33.16	64.90	23.58	85.21	14.19	1.257	1.74	6.641
25	81.11	0.8	20.28	36	0.84	31.76	30.67	73.13	22.38	91.61	13.83	1.241	1.59	7.503
26	81.11	0.8	20.28	39	0.96	27.25	26.70	71.19	17.89	89.33	9.94	1.3	2.11	10.591
27	81.11	1.2	4.72	36	0.84	28.84	26.89	80.63	16.51	97.34	8.78	1.342	2.70	8.356
28	81.11	1.2	4.72	39	0.96	25.90	28.58	72.41	19.25	90.87	10.91	1.293	2.08	7.184
29	81.11	1.2	20.28	36	0.96	2.11	33.72	67.74	20.56	91.07	10.51	1.356	2.74	9.392
30	81.11	1.2	20.28	39	0.84	-1.75	32.56	70.43	18.08	92.25	8.70	1.405	3.43	6.642
31	100	1	12.5	37.5	0.9	22.97	30.05	60.35	22.55	77.48	14.48	1.22	1.42	6.294

Tableau 3. 3 Coefficients et paramètres des modèles des essais empiriques et de la stabilité statiques

Terme	Étalement (cm)		T ₅₀ (s)		L-Box (%)		V-Funnel (s)		T ₂₀ (s)		T ₄₀ (s)		Pi (%)		Pd (mm)		ISS		Km (cm)	
	R ² =0.91		R ² =0.85		R ² =0.92		R ² =0.74		R ² =0.65		R ² =0.72		R ² =0.87		R ² =0.79		R ² =0.74		R ² =0.73	
	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value
Constante	79.09	<.0001	1.86	<.0001	0.87	<.0001	7.60	<.0001	1.79	<.0001	3.82	<.0001	15.69	<.0001	27.31	<.0001	5.94	<.0001	3.50	<.0001
G1/G2	0.46	0.4714	-0.08	0.3379	0.07	0.0009	-0.30	0.2543	-0.06	0.4918	-0.12	0.4909	-7.31	0.0003	-4.29	0.0368	-1.39	0.0295	0.27	0.5812
G/S	-0.93	0.1597	-0.1	0.2291	-0.02	0.1828	0.28	0.2783	0.01	0.8837	0.02	0.9106	-1.82	0.2607	-2.11	0.2802	-1.6	0.0142	0.25	0.6236
MP/C	2.77	0.0007	0.14	0.1109	0.11	<.0001	0.29	0.2699	0.09	0.3228	0.13	0.4746	2.47	0.1330	3.87	0.0567	0.91	0.1418	-1.27	0.019
W/C	2.24	0.004	-0.31	0.0018	0.05	0.0057	-1.09	0.0006	-0.17	0.0805	-0.53	0.0092	1.66	0.3166	3.95	0.0585	-0.08	0.8947	-1.21	0.0279
Sp	1.24	0.0653	-0.31	0.0014	-0.001	0.9451	-0.59	0.0306	-0.12	0.1908	-0.36	0.0527	3.49	0.0388	6.95	0.0018	1.46	0.0224	-1.20	0.0247
G1/G2*G/S	1	0.1863	-0.19	0.067	0.04	0.0372	-0.76	0.0178	-0.19	0.0788	-0.49	0.026	6.43	0.0026	3.75	0.1024	-	-	-	-
G1/G2*MP/C	-3.56	0.0003	0.16	0.1060	-0.06	0.0063	0.44	0.1510	0.15	0.1645	-	-	-3.79	0.0512	-	-	-	-	1.31	0.0325
G1/G2*W/C	-1.23	0.1215	-	-	-0.05	0.0110	-	-	-	-	-	-	-3.59	0.0720	-	-	-1.34	0.0739	-	-
G1/G2*Sp	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-5.86	0.0051	-4.5	0.0541	-	-	-	-
G/S*MP/C	1.13	0.1405	-	-	0.08	0.0009	-	-	-	-	-	-	-	-	27.31	<.0001	-	-	-	-
G/S*W/C	1.82	0.0297	-	-	0.06	0.0083	-	-	-	-	-	-	2.85	0.1455	-4.29	0.0368	-	-	-	-
G/S*Sp	-1.69	0.0349	-	-	-0.04	0.0625	-	-	-	-	-	-	-4.44	0.0253	-2.11	0.2802	-	-	1.44	0.0206
MP/C*W/C	-2.01	0.0181	-0.16	0.1164	-0.06	0.0055	-	-	-0.22	0.0583	-0.38	0.0846	-3.38	0.0888	3.87	0.0567	-2.51	0.0021	1.30	0.0406
MP/C*Sp	2.88	0.0015	-0.26	0.0135	0.05	0.0110	-	-	-	-	-	-	5.26	0.0101	3.95	0.0585	-1.54	0.0357	-1.06	0.0771
W/C*Sp	1.3	0.1047	0.25	0.0209	-	-	0.37	0.2411	0.17	0.1253	0.40	0.0736	-	-	6.95	0.0018	-	-	-1.36	0.0325
G1/G2*G1/G2	-	-	-0.22	0.0378	-	-	-0.60	0.0655	-0.3	0.0117	-0.65	0.0067	6.22	0.0044	3.75	0.1024	2.42	0.0028	-	-
G/S*G/S	-1.98	0.0212	-0.23	0.0321	-0.03	0.0996	-0.75	0.0250	-	-	-0.33	0.1404	-	-	-	-	-	-	0.76	0.2176
MP/C*MP/C	-1.76	0.035	-0.18	0.0824	-0.04	0.0397	-	-	-0.19	0.0864	-0.4	0.0799	-	-	-	-	-	-	0.85	0.1683
W/C*W/C	-1.37	0.0982	0.44	0.0005	-0.03	0.1215	0.66	0.0481	0.18	0.1119	0.31	0.1689	-2.31	0.2440	-4.5	0.0541	-	-	-	-
Sp*Sp	-	-	-	-	-	-	0.43	0.1579	-	-	-	-	-	-	27.31	<.0001	-1.34	0.0610	-	-

Tableau 3. 4 Coefficients et paramètres des modèles des essais rhéologiques

Terme	τ_B (Pa)		μ_B (Pa.s)		τ_{MB} (Pa)		μ_{MB} (Pa.S)		τ_{HB} (Pa)		k_{HB} (Pa.S)		n		c/ μ_{MB} (S 10 ⁻²)		TVR (%)	
	R ² =0.70		R ² =0.79		R ² =0.85		R ² =0.88		R ² =0.87		R ² =0.78		R ² =0.60		R ² =0.61		R ² =0.72	
	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value
Constante	9.98	0.0019	29.27	<.0001	61.28	<.0001	18.52	<.0001	80.14	<.0001	9.99	<.0001	1.32	<.0001	0.02	<.0001	8.46	<.0001
G1/G2	0.98	0.6871	0.72	0.1134	-1.21	0.4288	1.16	0.0017	-1.00	0.5071	0.98	0.0059	-0.02	0.0253	-0.003	0.0267	-0.79	0.0090
G/S	0.41	0.8657	0.11	0.8097	0.50	0.7410	0.09	0.7798	0.86	0.5698	-0.027	0.9315	0.001	0.9354	-0.0003	0.7995	-0.45	0.1166
MP/C	-7.76	0.0042	-0.24	0.5869	-6.28	0.0007	-0.54	0.1020	-6.41	0.0005	-0.47	0.1552	-	-	-	-	0.65	0.0280
W/C	-6.21	0.0210	-0.59	0.2041	-2.75	0.0926	-1.28	0.0010	-2.68	0.0958	-1.15	0.0022	0.03	0.0118	0.003	0.0127	0.23	0.4139
Sp	-	-	-1.17	0.0139	-1.86	0.2262	-0.64	0.0517	-2.55	0.0958	-0.31	0.3285	-	-	-	-	1.07	0.0008
G1/G2*G/S	-4.7	0.1049	-0.64	0.2164	-	-	-1.71	0.0002	-	-	-1.54	0.0004	0.03	0.0043	0.004	0.0037	0.43	0.1816
G1/G2*MP/C	3.94	0.1707	-	-	5.83	0.0037	-	-	6.29	0.0019	-	-	-	-	-	-	-	-
G1/G2*W/C	7.29	0.0197	-	-	2.14	0.2472	0.74	0.0637	-	-	0.85	0.0371	-0.03	0.0172	-0.003	0.0170	-	-
G1/G2*Sp	-	-	1.06	0.0474	-	-	1.07	0.0083	2.96	0.0994	0.64	0.0938	-	-	-	-	-0.51	0.1166
G/S*MP/C	-8.23	0.0075	1.89	0.0014	-3.42	0.0632	0.93	0.0192	-2.13	0.2273	-	-	-	-	-	-	-	-
G/S*W/C	-	-	-1.12	0.0438	-4.39	0.0255	-0.55	0.1570	-5.16	0.0097	-	-	-	-	-	-	-	-
G/S*Sp	-	-	0.89	0.0892	3.86	0.0387	0.95	0.0164	4.36	0.0203	0.70	0.0686	-	-	-	-	-0.69	0.0402
MP/C*W/C	3.41	0.2494	-	-	5.58	0.0064	-	-	5.91	0.004	-	-	-	-	-	-	-	-
MP/C*Sp	-	-	-2.03	0.0008	-4.16	0.0274	-1.39	0.0012	-5.26	0.0068	-0.92	0.0205	-	-	-	-	0.79	0.0200
W/C*Sp	-	-	-1.00	0.0683	-	-	-0.59	0.1326	-	-	-	-	-	-	-	-	0.51	0.1350
G1/G2*G1/G2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G/S*G/S	-	-	1.06	0.0568	4.22	0.0322	-	-	4.66	0.0185	-	-	0.02	0.1297	0.002	0.0862	-	-
MP/C*MP/C	8.20	0.0097	-	-	7.20	0.0010	-	-	7.43	0.0007	-	-	-	-	-	-	-	-
W/C*W/C	-	-	-	-	-	-	1.16	0.0073	-	-	1.00	0.0180	-0.02	0.0676	0.003	0.0754	-	-
Sp*Sp	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Les modèles résultants sont établis par un ajustement par régression « pas à pas » qui utilise des transformations plutôt que des colonnes de formule pour enregistrer les termes de parties d'effets catégoriels (Proust et Jmp, 2009). Ces modèles étant en unités codées et il faut effectuer des calculs afin de les transformer en unités réelles.

Les coefficients des corrélations des modèles postulés sont généralement bons sauf dans les cas de l'indice de fluidité ($R^2=0.60$) et la viscosité différentielle c/μ_{BM} ($R^2=0.61$). Cela peut être dû au fait que certains paramètres rhéologiques tels que l'indice de consistance k et l'indice de fluidité n n'ont pas d'interprétation physique claire (Rigal, 2012).

Tableau 3. 5 Analyse de la variance des réponses

Source	Degré (s) de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Étalement (cm)	17	1045.36	61.49	7.4825
L-Box (%)	16	0.85	0.05	10.3799
V-funnel (s)	12	71.71	5.98	4.4018
T ₂₀ (s)	12	5.56	0.46	2.7505
T ₄₀ (s)	12	29.70	2.47	3.8020
T ₅₀ (s)	14	12.76	0.91	6.4285
Pi (%)	11	642.74	58.43	1.8890
Pd (mm)	14	4502.38	321.6	4.2898
ISS	10	424.02	42.4	5.6857
Km (cm)	12	249.76	20.81	4.0521
τ_B (Pa)	10	5719.90	571.99	4.6617
μ_B (Pa.s)	13	258.73	19.90	5.0720
τ_{MB} (Pa)	14	4287.36	306.24	6.5043
μ_{MB} (Pa.s)	14	237.11	16.94	8.3737
τ_{HB} (Pa)	14	4973.34	353.10	7.6936
K_{HB} (Pa.s)	11	144.25	13.11	6.2092
n	7	0.07	0.01	5.0724
c/μ_{MB} (S 10 ⁻²)	7	0.0009	0.0001	5.1690
TVR (%)	10	80.98	8.10	5.1406

D'après L'analyse de la variance des réponses qui sont récapitulées dans le tableau 3.5. On remarque que les Rapports F des réponses étalement sont tous supérieurs à 1. Donc on peut dire que les variations des réponses sont bien dues aux variations des facteurs et les modèles postulés ne représentent pas uniquement la moyenne des mesures.

Les résultats de répétitivité des points centraux issus des essais empiriques et de la stabilité statique semblent fluctuer normalement autour de ces valeurs moyennes (cf. Tableau 3.6). Ces dernières restent comprises entre les limites de contrôle inférieures et supérieures (LSC et LIC) qui déterminent une zone dans laquelle doivent se situer les résultats d'essais. On constate aussi que le test proposé montre le plus faible écart type moyen (0.93) par rapport l'étalement, Pi, Pd et ISS, ce qui nous mène à conclure que le test proposé s'est avéré très sensible à contrôler l'ouvrabilité et la stabilité statique des BAP.

Tableau 3. 6 Répétitivité des points centraux du test proposé

Moments	Étalement (cm)	T50 (s)	Pi (%)	Pd (mm)	ISS	Km (cm)
Moyenne	79.2	1.91	15.24	28.6	5.82	2.6
Ecart-type	2.28	0.547	5.56	6.65	3.12	2.1
Ecart type Moyenne	1.02	0.25	2.49	2.98	1.39	0.93
Moyenne LSC* à 95%	82	2.59	22.15	36.86	9.69	5.17
Moyenne LIC* à 95%	76.4	1.23	8.34	20.33	1.94	0.025

*LSC : limite supérieure de contrôle des moyennes.

*LIC : limite inférieure de contrôle des moyennes.

La figure 3.1 illustre un exemple de la transformation des résultats rhéologiques issus du logiciel (*Hei-Control*) selon les trois modèles rhéologiques (Bingham, Bingham modifié et Herschel-Bulkley) à l'aide du logiciel *RheoGraph*. On constate que le modèle de Bingham modifié et le modèle d'Herschel Bulkley sont très semblables et qu'ils pourraient fournir la meilleure estimation des paramètres rhéologiques des BAP. Cela est dû au fait que les BAP obéissent à un comportement rhéoépaississant non linéaire alors que l'ajustement linéaire du modèle de Bingham est devenu insuffisant pour décrire le comportement rhéologique de SCC (Lomboy *et al.*, 2014). En outre, des valeurs négatives du seuil de cisaillement ont été trouvées en utilisant le modèle de Bingham. Ceci est attribué à l'extrapolation déterminée par l'équation de Bingham (Hu *et al.*, 2013).

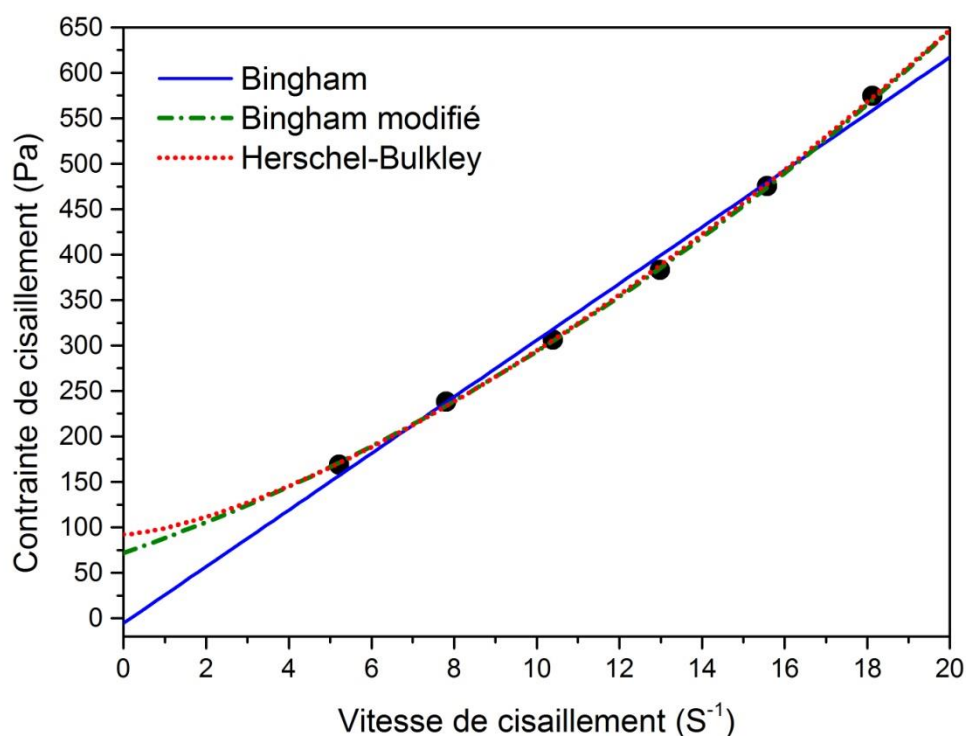


Figure 3. 1 La transformation des résultats rhéologiques selon les 3 modèles

3.2.1 Relation entre les paramètres rhéologiques des modèles étudiés

Les résultats des paramètres rhéologiques pour tous les mélanges et selon les 3 modèles étudiés sont présentés dans les figures 3.2 et 3.3. On observe que les contraintes de cisaillement issues du modèle de Bingham se caractérisent par des valeurs faibles par rapport aux autres modèles, alors que les valeurs les plus élevées des viscosités plastiques ont été obtenues également avec le même modèle. On peut également voir que les contraintes de cisaillement et les viscosités plastiques de Bingham modifié sont intermédiaires entre celles des modèles Bingham et Herschel-Bulkley pour tous les mélanges. Des résultats similaires ont été rapportés par Yahia et Khayat (2001).

Les mélanges contenant des teneurs élevées en gravier 8/15 (c.-à-d. les mélanges de 1 à 9) se caractérisent par des changements brusques des paramètres rhéologiques, ce qui indique que la classe granulaire a un effet significatif sur le comportement rhéologique des BAP.

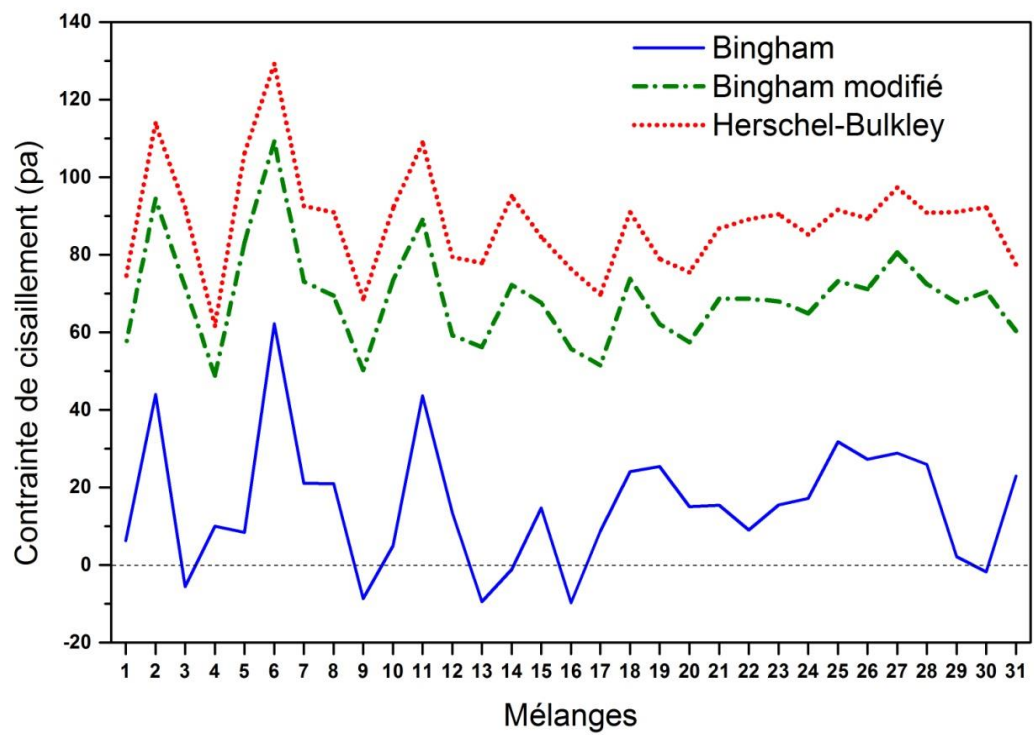


Figure 3. 2 Les résultats des contraintes de cisaillement

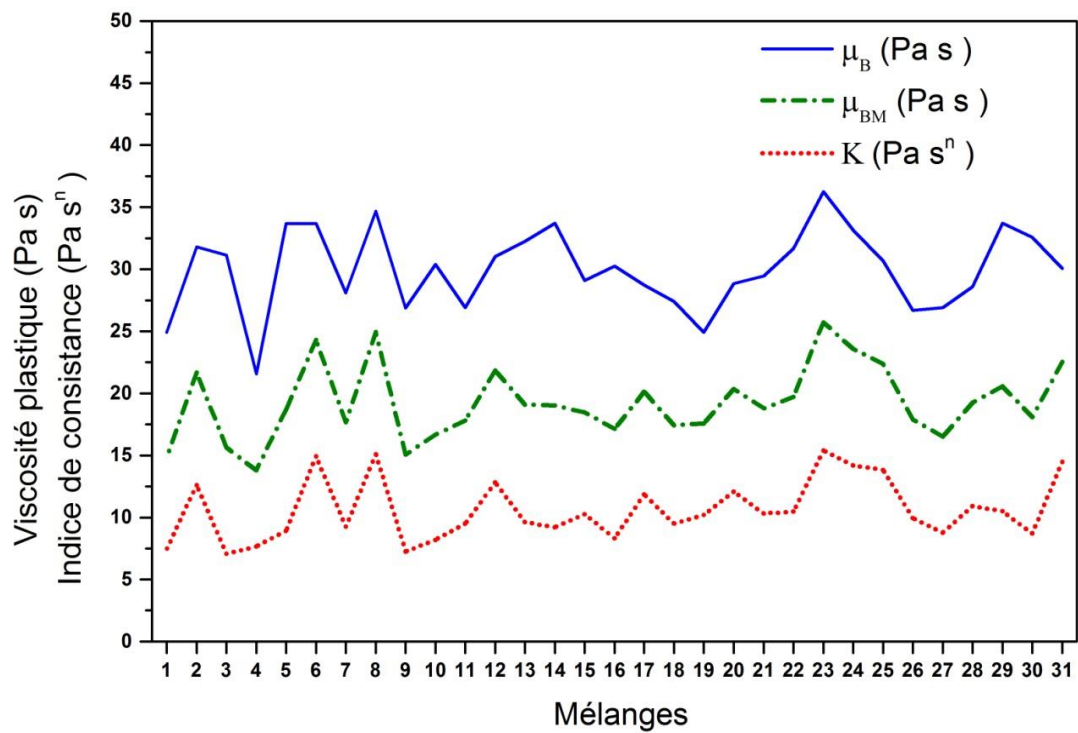


Figure 3. 3 Les résultats des viscosités plastiques et des indices de consistance

Les corrélations entre les seuils de cisaillements et les viscosités plastiques pour les modèles de Bingham, Bingham modifié et Herschel-Bulkley sont présentées dans les figures 3.4 et 3.5.

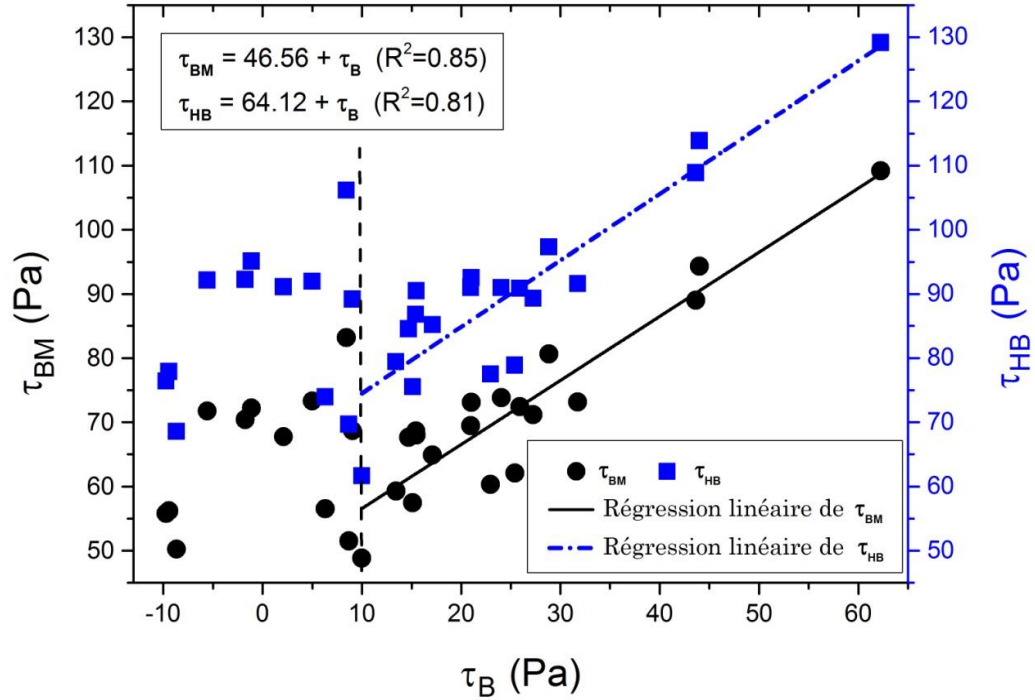


Figure 3. 4 Corrélations entre τ_B , τ_{BM} et τ_{HB}

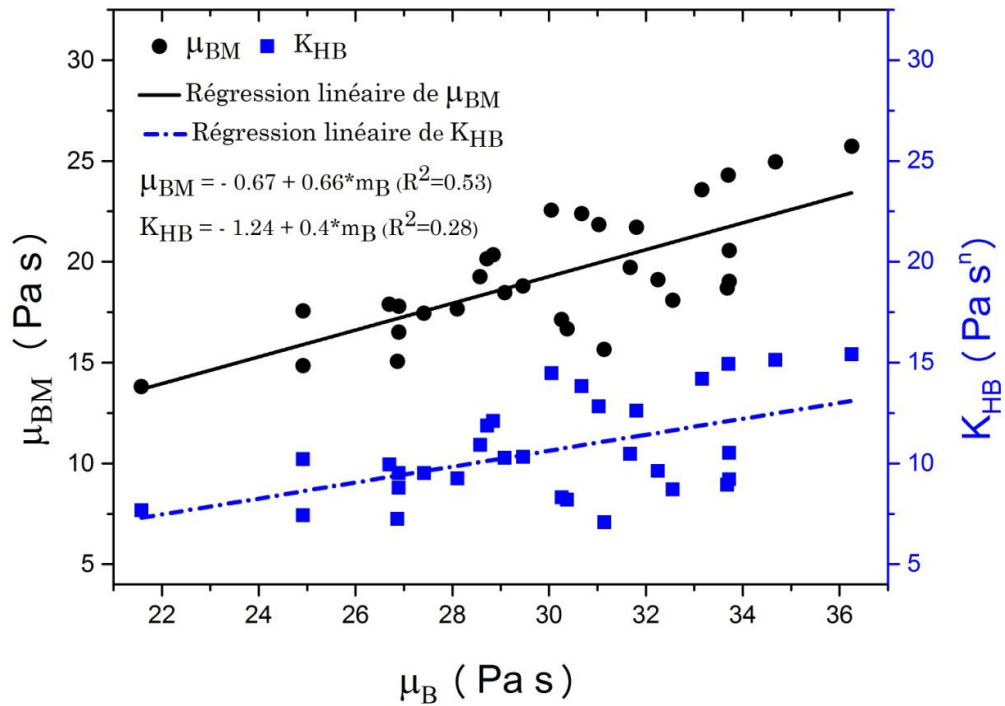


Figure 3. 5 Corrélations entre μ_B , μ_{BM} et K_{HB}

La figure 3.4 montre une très bonne corrélation entre les valeurs des seuils de cisaillement issus des modèles de Bingham modifié, d'Herschel-Bulkley et les valeurs élevées du seuil de cisaillement selon le modèle de Bingham ($\tau_B > 10$ Pa s), alors que pour des faibles seuils de cisaillement ($\tau_B < 10$ Pa s), aucune corrélation n'a été obtenue. Ces résultats confirment que le modèle de Bingham n'est pas applicable dans le cas des bétons ayant un seuil de cisaillement faible. Des résultats similaires ont été rapportés par (Heirman *et al.*, 2006) (Feys *et al.*, 2006) (Taleb, 2017). La figure 3.5 montre une relation moins significative entre la viscosité plastique de Bingham et celle de Bingham modifié, alors qu'une faible corrélation a été observée entre la viscosité de Bingham et l'indice de consistance d'Herschel-Bulkley.

Une forte corrélation a été établie entre la viscosité différentielle C/μ_{BM} et l'indice de fluidité n , comme le montre la figure 3.6. Cela est conforme aux résultats obtenus par d'autres chercheurs (Singh *et al.*, 2017) (Feys *et al.*, 2008) (Güneyisi *et al.*, 2016). Nous pouvons donc prédire le comportement rhéofluidifiant ou rhéoépaississant des bétons en utilisant la viscosité différentielle exprimée par le rapport C/μ_{BM} (Taleb, 2017). Dans notre cas, toutes les valeurs C/μ_{BM} sont comprises entre 0 et 0.05 (correspond à des indices de fluidité n compris entre 1.2 et 1.5) ce qui confirme que tous les mélanges du BAP étudiés ont un comportement rhéoépaississant.

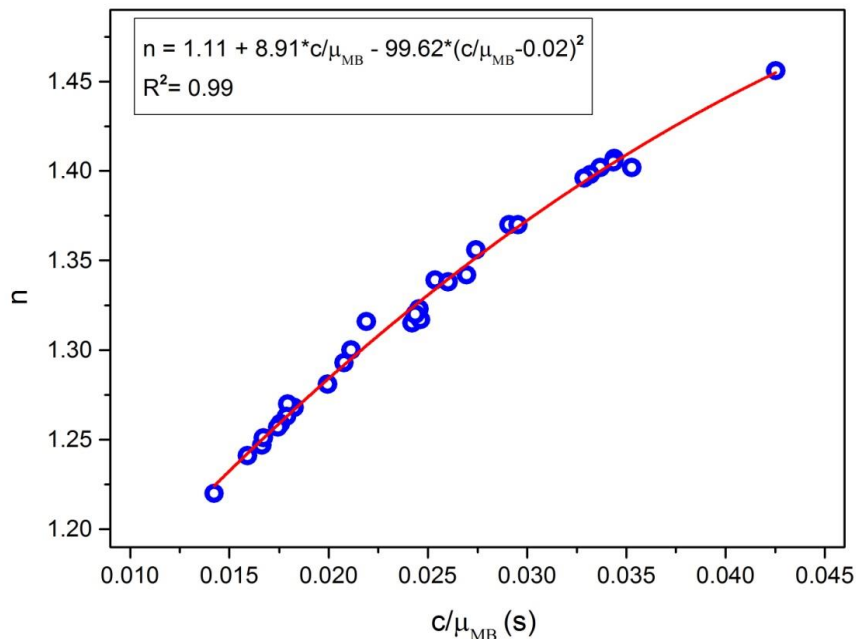


Figure 3. 6 Corrélations entre C/μ_{BM} et n

3.2.2 Influence des rapports G1/G2 et G/S sur l'étalement et la capacité de passage

Les courbes isoréponses représentées dans les figures 3.7 et 3.8, montrent l'effet de la variation des rapports G1/G2 et G/S sur l'étalement et la capacité de passage par l'essai de la boîte en L.

Il convient de noter que les valeurs d'étalement sont toutes dans les limites préconisées par l'AFGC (2008), alors que l'obtention d'une capacité de remplissage conforme aux exigences techniques préconisées ($\geq 80\%$) n'est possible que dans le cas des mélanges contenant un taux élevé de gravier 3/8 ou les mélanges avec $G1/G2 \geq 40\%$ et $G/S \leq 1\%$.

Nous constatons aussi que l'étalement et le rapport H2/H1 augmentent en fonction de l'augmentation du rapport G1/G2. Ceci se traduit par l'augmentation du pourcentage du gravier 3/8 qui participe à la réduction des frictions entre les gros granulats et la diminution du gravier 8/15 qui sont à l'origine du blocage du béton. Par ailleurs, l'augmentation du rapport G/S conduit à améliorer l'étalement et la capacité de passage à des valeurs maximales et ont ensuite diminué à nouveau. À titre d'exemple : Les valeurs optimales de l'étalement sont de 77cm pour un rapport $G/S=0.85$ (avec $G1/G2 \leq 5\%$) et 79cm pour un rapport $G/S=1$ (avec $G1/G2 = 75\%$).

Ce phénomène se traduit par l'obtention d'un mélange plus homogène avec un rapport G/S proche de 1. Au-delà de cette valeur, l'ouvrabilité est diminuée à cause du frottement intergranulaire. Ces résultats sont en bonne accordance avec ceux rapportés dans la littérature (G/S de l'ordre de 1) (AFGC, 2008) (Okamura et Maekawa, 1993).

Si on compare les résultats d'étalement avec les recommandations de l'AFGC, on distingue trois classes : pour $G/S > 1.1$ et $G1/G2 < 30\%$, l'étalement appartient à la classe SF2. Pour $G/S < 1$ et quelque soit la valeur de G1/G2, l'étalement appartient à la classe SF3. Pour $G1/G2 > 85\%$ et quelque soit la valeur de G/S, l'étalement appartient aussi à la classe SF3.

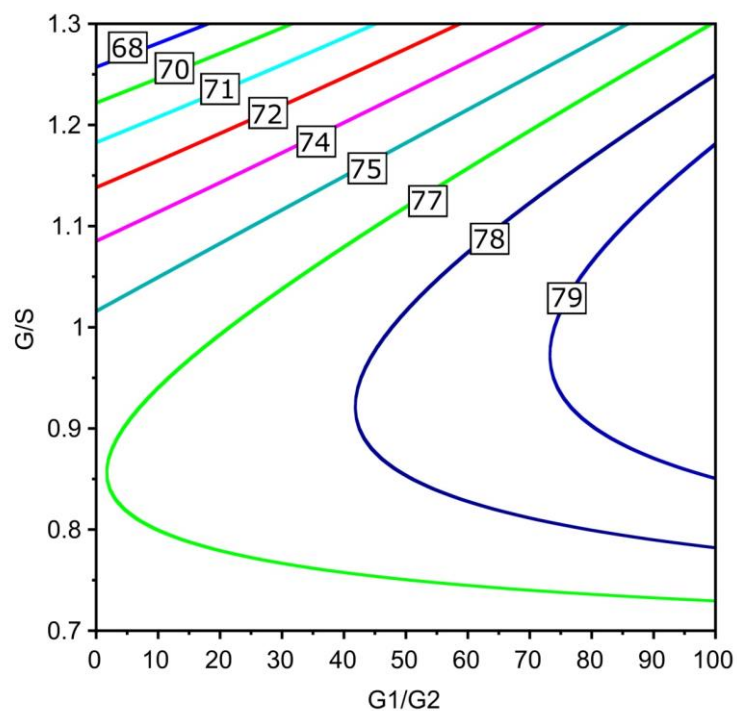


Figure 3. 7 Évolution de l'étalement (cm) en fonction du G/S et $G1/G2$

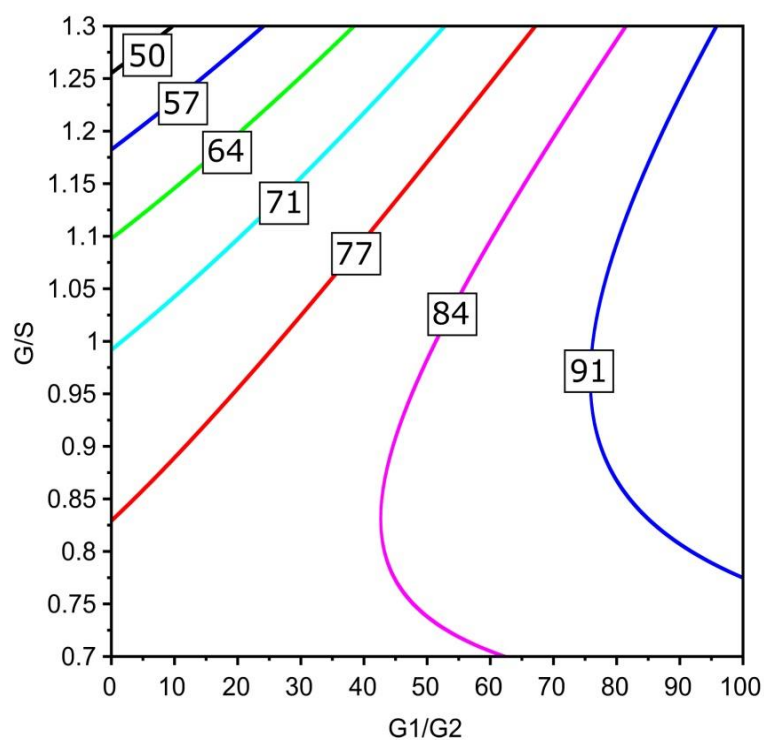


Figure 3. 8 Évolution du rapport H_2/H_1 (%) en fonction du G/S et $G1/G2$

3.2.3 Influence des rapports $G1/G2$ et G/S sur le temps d'écoulement

L'influence des rapports étudiés (G/S et $G1/G2$), sur le temps d'écoulement T_{50} , le temps d'écoulement au V-Funnel et les temps mesurés dans la boîte L (T_{20} et T_{40}) sont présentés dans les figures de 3.9 à 3.12. Nous remarquons d'après ces résultats que les mélanges de BAP préparés avec un rapport G/S d'environ 1 et un rapport $G1/G2$ de l'ordre de 40 à 60% possèdent les temps d'écoulement les plus longs par rapport aux autres combinaisons possibles. Cela est dû au fait que les petits granulates occupent l'espace entre les gros granulates, ce qui améliore l'empilement des grains et par conséquent le temps d'écoulement augmente. Une fois que les vides sont complètement remplis, les petits granulates commencent à occuper la place des gros granulates, et par conséquent l'empilement de la structure granulaire s'améliore (Sebaibi *et al.*, 2013) (Bouziani, 2013).

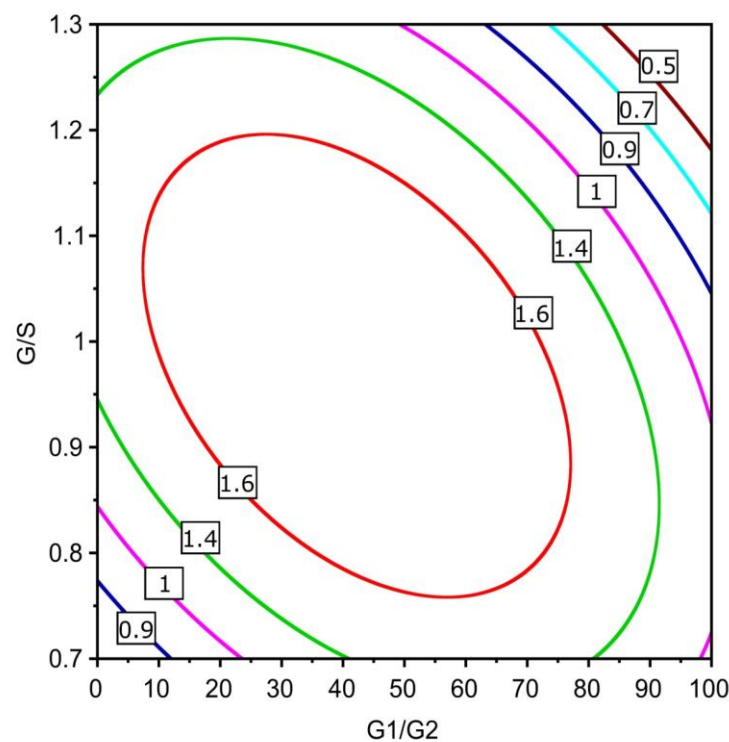


Figure 3. 9 Évolution de T_{50} (s) en fonction du G/S et $G1/G2$

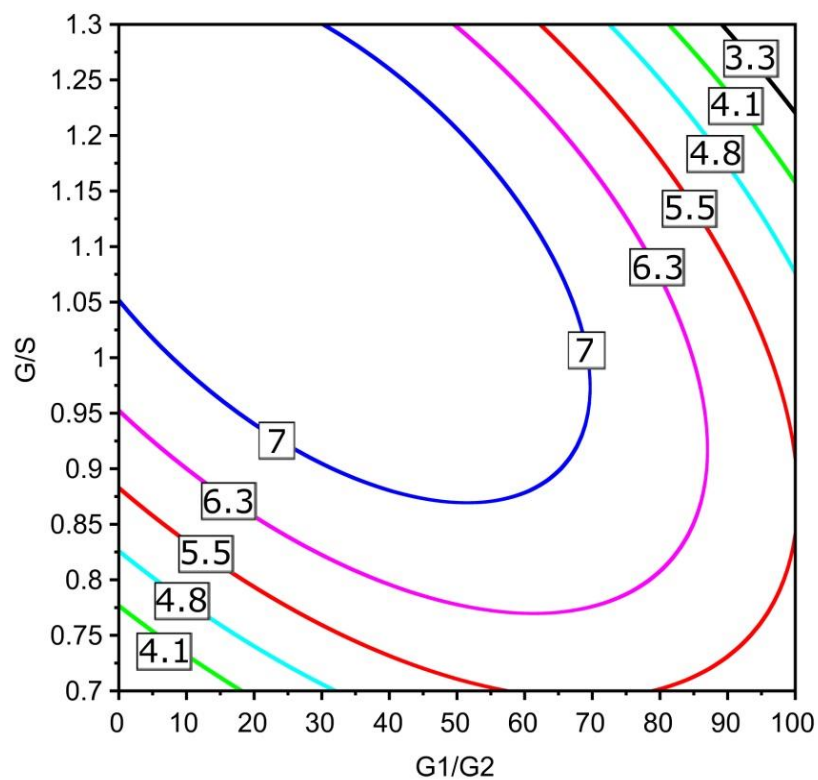


Figure 3. 10 Évolution de V-funnel (s) en fonction du G/S et $G1/G2$

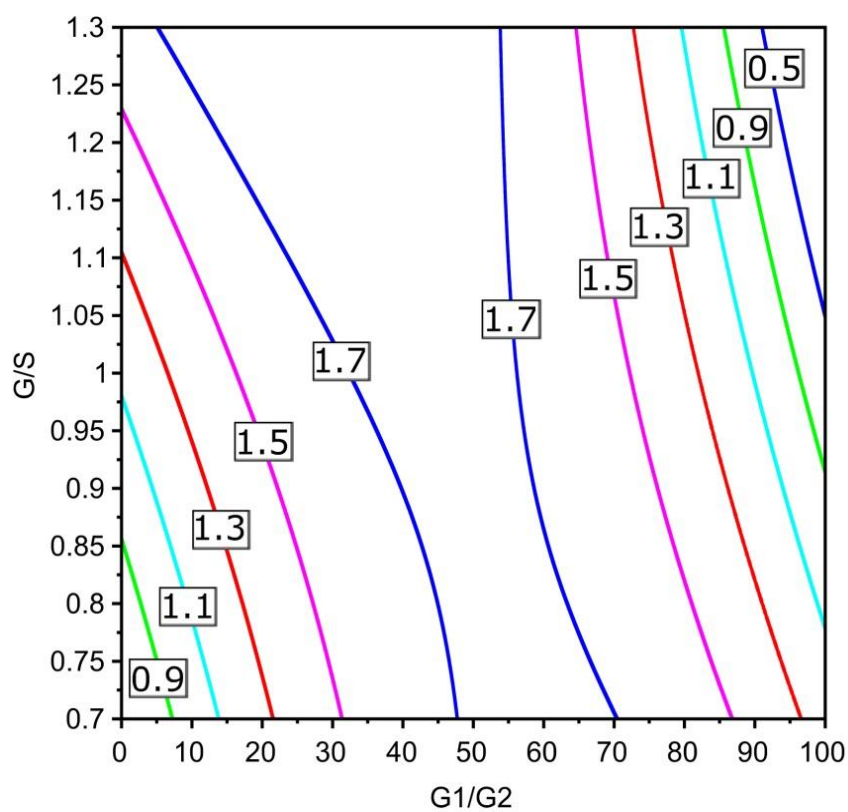


Figure 3. 11 Évolution de T20 (s) en fonction du G/S et $G1/G2$

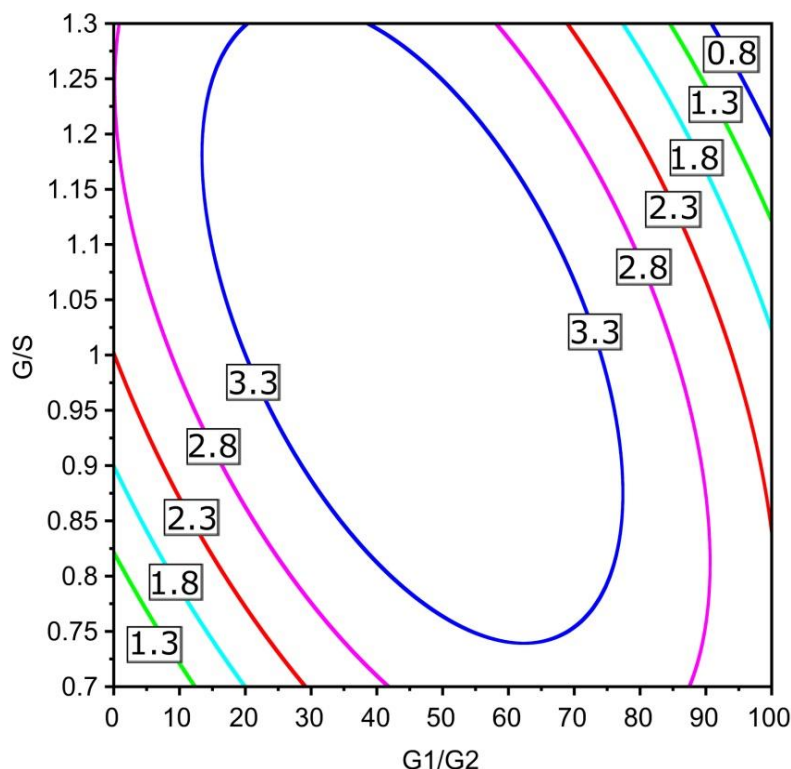


Figure 3. 12 Évolution de T40 (s) en fonction du G/S et G1/G2

3.2.4 Influence des rapports G1/G2 et G/S sur la stabilité statique

La Figure 3.13 montre l'effet de G/S et G1/G2 sur la stabilité mesurée à l'aide du test proposé K_m en courbes isoréponses. On constate que l'augmentation du rapport G1/G2 diminue les valeurs de K_m . Cela peut s'expliquer par le fait que l'augmentation du rapport G1/G2 tend à augmenter le volume de mortier filtré à l'intérieur de l'anneau, c'est ce qui a fait augmenter la valeur de K_{min} et par conséquent la valeur K_m diminue ($K_m = K_{max} - K_{min}$). De l'autre côté, l'augmentation du rapport G/S conduit à une diminution des valeurs K_m (pour G/S proche de 1), puis augmentent de nouveau. Ce qui confirme encore une fois l'obtention d'un empilement optimale pour G/S de l'ordre de 1.

La figure 3.14 montre les effets de G/S et G1/G2 sur la stabilité au tamis P_i en courbes isoréponses. Ce résultat montre que le mélange contenant un rapport G1/G2=60% et un rapport G/S de l'ordre de 1.1 a montré la meilleure stabilité statique par rapport aux autres compositions. Cela signifie que l'augmentation de l'empilement granulaire améliore la résistance à la ségrégation des BAP (Khayat *et al.*, 2002).

Les résultats de la stabilité au cylindre Pd sont représentés sur la figure 3.15. D'après cette figure, on peut noter que l'augmentation du rapport G1/G2 engendre une diminution des valeurs Pd, ce qui se traduit par l'augmentation de la stabilité en raison de la diminution du pourcentage des gros granulats.

L'essai de la ségrégation au cylindre consiste à mesurer la hauteur du mortier sur la surface de l'échantillon de béton, le béton montre une faible résistance à la ségrégation lorsque la hauteur du mortier mesuré est importante (Shen, Struble et Lange, 2005). Pour des valeurs faibles de $G1/G2$, la stabilité au cylindre Pd diminue en fonction de l'augmentation du rapport G/S . Ceci se traduit par l'augmentation du pourcentage des gros granulats, ce qui réduit le volume du mortier sur la surface et par conséquent les valeurs Pd diminuent. Pour des mélanges contenant un rapport $G1/G2$ élevé, l'augmentation du rapport G/S tend à augmenter les valeurs Pd, ce qui signifie l'augmentation du volume du mortier sur la surface en raison du pourcentage élevé de gravier 3/8.

La figure 3.16 illustre l'effet des rapports G/S et $G1/G2$ sur la stabilité à la colonne (l'indice de ségrégation statique ISS). On remarque d'après cette figure, qu'avec l'augmentation du rapport G/S , l'indice de ségrégation statique diminue. Cette diminution devient très importante avec un pourcentage et un volume élevé du gravier 8/15 ce qui engendre plus de frottement intergranulaire.

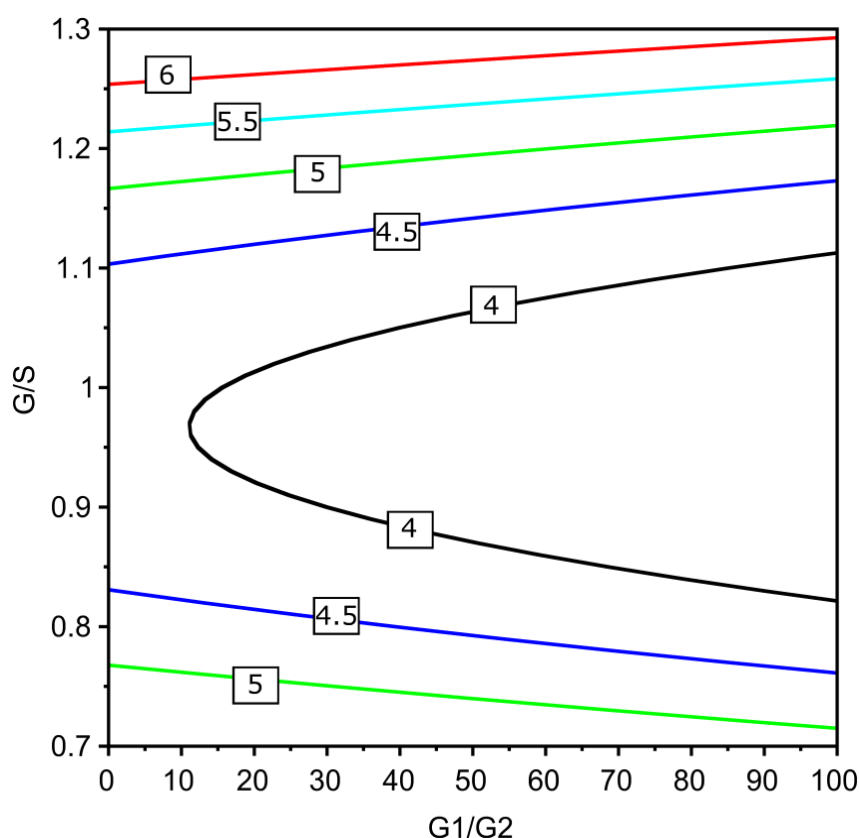


Figure 3. 13 Évolution de Km (cm) en fonction du G/S et $G1/G2$

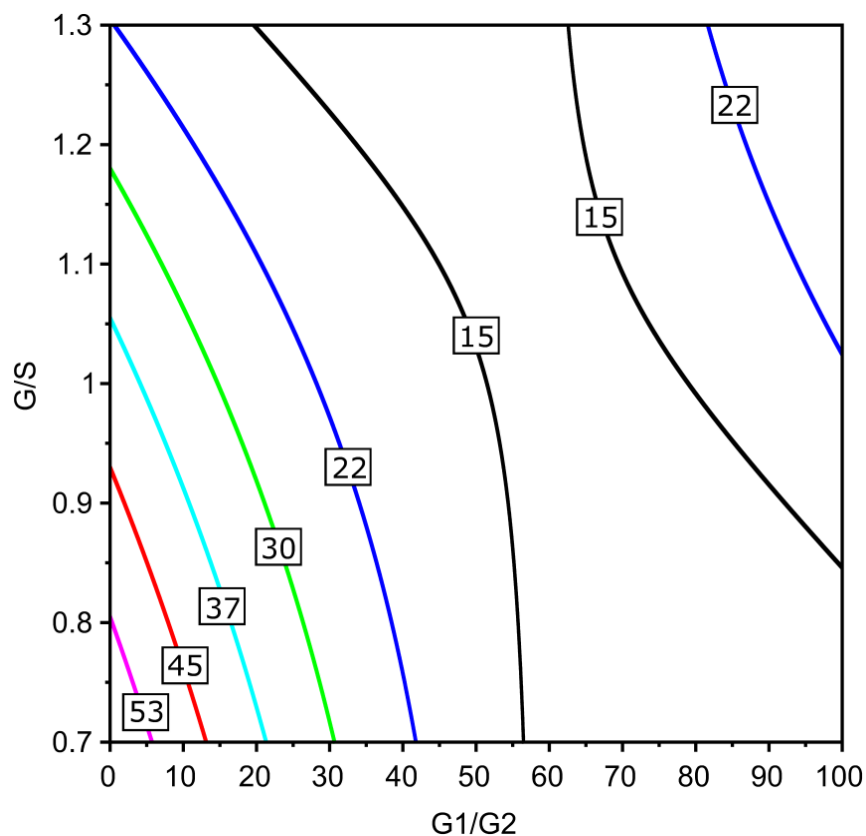


Figure 3. 14 Évolution de P_i (%) en fonction du G/S et $G1/G2$

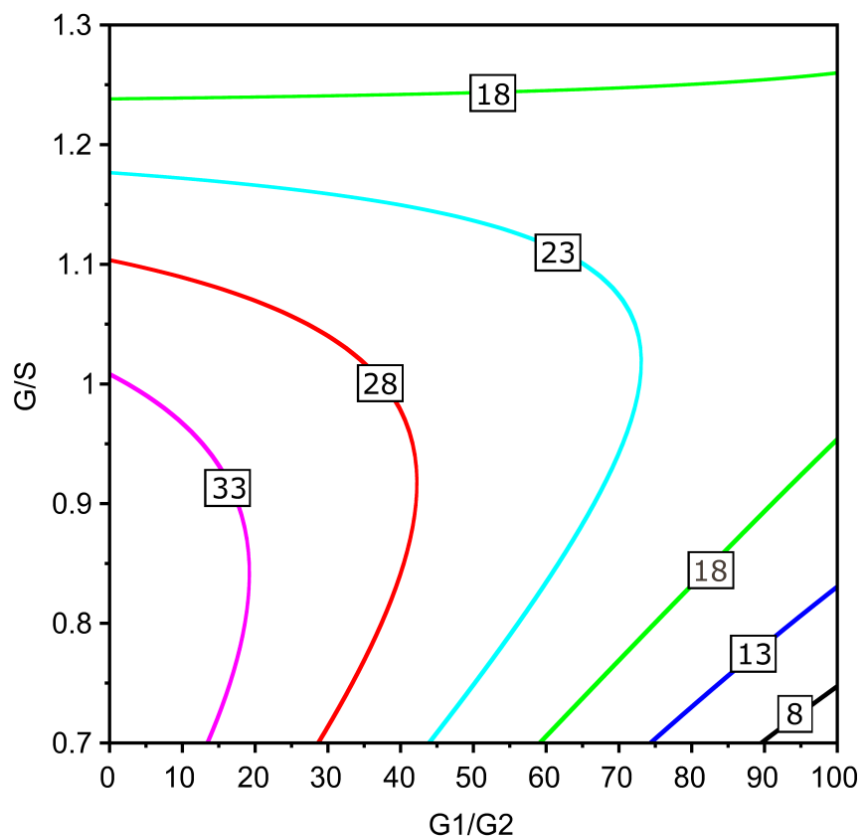


Figure 3. 15 Évolution de P_d (mm) en fonction du G/S et $G1/G2$

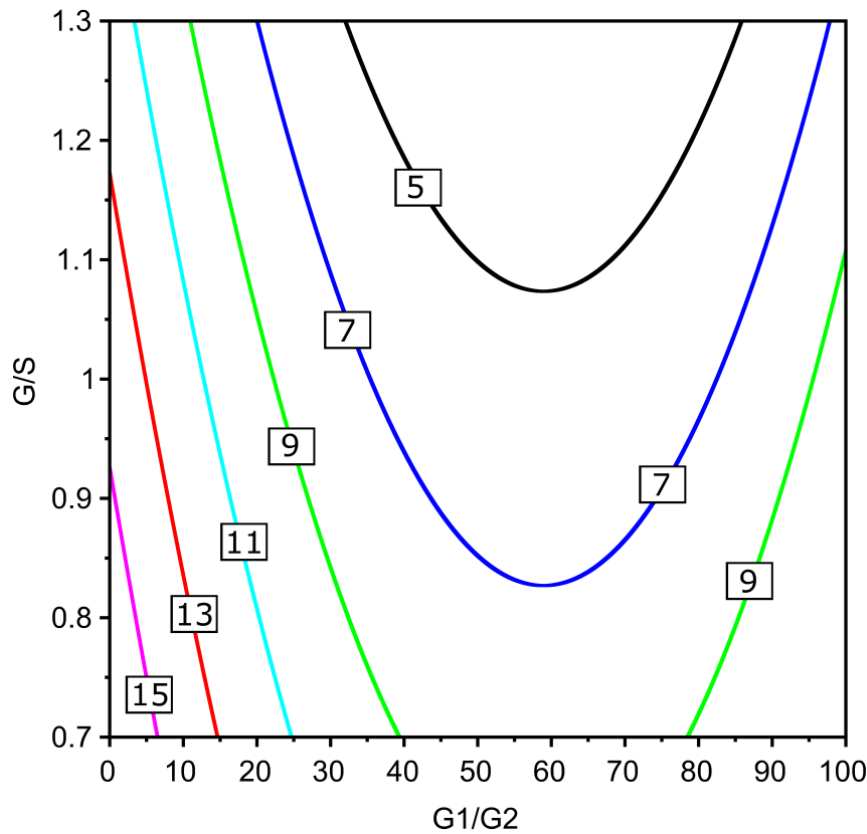


Figure 3. 16 Évolution de ISS en fonction du G/S et G1/G2

3.2.5 Influence des rapports G/S et G1/G2 sur le seuil de cisaillement

L'influence des rapports G/S et G1/G2 sur le seuil de cisaillement des trois modèles appliqués sur les bétons étudiés sont présentés dans les figures 3.17, 3.18 et 3.19. D'après ces courbes isoréponses on remarque que l'évolution des seuils de cisaillement issus des modèles Bingham modifié et Herschel-Bulkley sont identiques. On remarque aussi que l'évolution du seuil de cisaillement issu du modèle de Bingham est différente de celle des autres modèles. Ces résultats confirment une fois de plus que les BAP suivent un comportement non linéaire (comportement rhéoépaississant) et que les modèles non linéaires (spécialement celui d'Herschel-Bulkley ou de Bingham modifié) seraient mieux adaptés aux BAP. En revanche, le modèle de Bingham parfois aboutit à des seuils négatifs et ne décrit pas parfaitement le comportement rhéologique (Taleb *et al.*, 2017) (Güneyisi *et al.*, 2016) (Feys *et al.*, 2009).

Nous constatons aussi d'après les figures 3.18 et 3.19 que les mélanges préparés avec un rapport G/S d'environ 1 possèdent les seuils de cisaillement les plus bas ce qui confirme une fois de plus la relation entre la contrainte de cisaillement et l'aptitude d'écoulement. En outre, l'augmentation du rapport G1/G2 tend à diminuer le seuil de cisaillement en raison de la diminution de diamètre maximal des gros granulats (Hu et Wang, 2011) (Sebaibi *et al.*, 2013) (Bouziani, 2013).

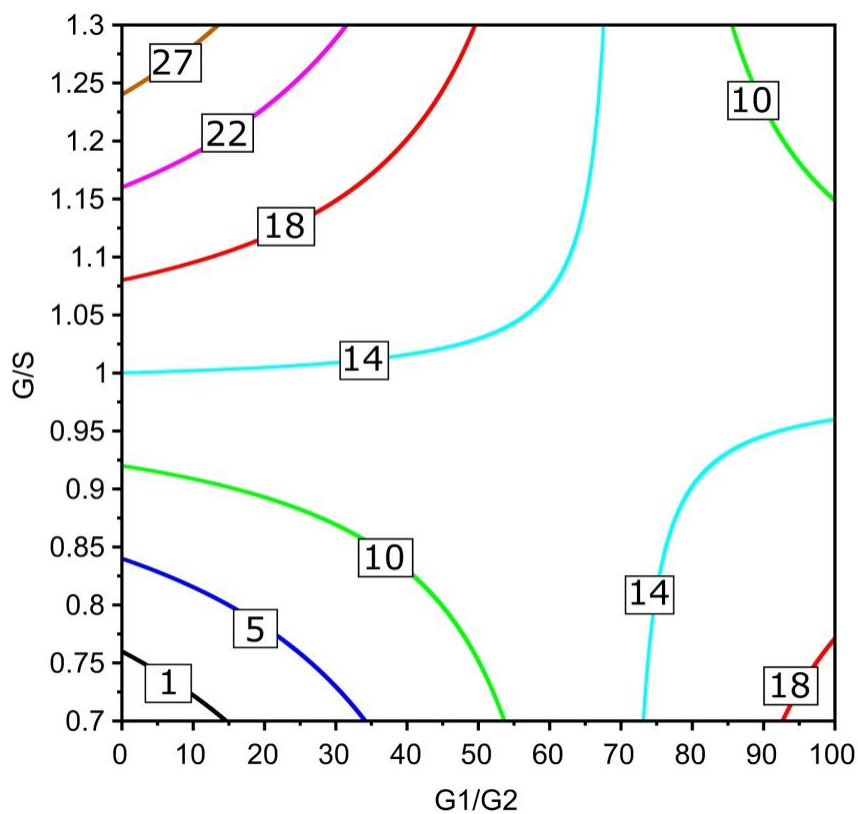


Figure 3. 17 Évolution de τ_B (Pa) en fonction du G/S et $G1/G2$

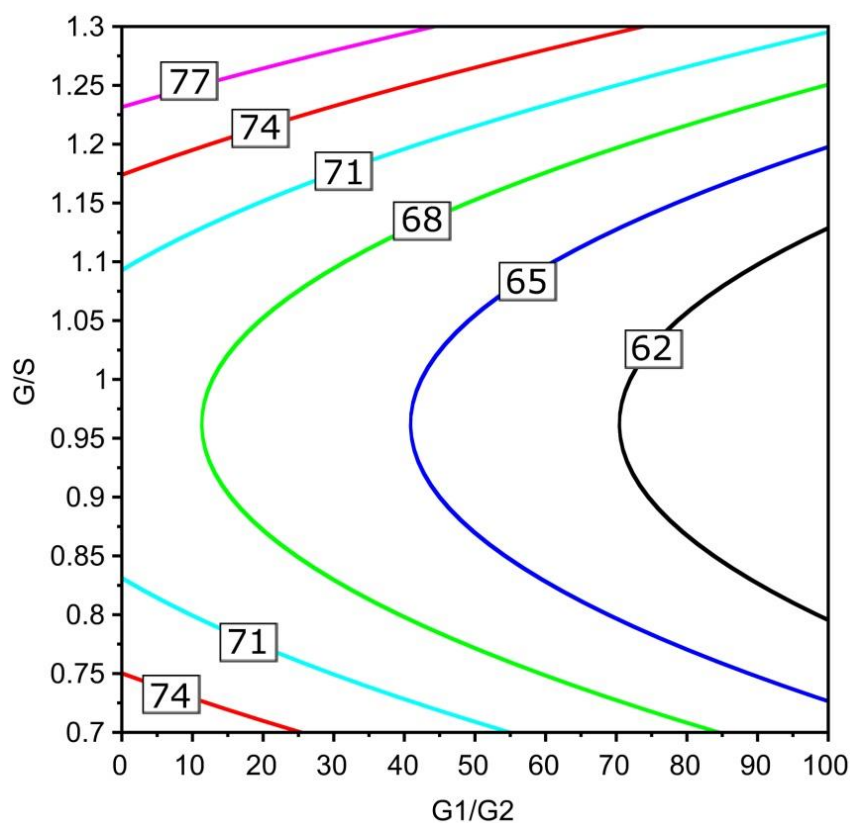


Figure 3. 18 Évolution de τ_{BM} (Pa) en fonction du G/S et $G1/G2$

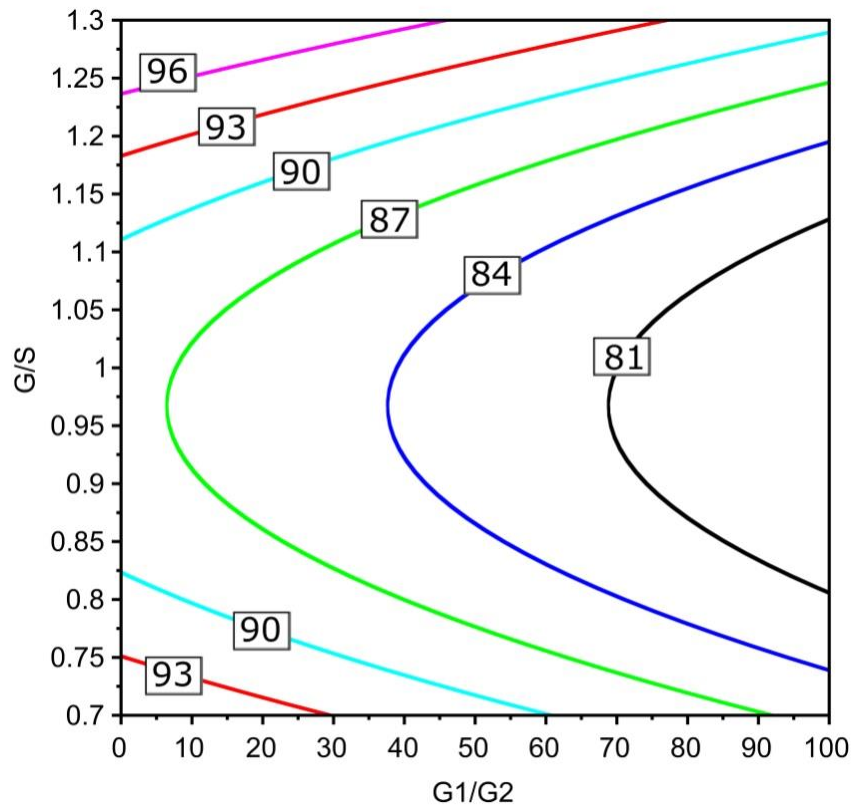


Figure 3. 19 Évolution de τ_{HB} (Pa) en fonction du G/S et $G1/G2$

3.2.6 Influence des rapports G/S et $G1/G2$ sur la viscosité plastique

Les viscosités plastiques des modèles de Bingham μ_B et Bingham modifié μ_{BM} ainsi que l'indice de consistance K_{HB} du modèle d'Herschel-Bulkley sont regroupés dans les figures 3.20, 3.21 et 3.22 respectivement. Pour des valeurs faibles de $G1/G2$ ($G1/G2 < 30\%$), les valeurs de μ_B , μ_{BM} et K_{HB} augmentent en fonction de l'augmentation du rapport G/S . Ce qui confirme que la viscosité augmente avec la teneur en granulats (Hu et Wang, 2011) (Taleb, 2017). L'augmentation du rapport $G1/G2$ tend à augmenter les valeurs de μ_B , μ_{BM} et K_{HB} . Cela s'explique par un accroissement des frictions interparticulaires lorsque la taille des particules diminue ce qui augmente par conséquent la viscosité du mélange (Hu, 2005).

La figure 3.23 illustre l'effet de G/S et $G1/G2$ sur le taux de variation (TVR). Nous constatons que les valeurs TVR diminuent en fonction de l'augmentation des rapports $G1/G2$ et G/S , ce qui se traduit par l'augmentation de la viscosité qui minimise les risques de ségrégation (Long *et al.*, 2017).

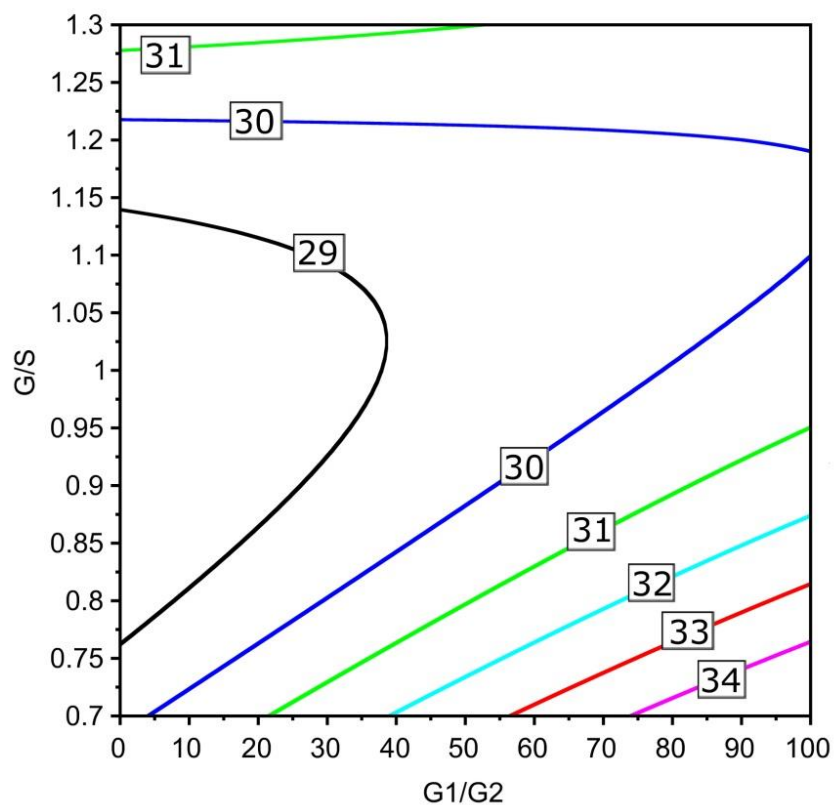


Figure 3. 20 Évolution de μ_B (Pa.s) en fonction du G/S et $G1/G2$

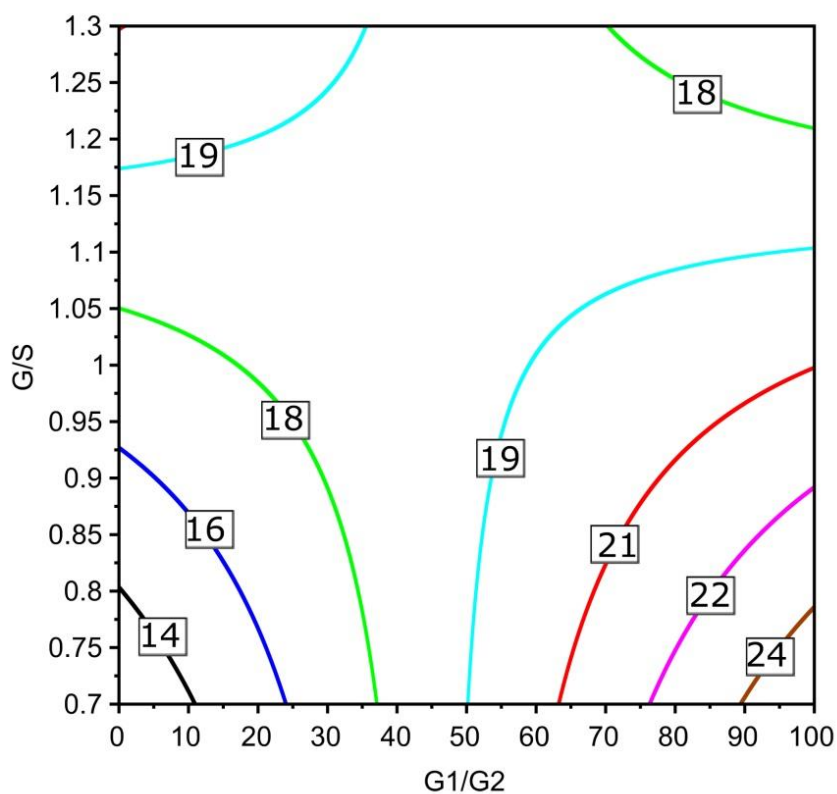


Figure 3. 21 Évolution de μ_{BM} (Pa.s) en fonction du G/S et $G1/G2$

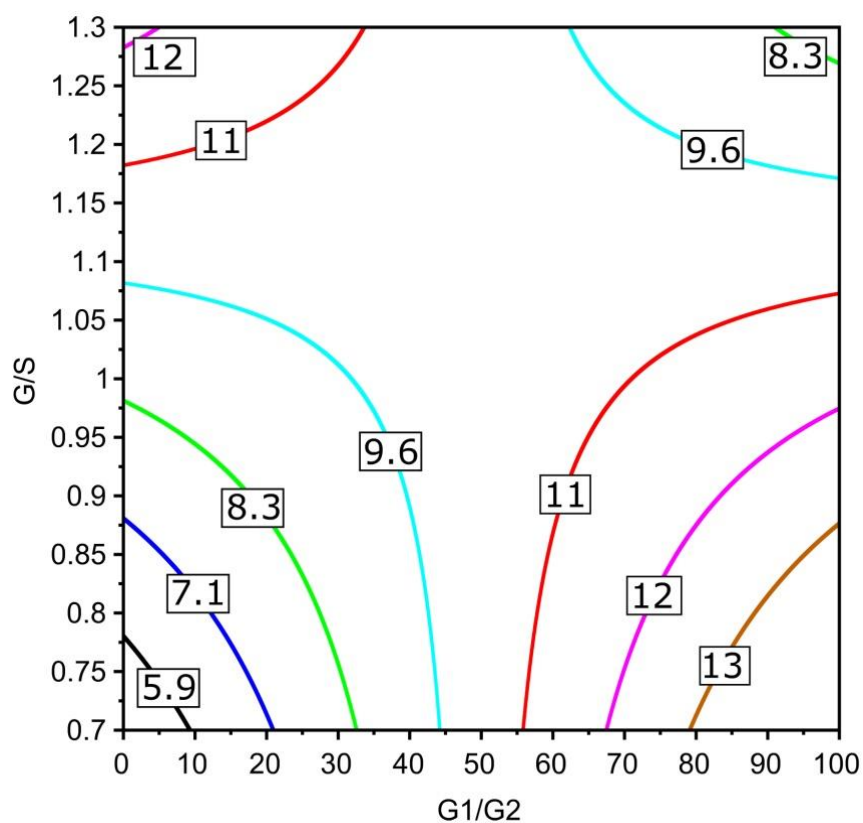


Figure 3. 22 Évolution de k_{HB} (Pa.s) en fonction du G/S et $G1/G2$

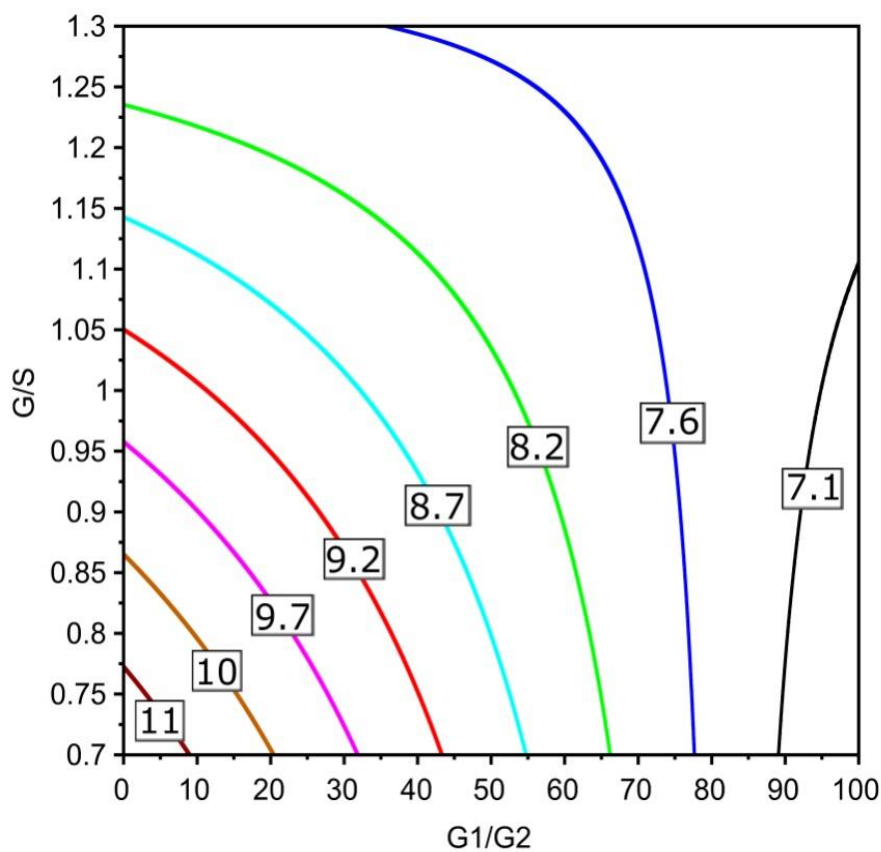


Figure 3. 23 Évolution de TVR (%) en fonction du G/S et $G1/G2$

3.2.7 Corrélations entre les essais empiriques et le K-Slump modifié

Les corrélations représentées graphiquement sur les figures 3.24, 3.25 et 3.26 ont été trouvées entre l'étalement, l'essai de la stabilité au tamis, l'essai de la stabilité à la colonne et le nouveau test proposé. Une bonne corrélation a été établie entre l'étalement et les valeurs Km avec un coefficient de corrélation $R^2=0.72$, étant donné que l'étalement diminue en fonction de l'augmentation des valeurs Km. Cette corrélation nous permet de prédire l'étalement d'un BAP par le K-Slump modifié. Cette corrélation reflète clairement la cohérence entre les valeurs de Km et les étalements élevés (environ 70 cm). L'essai K-slump modifiée s'est donc révélé très sensible à contrôler l'ouvrabilité des BAP très fluides.

La figure 3.25 montre une forte corrélation non linéaire entre l'essai de la stabilité au tamis et le K-Slump modifié ($R^2=0.81$). Il est à noter que la zone limitée par des valeurs P_i inférieures à 15 % et qui correspond à des valeurs Km supérieures à 4 cm présente la zone de stabilité statique acceptable. La corrélation illustrée dans la figure 3.26 présente aussi une bonne corrélation entre le K-Slump modifié et les valeurs P_d de la stabilité au cylindre (coefficient de corrélation de 0.73). La zone limitée par des valeurs P_d inférieures à 10 % et qui correspond à des valeurs Km supérieures à 8 cm présente la zone de stabilité statique acceptable.

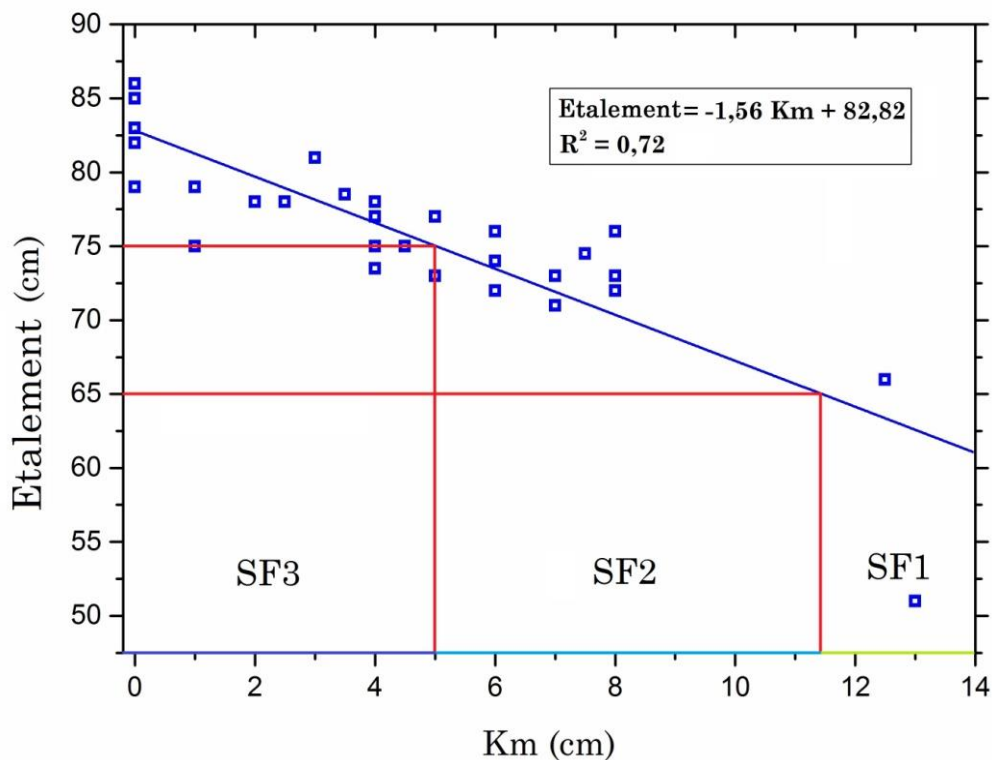


Figure 3. 24 Relation entre l'étalement et Km

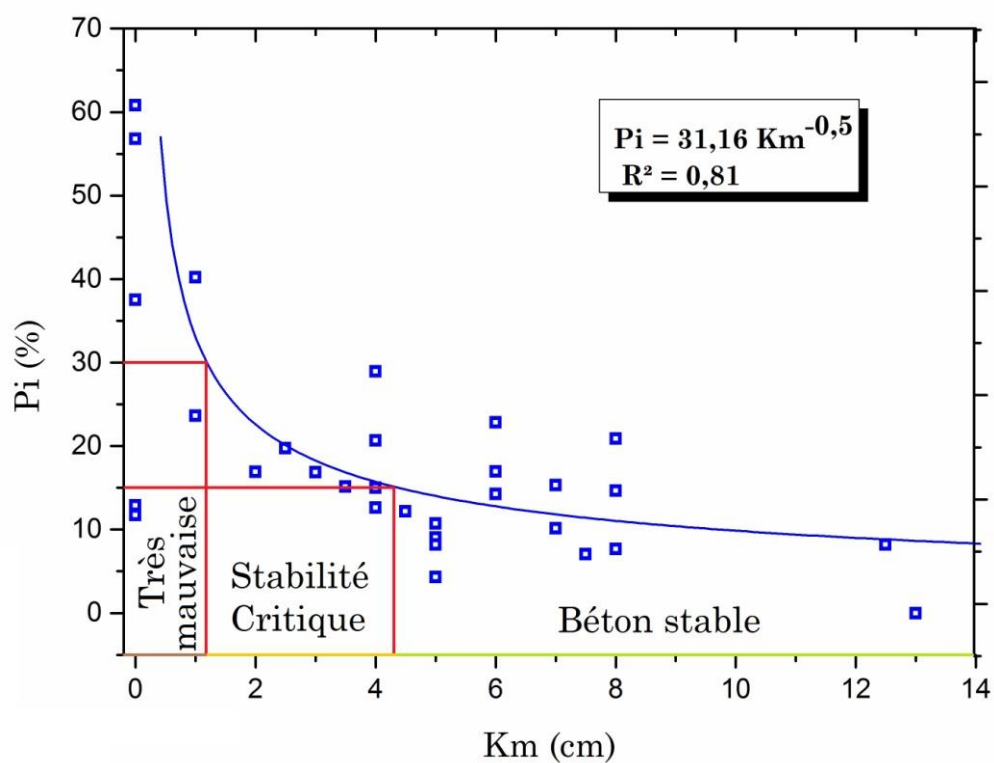


Figure 3. 25 Relation entre la stabilité au tamis et Km

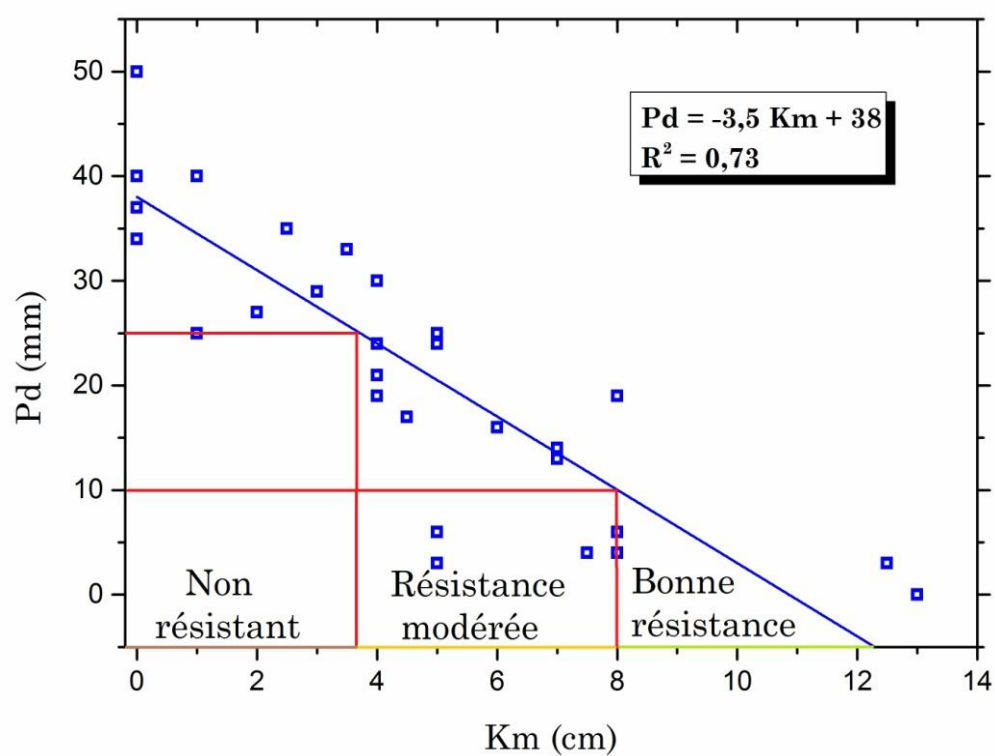


Figure 3. 26 Relation entre la stabilité au cylindre et Km

3.3 Influence de types de sable

Les tableaux 3.7 et 3.8 récapitulent les combinaisons des sables et les résultats des différents essais à l'état frais de 21 différents BAP étudiés. Tandis que les tableaux 3.9 et 3.10 présentent les coefficients et les paramètres des modèles trouvés à l'état frais et à l'état durci des BAP étudiés. On constate que les coefficients des corrélations des modèles postulés sont généralement bons (de 0.71 à 0.95).

Tableau 3. 7 Résultats des essais empiriques et de la stabilité statiques

N°	Combinaison Des sables			Étalement (cm)	T50 (sec)	L-Box (%)	V- Funnel (sec)	T20 (s)	T40 (s)	Pi (%)	Pd (mm)	Km (cm)
	SD	SC	SR									
1	0	0	1	76	2,11	99	8,04	0.83	1.68	23,68	21	4
2	0	0,2	0,8	78,5	1,97	90	6,98	0.92	1.78	20,82	15	6
3	0	0,4	0,6	79	1,91	98	6,27	0.51	0.93	27,38	26	3
4	0	0,6	0,4	77	2,66	87	8,77	1.07	1.88	24,55	17	5
5	0	0,8	0,2	73	3,8	62	18,92	2.67	7.42	13,74	8	7,5
6	0	1	0	69	5,27	48	23,75	4.76	15.15	9,12	6	8
7	0,2	0	0,8	78,5	2,76	90	7,86	0.92	2.19	19,07	12	6
8	0,2	0,2	0,6	80	2,32	95	7,45	0.69	1.28	22,8	17	5,5
9	0,2	0,4	0,4	77	2,56	98	9,7	1.55	3	23,22	16	6
10	0,2	0,6	0,2	76	2,9	73	13,45	1.71	3.69	13,96	9	7
11	0,2	0,8	0	72,5	5,15	67	27,17	4.33	11.46	9,33	7	8
12	0,4	0	0,6	76,5	3,83	95	20,95	4.23	12.44	11,76	7	7,5
13	0,4	0,2	0,4	78	2,5	100	10,91	0.8	1.7	18,97	13	7
14	0,4	0,4	0,2	78	2,98	90	9,9	1.91	3.25	16,7	11	6,5
15	0,4	0,6	0	77	3,42	82	15,23	2.3	5.5	12,04	8	8
16	0,6	0	0,4	68	4,8	37	16,7	2.92	6.09	7,54	6	8,5
17	0,6	0,2	0,2	73	4,82	78	18,05	2.4	5.44	10,57	8	8
18	0,6	0,4	0	75,5	3,61	90	16,3	1.9	4.17	18,06	14	6,5
19	0,8	0	0,2	64	4,76	17	19,48	2.61	5.83	14,21	10	8
20	0,8	0,2	0	68	3,51	55	16,45	2.4	5.4	19,44	15	7
21	1	0	0	59	6,08	0	25,13	5.6	15.82	13,36	11	7,5

Tableau 3. 8 Résultats des essais rhéologiques et à l'état durci

N°	Combinaison Des sables			τ_{BM} (Pa)	μ_{BM} (Pa.s)	Rt-7j (MPa)	Rt-14j (MPa)	Rt-28j (MPa)	Rc-7j (MPa)	Rc-14j (MPa)	Rc-28j (MPa)
	SD	SC	SR								
1	0	0	1	66.186	0.456	4.72	5.54	5.81	46.96	56.4	63.21
2	0	0,2	0,8	62.68	1.002	4.89	5.19	5.74	48.73	59.04	65
3	0	0,4	0,6	49.297	0.01	4.73	5.2	5.63	51.65	61.24	67.6
4	0	0,6	0,4	56.887	1.006	4.49	5.07	5.29	49.33	58.42	63.32
5	0	0,8	0,2	76.676	5.801	4.65	4.88	5.38	53.24	60.64	64.41
6	0	1	0	99.208	6.914	5.11	5.53	5.98	55.64	61.38	66.07
7	0,2	0	0,8	44.659	1.294	4.38	4.77	5.31	49.54	56.76	61.45
8	0,2	0,2	0,6	28.93	0.275	4.8	5.15	5.42	51.13	58.44	62.63
9	0,2	0,4	0,4	62.98	0.89	4.4	4.87	5.34	51.89	61.41	66.4
10	0,2	0,6	0,2	58.592	3.52	4.66	5.07	5.54	54.68	57.24	66.34
11	0,2	0,8	0	85.052	5.983	4.83	5.19	5.55	57.24	62.83	67.96
12	0,4	0	0,6	60.893	6.471	3.97	4.39	4.67	46.64	54.29	60.43
13	0,4	0,2	0,4	47.019	0.362	4.43	4.93	5.37	48.23	56.12	63.7
14	0,4	0,4	0,2	46.473	2.547	4.02	4.27	4.49	50.14	55.37	61.91
15	0,4	0,6	0	41.344	4.622	4.11	4.34	4.67	51.98	57.3	63.16
16	0,6	0	0,4	63.867	6.754	4.31	4.72	4.92	41.41	49.85	56.53
17	0,6	0,2	0,2	76.685	4.483	4.32	4.36	4.51	43.23	52.32	60.31
18	0,6	0,4	0	32.813	2.236	3.86	4.39	4.55	44.73	57.73	62.68
19	0,8	0	0,2	119.371	3.745	3.47	3.62	3.86	38.15	47.65	55.82
20	0,8	0,2	0	75.38	1.342	4.08	4.56	4.46	40.35	49.69	58.6
21	1	0	0	124.118	5.97	3.7	3.79	4.15	35.75	46.85	51.51

Tableau 3. 9 Coefficients et paramètres des modèles des essais empiriques et de la stabilité statiques

Terme	Étalement (cm)		T ₅₀ (s)		L-Box (%)		V-Funnel (s)		T ₂₀ (s)		T ₄₀ (s)		Pi (%)		Pd (mm)		Km (cm)	
	R ² =0.95		R ² =0.87		R ² =0.89		R ² =0.82		R ² =0.77		R ² =0.76		R ² =0.77		R ² =0.72		R ² =0.79	
	P<0,0001		P<0,0001		P<0,0001		P<0,0001		P<0,0001		P<0,0001		P<0,0002		P<0,0002		P<0,0001	
	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value
SD	57,96	<0.0001	5,82	<0.0001	-3.04	0,7323	23,94	<0.0001	4,52	<0.0001	11,92	<0.0001	15,05	<0.0001	14,38	<0.0001	7,40	<0.0001
SC	67,90	<0.0001	5,66	<0.0001	38.62	0,0005	27,61	<0.0001	5,18	<0.0001	15,83	<0.0001	6,42	0.0235	4,86	0,0307	8,54	<0.0001
SA	77,55	<0.0001	2,22	<0.0001	99.21	<0.0001	8,36	0,0001	1,02	0,0682	2,52	0,1482	23,20	<0.0001	19,5	<0.0001	4,37	<0.0001
SD*SC	51,86	<0.0001	-8,85	<0.0001	279.46	<0.0001	-38,1	0,002	-10,75	0,0007	-36,98	0,0004	17,32	0,1233	-38,39	0,0016	-2,83	0,2829
SD*SA	20,61	0.0001	-	-	75.30	0,0565	-	-	-	-	-	-	-30,10	0,0125	-	-	8,26	0,0053
SA*SC	20,09	0.001	-7,01	0.0005	79.17	0,0462	-41,9	0,0007	-9,24	0,0024	-31,46	0,0014	39,72	0,002	28,27	0,0131	-6,62	0,0197

Tableau 3. 10 Coefficients et paramètres des modèles des essais rhéologiques et à l'état durci

Terme	τ_{MB} (Pa)		μ_{MB} (Pa.S)		Rt-7j (MPa)		Rt-14j (MPa)		Rt-28j (MPa)		Rc-7j (MPa)		Rc-14j (MPa)		Rc-28j (MPa)	
	R ² =0.78		R ² =0.71		R ² =0.73		R ² =0.74		R ² =0.81		R ² =0.92		R ² =0.89		R ² =0.89	
	P<0,0002		P<0,001		P<0,0001		P<0,0001		P<0,0001		P<0,0001		P<0,0001		P<0,0001	
	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value
SD	129,26	<0.0001	4,80	0,0013	3,58	<0.0001	3,76	<0.0001	3,88	<0.0001	33,16	<0.0001	45,79	<0.0001	4.80	51,9079
SC	105,82	<0.0001	8,48	<0.0001	4,91	<0.0001	5,35	<0.0001	5,76	<0.0001	56,35	<0.0001	61,29	<0.0001	8.48	65,4614
SA	58,18	<0.0001	0,48	0,6996	4,75	<0.0001	5,35	<0.0001	5,78	<0.0001	48,25	<0.0001	58,33	<0.0001	0.48	63,5507
SD*SC	-282,05	<0.0001	-15,29	0,0089	-	-	-	-	-	-	19,84	0,0056	14,91	0,0193	-15.3	21,1384
SD*SA	-104,96	0,0367	8,78	0,1053	-	-	-	-	-	-	17,21	0,01327	-	-	8.78	4,8705
SA*SC	-94,21	0,0573	-15,40	0,0085	-0,54	0.5016	-0,98	0.3046	-0,95	0.3103	-3,95	0,5289	1,57	0,7883	-15.4	4,4196

3.3.1 Influence des sables sur l'étalement et la capacité de remplissage

Les diagrammes ternaires montrés dans les figures 3.27 et 3.28 illustrent les résultats des essais d'étalement et la capacité de remplissage par la boîte en L (rapport H2/H1) en fonction des combinaisons des sables SA, SD et SC.

Les résultats d'étalement montrent que l'augmentation de pourcentage de sable alluvionnaire dans les systèmes binaires SA-SD et SA-SC et le système ternaire SA-SC-SD (jusqu'à 30%) contribue à améliorer l'ouvrabilité du BAP. La valeur d'étalement la plus élevée (79 cm) a été obtenue pour une proportion de 60% de SA, 30% de SC et 10% de SD. En supposant que tous les paramètres de formulation des mélanges sont maintenus constants (à l'exception des proportions de sable). L'amélioration de l'ouvrabilité peut être expliquée par l'obtention d'un empilement plus dense des particules de sable qui se traduit par un excès de pâte gagnée pour la lubrification des grains solides du mélange.

D'après la figure 3.28 on constate que les mélanges composés de plus de 65% de SA dans un système binaire SA-SD et plus de 35% dans un système binaire SA-SC, conduisent à un rapport H2/H1 supérieur à 80% (la limite exigée par EFNARC (2002)). Des résultats similaires sur l'effet de SA, SC et SD dans les systèmes binaires et ternaires ont été rapportés par (Rmili *et al.*, 2009) (Bouziani, 2013) (Bouziani *et al.*, 2012).

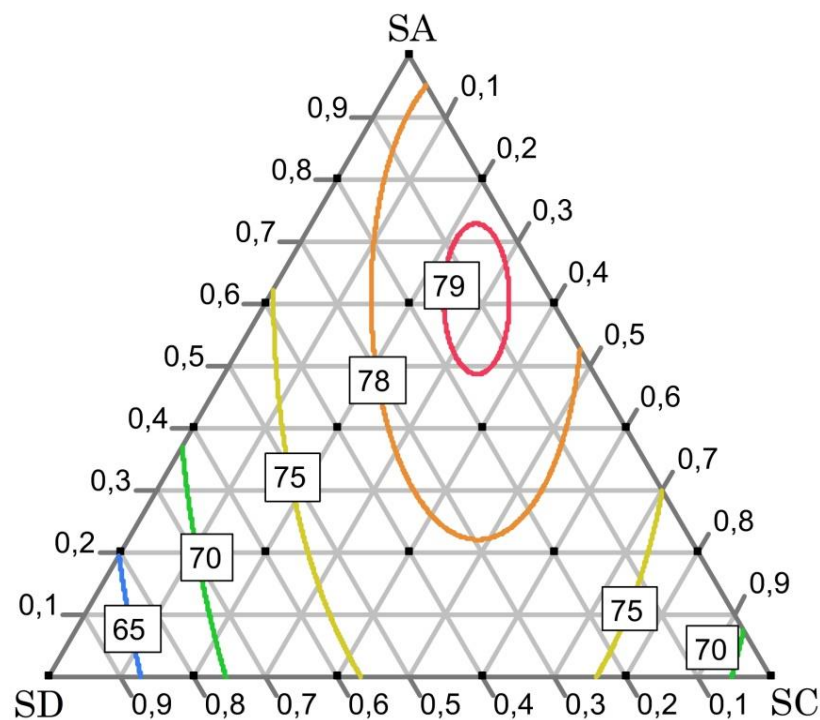


Figure 3. 27 Diagramme ternaire de l'étalement (cm) en fonction du type de sable

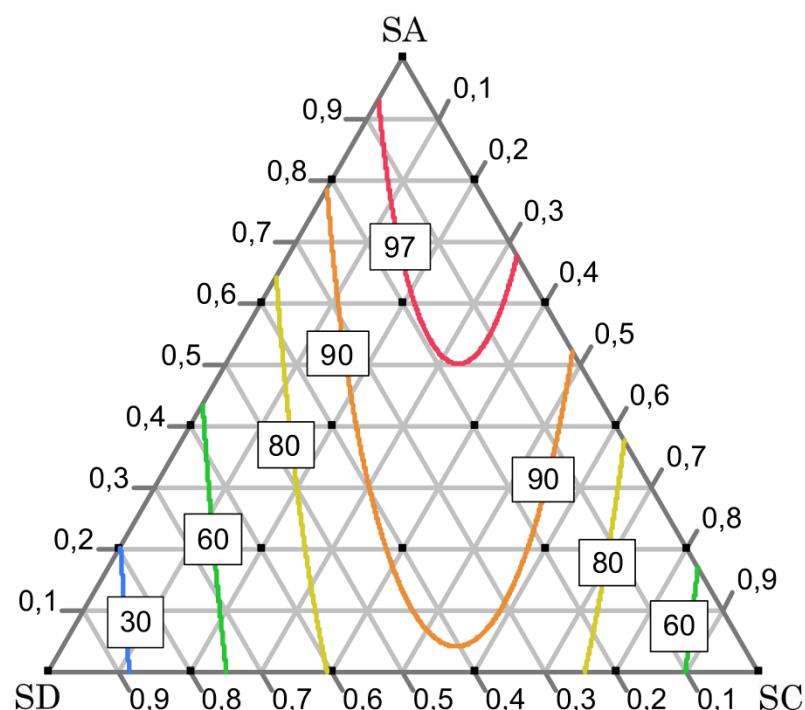


Figure 3. 28 Diagramme ternaire du rapport H2/H1 (%) en fonction du type de sable

3.3.2 Influence des sables sur le temps d'écoulement

Les diagrammes illustrés dans les figures de 3.29 à 3.32 représentent la variation de T50, V-funnel, T20 et T40 en fonction des combinaisons des sables utilisés.

On observe d'après ces figures que les temps d'écoulement augmentent avec l'augmentation des proportions de SD. Cela est dû au mauvais empilement causé par la nature homo métrique des sables dunaires (Douara et Guettala, 2017). De plus, les sables de dune possèdent un faible module de finesse ce qui demande une grande quantité d'eau pour mouiller la surface des particules (Benabed, 2014) (Bouziani, 2012).

On constate aussi que l'augmentation de la proportion de SC engendre une augmentation des temps d'écoulement, ceci est expliqué par le fait que le sable concassé possède une quantité de fines importante et un coefficient d'absorption élevé (4.75%) ce qui demande aussi une quantité d'eau importante (Benabed, 2014) .

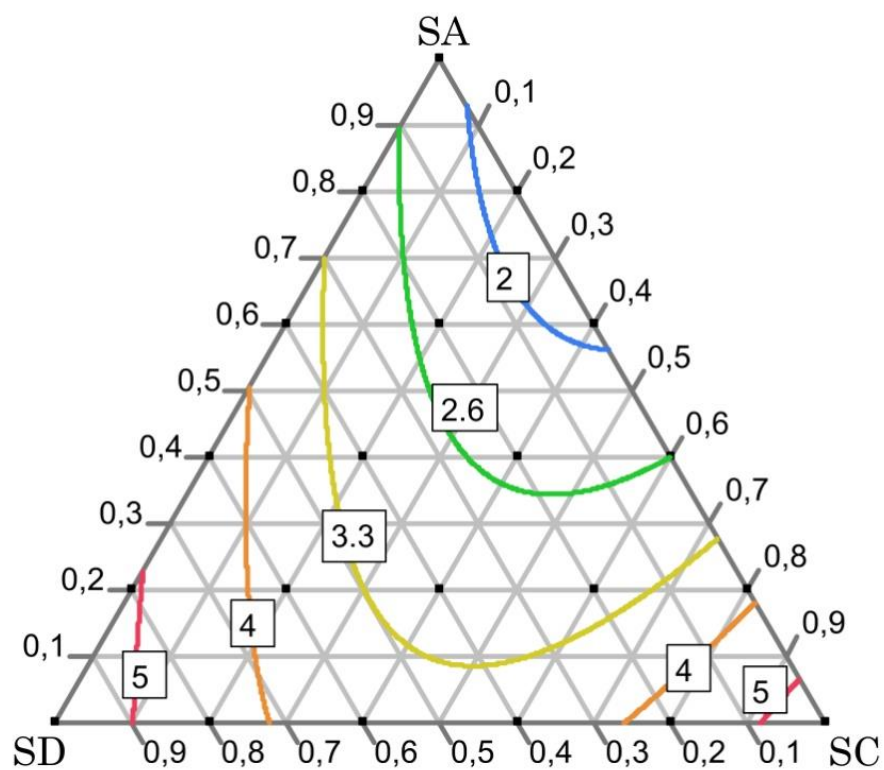


Figure 3. 29 Diagramme ternaire de T50 (s)
en fonction du type de sable

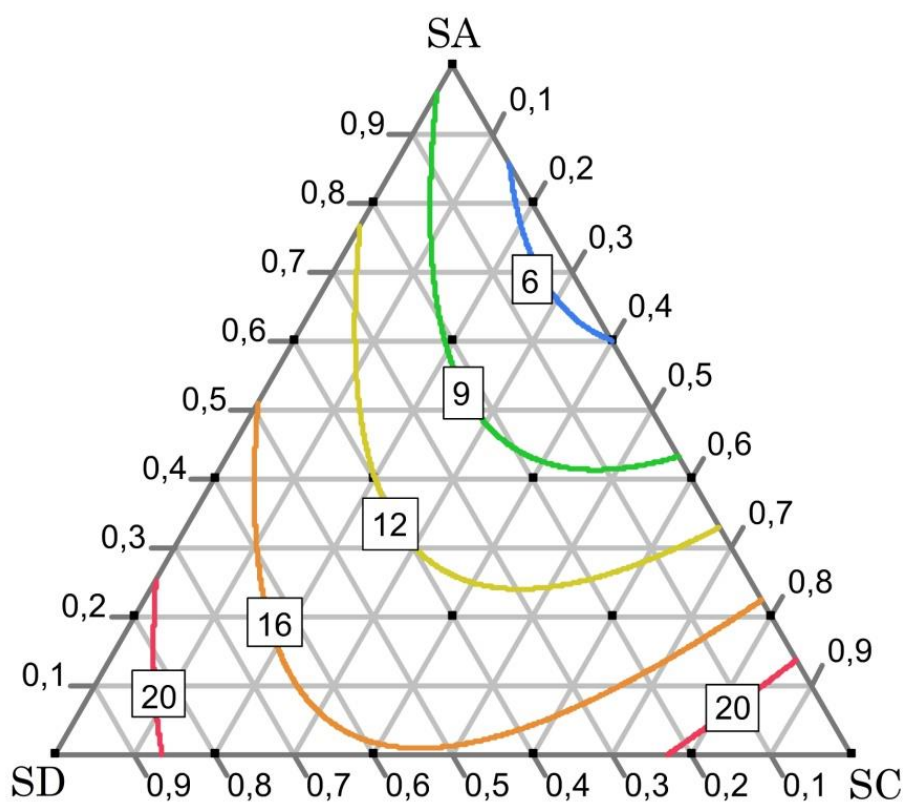


Figure 3. 30 Diagramme ternaire de V-Funnel (s)
en fonction du type de sable

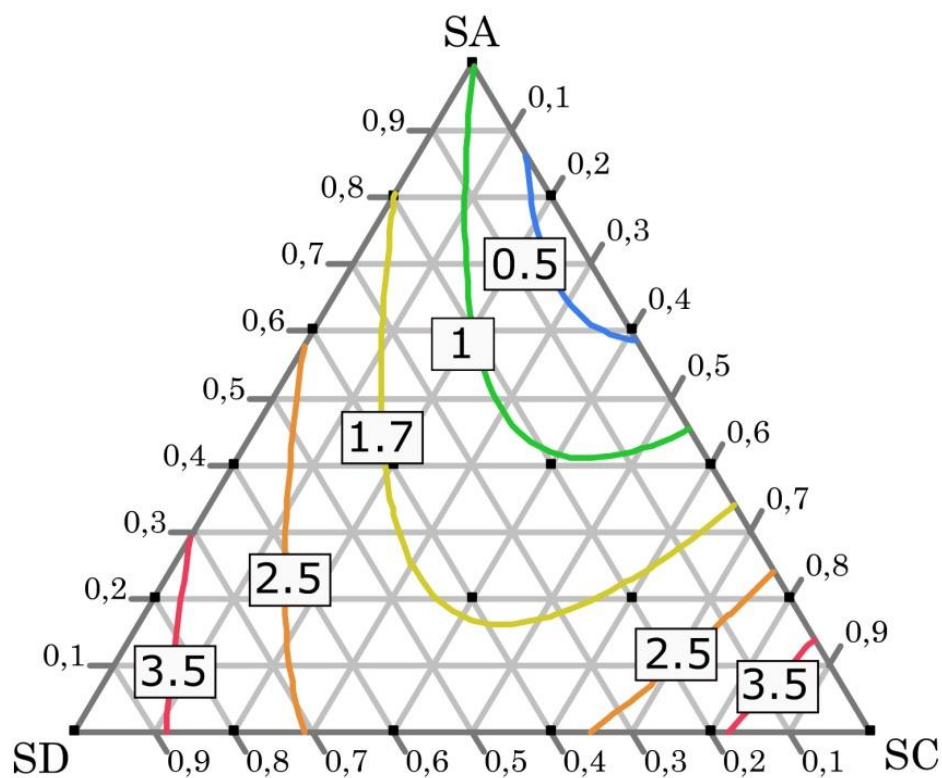


Figure 3. 31 Diagramme ternaire de T20 (s)
en fonction du type de sable

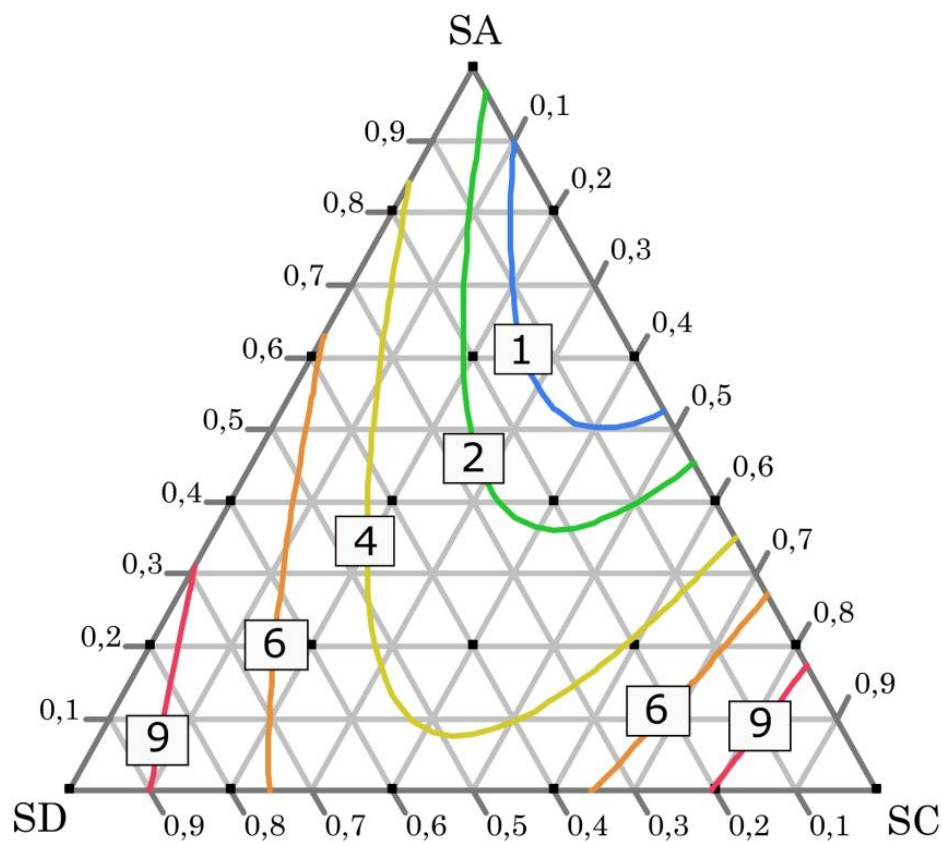


Figure 3. 32 Diagramme ternaire de T40 (s)
en fonction du type de sable

3.3.3 Influence des sables sur la variation du seuil de cisaillement

Le diagramme ternaire illustré dans la figure 3.33 représente la variation des seuils de cisaillement tirés du modèle Bingham modifié en fonction des combinaisons des sables SA, SD et SC.

Les résultats obtenus montrent que l'introduction de sable alluvionnaire dans les systèmes binaires SA-SD et SA-SC ainsi que le système ternaire SA-SD-SC conduit à une diminution du seuil de cisaillement. Une valeur minimale du τ_{BM} (environ 44 Pa) a été obtenue pour des mélanges contenant 30% de SA, 30% de SD et 40% de SC. La diminution du seuil pour cette combinaison est due au fait que les sables SA, SD et SC possèdent des granularités différentes, ce qui donne des bétons plus compacts et engendre un faible seuil de cisaillement (Benabed, 2014).

On peut également constater que les mélanges à base d'un seul type de sable (points au sommet du triangle équilatéral) sont caractérisés par les plus grands taux de cisaillement (par ordre SD, SC et SA).

Hu (2005) et Park et al (2018) ont constaté que les mélanges contenant des sables concassés amènent à des seuils de cisaillement élevés, ce qui engendre une fluidité moindre que celle obtenue en utilisant des sables alluvionnaires. Cette perte d'ouvrabilité est attribuée à la finesse importante et le coefficient d'absorption élevée du SC par rapport aux autres sables. En outre, la forme arrondie des sables alluvionnaires joue un rôle important dans son comportement rhéologique et lui confère plus de maniabilité, tandis que la forme angulaire de SC conduit à une augmentation des forces de frottement, ce qui nécessite une contrainte de cisaillement supplémentaire pour déclencher l'écoulement (Mindess *et al.*, 2003).

Dans le cas des sables de dune, et malgré qu'ils sont de forme roulée, ils amènent à des seuils plus élevés que ceux fournis par les sables alluvionnaires et concassés, et cela est dû aussi à sa granulométrie fine et sa forme homogène (Douara et Guettala, 2017) (Benabed, 2014).

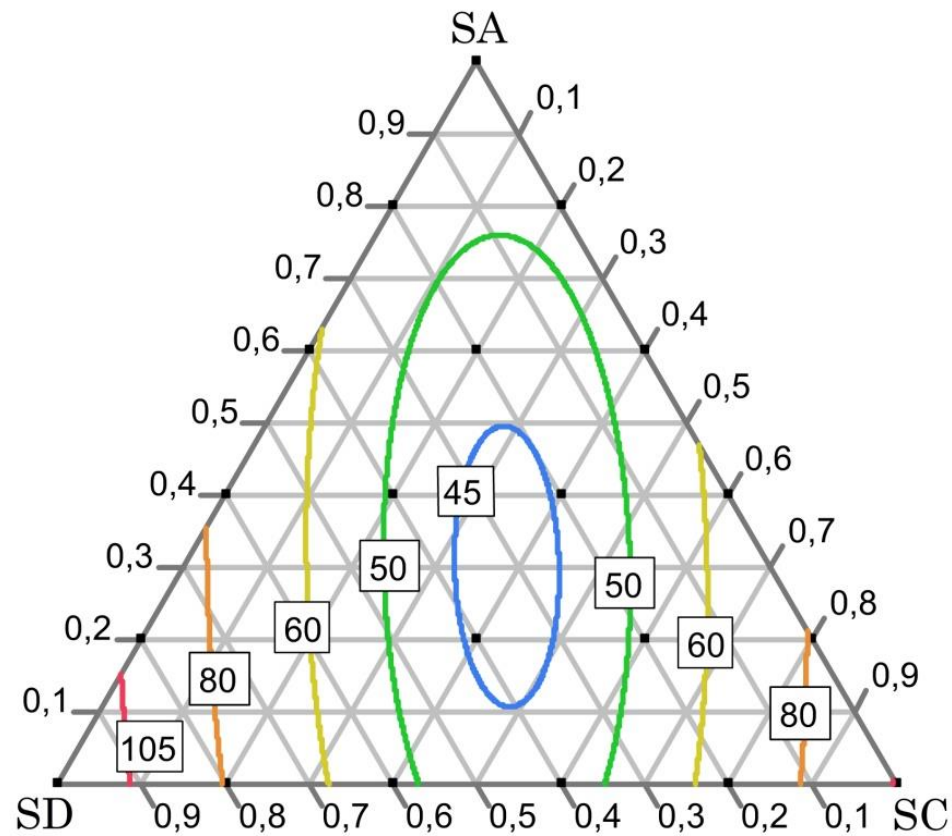


Figure 3. 33 Diagramme ternaire de τ_{BM} (Pa)
en fonction du type de sable

3.3.4 Influence des sables sur la variation de la viscosité plastique

Le diagramme illustré dans la figure 3.34 illustre la variation des viscosités plastiques issues du modèle de Bingham modifié μ_{BM} en fonction des combinaisons des sables utilisés. On observe que la viscosité plastique augmente avec l'augmentation des proportions de SD et SC.

Ce constat est dû aussi à l'augmentation de la finesse et de la surface spécifique ainsi que le mauvais empilement granulaire des sables de dune et l'angularité des grains du sable concassé, ce qui engendre plus de frictions intergranulaires (Douara et Guettala, 2017) (Benabed *et al.*, 2012).

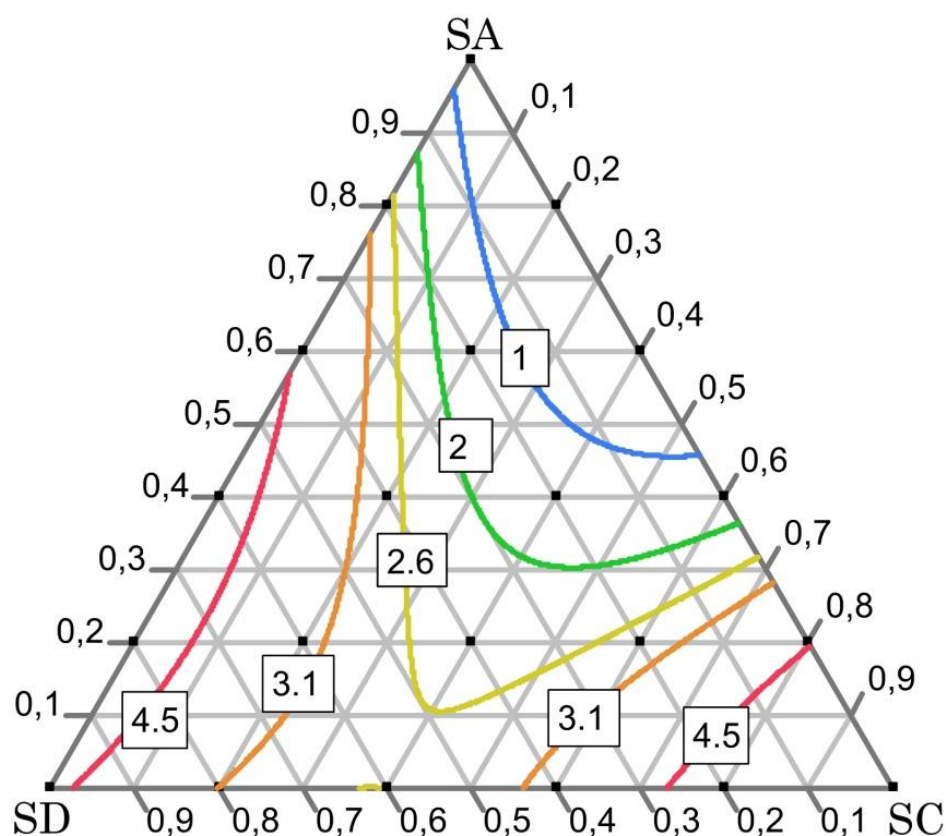


Figure 3. 34 Diagramme ternaire de μ_{BM} (Pa.s) en fonction du type de sable

3.3.5 Influence des sables sur la stabilité statique

Les résultats des essais de la stabilité au tamis, la stabilité au cylindre et le K-Slump modifié ont été représentés par les figures 3.35, 3.36 et 3.37 en fonction des combinaisons des sables SA, SD et SC.

D'après ces résultats, on remarque que les mélanges composés de plus de 80% de SC dans un système binaire SA-SC présentent une stabilité au tamis inférieure à 15% et une stabilité au cylindre inférieure à 10 mm, ça nous montre que le sable concassé a un effet bénéfique sur la résistance à la ségrégation des BAP.

Cette amélioration est attribuée, d'une part, à la forme angulaire des sables concassés qui favorise l'enchevêtrement des gros granulats (Douara et Guettala, 2017) et, d'autre part, à l'augmentation de volume de pâte grâce à l'existence de fines dans le sable de concassage (Felekoğlu, 2008) (Benabed *et al.*, 2012) (Bouziani, 2013) (Nécira *et al.*, 2017).

Les résultats montrent aussi que les valeurs P_i et P_d diminuent en fonction de l'augmentation des proportions de SD dans les systèmes binaires SA-SD (correspond à des proportions SD de l'ordre de 0,65 et 0,55 pour P_i et P_d respectivement) puis augmentent de nouveau. Cela est dû au fait que les granulats du sable SD occupent l'espace entre les granulats du sable SA, ce qui permet de réduire le risque de ségrégation. Une fois que les vides sont complètement remplis, les granulats SD commencent à occuper la place des granulats SA, ce qui induit une mauvaise distribution granulaire qui influe à son tour la stabilité du mélange.

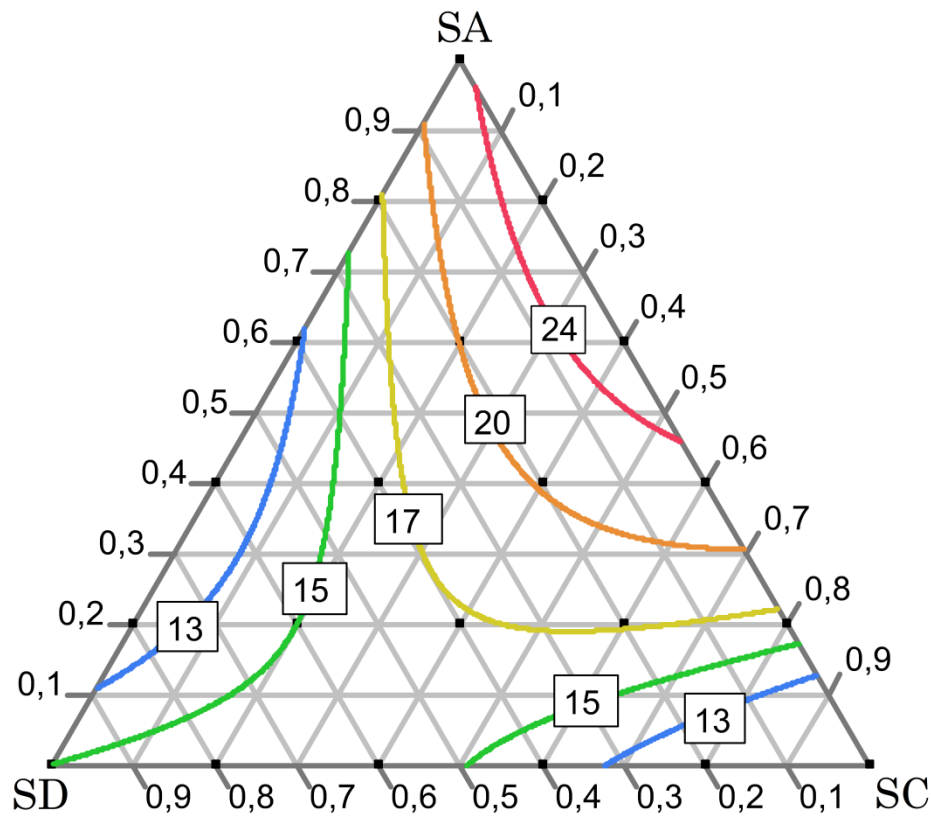


Figure 3. 35 Diagramme ternaire de P_i (%) en fonction du type de sable

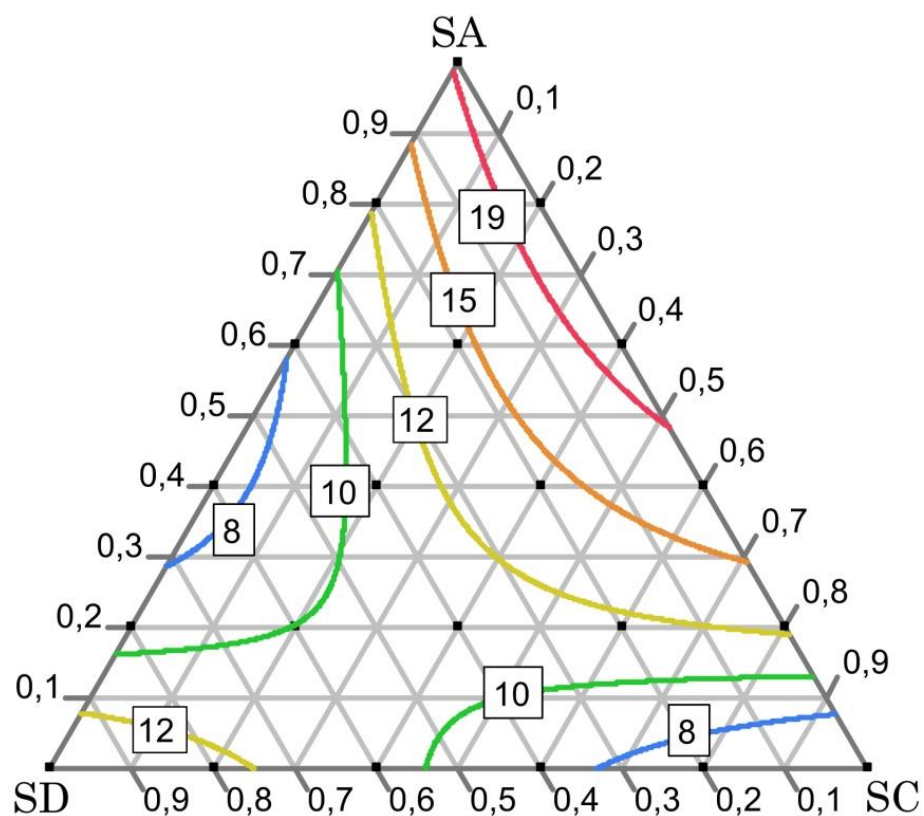


Figure 3. 36 Diagramme ternaire de Pd (mm)
en fonction du type de sable

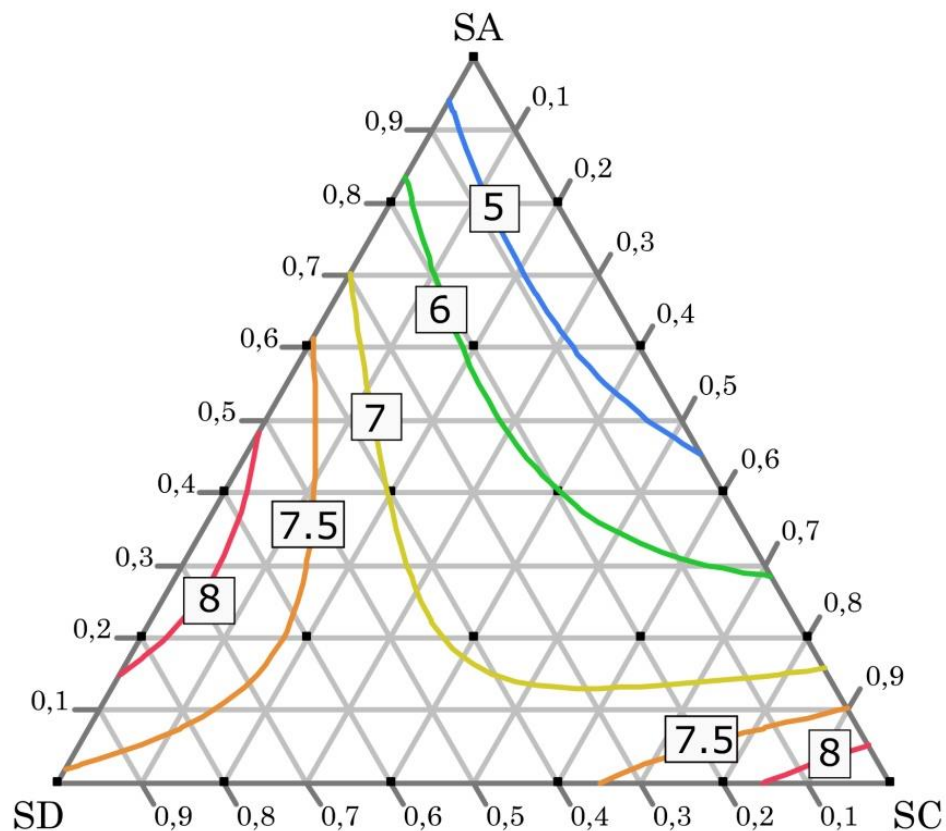


Figure 3. 37 Diagramme ternaire de km (cm)
en fonction du type de sable

3.3.6 Influence des sables sur la résistance à la traction

Les diagrammes ternaires montrés dans les figures 3.38, 3.39 et 3.40 présentent les résultats des essais de la résistance à la traction à 7, 14 et 28 jours.

On observe d'après ces figures que la résistance à la traction augmente avec l'augmentation des proportions de SA et SC, tandis que l'utilisation des sables de dune influe négativement sur le développement de la résistance à la traction des BAP. Ceci est dû à la bonne répartition granulométrique de SA ainsi que l'angularité, la quantité de fines importante et l'enchevêtrement des grains du sable concassé (Benabed, 2014) (R'mili *et al.*, 2009) (Achour, 2008) .

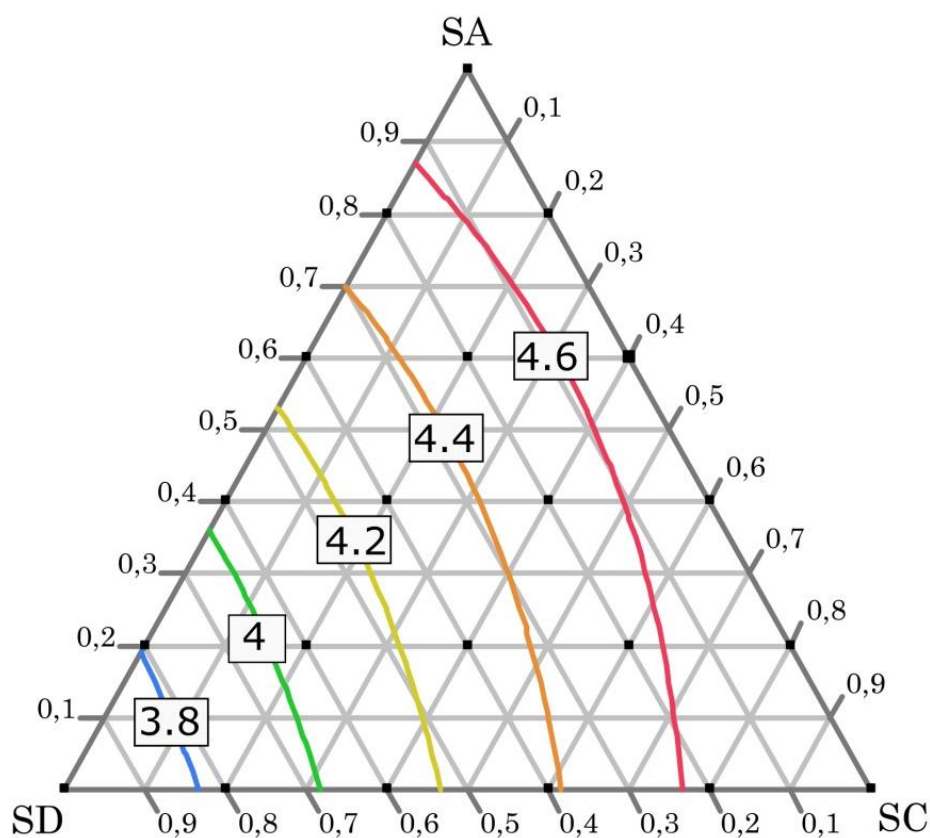


Figure 3. 38 Diagramme ternaire de Ft 7j (MPa)
en fonction du type de sable

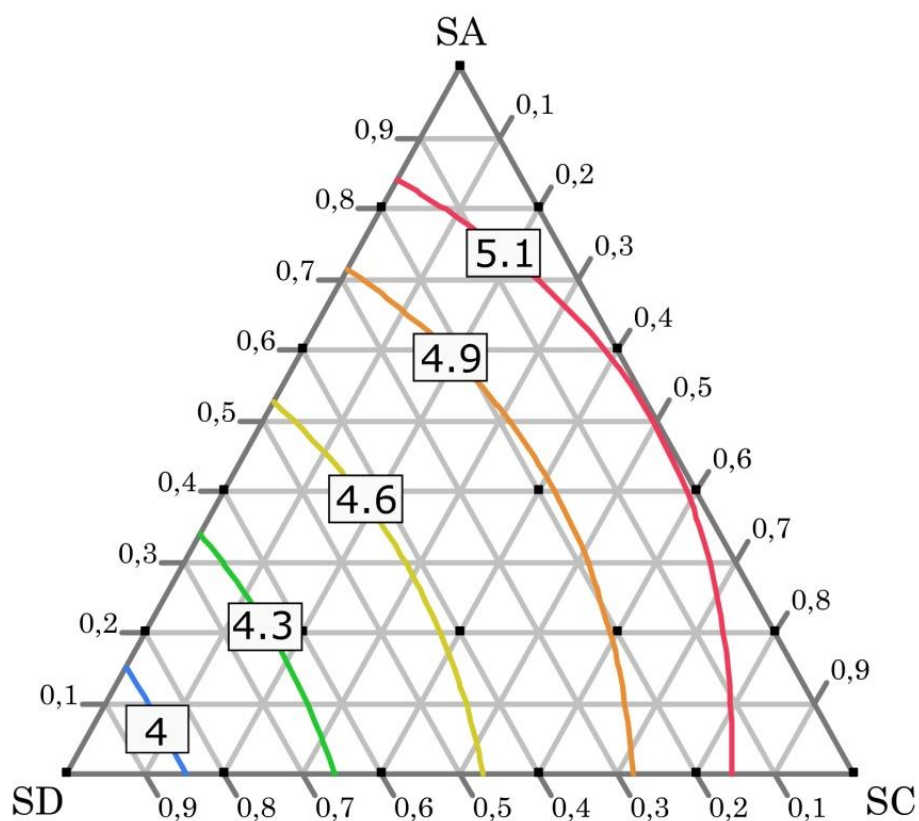


Figure 3. 39 Diagramme ternaire de Ft 14j (MPa)
en fonction du type de sable

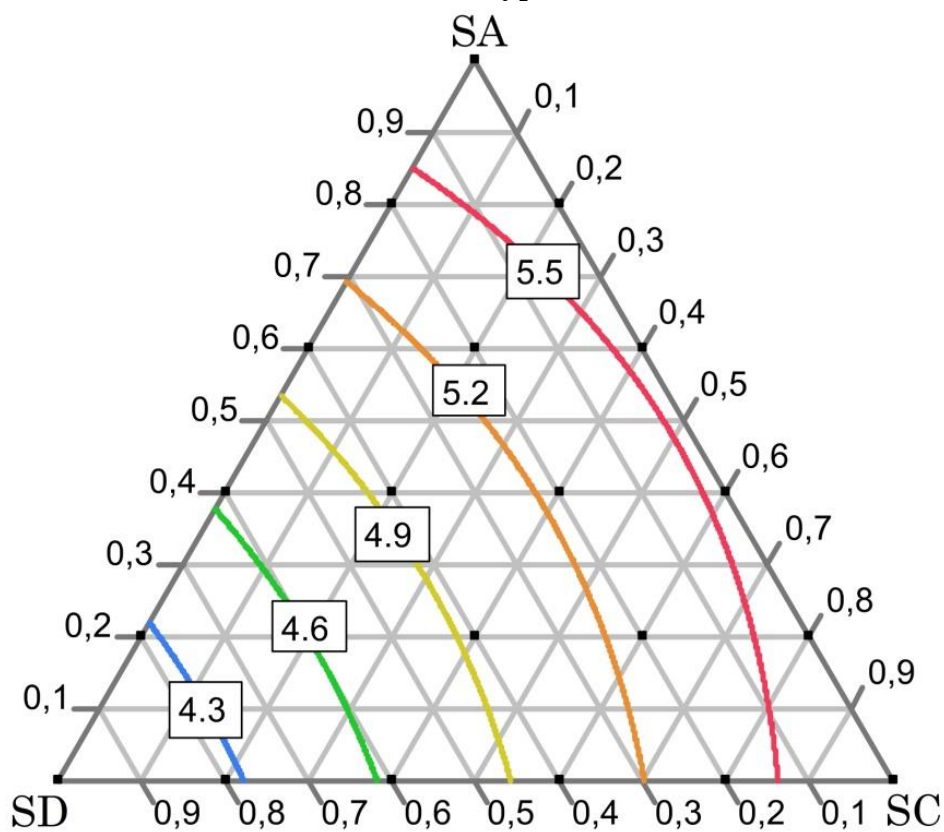


Figure 3. 40 Diagramme ternaire de Ft 28j (MPa)
en fonction du type de sable

3.3.7 Influence des sables sur la résistance à la compression

Les figures 3.41, 3.42 et 3.43 montrent les courbes ternaires de la résistance mécanique en termes de compression mesurée à 7, 14 et 28 jours. Il est remarquable que l'augmentation des proportions de SA et SC dans les systèmes binaires et ternaires donne des résistances à la compression supérieures à ceux contenant une forte teneur en SD.

On remarque aussi que les mélanges contenant des teneurs élevées en SC présentent les meilleures résistances. Cela signifie que les BAP fabriqués avec du sable concassé possèdent une bonne liaison entre les particules de sable et la pâte de ciment hydratée par rapport à ceux préparés avec SA et SD en raison de la texture rugueuse des grains SC tandis que les sables alluvionnaires et dunaires sont de forme arrondie (Bouziani, 2013) (Rmili *et al.*, 2009) (Aissoun *et al.*, 2016).

D'autre part, les mélanges contenant du sable alluvionnaire ont des résistances supérieures par rapport à ceux contenant du sable dunaire et cela est dû à la granulométrie continue de SA tandis que le sable de dune possède une granulométrie fine et une porosité élevée (Benabed, 2014).

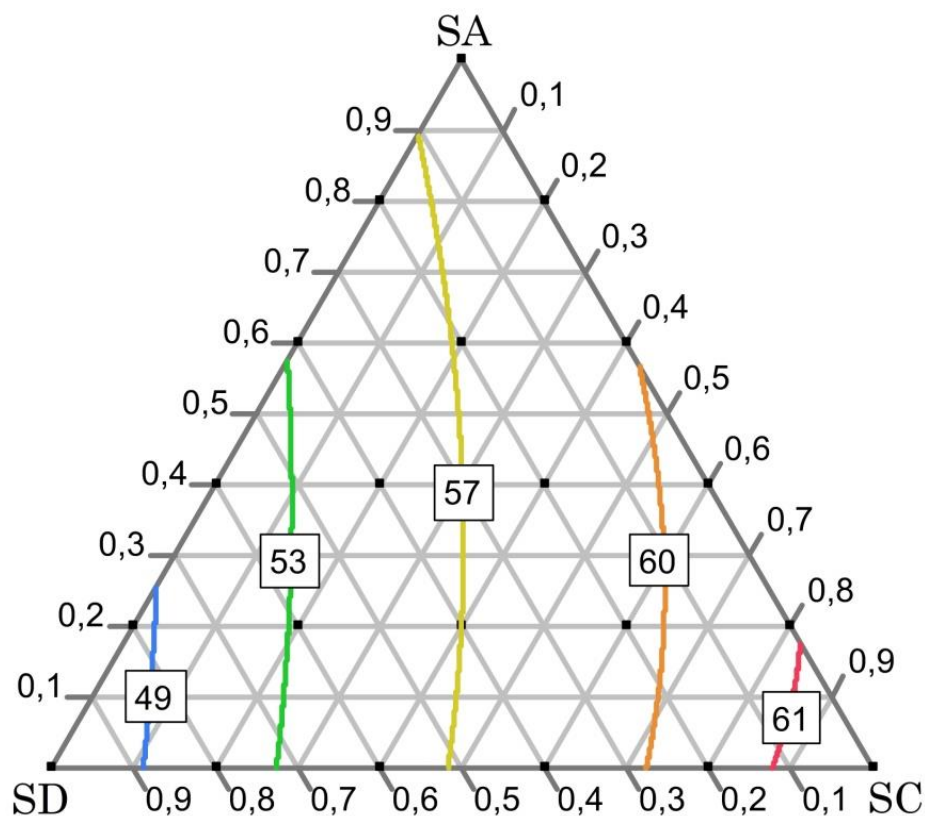


Figure 3. 41 Diagramme ternaire de F_c 7j (MPa) en fonction du type de sable

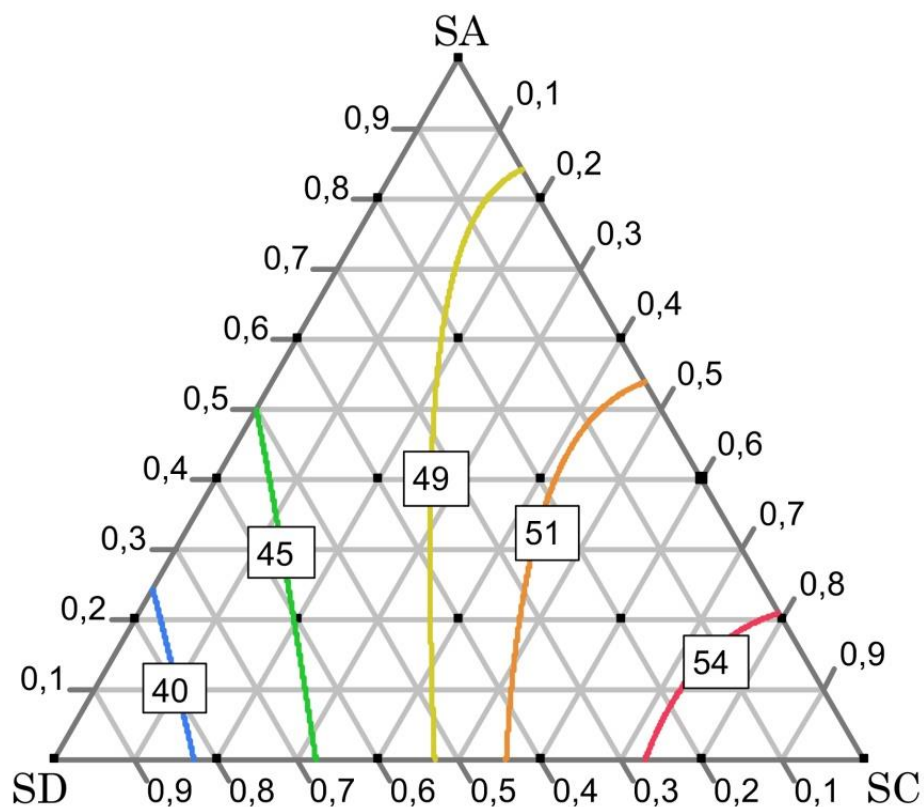


Figure 3. 42 Diagramme ternaire de F_c 14j (MPa)
en fonction du type de sable

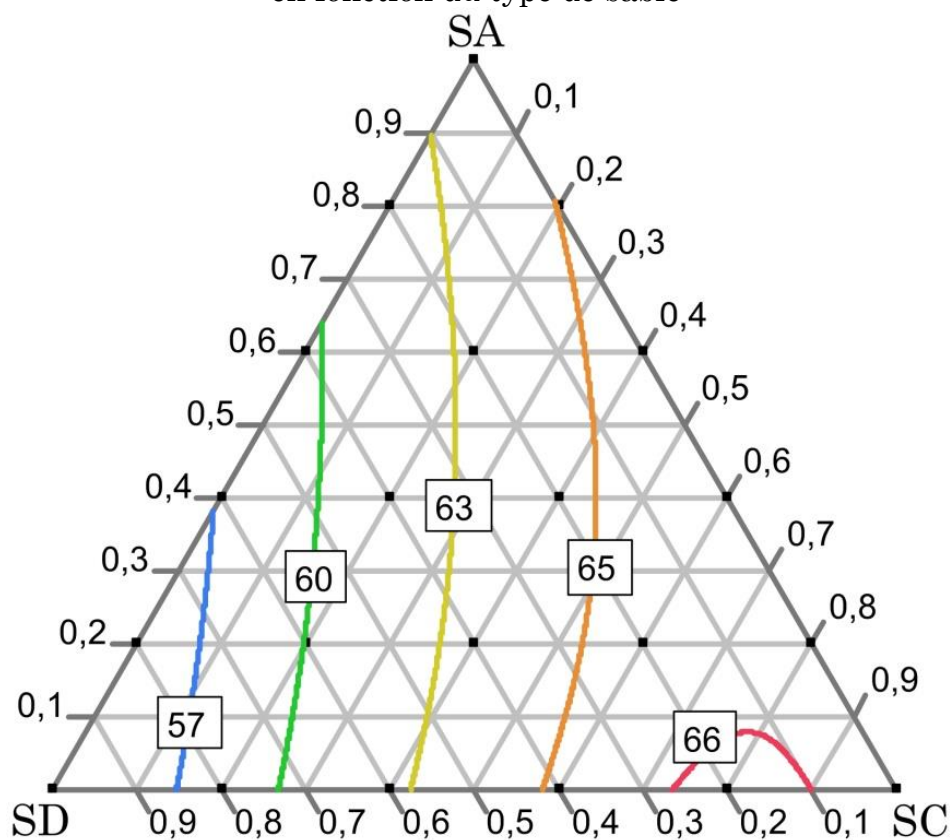


Figure 3. 43 Diagramme ternaire de F_c 28j (MPa)
en fonction du type de sable

3.3.8 Corrélations entre les paramètres rhéologiques et les essais empiriques

L'établissement des corrélations entre les grandeurs rhéologiques mesurées à l'aide d'un rhéomètre et les résultats des essais empiriques a fait l'objet de nombreux travaux de recherche, en particulier au cours des deux dernières décennies (Jiao *et al.*, 2017). Dans cette étude, les résultats des essais empiriques sont corrélés avec les paramètres rhéologiques obtenus à partir du modèle de Bingham modifié (τ_{BM} et μ_{BM}).

Actuellement, il est bien connu qu'il existe une bonne corrélation entre les valeurs des seuils de cisaillement tirés des modèles rhéologiques existants et les résultats des essais empiriques tels que l'essai d'étalement et la capacité de remplissage par la boîte en L (Taleb *et al.*, 2017) (Boukhelkhal *et al.*, 2016) (González-Taboada *et al.*, 2017).

Dans notre cas et d'après les figures 3.44 et 3.45 on observe une bonne corrélation linéaire entre le seuil de cisaillement du modèle de Bingham modifié d'une part et les résultats d'étalement et le taux de remplissage de la boîte en L d'autre part, avec des coefficients de détermination acceptables.

Ces résultats montrent que la diminution du seuil de cisaillement apporte une amélioration de la fluidité et la capacité de passage et de remplissage des BAP. On peut également observer que l'étalement et le rapport H2/H1 diminuent avec l'augmentation des proportions de SD et SC qui génèrent des contraintes de cisaillement élevées dû à la finesse importante de SD et l'angularité des grains du SD.

Pour les mélanges à haute teneur en RS, on observe une amélioration de l'étalement et de la capacité de passage. Ce qui confirme que le sable alluvionnaire apporte un effet bénéfique à la rhéologie des BAP dû à sa granulométrie continue, ce qui permet d'améliorer l'empilement du squelette granulaire et offre au mélange une meilleure fluidité et une bonne capacité de passage.

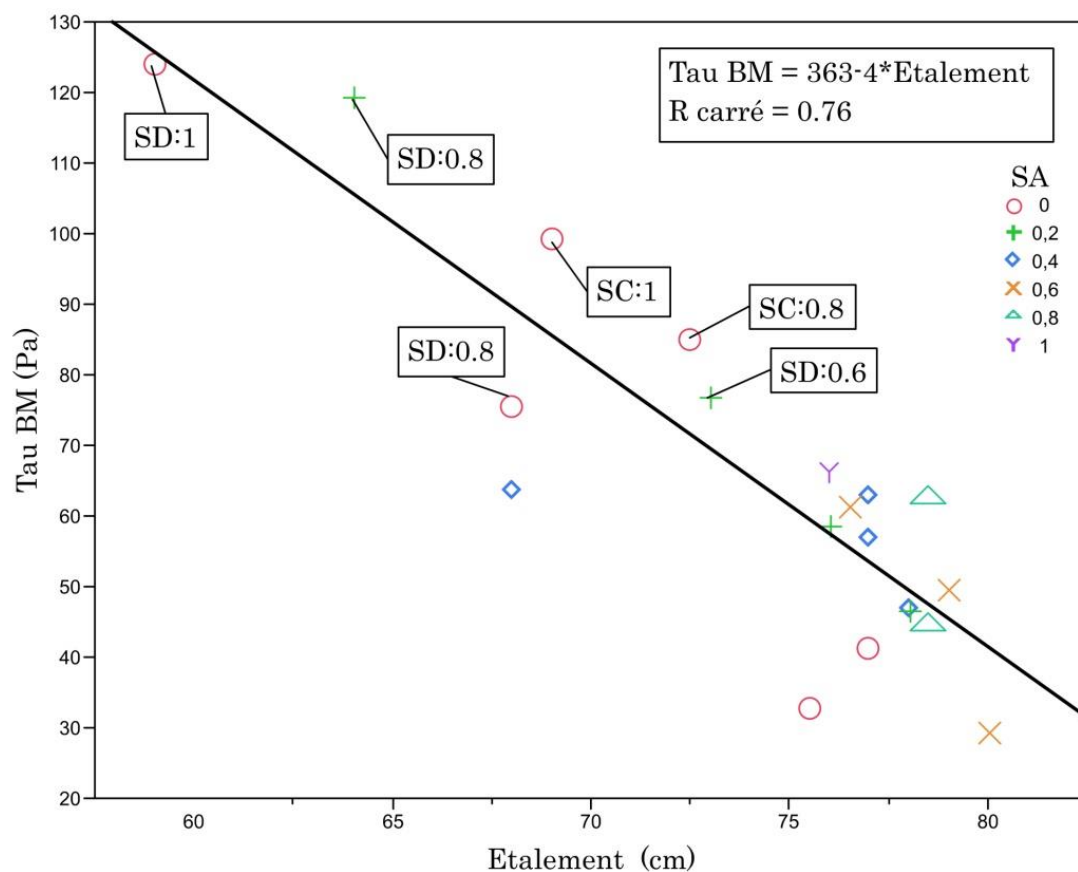


Figure 3. 44 Relation entre τ_{BM} et l'étalement

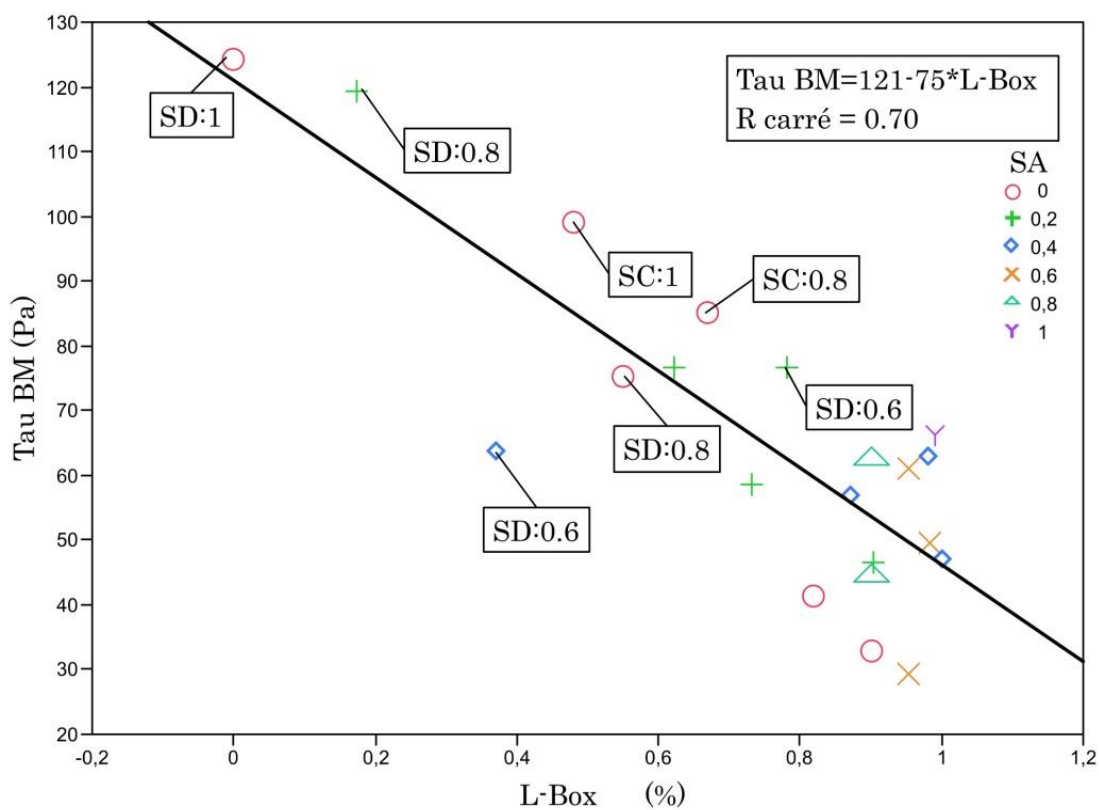


Figure 3. 45 Relation entre τ_{BM} et L-Box

Dans les figures 3.46 et 3.47, la viscosité plastique (μ_{MB}) est corrélée avec l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel) et le temps d'écoulement T50 respectivement.

On remarque selon les résultats obtenus que les mélanges à haute teneur en SA présentent une faible viscosité plastique par rapport à ceux préparés avec SC et SD. Une teneur élevée en SD tend à augmenter la surface spécifique du mélange et par conséquent la diminution du volume de pâte nécessaire pour l'écoulement.

D'autre part, la teneur élevée en SC fournit une quantité de fines supplémentaires et des frictions intergranulaires importantes en raison de la forme angulaire des particules SC. Des relations similaires ont été obtenues par autres chercheurs (Benabed *et al.*, 2012) (Benaicha *et al.*, 2016).

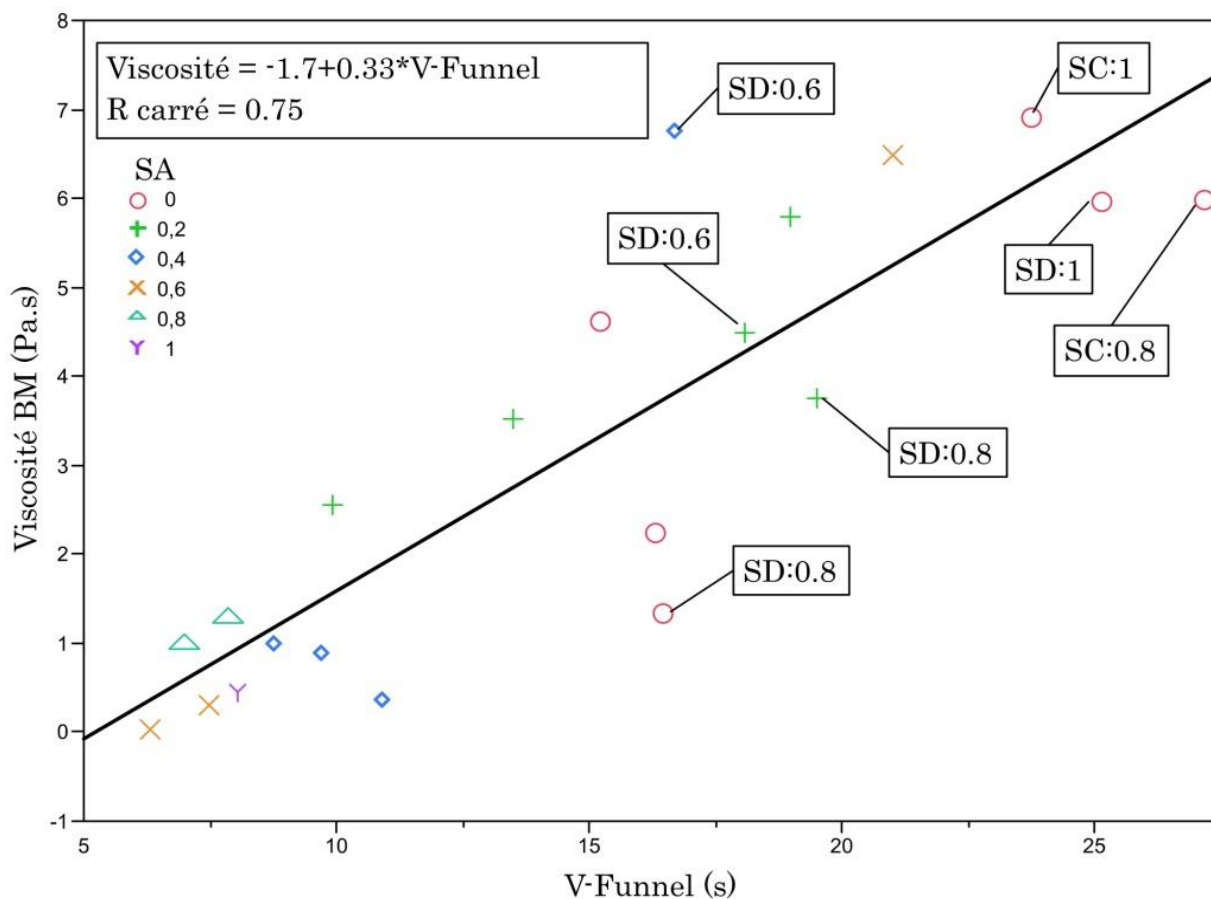
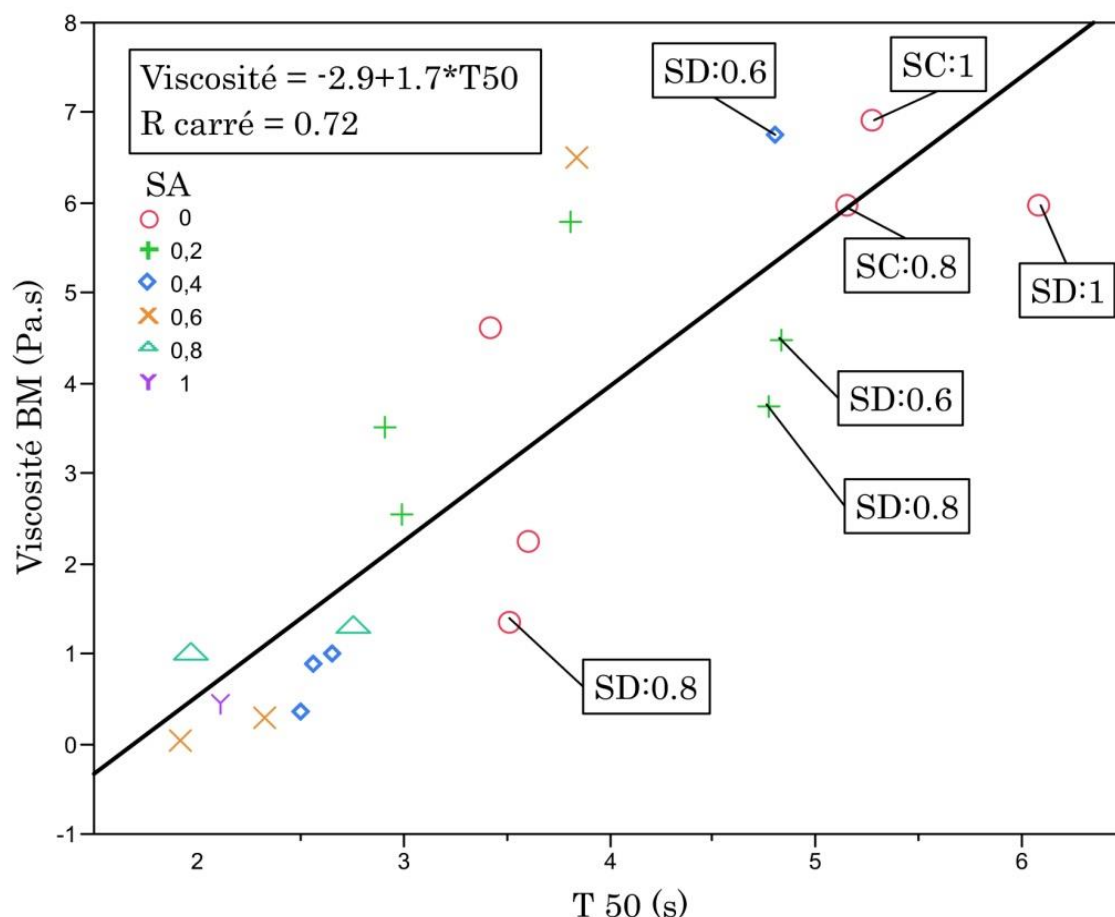


Figure 3. 46 Relation entre μ_{BM} et V-Funnel

Figure 3. 47 Relation entre la μ_{BM} et T_{50}

3.3.9 Corrélations entre la viscosité plastique et la stabilité statique

Afin de mieux comprendre la relation entre la viscosité plastique et la stabilité statique des BAP, une corrélation a été établie entre les valeurs de la viscosité plastique issue du modèle Bingham modifié et les résultats des essais de la stabilité au tamis (Figure 3.48) et de la stabilité au cylindre (Figure 3.49).

Ces résultats confirment qu'il existe une bonne corrélation entre la viscosité et la stabilité statique des BAP avec des coefficients de corrélation aussi importants.

D'autre part, l'augmentation de la teneur en SD et/ou en SC entraîne une augmentation significative de la viscosité plastique et de la stabilité statique des mélanges dus à la granulométrie fine du SD et l'angularité et le taux de fillers calcaires importants du SC, ce qui permet de réduire le risque de ségrégation (Benabed, 2014) (Long et al., 2017).

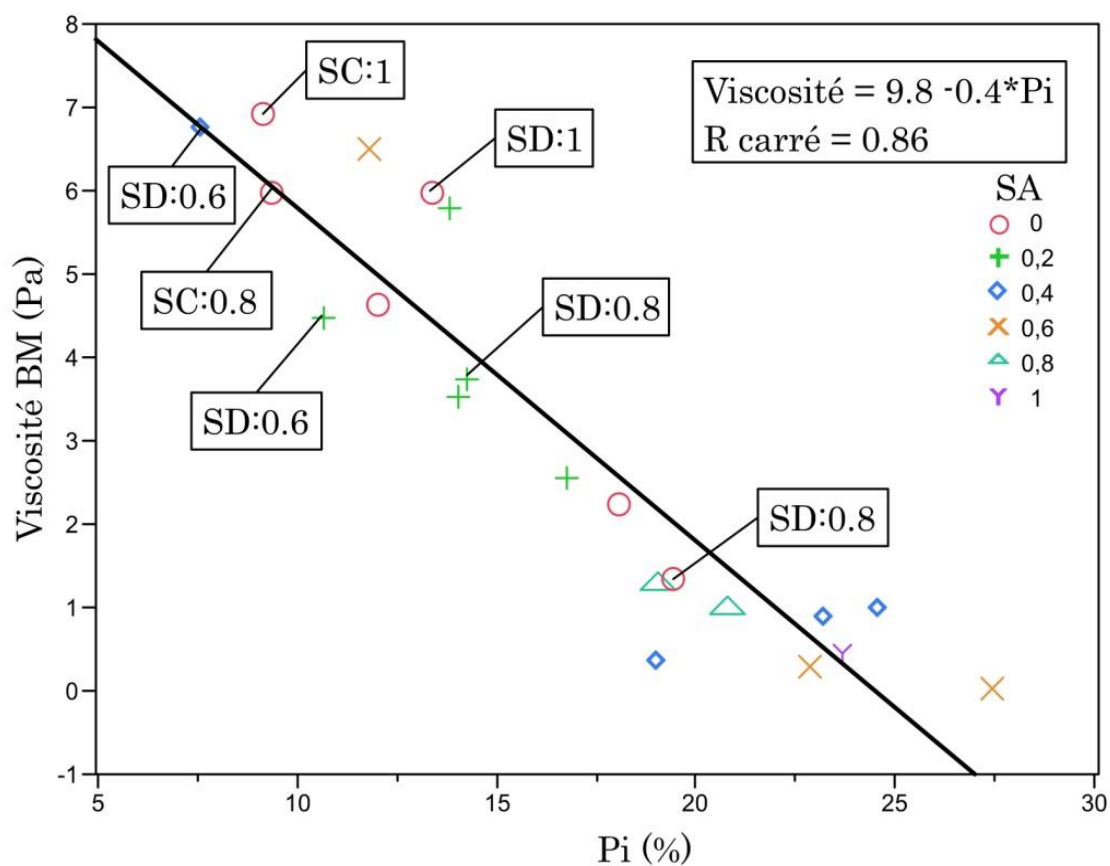


Figure 3. 48 Relation entre μ_{BM} et P_i

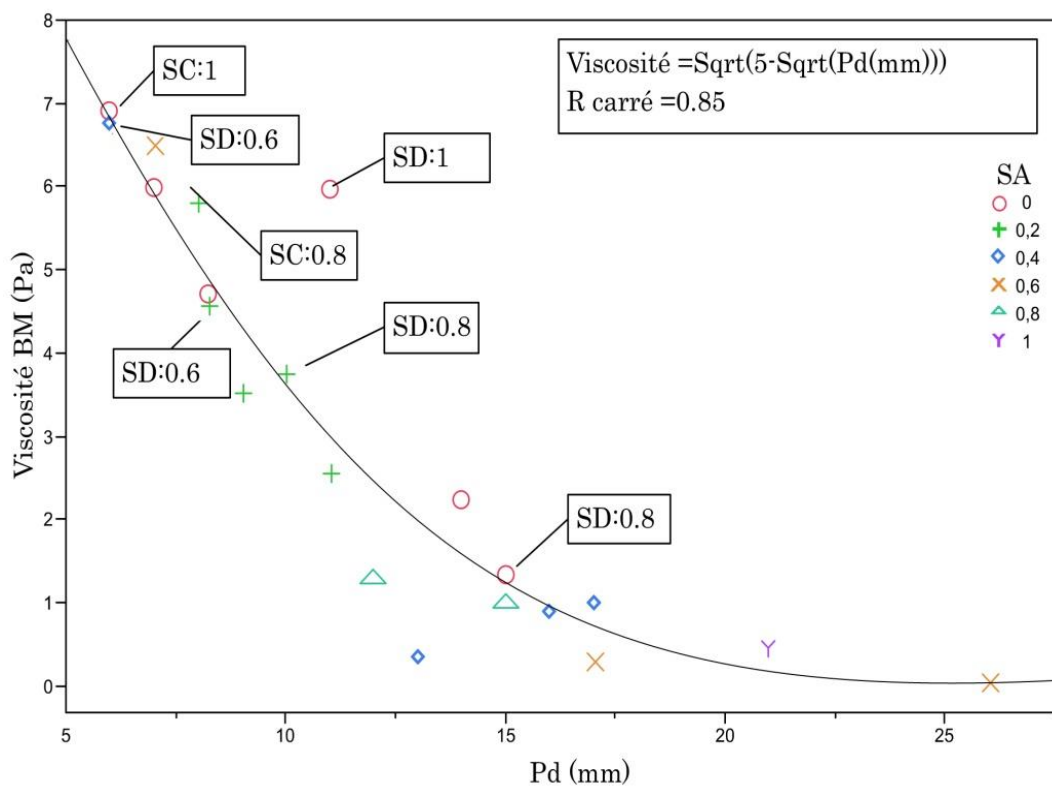


Figure 3. 49 Relation entre μ_{BM} et P_d

3.4 Conclusion

D'après ce qui a été présenté dans la première partie de cette étude qui consiste à étudier l'effet des paramètres de formulation sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et de la stabilité des BAP avec la proposition d'un nouveau test, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Le modèle Bingham se caractérise par le plus faible seuil de cisaillement et la viscosité plastique la plus élevée par rapport à ceux de Bingham modifié et Herschel Bulkley.
- Les contraintes de cisaillement et les viscosités plastiques de Bingham modifié sont intermédiaires entre celles des modèles de Bingham et Herschel-Bulkley.
- Une forte corrélation a été établie entre les contraintes de cisaillement du modèle de Bingham et celles de Bingham modifié et Herschel Bulkley, tandis qu'aucune relation n'a été trouvée entre ces dernières et les faibles contraintes de cisaillement obtenues avec le modèle de Bingham.
- Une corrélation modérée a été obtenue entre μ_{BM} et μ_B , tandis qu'une relation faible a été observée entre K_{HB} et μ_B .
- Les BAP confectionnés avec un rapport G/S proches de 1 sont caractérisés par les plus faibles seuils de cisaillement. D'autre part, l'augmentation du rapport G1/G2 entraîne une diminution des valeurs de τ_{BM} et τ_{HB} .
- L'augmentation des rapports G/S et G1/G2 entraîne une augmentation de la viscosité (μ_{BM} et K_{HB} augmentent). En parallèle, les valeurs TVR diminuent ce qui se traduit par une augmentation de la résistance à la ségrégation. Cela confirme aussi la relation proportionnelle entre la viscosité et la résistance à la ségrégation.
- Un rapport G1/G2 de l'ordre de 40 à 60% et un rapport G/S proche de 1 ont montré de meilleures performances en termes d'empilement granulaire et de résistance à la ségrégation.
- Une bonne corrélation a été établie entre les résultats de test proposé (K-Slump modifié) et les essais d'étalement, de la stabilité au tamis et au cylindre.

- L'essai de K-Slump modifié peut être considéré comme un essai simple et rapide, en comparaison avec les essais de stabilité existante, qui permet d'évaluer la résistance à la ségrégation des BAP d'une manière satisfaisante.

Les résultats obtenus dans la deuxième phase d'étude sur le comportement rhéologique et mécanique des BAP à base de plusieurs types de sables, ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les mélanges des sables binaires composés de plus de 0,35 de SD dans le système SA-SD et plus de 0,65 de SC dans le système SA-SC conduit à un rapport H_2/H_1 inférieur à 0,8, ce qui ne répond pas aux exigences de l'EFNARC.
- Des proportions de SC supérieures à 0,8 dans le système binaire SA-SC et des proportions de SD supérieures à 0,3 dans le système SA-SD montrent des valeurs de stabilité au tamis inférieures à 15% et des valeurs de stabilité au cylindre inférieures à 10 mm.
- Le seuil de cisaillement et la viscosité plastique du modèle de Bingham modifié augmentent avec l'augmentation des proportions SD et SC dans les systèmes binaires SA-SD et SA-SC. Alors que la plus faible valeur du seuil de cisaillement (environ 44 Pa) a été obtenue pour un mélange à dosage de 30% de SA, 40% de SC et 30% de SD.
- La résistance à la compression à 28 jours augmente avec l'augmentation des proportions de SC et diminue avec l'augmentation des proportions SD dans les mélanges binaires et ternaires.
- Les résultats obtenus ont montré de bonnes corrélations entre l'étalement, l'essai de la boîte en L et les contraintes de cisaillement, alors que la viscosité plastique présente une meilleure corrélation avec les essais de mesure du temps d'écoulement (T50, V-funnel, T20 et T40).

Conclusion générale

Conclusion générale et perspectives

Les travaux effectués dans le cadre de cette thèse s'articulent autour de deux parties principales :

La première partie concerne l'étude de l'influence des paramètres de formulation sur le comportement rhéologique des BAP, basé essentiellement sur les paramètres liés à la fraction granulaire tels que le rapport gravier/sable (G/S) et le rapport gravier 3-8/gravier 8-15 (G1/G2). En parallèle, un nouveau dispositif expérimental a été mis au point pour évaluer rapidement et d'une manière satisfaisante l'ouvrabilité et la stabilité statique des BAP.

La deuxième partie consiste à étudier l'influence de la combinaison de trois types de sable (alluvionnaire, dunaire et concassé) dans des mélanges binaires et ternaires sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des BAP.

L'utilisation de la méthode des plans d'expérience s'est avérée très utile pour comprendre les phénomènes étudiés, et permet ainsi de bien illustrer l'effet de la variation des paramètres clés de composition. En outre, cette approche fournit surtout un support pour corriger la méthode de formulation choisie, ce qui nous amène à adopter une formulation basée sur les recommandations de l'association française de génie civil (AFGC).

Les courbes isoréponses consistent à établir des modèles mathématiques qui visent à comprendre et prédire le comportement rhéologique et mécanique des BAP confectionnés avec différents types de sable et différentes combinaisons (binaires et ternaires).

L'étude du comportement rhéologique des bétons fluides à l'aide d'un rhéomètre donne une meilleure définition des propriétés d'écoulement et fournit des paramètres rhéologiques (seuil d'écoulement et viscosité plastique) qui permettent de décrire correctement le comportement des BAP.

Plusieurs études rapportent que les BAP avaient généralement un comportement de type rhéoépaississant et qui peut être décrit par un modèle rhéologique non linéaire tel que celui d'Herschel-Bulkley ou de Bingham modifié. Ces deux modèles sont presque identiques et ils pourraient fournir une meilleure description du comportement rhéologique des BAP.

Les paramètres de formulation liés à la fraction granulaire tels que la variation des rapports G/S et G1/G2 ont un effet important sur les propriétés rhéologiques des bétons.

L'analyse statistique des résultats de répétabilité montre que la sensibilité de nouveau test proposé est jugée suffisante pour évaluer l'ouvrabilité et la stabilité statique des BAP.

L'augmentation des proportions SD et SC dans les mélanges binaires ou ternaires avec SA entraîne une diminution significative de la fluidité et de la capacité de passage. Bien que l'ouvrabilité diminue, elle reste dans les limites préconisées l'AFGC.

Les résultats d'essais de la stabilité statique montrent un bon comportement de résistance à la ségrégation avec l'augmentation des proportions de SD et SC dans les systèmes binaires et ternaires.

Des bonnes corrélations ont été trouvées entre les paramètres rhéologiques mesurés à l'aide d'un rhéomètre et les mesures expérimentales obtenus à travers les essais couramment utilisés. Ce qui nous permet de prédire l'ouvrabilité et la stabilité des BAP à partir du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique.

Ce travail de thèse est consacré à l'étude de l'influence de la combinaison de trois types de sable sur le comportement rhéologique et notamment la stabilité statique des BAP. Pour continuer d'avancer sur cette voie, les points suivants seront recommandés :

- Poursuivre les recherches du comportement tribologique des BAP à partir de nos sables locaux.
- On se propose de valoriser les co-produits et les déchets industriels dans des mélanges binaires et ternaires comme substitut du sable.
- Il sera souhaitable d'utiliser la méthode de plan d'expérience qui permet de réduire le nombre d'essais et apporte un gain de temps sans entraver les propriétés recherchées.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Achour, T. (2008) « Tensile strength and elastic modulus of calcareous concrete: application to Tunisians' mixtures », *Materials and Structures*, 41(8), p. 1427-1439.

Adjoudj, M. (2015) « Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton ». Thèse de doctorat en cotutelle. Université de Cergy Pontoise ; Université Hassiba Benbouali de Chlef, p. 162.

AFGC (2008) « Recommendations for use of self-compacting concrete ». Association française de Génie Civil (AFGC) Publications Paris, France.

Aissoun, B. M. (2015) « Influence des caractéristiques rhéologiques des bétons autoplaçants sur leur durabilité ». Thèse de doctorat. Université de Sherbrooke, p. 233.

Aissoun, B. M., Hwang, S.-D. et Khayat, K. H. (2016) « Influence of aggregate characteristics on workability of super workable concrete », *Materials and Structures*. Springer, 49(1-2), p. 597-609.

ASTM C1362 - 09 (2014) Standard Test Method for Flow of Freshly Mixed Hydraulic Cement Concrete (Withdrawn 2014). Disponible sur: <https://www.astm.org/Standards/C1362.htm> .

ASTM C1610 (2017) Standard Test Method for Static Segregation of Self-Consolidating Concrete Using Column Technique. Disponible sur: <https://www.astm.org/Standards/C1610.htm> .

ASTM C1712-17 (2017) Standard Test Method for Rapid Assessment of Static Segregation Resistance of Self-Consolidating Concrete Using Penetration Test. Disponible sur: <https://www.astm.org/Standards/C1712.htm> .

Barnes, H. A. (1997) « Thixotropy a review », *Journal of Non-Newtonian fluid mechanics*. Elsevier, 70(1-2), p. 1-33.

Behim, M. et Ali Boucetta, T. (2013) « Valorisation du verre à bouteille comme addition fine dans les bétons autoplaçants », *Revue francophone d'écologie urbaine et industrielle, Déchets Science et Technique*, 65, p. 20-28.

- Belaidi, A. S. E. (2013) « Contribution à l'étude rhéologique et durabilité de béton autoplaçant : Apport des ajouts cimentaires ternaires et des fillers locaux et industriels ». Thèse de doctorat. Université Saâd Dahleb de Blida, p. 192.
- Belaribi, O. (2015) « Durabilité des bétons autoplaçants à base de vase et de pouzzoloane ». Thèse de doctorat en cotutelle. Université de Mostaganem ; Université Cergy-Pontoise, p. 175.
- Benabed, B. et al. (2012) « Properties of self-compacting mortar made with various types of sand », *Cement and Concrete Composites*. Elsevier, 34(10), p. 1167-1173.
- Benabed, B. (2014) « Influence de la qualité et de la nature des sables sur les performances et la durabilité des bétons autoplaçants ». Thèse de doctorat en cotutelle. Université Amar Telidji de Laghouat ; Université Cergy-Pontoise, p. 226.
- Benaïcha, M. et al. (2016) « New approach to determine the plastic viscosity of self-compacting concrete », *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. Springer, 10(2), p. 198-208.
- Bensebti, S. et al. (2015) « La Ségrégation verticale dans les Bétons Autoplaçants « Mise en place d'une procédure expérimentale » », in *Rencontres Universitaires de Génie Civil*.
- Bethmont, S. (2005) « Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP) : Étude expérimentale des interactions granulaires ». Thèse de doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, p. 159.
- Bethmont, S. et al. (2005) « Stabilité d'une sphère dans un fluide complexe : Ségrégation des bétons autoplaçants (BAP) », *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*. Laboratoire central des ponts et chaussées, (254), p. 61-73.
- Bonen, D. et Shah, S. P. (2005) « Fresh and hardened properties of self consolidating concrete », *Progress in Structural Engineering and Materials*. Wiley Online Library, 7(1), p. 14-26.
- Bouhamou, N. et al. (2008) « Influence des paramètres de composition sur le comportement du béton autoplaçant à l'état frais », *Afrique Science : Revue Internationale des Sciences et Technologie*. ENS Abidjan.
- Boukendakdji, O. (2010) « Étude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant ». Thèse de doctorat. Université Saâd Dahleb de Blida, p. 182.

- Boukhelkhal, A. et al. (2016) « Effects of marble powder as a partial replacement of cement on some engineering properties of self-compacting concrete », *Journal of adhesion science and Technology*. Taylor & Francis, 30(22), p. 2405-2419.
- Bouziani, T. (2012) « Formulation d'un béton de sable autoplaçant : rôle de la granularité et de dosages des constituants sur le comportement rhéologique ». Thèse de doctorat. Université M'Hamed Bougara de Boumerdès, p.129.
- Bouziani, T., Bederina, M. et Hadjoudja, M. (2012) « Effect of dune sand on the properties of flowing sand-concrete (FSC) », *International Journal of Concrete Structures and Materials*. Springer, 6(1), p. 59-64.
- 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*. Elsevier Ltd, 49, p. 308-314.
- Bui, V. K. et al. (2002) « Rapid testing method for segregation resistance of self-compacting concrete », *Cement and Concrete Research*. Elsevier, 32(9), p. 1489-1496.
- Cengel, Y. A. et Cimbala, J. M. (2017) *Mécanique des fluides*. De Boeck Supérieur, p. 1010.
- Collectif (2000) *Construire avec les bétons*. Le Moniteur (Collection Techniques de conception), p. 560.
- Contec (2018) BML Viscometer. Disponible sur : <http://www.contec.is/page9.htm>.
- Controls France (2017). Disponible sur : <http://controls.fr/fra/> .
- Cordeiro, G. C., de Alvarenga, L. M. S. C. et Rocha, C. A. A. (2016) « Rheological and mechanical properties of concrete containing crushed granite fine aggregate » *Construction and Building Materials*. Elsevier, 111, p. 766-773.
- Couarraze, G. et Grossiord, J. L. (2000) *Initiation à la rhéologie*. Tec & Doc, p. 300.
- Coussot, P. et Ancey, C. (1999) « Rheophysics of pastes and suspensions », EDP Sciences, Paris.

Coussot, P. et Grossiord, J. L. (2002) Comprendre la rhéologie : de la circulation du sang à la prise du béton. EDP Sciences.

Cyr, M., Legrand, C. et Mouret, M. (2000) « Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives », Cement and Concrete Research. Elsevier, 30(9), p. 1477-1483.

Daoud, A. (2003) « Étude expérimentale de la liaison entre l'acier et le béton autoplaçant : contribution à la modélisation numérique de l'interface ». Thèse de doctorat. Toulouse, INSA, p. 221.

De Larrard, F. (2002) Construire en béton : l'essentiel sur les matériaux. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées (Collection du Laboratoire central des ponts et chaussées), p. 200.

De Larrard, F et C.F. Ferraris. (1998) « Rhéologie du béton frais remanié I - Plan expérimental et dépouillement des résultats ». Lab. Ponts Chaussées 213.

De Larrard, F. et Sedran, T. (1999) « Une nouvelle approche de la formulation des bétons », in Annales du BTP, p. 39-54.

Denis, J., Briant, J. et Hipeaux, J.-C. (1997) Physico-chimie des lubrifiants : analyses et essais. Technip.

Diederich, P. (2010) « Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton ». Thèse de doctorat. Université Toulouse III-Paul Sabatier, p.253.

Douara, T. et Guettala, S. (2017) « Effets de divers types de sables sur les propriétés d'un béton autoplaçant », 6^e colloque international de la recherche appliquée et de transfert de technologie (CRATT'2017)., At Hammamet - Tunisie.

EFNARC, S. (2002) « Guidelines for Self-Compacting Concrete, European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, Norfolk, UK », English ed., February.

El Barrak, M. (2003) « Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des Bétons Auto-Plaçants (BAP) à l'état frais », Revue française de Génie Civil. Taylor & Francis, 7(1), p. 115.

Estelle, P. et Lanos, C. (2012) « High torque vane rheometer for concrete: principle and validation from rheological measurements », Applied Rheology, 22, p. 12881.

- Farih, M. (2016) « Influences des agents de viscosité sur les paramètres rhéologiques intrinsèques des mortiers des bétons autoplaçants ». Thèse de Doctorat. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, p.110.
- Felekoğlu, B. (2008) « A comparative study on the performance of sands rich and poor in fines in self-compacting concrete », *Construction and Building Materials*. Elsevier, 22(4), p. 646-654.
- Ferraris, C. F. et al. (2001) *Comparison of Concrete Rheometers: International Test at LCPC (Nantes, France) in October, 2000*. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology.
- Feys, D., Verhoeven, R. et Schutter, G. De (2008) « Cement and Concrete Research Fresh self-compacting concrete, a shear thickening material », 38, p. 920-929.
- Feys, D., Verhoeven, R. et De Schutter, G. (2008) « Fresh self-compacting concrete, a shear thickening material », *Cement and Concrete Research*. Elsevier, 38(7), p. 920-929.
- Feys, D., Verhoeven, R. et De Schutter, G. (2009) « Why is fresh self-compacting concrete shear thickening? », *Cement and concrete Research*. Elsevier, 39(6), p. 510-523.
- Feys, D. et al. (2013) « Extension of the Reiner–Riwlin equation to determine modified Bingham parameters measured in coaxial cylinders rheometers », *Materials and structures*. Springer, 46(1-2), p. 289-311.
- Geiker, M. R. et al. (2002) « The effect of measuring procedure on the apparent rheological properties of self-compacting concrete », *Cement and Concrete Research*. Elsevier, 32(11), p. 1791-1795.
- George, D. et Jean, F. (1998) « Nouveau guide du béton et de ses constituants [New guide of concrete and its constituents] », Paris : Edition eyrolles, p. 416.
- Gibouin, F. (2015) « Application de méthodes optiques couplées à l'étude d'écoulements de fluides biréfringents ». Thèse de doctorat. Université de Poitiers, p.174.
- González-Taboada, I. et al. (2017) « Self-compacting recycled concrete: Relationships between empirical and rheological parameters and proposal of a workability box », *Construction and Building Materials*. Elsevier, 143, p. 537-546.

Goupy, J. et Creighton, L. (2006) Introduction aux plans d'expériences - 3^e édition. Dunod (Technique et ingénierie), p. 324.

Güneyisi, E. et al. (2016) « Evaluation of the rheological behavior of fresh self-compacting rubberized concrete by using the Herschel-Bulkley and modified Bingham models », Archives of Civil and Mechanical Engineering, 16(1), p. 9-19.

Guy, C., Jean-Louis, G. et Nicolas, H. (2014) Initiation à la rhéologie (4 Éd.) : Bases théoriques et applications expérimentales. Lavoisier, p. 309.

Haddadou, N. (2015) « Elaboration et caractérisation de béton autoplaçant fibré avec ajout de poudre de marbre ». Thèse de doctorat. Université M'hamed Bougara, Boumerdès, 179 p.

Hafid, H. (2012) « Influence des paramètres morphologiques des granulats sur le comportement rhéologique des bétons frais : étude sur systèmes modèles ». Thèse de doctorat. Université Paris-Est, p. 159.

Heirman, G. et al. (2006) « Contribution to the solution of the Couette inverse problem for Herschel-Bulkley fluids by means of the integration method », Proceedings of the 2nd International RILEM Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, Québec-City, (September), p. 1-15.

Helnan-Moussa, B. (2009) « Influence de la température sur la thixotropie des bétons autoplaçants ». Thèse de doctorat. Université d'Artois, p.273.

Hermime, H. (2016) « Caractérisation expérimentale et numérique du béton autoplaçant" Utilisation des déchets de construction ». Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, p. 143.

Hu, J. (2005) A study of effects of aggregate on concrete rheology. Digital Repository@ Iowa State University, <http://lib.dr.iastate.edu/>.

Hu, J. et Wang, K. (2011) « Effect of coarse aggregate characteristics on concrete rheology », Construction and Building Materials. Elsevier Ltd, 25(3), p. 1196-1204.

Hu, J., Wang, Z. et Kim, Y. (2013) « Feasibility study of using fine recycled concrete aggregate in producing self-consolidation concrete », Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 2(1), p. 20-34.

Jiao, D. et al. (2017) « Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review », Cement and Concrete Composites. Elsevier, 83, p. 146-159.

- Khayat, K. H., Hu, C. et Laye, J.-M. (2002) « Importance of aggregate packing density on workability of self-consolidating concrete », in First North American Conference on Design and Use of Self Consolidating Concrete, p. 55-62.
- Kind-Barkauskas, F. (2006) « Construire en béton : conception des bâtiments en béton armé ». Presses polytechniques et universitaires romandes, p. 296.
- Larcher, J.-L. et Gelgon, T. (2012) « Aménagement des espaces verts urbains et du paysage rural : histoire, composition, éléments construits ». Éd. Tec & Doc, p. 596.
- Li, Y. et al. (2014) « Study on dispersion, adsorption and flow retaining behaviors of cement mortars with TPEG-type polyether kind polycarboxylate superplasticizers », Construction and Building Materials. Elsevier, 64, p. 324-332.
- Lomboy, G. R., Wang, X. et Wang, K. (2014) « Rheological behavior and formwork pressure of SCC, SFSCC, and NC mixtures », Cement and Concrete Composites. Elsevier Ltd, 54, p. 110-116.
- Long, W.-J. et al. (2017) « Rheological approach in proportioning and evaluating prestressed self-consolidating concrete », Cement and Concrete Composites. Elsevier, 82, p. 105-116.
- Mindess, S., Young, F. J. et Darwin, D. (2003) « Concrete 2nd Edition ». Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, Inc, p. 644.
- Minitab (2018). Disponible sur : <https://support.minitab.com/fr-fr/minitab/18/>.
- Mokéddem, S. (2012) « Contrôle de la rhéologie d'un béton et de son évolution lors du malaxage par des mesures en ligne à l'aide de la sonde Viscoprobe ». Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Nantes (ECN), p.176.
- Naji, S. (2016) « La caractérisation des propriétés physiques et mécaniques des matériaux cimentaires à l'aide des ondes de cisaillement ». Thèse de doctorat. Université de Sherbrooke, p. 198.
- Nasser, K. W. et Biswas, S. (1996) « A new method and apparatus for evaluation of the K-slump of concrete », Canadian Journal of Civil Engineering. NRC Research Press, 23(1), p. 124-133.

Nécira, B., Guettala, A. et Guettala, S. (2017) « Study of the combined effect of different types of sand on the characteristics of high performance self-compacting concrete », *Journal of adhesion science and Technology*. Taylor & Francis, 31(17), p. 1912-1928.

NF EN 1008 (2003). Eau de gâchage pour bétons. Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton.

NF EN 12350-8 (2010) Essai pour béton frais-Partie 8 : béton autoplaçant-Essai d'étalement au cône d'Abrams.

NF EN 12350-9 (2010) Essai pour béton frais-Partie 9 : béton autoplaçant-Essai d'écoulement à l'entonnoir en V.

NF EN 12350-10 (2010) Essai pour béton frais - Partie 10 : béton autoplaçant - Essai à la boîte en L.

NF EN 12350-11 (2010) Partie Béton autoplaçant—essai de stabilité au tamis.

NF EN 12350-12 (2010). NF EN 12350-12 Essai pour béton frais - Partie 12 : béton auto-plaçant - Essai d'écoulement à l'anneau

NF EN 12390-3 (2012). Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes - Essais pour béton durci - Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes

NF EN 12390-5 (2012). Essais pour béton durci - Partie 5 : résistance à la flexion sur éprouvettes

NF EN 12620+A1 (2008). Caractéristiques des granulats et des fillers élaborés à partir de matériaux naturels, artificiels ou recyclés et des mélanges de ces granulats

NF EN 206 (2014). Béton destiné aux structures coulées en place, aux structures préfabriquées, ainsi qu'au béton destiné aux produits préfabriqués structurels pour bâtiments et structures de génie civil.

NF P18-508 (2012). Hydraulique-additions-calcaires-specified-et-criteres-de-conformite/article/641430/fa171361.

Okamura, H. et Maekawa, K. (1993) « K, O'zawa », *High Performance Concrete*. Gihoudou Pub, Tokyo.

- Okamura, H. et Ouchi, M. (2003) « Self-compacting concrete », *Journal of advanced concrete technology*. Japan Concrete Institute, 1(1), p. 5-15.
- Ouchi, M. et Hibino, M. (2000) « Development, Applications and Investigations of Selfcompacting Concrete », in *International Workshop*, Kochi, Japan.
- Proust, M. et JMP, A. (2009) « Design of experiments guide », SAS Institute, Cary, NC, USA.
- Rigal, C. (2012) « Comportement de fluides complexes sous écoulement : Approche expérimentale par résonance magnétique nucléaire et techniques optiques et simulations numériques ». Thèse de doctorat. Université de Lorraine, p.225.
- R'mili, A., Ouezdou, B. et Ghorbel, E. (2009) « Incorporation du sable de concassage et du sable du désert dans la composition des bétons autoplacants », *Matériaux Sols et Structure*, p. 8.
- Rmili, A. et al. (2009) « Incorporation of Crushed Sands and Tunisian Desert Sands in the Composition of Self Compacting Concretes Part II: SCC Fresh and Hardened States Characteristics », *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 3(1), p. 11-14.
- Sebaibi, N. et al. (2013) « Composition of self-compacting concrete (SCC) using the compressible packing model, the Chinese method and the European standard », *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 43, p. 382-388.
- Shen, L., Struble, L. et Lange, D. (2005) « Testing static segregation of SCC », in *SCC2005, Proceedings of the 2nd North American Conference on The Design and Use of SCC*, November, p. 1-3.
- Shen, L., Jovein, H. B. et Li, M. (2014) « Measuring static stability and robustness of self-consolidating concrete using modified segregation probe », *Construction and Building Materials*. Elsevier, 70, p. 210-216.
- Shiu, W. (2008) « Impact de missiles rigides sur structures en béton armé: analyse par la méthode des éléments discrets ». Thèse de doctorat. Université Joseph-Fourier-Grenoble I, p. 129.
- Singh, R. B., Kumar, N. et Singh, B. (2017) « Effect of Supplementary Cementitious Materials on Rheology of Different Grades of Self-Compacting Concrete Made with Recycled Aggregates », *Journal of Advanced Concrete Technology*, 15(9), p. 524-535.

- Soualhi, H. et al. (2016) « Design of portable rheometer with new vane geometry to estimate concrete rheological parameters », 3730(June).
- Taillet, R., Villain, L. et Febvre, P. (2018) Dictionnaire de physique. De Boeck Supérieur, p. 976.
- Taleb, O. (2017) « Étude du comportement rhéologique des bétons autoplaçants locaux ». Thèse de doctorat. Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, p. 236.
- Taleb, O., Ghomari, F., Boukli Hacene, M. A., Kadri, E.-H., et al. (2017) « Formulation and rheology of eco-self-compacting concrete (Eco-SCC) », Journal of adhesion science and Technology. Taylor & Francis, 31(3), p. 272-296.
- The European Project Group (2005) « The European Guidelines for Self-Compacting Concrete », The European Guidelines for Self-Compacting Concrete, (May), p. 63.
- Turcry, P. et Loukili, A. (2003) « Différentes approches pour la formulation des bétons autoplaçants : Influence sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques », Revue française de génie civil. Taylor & Francis, 7(4), p. 425-450.
- Van Der Vurst, F. et al. (2017) « Effect of the mix design on the robustness of fresh self-compacting concrete », Cement and Concrete Composites. Elsevier, 82, p. 190-201.
- Yammine, J. (2007) « Rhéologie des bétons fluides à hautes performances : relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés mécaniques ». Thèse de doctorat. École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, p.243.
- Zeghichi, L., Benghazi, Z. et Baali, L. (2014) « The effect of the kind of sands and additions on the mechanical behaviour of SCC », Physics Procedia. Elsevier, 55, p. 485-492.

Annexe

Annexe

Annexe A : Fiches techniques des matériaux utilisés



شركة ذات أسهم البسكرة للإسمنت

S.P.A BISKRIA CIMENT

ش.ذ.م. - رأس مالها الاجتماعي : 870.000.000 DA
 Société par actions au capital social de : 870.000.000 DA
 N° Identification Fiscale : 000907024283698 - N° Article d'Imposition : 07030013436 - N° Registre de Commerce : 07700-0242836 B 09

FICHE TECHNIQUE
CEM I 42.5 CRS Mise à jour du 09 Janvier 2017

Caractéristiques chimiques			
Eléments	Garanties	Teneur %	
SO_3	(NA 237) < 3.5%	2.30	
Cl	(NA 5080) ≤ 0.1%	0.028	
P.A.F	(NA 237) ≤ 5 %	2.04	
C3S Clinker	Calculé Selon Bogue	62	
C2S Clinker	Calculé Selon Bogue	13	
C3A Clinker	Calculé Selon Bogue	1.5	
C4AF Clinker	Calculé Selon Bogue	17	
Caractéristiques physiques			
Désignation	Unité	Garanties	mesures
Surface spécifique Blaine	Cm^2/g	(NA 231)	3420
Début de prise	min	(NA 233) ≥ 60 min	180
Expansion à chaud	mm	≤ 10mm (NA 232)	0.5
Consistance	%	T (NA 229)	25.7
Caractéristiques mécaniques			
Résistance à la compression MPa	02 jours	≥ 10	21
	28 jours	$62.5 \geq R \geq 42.5$	49.5

SPA BISKRIA CIMENT Siège sociale : DJAR BELAHRACHE BRANIS WILAYA DE BISKRA (Algérie)

☎ : +213 (0) 33 62 74 62 Fax : +213 (0) 33 62 73 92 MOBILE : +213 (0) 560 960 470 Email : biskria.spa@gmail.com

Super plastifiant MEDAFLOW 30

MEDAFLOW 30

Conforme 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.

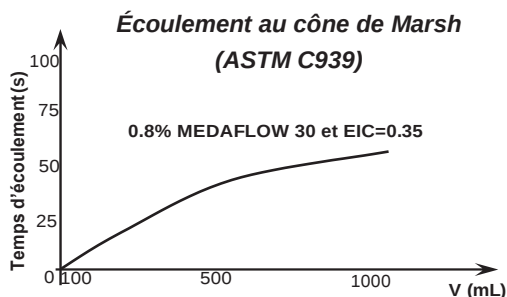
DOMAINES D'APPLICATION

- 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.

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.



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

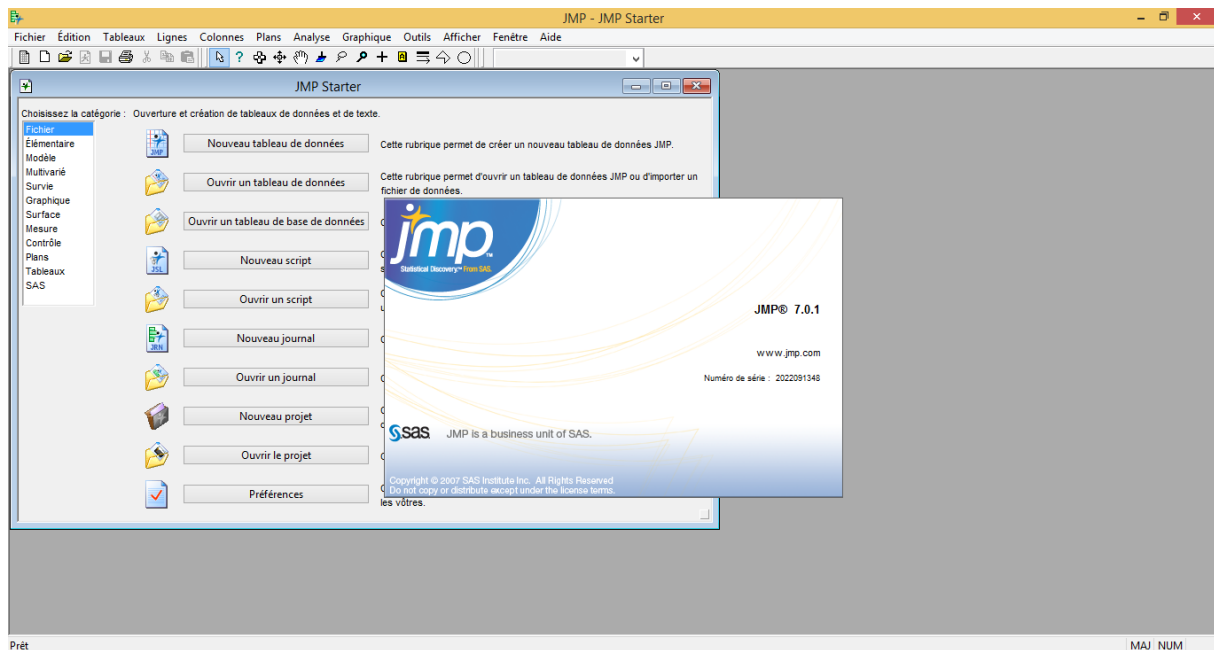
www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



Annexe B : Feuille de calcul des différents constituent du BAP

Formules	Symboles
$V_p + V_{gr} = 1000 \text{ l}$	V_p : Volume de pâte
$V_p = V_a + V_c + V_e + V_{Sp} + V_F$	V_{gr} : Volume des granulats
$V_p = V_a + \frac{C}{\rho_c} + \frac{E}{\rho_e} + \frac{M_{Sp}}{\rho_{Sp}} + \frac{F}{\rho_F}$	V_a : Volume de l'air
$V_{gr} = V_g + V_s$	V_c : Volume de ciment
$V_{gr} = \frac{M_g}{\rho_g} + \frac{M_s}{\rho_s}$	V_e : Volume de l'eau
$V_a + \frac{C}{\rho_c} + \frac{E}{\rho_e} + \frac{M_{Sp}}{\rho_{Sp}} + \frac{F}{\rho_F} + \frac{M_g}{\rho_g} + \frac{M_s}{\rho_s} = 1000$	V_{Sp} : Volume de superplastifiant
$V_p = V_a + \frac{C}{\rho_c} + \frac{E}{\rho_e(C+F)} \cdot (C+F) + \frac{M_{Sp}}{\rho_{Sp}} + \frac{F}{C} \cdot \frac{C}{\rho_F}$	V_F : Volume des fillers
$V_p - V_a = C \left[\frac{1}{\rho_c} + \frac{E}{\rho_e(C+F)} \cdot \left(1 + \frac{F}{C}\right) + \frac{M_{Sp}}{\rho_{Sp}} + \frac{F}{C} \cdot \frac{1}{\rho_F} \right]$	V_g : Volume de gravier
$C = \frac{V_p - V_a}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{E}{\rho_e(C+F)} \cdot \left(1 + \frac{F}{C}\right) + \frac{M_{Sp}}{\rho_{Sp}} + \frac{F}{C} \cdot \frac{1}{\rho_F}}$	V_s : Volume de sable
$V_{gr} = 1000 - V_p$	C : Masse de ciment
$V_g + V_s = 1000 - V_p$	E : Masse de l'eau
$V_g = \frac{1000 - V_p}{2}$	M_{Sp} : Masse de superplastifiant
$M_g = \rho_g \left(\frac{1000 - V_p}{2} \right)$	F : Masse des fillers
$V_s = \frac{1000 - V_p}{2}$	M_g : Masse de gravier
$M_s = \rho_s \left(\frac{1000 - V_p}{2} \right)$	M_s : Masse de sable
	ρ_c : Densité du ciment
	ρ_e : Densité de l'eau
	ρ_{Sp} : Densité de superplastifiant
	ρ_F : Densité des fillers

Annexe C : Logiciel de modélisation statistique JMP



C.1 Présentation du logiciel

JMP (prononcez « jump ») est un puissant outil interactif de visualisation des données et d'analyse statistique. Il permet d'analyser des données et d'interagir avec elles via des tables, des graphiques, des diagrammes et des rapports afin d'en tirer un maximum d'enseignements.

JMP permet aux chercheurs de réaliser une large gamme d'analyses et de modélisations statistiques. Il est également utile à l'analyse commerciale qui souhaite découvrir rapidement des tendances et des modèles dans les données. Avec JMP, vous n'avez pas besoin d'être un expert en statistiques pour faire parler vos données.

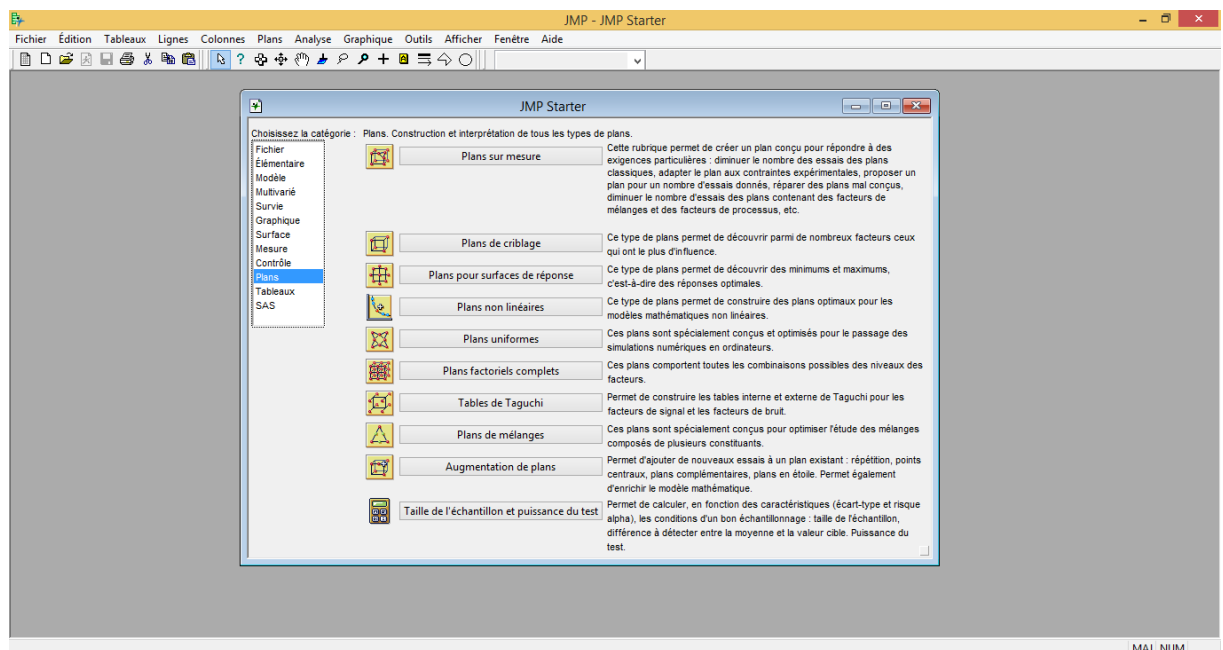
Vous pouvez utiliser JMP pour :

- Créer des graphiques et des diagrammes interactifs pour explorer vos données et découvrir des relations ;
- Découvrir des modèles de variation prenant en compte plusieurs variables à la fois ;
- Explorer et synthétiser de grandes quantités de données ;
- Développer de puissants modèles statistiques afin de prévoir l'avenir.

C.2 Choix et construction du plan d'expérience

Les plans d'expériences (DOE) sont un moyen pratique et universel d'explorer l'éventail des opportunités à plusieurs facteurs. JMP offre des fonctionnalités intuitives d'exception pour l'analyse et la conception de plans d'expériences.

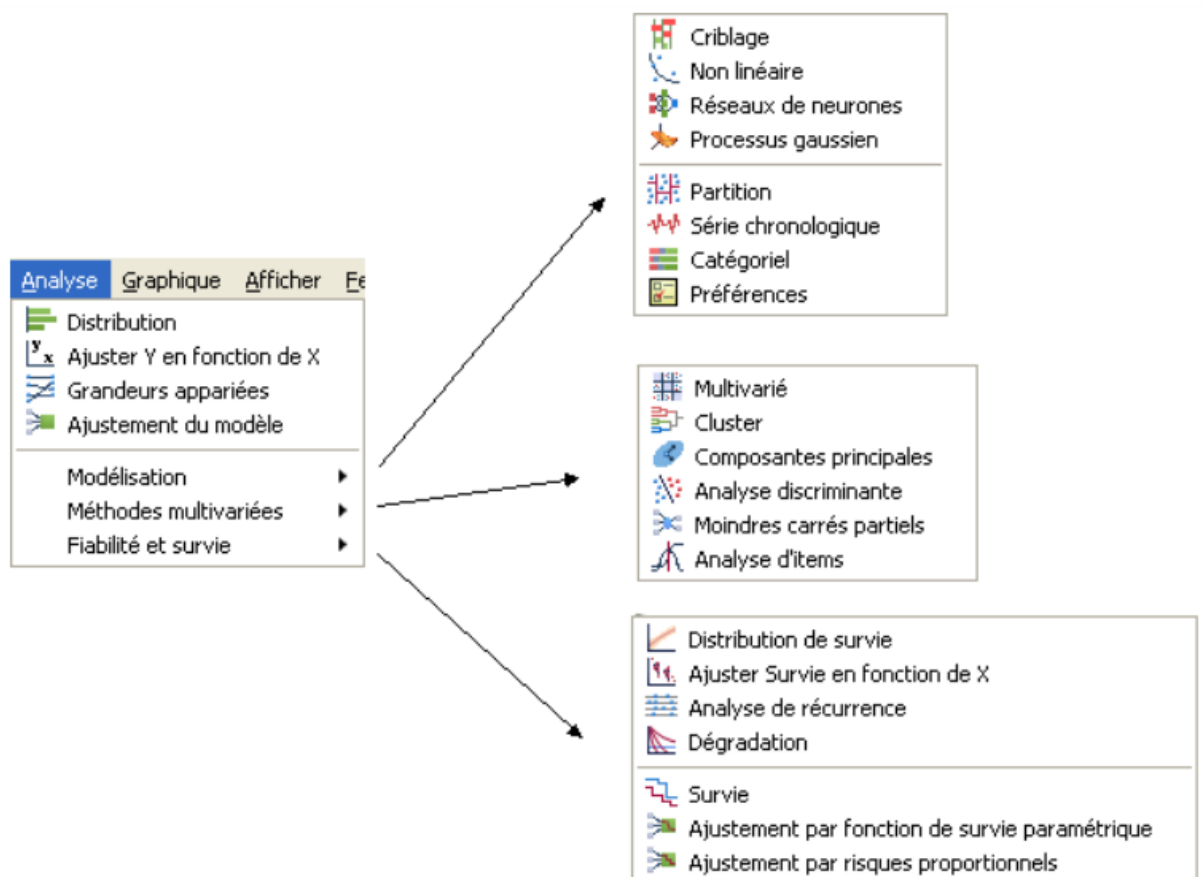
JMP propose tous les types de plans classiques connus : le plan factoriel complet, le plan de criblage, le plan pour surface de réponse, le plan de mélanges et la table de Taguchi. Une fois les facteurs et les réponses définis, JMP vous permet de choisir un plan approprié dans une liste et fournit plusieurs outils, dont des profils et des répartitions de la variance de prévision, destinés à évaluer ce plan avant d'engager des ressources.



C.3 Analyse des résultats d'un plan

L'analyse des données permet de prendre des décisions avisées. L'analyse des données implique souvent les actions suivantes :

- Étude des distributions ;
- Découverte de relations ;
- Tests d'hypothèses ;
- Construction de modèles.



Annexe D : Agitateurs à hélice électroniques Heidolph RZR 2102 control Z

D.1 Description

Le Heidolph RZR 2102 control Z est un agitateur à tige à deux gammes de vitesse de rotation (Niveau I : 4– 108 t/min et Niveau II : 17 – 540 t/min). Il est équipé d'un moteur à condensateur, parfait pour mélanger des milieux à haute viscosité. Il assure une vitesse constante sur la totalité de la plage, même en cas de variation de la viscosité et en mode de surcharge. Les changements de viscosité peuvent être contrôlés à l'aide de l'affichage LED. Réglage et contrôle numériques de la vitesse et du couple. Il possède des engrenages planétaires à bride (rapport d'engrenage 4:1). Le bras est compatible avec les éléments d'agitation dotés de tiges pouvant atteindre 10 mm de diamètre.



D.2 Données techniques

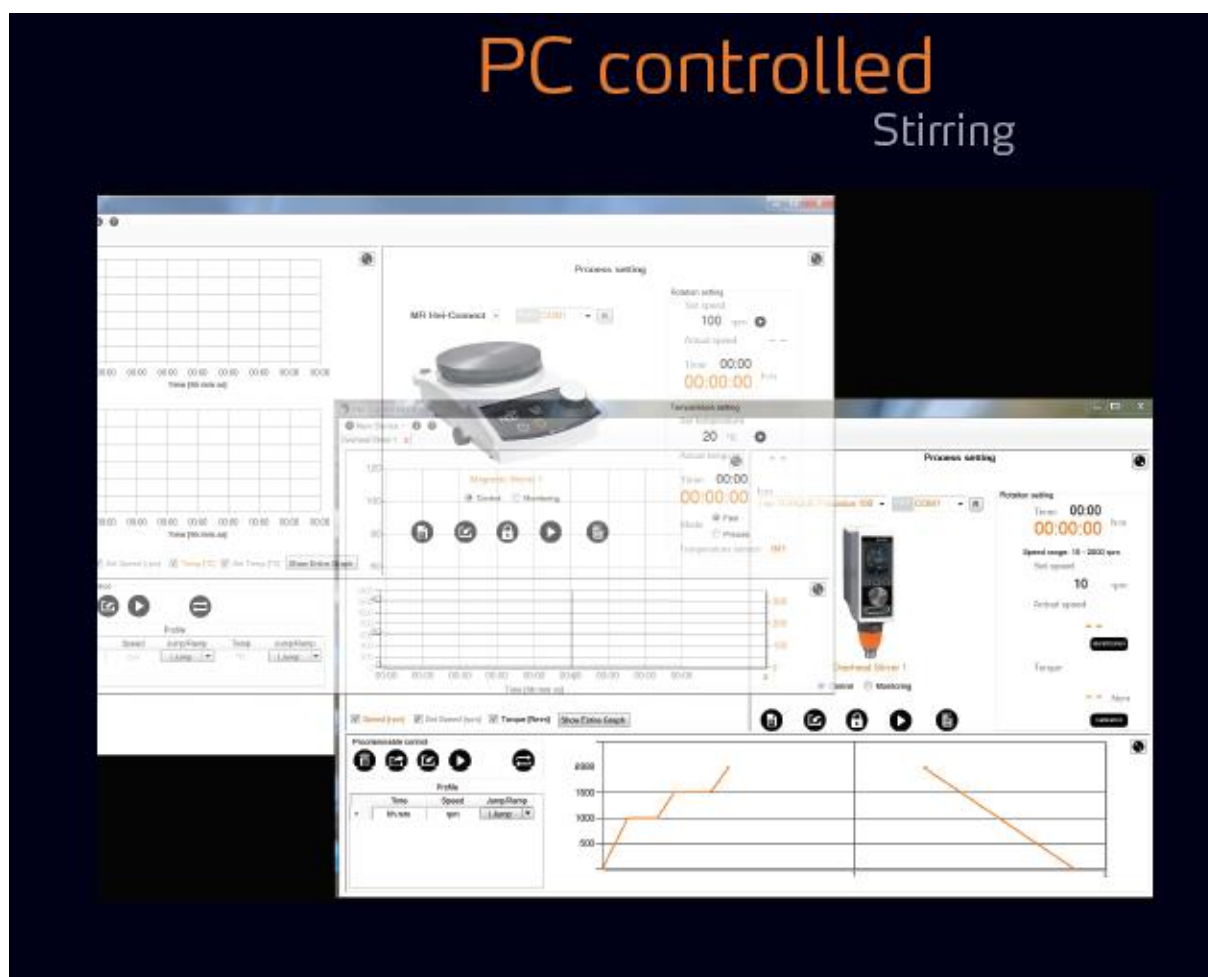
DONNEES TECHNIQUES		
Puissance absorbée (charge nominale)	RZR 2020 / 2021	P = 50 W
Puissance absorbée (charge nominale)	RZR 2041	P = 70 W
Puissance débitée Moteur	RZR 2020 / 2021	P = 50 W
Puissance débitée Moteur	RZR 2041	P = 100 W
Dimensions (en mm) RZR 2020 / 2021	Largeur 82 ; hauteur 206 ; profondeur 176	
Dimensions (en mm) RZR 2041	Largeur 82 ; hauteur 211 ; profondeur 176	
Poids RZR 2051 control	3 kg	
Poids RZR 2102 control	3,8 kg	
Température de service	0 – 40 °C	
Température de stockage	- 20 à + 80 °C	
Humidité de l'air relative	95 % (sans humidification)	
Protection	IP 40	
Couple	Voir courbes caractéristiques ci-dessous	
Gamme de vitesse de rotation	40 – 2000 rpm Niveau I : 40 – 400 rpm Niveau II : 400 – 2000 rpm	
Raccord pour pale de l'agitateur	Mandrin 10,5 mm, arbre de sortie avec trou pour arbre d'agitation avec $\varnothing$ jusqu'à 10 mm	
Fixation de l'agitateur	Barre de fixation 13 mm	
Protection du moteur	Un dispositif de protection contre les surchauffes met automatiquement le moteur hors service dans le cas d'une surcharge persistante (diode d'alarme rouge); bouton-poussoir de redémarrage ON/OFF.	
Lampe témoin pour «Appareil en marche»	témoin (vert)	
Protection de l'arbre d'agitation	Montage du dispositif de protection de l'arbre d'agitation possible (accessoire)	
Antiparasite	Selon EN 50081	
Mode de service	Régime permanent	
Affichage RZR 2021 et RZR 2041	Affichage à cristaux liquides à 4 chiffres, hauteur des chiffres 8 mm	
Affichage gamme de mesure	40 – 2000 rpm	
Résolution	1 rpm	
Précision de la valeur affichée	+/- 01 de la valeur finale	
Principe de mesure	Capteur à effet Hall avec aimant torique	

Annexe E : Logiciel d'acquisition « Hei-control V2.01 »

Hei-control est un logiciel développé par la société Heidolph pour l'acquisition et le contrôle des données de mesure des agitateurs de la série RZR et Hei-TORQUE.

Le « Hei-Control Software » fournit les fonctions suivantes :

- Définir et sécuriser les paramètres de processus individuels
- Cycles de processus de sauvegarde et de lecture
- Programmer et sauvegarder les profils de vitesses
- Définir un compte à rebours ou une minuterie
- Contrôlez jusqu'à quatre appareils simultanément

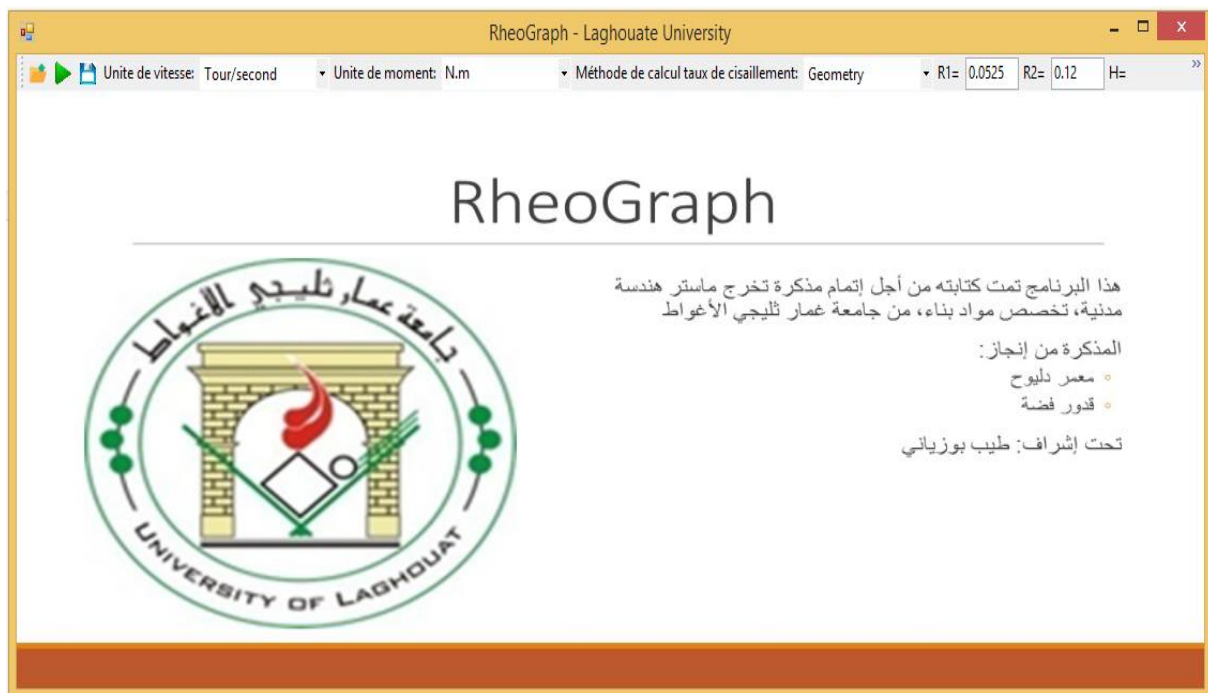


Annexe F : Logiciel d'acquisition « *RheoGraph* »

Le logiciel « *RheoGraph* » est un outil d'acquisition numérique développé dans le cadre d'un projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master II en Génie civil intitulé « Développement d'un logiciel d'acquisition de l'agitateur Heidolph RZR 2102 pour l'estimation des paramètres rhéologiques des mortiers et bétons frais ». Réalisé par : Maamar Dliouah et Kaddour Fedda et encadré par le Professeur Tayeb Bouziani.

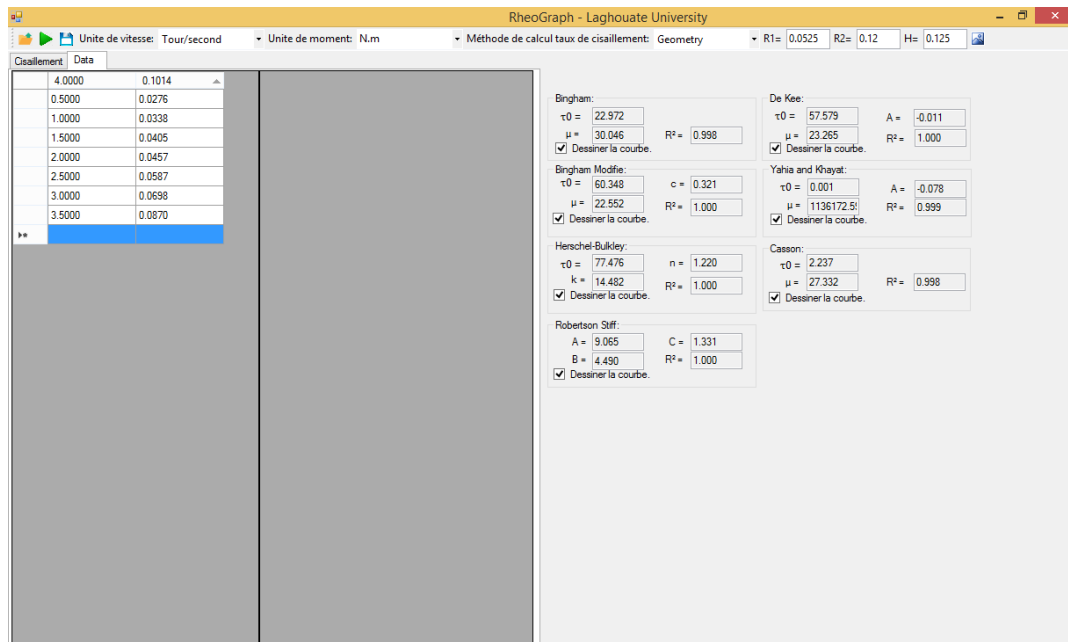
C'est un outil d'acquisition numérique à l'aide du langage de programmation C# ; pour l'exploitation des informations de base (couple et vitesse de rotation) issues de l'agitateur Heidolph RZR-2102, à plusieurs paramètres rhéologiques selon deux méthodes de transformation (classique et Lanos & Estelle) et sept modèles rhéologiques :

- Bingham;
- Bingham Modifiée;
- Herschel-Bulkley;
- Robertson-Stiff;
- De Kee;
- Yahia and Khayat;
- Casson.



F.1 Présentation numérique

Dans la fenêtre principale de logiciel, on a des boîtes qui représentent les résultats. Dans ces boîtes on trouve les paramètres rhéologiques issus de différents modèles.



F.2 Présentation graphique

Le logiciel représente aussi les résultats par des courbes, et chaque modèle avec différentes couleurs :

