



DOCTORAL THESIS

Doctorate in Science

Presented by

DJOUAL BELKACEM

With a view to obtaining the doctoral diploma in Doctor of Sciences

Branch: *Civil Engineering*

Specialty: Construction materials

The effect of granulometry, nature of sand and mineral addition on the performance and durability of self-compacting sand concretes

Supported, on 16 / 10 / 2024, before the jury composed of:

Last and first name	Grade	Institution of affiliation	Designation
Mr Boubaker BENCHEIKH	MCA	University of Djelfa	President
Mm Ratiba MITICHE	Professor	ENP, Algeria	Supervisor
Mr Mohamed BACHAR	MCA	University of Djelfa	Examiner
Mr Ahmed MERAH	Professor	University of Laghouat	Examiner
Mr Aissa BOUCEDRA	MCA	University of Laghouat	Examiner



Département : Génie Civil

N° d'Ordre : / 2024

Autorisation de Soutenance N°/2024

THESE DE DOCTORAT

Doctorat en sciences

Présentée par

DJOUAL BELKACEM

En vue de l'obtention du diplôme de Docteur en *en sciences*

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux de construction

Thème

L'effet de granulométrie , de la nature du sable et d'addition minérale sur les performances et la durabilité des bétons de sable autoplaçants

Soutenue publiquement, le 16 /10 /2024, devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement de rattachement	Désignation
Mr Boubaker BENCHEIKH	MCA	Université de Djelfa	Président
Mm Ratiba MITICHE	Professeur	ENP d'Alger	Directrice de thèse
Mr Mohamed BACHAR	MCA	Université de Djelfa	Examineur
Mr Ahmed MERAH	Professeur	Université de Laghouat	Examineur
Mr Aissa BOUCEDRA	MCA	Université de Laghouat	Examineur

Université de Djelfa, FST, 2024

الإهداء

”و ما بكم من نعمة فمن الله ”
احمد الله الذي لا اله الا هو على توفيقه في إكمال هذه المذكرة و على باقي نعمه علينا .

إلى:

أولاً:

إلى الوالد الفاضل على دعمه و إعانته.

داعيا المولى أن يحفظه و يطيل عمره في إطاعته.

ثانياً:

إلى زوجتي و ابنائي الى عائشة و سجاد و جلال الدين و صغيري عماد الدين

ثالثاً:

إلى الاخوة و الاخوات الى الأصحاب و. إلى كل من ساعدني في المخبر إلى كل من عرفني في
الدراسة أو في الحياة العملية.

رابعاً:

إلى كل من أعان في هذه المذكرة و لو بكلمة تشجيع أو تحفيز دون نسيان أساتذتي في جميع
الأطوار.

إلى كل من سبق ذكرهم اهدي هذا العمل المتواضع..
بلقاسم جوال.



رثاء

” بسم الله الرحمن الرحيم ”

انعي فقدان أمي عائشة جوال الغالية التي كانت نور حياتي .مشجعتي في العلم و المعرفة رحيله يوم 2020/08/21 كان خنجر غرس في قلبي ،فهي كانت قلبا ينبض بالحب والتفاني .تركت وراءها أثر لا يمحي . عندما انظر الى الوراء،أجد بصماتها في كل نجاح حققته طول مسيرتي العلمية وفي كل شيء جميل حدث لي ،واليوم وداعا،امي الحنون ،تركنتني أعاني الحزن والفراق ،ولكن ستظلين في قلبي والدمع يظل على جفا أفكارى و أحلامي ،كما تظل أمانينا موجودة ورائحة الياسمين تحيط بقبرك دائما ،مادامت روعي في جسدي فشوقي لك يزداد ، في هذه المناسبة اعبر عن فراقى لك بقلب مفجوع،لكن احمل في اعماقى ذكريات جميلة لك اذكر يوم كنت اناقش رسالة الماجستير وانتي تنتضرين في صبر وشوق لحظة تخرجى اه ما احلاها من ذكريات .وداعا امى العزيزة ،لكن سابقى كلى ثقة وقوة لأحمل رسالتك واستمر فى رحلة العلم والتعليم،ارجو من كل من يستفيد من هذه المذكرة ولو بفكرة بسيطة ان يدعو لأمى بالرحمة والمغفرة .

بلقاسم جوال.



Remerciements

Les travaux présentés dans cette thèse ont été réalisés au Laboratoire de Réhabilitation des Structures et des Matériaux de l'Université de Laghouat, et je tiens à exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui m'ont aidé dans cette étude, notamment mes collègues, professeurs et membres du laboratoire, tout au long de cette période de travail qui fut longue et difficile.

Je commence par adresser mes chaleureux remerciements à la **professeure Ratiba Mitiche Kettab** à ENP Alger, ma directrice de thèse, pour son soutien et ses encouragements continus tout au long de ce travail.

Un salut spécial au Dr Professeur et ami **Dr Rebih Zaitri** à l'université de Z. A. Djelfa ,pour ses conseils, ses efforts et son aide.

Nous remercions le président du jury et les examinateurs d'avoir examiné notre thèse.

Je tiens à remercier le Professeur **Dr Tayeb Bouziani** à l'université de A. T. laghouat pour ses précieux conseils au début de ma thèse.

Je tiens également à remercier **M. Djilali Boulerbaa**, ingénieur à la Plateforme Technique d'Analyses Physiques et Chimiques (**PTAPC-Laghouat**), pour son aide dans la réalisation des analyses. pour son aide dans la réalisation des analyses sous DRX, et je remercie également **Dr. Allaoui** A département de Mécanique de l'Université de Laghouat pour avoir réalisé pour moi des expériences **SEM**.

Mes remerciements vont également au **Dr Youssef Korichi** pour son amitié et ses efforts qui ont rendu ce travail possible.

Je n'oublierai jamais non plus que mon neveu, le professeur d'anglais, remercié le **Dr chouihat Yassin** pour toute l'aide qu'il m'a apportée dans la traduction de l'article en anglais.

Je n'oublie pas de remercier mon frère, le professeur de langue française, **Djoual Mohamed**, pour son aide précieuse.

Finalement, je tiens à exprimer ma gratitude à tous mes professeurs et collègues du Département de génie civil pour leurs encouragements qui ont rendu ce travail très agréable.

DJOUAL BELKACEM

ملخص

تسعى الدراسة الحالية إلى تقييم تأثير المضافات المعدنية، مثل الحجر الجيري (FC)، ومسحوق الطوب (PB) ومسحوق السيراميك (PC)، على أداء الخرسانة الرملية ذاتية الضغط (BSAP). ويهدف أيضًا إلى فحص الخواص الميكانيكية ومقاومة الأحماض لـ BSAP عند تعرضه لـ H_2SO_4 (5%) و HCl (5%)، من خلال حفظه لفترات زمنية مختلفة. استخدمت الدراسة نموذج الخلط الشبكي الذي يتضمن 21 خلطة خرسانية لتقييم تأثير العوامل التركيبية والمضافات المعدنية. وبقيت نسبة الرمل الغريني (75%) والرمل الكثيب (25%) ثابتة، بينما تراوحت كميات الماء من الحجر الجيري ومسحوق الطوب ومسحوق السيراميك من 0% إلى 100%. تم تطوير نماذج رياضية لربط هذه المعايير بقابلية الاستخدام ومقاومة الضغط. أظهرت النتائج أن زيادة كميات مسحوق الحجر الجيري (FC) ومسحوق الطوب (PB) ومسحوق السيراميك (PC) ساهمت في تحسين سهولة تنفيذ BSAP، كما يتضح من اختبار انسياب الخرسانة واختبار القمع V باستخدام هذه الإضافات، سواء استُخدمت بشكل فردي أو مجتمعة، تُعزّز كلاً من خصائص الخرسانة في الحالة اللينة أو المتصلبة. أدت النسب الأعلى من مسحوق الحجر الجيري (FC) ومسحوق السيراميك (PC) في التركيبات الخطية أو الثنائية أو الثلاثية إلى زيادة ملحوظة في مقاومة الانضغاط، مع الحصول على أفضل النتائج باستخدام خليط ثلاثي من مسحوق الحجر الجيري (70%) ومسحوق الطوب (20%) ومسحوق السيراميك (10%). بعد 180 يومًا، بلغت مقاومة الانضغاط 48 ميجا باسكال مع مسحوق السيراميك (60%) ومسحوق الحجر الجيري (30%) ومسحوق الطوب (10%). يهدف هذا البحث إلى دمج الخرسانة الرملية في تكنولوجيا الخرسانة ذاتية التسوية، وذلك باستخدام موارد الرمال المحلية، وخاصة رمال الكثبان الرملية في جنوب الجزائر. بشكل عام، أدى دمج المضافات المعدنية إلى تحسين متانة وقوة BSAP، باستثناء مسحوق الطوب (PB) عندما يتجاوز 60% أو إدخال مسحوق السيراميك (PC). يساهم هذا البحث في تحسين أداء BSAP خاصة في وجود المحاليل الحمضية من خلال الاختيار الدقيق ونسبة المضافات المعدنية.

الكلمات المفتاحية: التحليل الإحصائي؛ إضافات معدنية؛ المتانة الميكانيكية؛ الخرسانة الرملية ذاتية التموضع؛ معايير تصميم الخلطة.

Résumé

La présente étude a pour but d'évaluer l'impact des additifs minéraux, notamment de filler calcaire (FC), poudre de brique (PB) et la poudre de céramique (PC), sur les performances du béton de sable auto-plaçants (BSAP). Elle vise également à examiner les propriétés mécaniques et la résistance à l'acide du BSAP lorsqu'il était exposé à H_2SO_4 (5%) et HCl (5%) sur différentes périodes. L'étude a utilisé un modèle de mélange en réseau comprenant 21 mélanges de béton pour évaluer l'influence des paramètres de composition et des additifs minéraux. La proportion de sable alluvial (75%) et de sable dunaire (25%) est restée constante, tandis que les doses de remplissage de calcaire, de poudre de brique et de poudre de céramique variaient de 0% à 100%. Des modèles mathématiques ont été développés pour corrélés ces paramètres avec la facilité de mise en œuvre et la résistance à la compression. [Les résultats ont montré que l'augmentation des doses de remplissage de filler calcaire (FC), de poudre de brique (PB) et de poudre de céramique (PC) améliorait la facilité de mise en œuvre du BSAP, comme le montrent les tests d'étalement et d'écoulement en V-funnel]. Ces additifs, utilisés individuellement ou en combinaison, amélioraient à la fois le comportement à l'état frais et durci. Des proportions plus élevées de FC et de PC, dans des combinaisons linéaires, binaires ou ternaires, augmentaient significativement la résistance à la compression, avec les meilleurs résultats obtenus avec un mélange ternaire de FC (70%), PB (20%) et PC (10%). Après 180 jours, la résistance à la compression atteignait 48 MPa avec PC (60%), FC (30%) et PB (10%). La recherche visait à intégrer le béton de sable dans la technologie du béton autonivelant, en utilisant les ressources locales de sable, en particulier le sable dunaire dans le sud de l'Algérie. Dans l'ensemble, l'incorporation d'additifs minéraux améliorait la durabilité et la résistance du BSAP, à l'exception de la poudre de brique (PB) lorsqu'elle dépassait 60% ou de l'introduction de la poudre de céramique (PC). Cette recherche contribue à améliorer les performances du BSAP, en particulier en présence de solutions acides, grâce à la sélection soignée et à la proportion des additifs minéraux.

Mots clés : Analyse statistique ; Paramètres de formulation ; Additifs minéraux ; Résistance mécanique ; Durabilité ; Béton de sable auto-Plaçant.

Abstract

In this study, we aimed to evaluate the impact of mineral additives, namely limestone (FL), brick powder (PB), and ceramic powder (CP), on the performance of self-leveling sand concrete (SCSCS). The mechanical properties and acid resistance of SCSCS when exposed to H₂SO₄ (5%) and HCl (5%) over different periods were also examined. The study employed a network mixing model comprising 21 concrete mixes to assess the influence of composition parameters and mineral additives. The proportion of alluvial sand (75%) and dune sand (25%) remained constant, while the filling doses of limestone, brick powder, and ceramic powder varied from 0% to 100%. Mathematical models were developed to correlate these parameters with workability and compressive strength. [Results showed that increasing doses of limestone (FL), brick powder (PB), and ceramic powder (CP) enhanced the workability of SCSCS, as evidenced by spread and V-funnel] flow tests. These additives, whether used individually or in combination, improved both fresh and hardened state behavior. Higher proportions of FL and CP, in linear, binary, or ternary combinations, significantly increased compressive strength, with the best results obtained with a ternary mixture of FL (70%), PB (20%), and CP (10%). After 180 days, compressive strength reached 48 MPa with CP (60%), FL (30%), and PB (10%). The research aimed to integrate sand concrete into self-leveling concrete technology, utilizing local sand resources, especially dune sand in southern Algeria. Overall, incorporating mineral additives improved the durability and strength of BSAP, except for brick powder (PB) when exceeding 60% or the introduction of ceramic powder (CP). This research contributes to enhancing the performance of SCSCS, particularly in the presence of acidic solutions, through careful selection and proportioning of mineral additives.

Keywords: Statistical analysis; Formulation parameters; Mineral additives; Mechanical resistance ; Sustainability ; Self-Compacting Sand Concrete.

Sommaire

Sommaire

Résumé

Liste Des Figures

Liste Des Equations

Liste Des Tableaux

Introduction Générale.....1

Première Partie. Synthèse Bibliographiques

Chapitre I : Béton de sable

I.1. Introduction	3
I.2. Historique	3
I.3. Définition	4
I.4. Composants du béton de sable	4
I.4 .1 Les sables	4
I.4.2 Les fines d'ajout (ou additions)	4
I.4. 3 Les ciments.....	5
I.4. 4 l'eau de gâchage	5
I.4. 5 les fillers	5
I.4. 6 adjuvants	5
I.4. 7 autres ajouts.....	5
I.5. Propriété d'un béton de sable	6
I.6. Domaines d'utilisation des bétons de sable.....	8
I.7. Les bétons de sable fluides.....	09
I.7. 1 Le contexte des bétons fluides	09
I.7. 2 Principales caractéristiques des bétons de sable fluides.....	10
I.7. 3 Domaines d'application des bétons de sable fluides.....	11
I.7. 3.1 Sur le plan des performances mécaniques.....	11
I.7. 3.2 En bâtiment	11
I.7. 3.3 En voirie	11
I.7. 3.4 En génie civil.....	11
I.8. Conclusion.....	13

Chapitre II : Béton autoplaçant

II.1. Introduction.....	14
II.2. Historique du béton auto plaçant (BAP)	14
II.3. Définition des BAP	16
II.4. Domaine d'application des BAP.....	16

II.5. Mise en œuvre et précautions d'emploi du BAP	17
II.6. Cahier des charges d'un BAP	17
II.7. Caractéristiques technique de BAP	18
II.8. Constituants des BAP	22
II.8.1 Le ciment.....	22
II.8.2 Les granulats	23
II.8.3 L'eau de gâchage	23
II.8.4 Ajouts minéraux.....	23
II.8.5 Adjuvants	25
II.8.5.1 Superplastifiants.....	25
II.8.5.2 Agent viscosité.....	26
II.9. La formulation des bétons ordinaires	27
II.10. Méthodes de formulation des bétons auto plaçant	27
II.10.1 Méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires	28
II.10.2 Méthode basée sur l'optimisation du mortier	29
II.10.3 Méthode basée sur l'optimisation de la pate	30
II.10.4 Méthode de formulation chinoise	30
II.10.5. Méthode basée sur le plan d'expérience (méthode statistique).....	32
II.10.5.1. Notions sur les plans d'expériences.....	32
II.10.5.2. Modélisation mathématique de la réponse.....	33
II.10.5.3. Analyse de la variance.....	34
II.10.5.4. Le coefficient de détermination R^2	35
II.10.5.5. La probabilité p-value.....	35
II.10.5.6. Plans pour surfaces de réponse.....	35
II.10.5.7. Les plans de mélanges.....	36
II.11. Caractérisations des BAP a l'état frais	39
II .11. 1. Essai de caractérisation des BAP.....	39
II . 12 . Propriétés des BAP a l'état durci	40
II .12.1. Propriétés mécaniques.....	40
II .12.2. Résistance mécanique.....	40
II .12.3 Module d'élasticité (en compression).....	41
II.13. Retrait.....	42
II .14. Comportement du BAP et bétons vis-à-vis des attaques acides.....	44
II .14.1. Mécanisme d'attaques de HCl et H ₂ SO ₄	45
II .15. Durabilité des bétons autoplaçants.....	47
II .15.1. Perméabilité à l'eau	47

II .15.2. Pénétration des chlorures.....	47
II .15.3. Résistance à l'effet gel-dégel.....	48
II .15.4. Résistance aux attaques sulfatiques d'origine externe	48
II .16. Étapes d'une attaque sulfatique	49
II .17 Mécanisme de formation des produits expansifs	49
II .18. Facteurs affectant l'attaque sulfatique	51
II .19. Résistance des bétons autoplaçants aux agressions sulfatiques.....	52
II.20. Cas d'attaque de béton par les sulfates	53
II.21.Conclusion	54

Deuxième partie. Étude expérimentale

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés et méthodes d'essais.

III.1. Introduction	56
III.2.Matériaux.....	56
III.2.1.Granulats.....	56
III.2.2. les l'additions minérales utilisées.....	60
III.2.2.1. Caractérisation du filler calcaire.....	60
III.2.2.1.1. Caractéristiques physico-chimiques.....	61
III.2.2.2. caractérisation de la poudre de briques.....	62
III.2.2.3. poudre de céramique (sanitaire).....	64
III.2.3 Caractérisation du ciment.....	66
III.2.3.1. Définition.....	66
III.2.3.2. Analyse chimique et minéralogique.....	67
III.2.3.3.Classe de résistance	67
III.2.4. Le Superplastifiant (SP).....	68
III.2.5. Eau de gâchage.....	69
III.3. Méthodes et essais.....	70
III .3.1 Introduction.....	70
III .3.2 Choix et préparation des plans d'expérience.....	72
III.3. 3.Essais de durabilité.....	73
III.3. 3.1.Confection des éprouvettes.....	73
III.3. 3.2.Milieux de conservation.....	73
III.3. 3.3.Essais de compression.....	76
III.3. 3.4.Essais de traction par flexion.....	77
IV.4. Programme expérimental.....	78
IV.5. Conclusion.....	79

Chapitre IV : Résultats des Essais et Interprétation

IV.1. Introduction	80
IV.2. Réalisation des essais et modélisation.....	82
IV.3. Procédures des essais.....	83
IV.4. Confection des BSAP.....	83
IV.5. Influence des additions minérales.....	84
IV.6. Modèles mathématiques.....	89
IV.7. Analyse de la variance.....	90
IV.8. Exploitation des modèles.....	91
IV.9. Interprétation des résultats à l'état frais.....	93
IV.9.1. Influence de l'addition minérale sur l'étalement.....	93
IV.9.2. Influence des additions minérales sur le temps d'écoulement du (J-Ring) T500J.....	94
IV.9.3. Influence des ajouts de minéraux sur le temps d'écoulement.....	95
IV.9.4. Influence des additions minérales sur le temps d'écoulement au V-funnel.....	96
IV.9.5. Influence des additions minérales sur l'écoulement à la boîte (L-box).....	97
IV.9.6. Influence des additions minérales sur la stabilité au tamis.....	98
IV.10. Résistances mécaniques.....	99
IV.10.1. Influence des additions minérales sur la résistance à la traction.....	99
IV.10.2. Influence des additions minérales sur la résistance à la compression.....	101
IV.11. Conclusion.....	102
IV.12. ÉTUDE DE LA DURABILITÉ.....	104
IV.12.1. Introduction.....	104
IV.12.2. Variation de masse.....	104
IV.12.3. Comportement des BSAP vis-à-vis des milieux H ₂ SO ₄ et HCl.....	108
IV.12.4. Résistance mécanique.....	109
IV.12.4.A. Effet de la dégradation de l'acide chlorhydrique (HCl 5%) sur la résistance à la compression et à la flexion en traction.....	109
IV.12.4.B. Effet de la dégradation de l'acide sulfurique (H ₂ SO ₄ 5%) sur la force à la rupture.....	112
IV.12.4.C. Effet de la dégradation d'eau pure sur la résistance à la compression et à la flexion en traction.....	114
IV.13. Conclusion.....	117
Conclusion générale et perspectives.....	118

Liste des figures

Figure 1.1 Relation entre le dosage en ciment et le pourcentage des granulats fins dans un béton.....	7
Figure 1.2 Schéma explicatif de l'apparence des bétons (1), (2) et (3).....	7
Figure 1.3 Relation entre la capacité de remplissage et risques de ségrégation.....	8
Figure 2.1 Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle.....	18
Figure 2.2 Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton.....	20
Figure 2.3 Exemple de comparaison entre une composition de BAP et celle d'un BO.....	22
Figure 2.4 Effet de superplastifiant sur le ciment : (a) ciment et eau, (b) ciment, eau et superplastifiant.....	25
Figure 2.5 Action de dispersion des grains de ciment: (I) pâte floculée ; (II) pâte dispersée.....	26
Figure 2.6 Interaction entre l'eau et les polysaccharides.....	26
Figure 2.7 Le domaine de variation du rapport G/S.....	33
Figure 2.8 Domaine d'étude délimité par les facteurs G/S et E/C.....	33
Figure 2.9 Plan composite pour l'étude de deux facteurs.....	36
Figure 2.10 Plan de mélange en réseaux comportant 21 mélanges Ce plan est noté.....	38
Figure 2.11. Représentation des mélanges à trios constituants à l'aide d'un triangle Equilatéral.....	39
Figure 2.12 Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) Correspondant.....	40
Figure 2.13 Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales.....	41
Figure 2.14 Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation	42
Figure 2.15 Comparaison des retraits endogènes d'un béton traditionnel et cinq BAP.....	43
Figure 2.16 Comparaison des retraits de dessiccation d'un béton vibré et cinq BAP.....	44
Figure 2.17 Effet de la quantité du ciment et de la teneur en C3A sur la vitesse de détérioration du béton.....	51
Figure 2.18 Influence des cendres volantes sur l'expansion du béton.....	52
Figure 2.19 Détérioration du béton par une attaque sulfatique : Barrage Fort Peck sur	

la rivière Missouri au Montana (États-Unis).....	54
Figure 2.20 Analyse du béton détérioré par diffraction aux rayons X (DRX).....	54
Figure 3.1. Distributions granulométriques des sables utilisés.....	57
Figure 3.2. Photo MEB du sable alluvionnaire.....	57
Figure 3.3. Photo MEB du sable de dunes.....	58.
Figure 3.4. Aspect général des grains des différents sables utilisés visualisé au Microscope Electronique ZIEZ 20000.....	58
Figure 3.5. Diffraction des rayons X du sable alluvionnaire.....	59
Figure 3.6. Diffraction des rayons X du sable dunaire.....	59
Figure 3.7. Diffraction des rayons X du filler calcaire.....	61
Figure 3.8. Photo MEB du filler calcaire.....	61
Figure 3.9. Diffraction des rayons X des fines de briques.....	63
Figure 3.10 Photo MEB des poudres des briques.....	63
Figure 3.11 Image d'une machine de concassage des différents ajouts minéraux utilisés dans ce travail.....	64
Figure 3.12. Diffraction des rayons X des poudres céramiques.....	65
Figure 3.13. Photo MEB des poudres céramiques.....	66.
Figure 3.14 Ciment utilisé dans la confection des bétons étudiés.....	66
Figure 3.15 Superplastifiant GRANITEX-MEDAFLOW25.....	69
Figure 3.16 Logiciel de modélisation statistique JMP.....	71
Figure 3.17. Conservation des éprouvettes dans les milieux agressifs : 5% HCl et 5% H ₂ SO ₄	74
Figure 3.18. Conservation des éprouvettes dans l'Eau Pure	75
Figure 3.19 Mesure de la masse à l'aide d'une balance électronique.....	76
Figure 3.20.a. Lecture des résultats de l'essai de la compression.....	77
Figure 3.20.b. Appareil de compression.....	77
Figure 3.21.a. Lecture des résultats de l'essai de la compression.....	78
Figure 3.21.b. La forme des échantillons après l'expérience de flexion.....	78
Figure 4.1 Plan utilisé pour l'étude de l'influence l'additions minérales.....	80
Figure 4.2. Valeurs observées en fonction des valeurs modèles des réponses : (1) Eta, (2) Vf, (3) J-Ring, (4) Sta et (5) Rc-28 et (5) Rt-28.....	92
Figure 4.3. Diagramme ternaire de l'étalement (cm) en fonction du type d'addition minérale.....	93
Figure 4.4. Exemple d'étalement sur BSAP frais (cas de la formulation F1).....	94
Figure 4.5. Diagramme ternaire de l'étalement modifié (J-Ring) en fonction du type	

d'addition minérale.....	94
Figure 4.6. Exemple d'étalement J-ring sur BSAP frais (cas de la formulation F21).....	95
Figure 4.7. Diagramme ternaire de T500 (s) en fonction du type d'addition minérale.....	95
Figure 4.8. Diagramme ternaire de temps d'écoulement au V-funnel en fonction du type d'addition minérale.....	96
Figure 4.9. Exemple temps d'écoulement au V-funnel sur BSAP frais (cas de la formulation F1).....	96
Figure 4.10. Exemple temps d'écoulement à la boîte (L-box).....	97
Figure 4.11. Diagramme ternaire d'écoulement à la boîte en L en fonction du type d'addition minérale.....	97
Figure 5.12. Exemple de l'essai de la stabilité au tamis sur BSAP frais. (cas de la formulation F1).....	98
Figure 4.13. Diagramme ternaire de stabilité au tamis (%) en fonction du type d'addition minérale.....	98
Figure 4.14. Diagrammes ternaires a la traction par flexion en fonction du type de l'addition minérale.....	100
Figure 4.15. Diagramme ternaire a la compression en fonction du type d'addition minérale.....	102
Figure 4.16. Exemple du procédé de mesure de la résistance à la compression et a la flexion du BSAP (formulation F1).....	103
Figure 4.17. Variation de la masse en fonction de la période d'immersion dans une solution (5% H ₂ SO ₄ , 5% HCl et Eau pure) Age 28 ,90 et 180 jours.....	106
Figure 4.18. Mesure de la perte de masse à l'aide d'une balance électronique.....	107
Figure 4.19. Comparaison visuel des éprouvettes exposées aux différents milieux (âge 90 jours).....	108
Figure 4.20. Une couche de sous-produits blancs recouvre l'extérieur des échantillons immergés dans le milieu acide H ₂ SO ₄ , avec le FSDM comme exemple.....	109
Figure 4.21. Variation de la résistance à la flexion du BSAP conservé dans la solution d' HCl (5%).....	110
Figure 4.22. Variation de la résistance à la compression du BSAP conservé dans la solution d' HCl (5%).....	111
Figure 4.23. Variation de la résistance à la flexion du BSAP conservé dans la solution H ₂ SO ₄ (5%).....	113
Figure 4.24. Variation de la résistance à la compression du BSAP conservé dans la solution H ₂ SO ₄ (5%).....	113

Figure 4.25. Variation de la résistance à la flexion du BSAP conservé dans la solution l'Eau pure.....	115
Figure 4.26. Variation de la résistance à la compression du BSAP conservé dans la solution Eau pure.....	115
Figure 4.27. Photographies des échantillons pendant les essais mécaniques sur le BSAP.....	116

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Exemples de différentes compositions utilisées au Japon (kg/m ³).	30
Tableau 2.2 : Constituants du BAP (kg/m ³).	31
Tableau 3.1 : Propriétés principales des sables utilisés.	56
Tableau 3.2: Caractéristiques physiques du filler calcaire utilisé	61
Tableau 3.3: Caractéristiques chimiques du filler calcaire utilisé.....	61
Tableau 3.4 : Caractéristiques physiques des fines de brique utilisées	62
Tableau 3.5 : Caractéristiques chimiques des fines de brique utilisées.....	63
Tableau 3.6 : Caractéristiques physiques des fines céramiques utilisées.	65
Tableau 3.7 : Caractéristiques chimiques des fines céramiques utilisées.....	65
Tableau 3.8 : Composition chimique du ciment utilisé.....	67
Tableau 3.9 : La composition minéralogique du ciment utilisé.....	67
Tableau 3.10 : Les dosages de composition 1.....	67
Tableau 3.11: Les dosages de composition 2.....	68
Tableau 3.12 : Analyse chimique de l'eau utilisée.	69
Tableau 3.13 : Programme expérimental des essais mécaniques :	
Compression et flexion.....	78
Tableau 3.14: Programme expérimental des essais physiques :	
variation de la masse.....	79
Tableau 4.1 : présent les différents Compositions Utilisées dans le plan D'expériences.....	81
Tableau 4.2 : Composition des formulations étudiées.....	82
Tableau 4.3 : Résultats des essais rhéologiques (à l'état frais) et de la stabilité statiques.....	85
Tableau 4.4 : Résultats des essais mécaniques à l'état durci- Résistances à la compression.....	86
Tableau 4.5: Résultats des essais mécaniques à l'état durci- Résistance à la traction par flexion	87
Tableau 4.6: Coefficients et paramètres des modèles des essais rhéologiques (à l'état frais) et de la stabilité statique.....	88
Tableau 4.7: Coefficients et paramètres des modèles des essais mécaniques et à l'état durci- Resistance a la compression	88

Tableau 4.8: Coefficients et paramètres des modèles des essais mécaniques et à (l'état durci)- Résistance à la traction par flexion	89
Tableau 4.9: Analyse de la variance des réponses.....	90
Tableau 4.10: Perte de masse dans différents solutions.....	105
Tableau 4.11: force de rupture en flexion et en compression dans une solution de 5% HCl	110
Tableau 4.12: force de rupture en flexion et en compression dans une solution de 5% H ₂ SO ₄	112
Tableau 4.13: force de rupture en flexion et en compression dans une solution d'Eau pure.....	114

Liste des Equations

Équation (1)	28
Équation(2)	28
Équation(3)	29
Équation(4)	29
Équation(5)	30
Équation(6)	31
Équation(7)	31
Équation(8)	31
Équation(9)	32
Équation(10)	34
Équation(11)	34
Équation(12)	35
Équation(13)	36
Équation(14)	37
Équation(15)	38
Équation(16)	45
Équation(17)	45
Équation(18)	45
Équation(19)	45
Équation(20)	46
Équation(21)	50
Équation(22)	50
Équation(23)	50
Équation(24)	50
Équation(25)	50
Équation(26)	68
Équation(27)	76
Équation(28)	76
Équation(29)	76
Équation(30)	77
Équation(31)	78
Équation(32)	89
Équation(33)	89
Équation(34)	89
Équation(35)	89

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le béton auto-plaçant (BAP) est une avancée majeure en matière de technologie du béton, capable de s'écouler sous son propre poids sans nécessiter de compactage mécanique [Gesõ glu et al., 2012 ; Sadek et al., 2016]. Cette fluidité est attribuée à la pâte auto-plaçante (PAP) présente en grande quantité dans le mélange, qui agit comme lubrifiant pour les granulats [Baloch et al., 2019]. Cependant, l'utilisation accrue de PAP augmente la teneur en ciment, entraînant des coûts plus élevés et une possible réduction de la durabilité [Khan et al., 2019]. De plus, la production de ciment est liée à une importante pollution en CO₂ [Gartner & Quillin, 2007 ; Di Cristina et al., 2017]. Des améliorations sont nécessaires pour rendre le **BSAP** plus durable et rentable.

environnementales liées au béton de sable auto-plaçant (**BSAP**). Ces solutions incluent l'incorporation d'additifs minéraux tels que la cendre volante [Feleko et al., 2006], la chaux [Hassan et al., 2012], et le laitier de haut fourneau [Lee et al., 2020 ; Kim et al., 2020]. De plus, l'utilisation de la poudre céramique (PC) dans les mortiers et les bétons a montré un potentiel pour obtenir des résistances à la compression acceptables à un pourcentage optimal, comme le démontre l'étude d'Eldieb et Kanaan [El-Dieb et al., 2012], qui a constaté qu'une addition de 10 % de PC peut produire un béton avec une résistance à la compression louable [Safiuddin et al., 2012 ; Jittin et al., 2020]. D'autres alternatives, telles que les charges calcaires [Dhandapani et al., 2021] et les produits argileux de rebut [Tavakoli et al., 2014], ont également été explorées comme remplacements du ciment. L'impact des additifs minéraux sur la fluidité du béton dépend du dosage, du type, de la finesse et de la forme des particules [Zhang X., Han J., 2000]. Cette étude se concentre sur l'influence du type et du dosage de ces ajouts sur les caractéristiques du béton frais et sur la résistance à la compression des **BSAP** formulés. L'objectif principal de notre recherche est de formuler un **BSAP** avec des additifs optimisés, en tenant compte des types de sable (sable alluvial et sable dunaire) et des additifs minéraux (filler de calcaires, poudre de brique et poudre céramique).

Au cours de la phase initiale, les dosages des additifs minéraux (FC, PB, PC) ont été variés pour évaluer leur impact sur les performances du béton de sable auto-plaçant (**BSAP**). Les résultats ont montré un effet positif, dépendant de la composition des additifs et de la distribution des tailles des particules. Le béton contenait du sable limoneux et du sable dunaire, avec un rapport constant entre l'eau et le liant, ce qui a révélé des performances favorables.

Un test rapide a été mis en place pour évaluer la maniabilité et la stabilité du **BSAP**, validé par des expériences et des analyses statistiques, y compris l'ANOVA. Dans la deuxième phase, un schéma de réseau mixte a été élaboré, évaluant les effets des mélanges d'additifs. L'étude a également porté sur l'impact de l'immersion dans des acides sur la durabilité et les propriétés mécaniques des **BSAP**. Enfin, l'incorporation de déchets de céramique et de brique a amélioré la fluidité, la résistance et la durabilité.

La thèse est structurée en quatre chapitres, incluant des revues sur le béton sablé et les propriétés du béton auto-plaçant, ainsi que des tests expérimentaux pour caractériser le BAP à l'état frais et l'état durci .

- Le premier chapitre propose une revue bibliographique sur les particularités et les domaines d'application du béton sablé (BS) et du béton de sable liquide. Les propriétés du BS présentées dans ce chapitre montrent la similitude étroite, en termes de structure granulaire, entre le BS et le BAP.

En effet, la quantité élevée de pâte, l'absence ou le faible dosage de gros granulats et la faible tendance à la ségrégation créent des points d'intersection entre BS et BAP. Ensuite, l'effet des principaux composants sur les propriétés fraîches et durcies du BS a été discuté. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous présentons des approches théoriques et empiriques pour formuler le BS.

- Le deuxième chapitre propose une revue bibliographique du sujet principal à savoir Propriétés du BAP, notamment en termes de rhéologie et d'ouvrabilité à l'état frais ainsi que méthodes de perçage correspondantes. Nous citons ensuite quelques résultats de travaux déjà réalisés sur les corrélations entre mesures rhéologiques. donne des tests expérimentaux pour caractériser le BAP à l'état frais, nous présentons le rôle que jouent les composants du BAP sur ses propriétés et donnons les différentes méthodes de formulation connues jusqu'à présent ainsi que la robustesse du BAP.

- Le troisième chapitre décrit les propriétés des additifs minéraux, les matériaux utilisés, ainsi que les méthodes et procédures de test nécessaires à la mise en œuvre du programme expérimental dans le cadre de cette thèse. Une grande partie est consacrée à la préparation du plan expérimental à utiliser, notamment au choix du type de plan expérimental et à la description des procédures d'essai.

Deux

Tests de durabilité ont été réalisés portant sur l'absorption capillaire (absorption) et la résistance à l'acide chlorhydrique (HCl), aux acides sulfuriques (H₂SO₄) et à l'eau pure.

- Le chapitre quatre fait l'objet de l'analyse et de la discussion des résultats obtenus au terme d'un programme pilote résultant de l'application d'un plan complexe. A partir de la base de données issue de l'application de ce plan, nous fournissons des analyses statistiques permettant de trier l'effet des facteurs étudiés (dose de filler calcaire (FC), dose de poudre de brique (PB), dose de poudre céramique (PC), rapport eau sur liant fixe (W/L). , et dose de superplastifiant (SP). Par ordre d'importance également fixé, analyser et discuter de l'effet du sable sur la durabilité du BSAP exposé aux acides agressifs HCl, H₂SO₄ et à l'eau pure.

Enfin, nous fournissons une conclusion générale sur l'application de la méthode des plans d'expériences dans notre cas, montrant le potentiel de cette approche statistique et les nombreuses perspectives d'application offertes par cet outil d'analyse pour révéler clairement l'influence des paramètres de formulation du BSAP sur ses résultats.

Première Partie.

Synthèse

Bibliographique



Chapitre I



le Béton de sable

I.1. INTRODUCTION

Une croissance substantielle de la demande en agrégats s'est observée au cours de la dernière décennie en Algérie, en corrélation avec les activités de construction et l'évolution économique du pays. Plus spécifiquement dans le sud, où les granulats de grande taille sont peu abondants et leur acquisition coûteuse en raison des frais de transport vers d'autres régions, il devient impératif de gérer de façon judicieuse les ressources agrégées disponibles et de tirer parti des ressources existantes, à savoir le sable de dunes et le sable de concassage [CNERIB, 1992].

Puisque le sable de dunes est abondant, notamment dans le Sahara qui représente plus de 60% du territoire algérien, et que des quantités importantes de sable de concassage (issu des stations de concassage des granulats calcaires) existent dans certaines régions, l'idée de promouvoir le béton de sable est réapparue à la fin des années 1980 et celle de l'exploitation des sables de concassage dans les années 2000.

Outre cette dimension économique, le béton de sable possède parfois des caractéristiques qui ne sont pas ou mal remplies par le béton classique, comme la comptabilité, la projection, l'homogénéité et l'aspect esthétique [BATATA, 1994 ; SABLOCRETE, 1994]

I.2. HISTORIQUE

En France, durant le XIXe siècle, F. a conçu des ensembles préfabriqués où le béton de sable, constitué de sable, de ciment, de chaux et d'eau, a été introduit pour la première fois. Diverses applications de ce matériau ont perduré jusqu'à ce jour, comprenant le pont de New York (états unis), le phare de Port-Saïd (Égypte) et le mur de soutènement à Passy (France).

Au début du XXe siècle, le béton de sable a été développé en ex-URSS, où il a été employé dans des projets tels que le pont de Chernavskif et le port de Kaliningrad. Après la Seconde Guerre mondiale, le professeur REBINDER a identifié diverses utilisations pour ce matériau notamment, les chaussées, les pistes d'aviation et les structures architecturales. Cependant, son utilisation a progressivement diminué en raison des performances mécaniques supérieures offertes par l'emploi de granulats plus gros dans la composition du béton [BENAISSA, 1992].

La recherche et le développement du béton de sable ont été relancés à la fin des années 80 en France, en réponse à l'épuisement des ressources en granulats. Alors, un plan baptisé «SABLOCRETE» a été lancé en 1988 dans le cadre du programme visant à optimiser l'utilisation des matériaux locaux. Ce projet a mis en lumière des caractéristiques du béton de sable jusqu'alors négligées par les formulations traditionnelles, ce qui lui confère une place distinctive dans le spectre des bétons disponibles [SABLOCRETE, 1994].

I.3. DEFINITION

La norme française **NF P 18-500** a été établie pour le béton de sable, qui est un béton fin composé de sable, de ciment, d'addition et d'eau. En plus de ces éléments fondamentaux, le béton de sable est généralement accompagné d'un (ou plusieurs) additif.

I.4.COMPOSANTS DU BETON DE SABLE

Un béton de sable est fabriqué à partir de sable, de fines particules d'ajout, de ciment et d'eau. En ce qui concerne cette composition de base et afin de satisfaire les exigences de certains usages, il est possible d'envisager d'autres additions spécifiques telles que des fibres, des gravillons, des adjuvants.

I.4.1 Les sables

Tous les granulats 0/D, conformément aux définitions des normes **NF P 18-101** et **NF P 18-301**, sont considérés comme des sables. Il peut s'agir d'un sable alluvionnaire ou de ballastière, ou d'un sable de carrière obtenu par le concassage d'une roche massive ou détritique.

Il n'est pas nécessaire de respecter un critère granulométrique pour fabriquer du béton de sable : il est possible d'utiliser un sable fin et un sable alluvionnaire moyen ou grossier, ou un concassage 0/d.

I.4.2 Les fines d'ajout (ou additions)

La compacité est une qualité essentielle du béton en général.

Les facteurs clés qui influenceront la compacité sont :

- L'énergie de la mise en œuvre ;
- La taille du mélange et sa concentration en eau.

La principale distinction entre un béton traditionnel et un béton de sable est la granulométrie.

Certaines règles sont établies pour optimiser la compacité en relation avec la granulométrie. Le principe est simple : les parties les plus fines se cachent dans les espaces des parties les plus grandes.

Considérons le béton conventionnel : en débutant par les agrégats les plus volumineux (d'une taille de 10 à 20 mm), il est possible de créer des vides interstitiels qui peuvent ensuite être comblés par du sable, puis ces vides sont à leur tour remplis par des particules fines. Ces particules fines se composent de ciment, étant donné que la quantité indispensable de ciment pour garantir la résistance est équivalente à celle requise pour obtenir la bonne granulométrie des fines.

1.4.3 Les ciments

De manière similaire au béton conventionnel, le ciment utilisé dans la fabrication du béton de sable est conforme à la norme **NF 15-301**. Le type du ciment dépend de plusieurs critères tels que sa résistance, ses propriétés d'hydratation, la nature agressive de l'environnement, ainsi que la composition spécifique du béton et son application finale.

Afin d'exploiter pleinement l'activité hydraulique des fines d'addition, il est courant de favoriser les ciments de type CPA plutôt que ceux de type CPJ.

1.4.4 - Fixation de dosage en eau

Le volume en eau (e) est généralement sélectionné en fonction de l'expérience (250 l pour 400 kg de ciment, 220 l d'eau pour 350 kg de ciment) et sera adaptée, si besoin, en fonction de la maniabilité souhaitée.

1.4.5 Les fillers

Les fillers sont des substances minérales, qu'elles soient artificielles ou naturelles, qui ont un impact sur la taille du béton de sable en raison de leur granulométrie ($D \leq 0,08$ mm). Ils servent à combler les espaces vides et à accroître la densité du béton. Ainsi, leur utilisation diminue la nécessité de ciment, qui est extrêmement onéreux. Les fillers, en fonction de leur nature et de leur finesse, amélioreront la maniabilité et la résistance.

1.4.6 les Adjuvants

Les bétons de sable sont confectionnés en recourant aux mêmes adjuvants que ceux employés dans les bétons conventionnels, et leurs caractéristiques sont exploitées de manière similaire.

Cependant, le recours aux plastifiants ou aux superplastifiants est privilégié en raison des particularités propres au béton de sable : ces additifs améliorent sa maniabilité et augmentent sa résistance due à la défloculation des composants fins et à une réduction de la teneur en eau.

Les agents entraîneurs d'air sont également employés dans certains cas afin de générer un réseau de microbulles au sein du béton de sable, visant ainsi à le protéger contre les effets du gel (notamment lorsque la formulation utilisée est susceptible d'être affectée par le gel).

Il est impératif de vérifier régulièrement la nature et le dosage des adjuvants au laboratoire.

De plus, les adjuvants utilisés devront respecter la norme **NF P 18-103**.

1.4.7 Autres ajouts

A) Les fibres

Elles sont principalement employées pour diminuer le retrait au jeune âge : leur quantité et leur nature jouent un rôle crucial dans l'efficacité de ces ajouts.

Les fibres organiques (polypropylène) sont généralement utilisées pour contrer les conséquences du retrait de prise et empêcher la fissuration qui en découle.

L'amélioration de la ductilité peut être obtenue en utilisant des fibres de fonte amorphe ou des fibres d'acier.

B) Les gravillons

Un béton de sable est réputé capable d'incorporer une certaine proportion de gravillons tout en conservant son appellation de béton de sable. Du moment où les gravillons demeurent éparpillés sans former de structure organisée, le comportement demeure inchangé ; l'addition de gravillons en petite quantité peut considérablement améliorer diverses spécificités telles que la résistance, le retrait, le fluage et la maniabilité.

D'un point de vue pratique, si le rapport massique gravillons sur sable (G/S) demeure inférieur à 0,7. On maintient la désignation de béton de sable

Ainsi, la notion de béton de sable chargé implique une distinction marquée entre le diamètre maximal D_1 du sable $0/D_1$ et le diamètre minimal d_2 du gravillon d_2/D_2 : $d_2 \gg D_1$.

De surcroît, l'observation empirique révèle que des matériaux présentant une granulométrie continue $0/D$, avec une taille inférieure à 8 mm, peuvent être considérés comme des bétons de sable pour autant que le dosage pondéral des éléments supérieurs à 4 mm (désignés par G) respecte la règle précédente $G/S < 0,70$, où S représente les éléments inférieurs à 4 mm.

C) Les colorants

Certains usages de bétons de sable peuvent également utiliser les colorants couramment utilisés dans les bétons traditionnels : ils requièrent cependant une attention particulière lors de l'homogénéisation et d'une formulation adéquate afin de maintenir la stabilité de la teinte.

I.5. PROPRIETES D'UN BETON DE SABLE

a) Quantité de pâte élevée

La différence entre le béton de sable et le béton traditionnel se situe dans le fait qu'il est dosage en pâte et en sable, au détriment du dosage en gravillons. La diminution du diamètre maximal des granulats entraîne une augmentation du dosage du ciment dans un béton de sable par rapport aux bétons traditionnels. **La figure 1.1** illustre la corrélation entre le dosage du ciment et le pourcentage de granulats fins dans un béton.

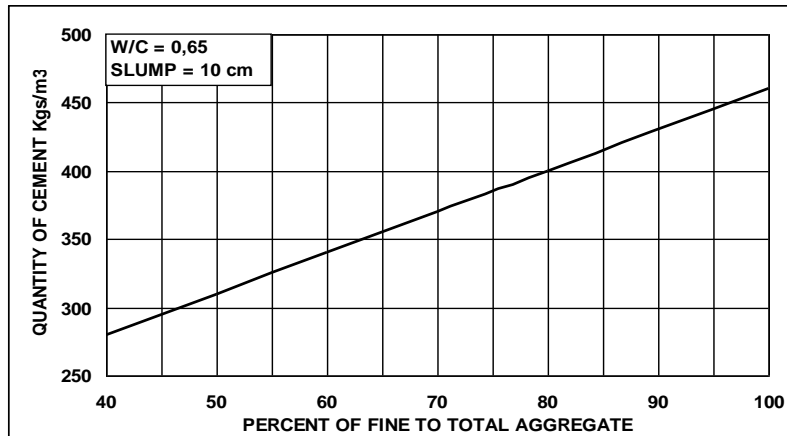


Figure 1.1 Relation entre le dosage en ciment et le pourcentage des granulats fins dans un béton [STAMATOPOLOS, 1971].

Afin d'éviter un dosage élevé en ciment, il est nécessaire d'ajouter une granulométrie similaire à celle du ciment. La rhéologie de la pâte de ciment est influencée par les éléments fins. Selon des recherches, il a été démontré que, au-delà d'une certaine quantité, les fines sont utilisées comme lubrifiant, et cela est d'autant plus crucial qu'elles sont broyées de manière fine [CNERIB, 1992]. De cette manière, l'incorporation d'une addition permet de réduire le prix du béton et d'améliorer significativement sa taille.

Le dosage en additions est souvent crucial pour le béton de sable, allant de 70 à 220 kg/m³ et plus. Donc, il est important de choisir avec soin le type et la finesse d'addition, car cela aura un impact significatif sur les caractéristiques du béton de sable.

b) Absence de gros granulats

La granulométrie est l'une des principales distinctions entre un béton de sable et un béton traditionnel. Un béton de sable ne renferme pas de gravillons ou présente une proportion inférieure à celle du sable dont le rapport massique G/S (Gravillons sur Sable) inférieur à 0.7. Voir **figure 1.2**. [SABLOCRETE, 1994].

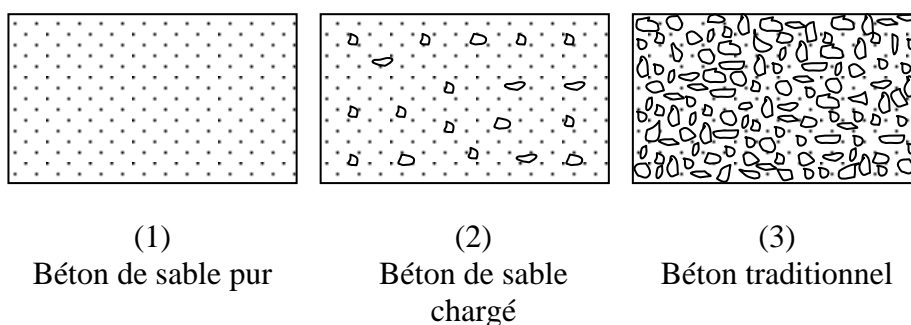


Figure 1.2 Schéma explicatif de l'apparence des bétons (1), (2) et (3) [SABLOCRETE, 1994].

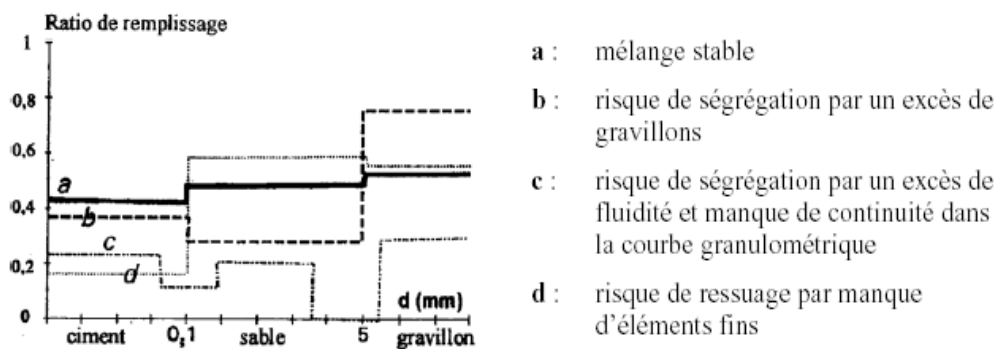
c) *Simple mise en place*

Le béton de sable présente une texture fine et une consistance très plastique, ce qui facilite sa mise en place, en particulier dans les zones très ferrillées, par rapport au béton traditionnel. La présence de fines influence le comportement rhéologique du béton de sable, en lui donnant une plus grande fluidité. De plus, le parement et l'esthétique des constructions sont d'avantage garantis par l'emploi d'un béton de sable.

d) *Bonne stabilité*

Le comportement du béton de sable face aux phénomènes de ségrégation est meilleur que celui des bétons traditionnels en raison de sa granulométrie serrée et de son absence de gravillons, ce qui lui confère une homogénéité accrue. Selon De LARRARD (1992), il a été constaté qu'une surabondance de gravillons ou de fluidité ainsi que la présence de discontinuité granulométrique dans un béton entraînent un risque de ségrégation. En revanche, une distribution équilibrée de la structure granulaire réduit les risques de ségrégation [De LARRARD,1992].

La figure 1.3 donne la relation entre le risque de ségrégation de quelques mélanges et les diagrammes de remplissage correspondants.



I.6. DOMAINES D'UTILISATION DES BETONS DE SABLE

Les applications qui ont touché des secteurs aussi divers que le bâtiment et le génie civil ont souligné l'intérêt que peut représenter l'utilisation du béton de sable, tant sur le plan technique qu'économique. [GLUAIS, 1993].

Différents secteurs utilisent le béton de sable en raison de ses caractéristiques spécifiques ::

a) *En raison de sa fluidité :*

- Lors de la construction des pieux forés;
- Lors de la construction de dalles autonivelantes ;

- En renforçant la structure en utilisant la projection.

b) *Étant donné sa faible propension à la ségrégation :*

- Une mise en place facile sous l'eau ;
- Afin de réparer les fondations ;
- En remplissant des cavités.

Cependant, la plupart des utilisations du béton traditionnel peuvent également être effectuées en béton de sable. Les critères technico-économiques sont les seuls à faire varier les choix.

I.7. LES BETONS DE SABLE FLUIDES

I.7.1 Le contexte des bétons fluides

Dans le domaine de la construction, les bétons conventionnels, dont la consistance varie de ferme à extrêmement plastique, offrent un large éventail d'utilisations potentielles. Ces bétons permettent d'obtenir, avec une relative facilité, des performances variées et requièrent des méthodes de mise en œuvre relativement communes.

Cependant, dans certaines situations spécifiques, ces bétons traditionnels s'avèrent inappropriés. Parmi ces circonstances, on peut citer l'impossibilité de procéder à la vibration des bétons destinés aux pieux, ainsi que les difficultés rencontrées lors de la vibration et du réglage. En outre, le remplissage optimal des coffrages présentant des formes complexes ou une accessibilité réduite peut s'avérer problématique, ce qui engendre des risques de ségrégation, d'enrobage insuffisant des armatures en acier et de défauts esthétiques sur les surfaces apparentes. Enfin, le pompage du béton sur des distances ou des hauteurs considérables constitue également un défi majeur.

Le but est d'optimiser les conditions de réalisation et la productivité, tout en préservant la qualité de l'ouvrage. C'est ainsi qu'elle s'est développée au début des années 90.

En France, le concept du béton de sable est parfaitement adapté à la technologie des bétons fluides (également appelés autonivelants).

Cependant, il est important de prendre en compte les précautions suivantes :

- L'étanchéité des coffrages requiert une exécution adéquate pour garantir la fluidité et la finesse granulométrique.
- Plan de support : lorsque la pente excède 1 %, il est impossible d'utiliser du béton de sable fluides, on envisage alors de l'autocompactants, qui nécessitent un ajustement manuel.

- L'aspect et la qualité de finition des parements des coffrages étant l'un des objectifs visés par l'utilisation de bétons de sable, il est primordial d'être exigeant avec les coffrages.

1.7.2 Principales caractéristiques des bétons de sable fluides sont :

Récemment, des bétons fluides ont été élaborés dans le dessein d'améliorer les conditions opérationnelles et la productivité, tout en rehaussant la qualité et la pérennité des ouvrages. Ces formulations ont suscité un intérêt marqué dans divers contextes, tels que les situations où l'utilisation de vibrations est restreinte, les difficultés d'accès aux zones renforcées de barres d'acier et aux formes complexes des coffrages, ainsi que les exigences de pompage du béton sur de longues distances. Le concept du béton de sable (BS) s'adapte particulièrement bien aux contraintes spécifiques énoncées ci-dessus. De plus, l'élimination totale ou partielle des agrégats de grande taille dans le BS diminue le risque de ségrégation [Ambroise, 1993-a].

- La consistance d'un béton de sable,(F) qui ne peut être appréciée par la mesure de l'affaissement au moyen du cône d'Abrams, se traduit par une propagation en plaque d'environ 55 à 60 cm. Dans le cas de revêtements routiers ou de dalles industrielles légèrement inclinées (de 1 à 1,5 c/o), il est recommandé de réduire cette propagation à environ 40 cm, ce qui peut requérir des interventions manuelles lors de la mise en place.
- Les propriétés mécaniques et de retrait sont extrêmement satisfaisants, permettant une diversité d'applications. La résistance au gel est adéquate, mais elle ne résiste pas aux sels de déverglaçage. La stabilité rhéologique est influencée par la quantité et la nature des fines ; les cendres volantes semblent préférer les charges calcaires.
- L'incorporation de fibres est importante dans le maintien de la fraîcheur du béton et dans la réduction du retrait plastique, favorisant ainsi son durcissement. Les fibres de polypropylène, en particulier, offrent des avantages substantiels en raison de leur effet sur la ductilité du matériau.
- Quant au traitement de surface, ces bétons fluides de sable ne peuvent pas être striés par balayage en raison de leur thixotropie. Ils ne doivent pas non plus être retouchés après leur mise en place. Toutefois, les tentatives de striage ou de talochage ponctuel sur des bétons très fluides entraînent souvent un suintement, pouvant conduire ultérieurement à la formation de croûtes ou de fissures.

1.7.3 Domaines d'application des bétons de sable fluides

1.7.3.1 Sur le plan des performances mécaniques

Les valeurs élevées ne sont pas préjudiciables. De surcroît, certaines additions, telles que les cendres volantes, possèdent une propriété pouzzolanique qui étend les résistances de plus de 28 jours.

Les valeurs de retraits plus surprenantes sont imputées à la qualité des formulations (ces bétons de sable, abondants en éléments fins, se révèlent capables de retenir l'eau), ainsi qu'à la rigueur lors de la fabrication et de la mise en œuvre (durée de malaxage en centrale et en toupie, efficacité de la cure, etc.).

Si les produits durcis procurent des performances adéquates au regard de leur utilisation, l'avantage principal des bétons de sable fluidifiés réside dans les améliorations qu'ils confèrent à l'état frais.

1.7.3.2 En bâtiment

Les bétons de sable fluidifié sont particulièrement employés dans tous les dallages intérieurs : dalles coulées sur terre-plein, sur prédalles, sur dalles de compression, etc.

La nature horizontale de ces éléments rend la fluidité particulièrement adaptée, tandis que les propriétés autoplaçante, voire autolissante, de ces bétons constitue un atout majeur

- L'intérêt principal réside dans les bénéfices suivants :
- Pompabilité, célérité et facilité de mise en œuvre ;
- Le personnel et le matériel sont restreints ;
- Aucun bruit, aucun réglage et aucun taillage mécanique superflus ;
- Produit terminé, apte à être utilisé immédiatement, indépendamment du revêtement ultérieur.

La fibretion (principalement des fibres métalliques) peut réduire la fréquence des joints.

1.7.3.3 En voirie

La fluidité ne convient pas aux pentes et aux dévers rencontrés dans la technique routière. Par ailleurs, la surface lisse est un obstacle à l'adhérence, d'autant plus que le traitement de surface est ardu à effectuer.

Cependant, quelques aménagements peu inclinés (aires de stationnement, pistes cyclables voies piétonnes, etc.) sont idéalement adaptés à l'utilisation du béton de sable fluidifié autoplaçant.

1.7.3.4 En génie civil

Des applications telles que les reprises en sous-œuvre, les injections et les pieux forés, présentent un intérêt pour les bétons de sable fluidifiés.

En règle générale, les bétons fluides de sable offrent des performances similaires aux bétons fluides traditionnels dont l'utilisation paraît s'intensifier. En fonction de la disponibilité locale de sables et de gravillons, le béton de sable pourra être employé dans les situations suivantes :

- risques de ségrégation préjudiciable ;
- forte densité de ferrailage ;
- recherche d'une texture fine.

Il semble contradictoire de garantir la fluidité avec des performances mécaniques optimales, des valeurs de retrait faibles et une bonne gestion de la durabilité. Cependant, avec une certaine expérience, de la conception à la fabrication et à la mise en place, il est envisageable de créer des dallages de grande qualité, avec des bétons offrant des performances courantes ou plus techniques.

Actuellement, grâce à l'émergence de nouvelles générations de superplastifiants, des bétons de sable extrêmement fluides peuvent être produits, tout en améliorant les performances météorologiques.

Pour élaborer ce type de béton, il est primordial de sélectionner le sable approprié : une courbe granulométrique large, continue et "pleine" assure un squelette solide. Si nécessaire, il est possible d'ajouter une charge en gravillons afin d'améliorer certaines performances.

En général, le dosage de ciment est d'environ 550 kg/m³ (étant donné la grande proportion des additions comme les fillers calcaires). Le rapport eau/ciment (E/C) peut être réduit (par exemple, E/C = 0.35 pour un dosage de 0.8% de MEDAFLOW-25) par rapport aux bétons de sable fluides (où le rapport E/C est plus élevé et proche de 1).

Dans une étude récente sur les bétons de sable autoplaçants (BSAP), Abidelah et ses collègues ont démontré, dans un travail publié en 2009 et portant sur la caractérisation d'un béton de sable autoplaçant (BSAP) à partir de déchets de carrière, qu'il est envisageable de produire des BSAP dont les caractéristiques à l'état frais et durci respectent les recommandations de l'Association Française de Génie Civil (AFGC) [AFGC, 2000], avec un rapport eau/liant (E/L) allant de 0.32 à 0.39 [ABIDELAH, 2009]. Les chercheurs ont employé des granulats dont le diamètre maximal (D_{max}) était de 8 mm, mais avec un dosage inférieur par rapport aux sables (le rapport gravier/sables : G/S est d'environ 0.25).

Dernièrement, Bouziani et ses collègues ont réussi à concevoir un BSAP [BOUZIANI, 2011], qui ne contient que du sable (un mélange de sable alluvionnaire et dunaire). Les nouveaux BSAP ont une étendue satisfaisante, mesurée à l'aide d'un mini-cône, allant de 27 à 33 cm, et des résistances mécaniques à la compression à 28 jours (allant jusqu'à 54 MPa). Dans cette étude, les auteurs ont également démontré l'importance d'un dosage optimal en poudre de

marbre (comme un filler calcaire) afin d'obtenir une viscosité modérée (pour éviter la ségrégation) tout en préservant une fluidité optimale du **BSAP**.

I.8. Conclusion

Le béton contenant du sable, du ciment, de l'eau et/ou des fines ajoutées est appelé béton de sable. En comparaison avec cette composition de base et afin de satisfaire aux exigences d'utilisation particulières, il est possible d'envisager d'autres matériaux, comme des matériaux auxiliaires, des graviers, etc. Afin d'obtenir un béton de sable avec des performances mécaniques optimales, il est essentiel de s'assurer que le béton soit le plus compact possible en choisissant du sable de bonne granulométrie et avec un diamètre maximal, et en remplissant correctement les espaces entre les grains avec des fillers de qualité et de grande précision. La majorité des utilisations actuelles du béton de sable portent sur ses caractéristiques particulières. En comparaison avec le béton traditionnel, en plus des économies réalisées en le substituant par du béton de sable, un certain nombre d'avantages sont présents tels que le coulis, le pompage, le travail en chute, l'aspect esthétique de la surface, etc. Le caractère physique et mécanique du béton de sable est influencé par le choix du sable et du filler. Il est important de souligner que la bonne exécution a également un effet sur la texture du béton. Les études récentes n'ont pas porté sur les tests de retrait, de fluage, d'adhésion des renforts et de durabilité, et les résultats obtenus ne concernent que des matériaux et des compositions spécifiques. Il est important de rappeler que le béton de sable a également été étudié en tant que béton liquide et autonivelant, et il a obtenu de bons résultats. Dans cette étude, nous visons à examiner comment les bétons de sable peuvent être intégrés avec les bétons auto-plaçants, qui possèdent des caractéristiques essentielles, comme mentionné dans le deuxième chapitre de cette étude. Notre objectif est aussi de saisir leurs réactions lors de l'intégration, en étudiant des éléments tels que la résistance mécanique, les caractéristiques à l'état frais et la longévité du béton.

Chapitre II



Le Béton autoplaçant

II.1. INTRODUCTION

Les bétons autoplaçants (BAP), également connus sous le terme anglais "Self-Compacting Concrete (SCC)", ont été introduits pour la première fois au Japon vers la fin des années 1980. Leur développement visait à rehausser la rentabilité, à garantir une mise en place optimale et constante d'un béton de qualité, ainsi qu'à réduire les nuisances sonores.

Les BAP sont également désignés comme bétons auto-compactants lorsqu'ils sont utilisés pour les parois verticales, ou encore comme bétons autonivelants dans le cas des parois horizontales [BATIMAG, 2005].

L'aspect le plus remarquable des BAP est leur grande flexibilité et leur aptitude à s'adapter parfaitement aux formes des coffrages les plus divers. En raison de leur grande homogénéité une fois installés, ils offrent la possibilité d'obtenir des structures solides et durables. Il est essentiel que le BAP puisse circuler facilement et sans vibration dans les zones confinées ou fortement ferrillées du coffrage, tout en maintenant une fluidité élevée et une résistance à la ségrégation adéquate.

Dans ce chapitre, nous examinons les principales propriétés des BAP, leurs avantages et leurs différents domaines d'application. Ensuite, nous effectuons un rappel théorique sur leur comportement rhéologique et les différents essais de caractérisation. Nous présentons également quelques résultats issus de la littérature concernant les corrélations possibles entre les mesures rhéologiques et les résultats des essais de caractérisation empiriques. Nous considérons aussi l'influence des constituants d'un BAP sur ses propriétés pertinentes, à savoir l'effet des granulats (gravier et sable), des fines d'ajout, du rapport eau/ciment (E/C), du superplastifiant et de la fibration. Enfin, nous concluons en présentant les principales approches de formulation des BAP connues jusqu'à présent, qui diffèrent de celles des bétons traditionnels.

Grâce aux avancées significatives dans la compréhension et la maîtrise des bétons autoplaçants (BAP), leur utilisation s'est considérablement élargie ces dernières années. De la formulation initiale à la mise en œuvre finale, en passant par les étapes de fabrication et de contrôle, les connaissances acquises permettent désormais d'employer ces bétons innovants dans un large éventail d'applications. Cependant, certains aspects méritent encore d'être perfectionnés pour optimiser davantage leur usage.

II.2. HISTORIQUE DU BETON AUTOPLAÇANT (BAP)

Depuis le début des années 1980, la proportion de travailleurs qualifiés dans le secteur de la construction au Japon a continué de diminuer, ce qui a entraîné une baisse du savoir-faire, notamment dans le domaine des techniques de vibration du béton. Une solution possible à cette problématique a été proposée en utilisant des bétons extrêmement fluides, qui ne nécessitent pas

d'énergie externe pour le serrage [OKAMURA, 2000]. C'est dans ce contexte qu'est né le concept des bétons autoplaçants. Outre leur facilité d'utilisation, ces bétons exhibent aussi l'avantage de réduire le temps de travail sur le chantier. Ce type de béton gagne en popularité en raison des nombreux avantages qu'il offre :

a) Sur la mise en œuvre :

- ✓ Diminution du temps de coulée ;
- ✓ Suppression de la vibration et donc diminution notable des nuisances sonores et de l'usure des moules métalliques et des coffrages ;
- ✓ Meilleures conditions de travail, ce qui permet d'attirer une main d'œuvre qui n'appréciait pas toujours les conditions de travail « bruyantes » ;
- ✓ Possibilité de couler des bétons dans des endroits inaccessibles ;
- ✓ Possibilité de couler des voiles de grande hauteur en une seule opération.

b. Sur la qualité du béton :

- ✓ Parfait remplissage des éléments fortement ferrailés ;
- ✓ Obtention d'une bonne qualité de parement (surface de béton lisse et donc moins de pores en surface) ;
- ✓ Et d'une manière générale, obtention d'une meilleure qualité du béton, in situ, pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers durant la réalisation ; cela va dans le sens d'une durabilité accrue des ouvrages.

c) Censurant la conception:

Il est possible de considérer de nouvelles formes d'éléments en béton ;

- Il est possible d'inclure des réservations dans la structure.

Toutefois, les bénéfices sont inévitablement accompagnés de certains désavantages :

- Prix accru des matières premières (ajouts, adjuvants) ;
- Changements dans les méthodes de production.

Les chercheurs japonais n'ont pas été publiés immédiatement. Il fallait prouver la faisabilité des bétons autoplaçants. Il a fait l'objet de plusieurs équipes de recherche et de développement. Des résultats concrets ont validé le travail effectué au Japon depuis une trentaine d'année. La formulation du béton autoplaçant dans différentes classes de résistance à un prix concurrentiel est un défi actuel. Il est indispensable de prendre en compte le cahier des charges qui tient compte des performances rhéologiques et les matériaux et techniques disponibles [SEDRAN, 1995].

II.3. DEFINITION DES BAP

Les bétons autoplaçants (BAP) sont des matériaux de construction innovants, caractérisés par une fluidité remarquable, une homogénéité exceptionnelle et une stabilité dimensionnelle optimale. Leur particularité réside dans leur capacité à se mettre en place sans nécessiter de vibration, la compaction s'opérant uniquement grâce à l'action de la gravité. Cette propriété confère aux structures réalisées avec des BAP une qualité équivalente à celle obtenue avec des bétons classiques [AFGC, 2000].

Les propriétés des BAP sont évaluées à l'aide de différents essais normalisés, dont les résultats permettent de fournir une définition quantitative précise de ces matériaux :

- L'affaissement au cône d'Abrams, qui mesure la consistance du béton, doit se situer dans une plage de valeurs cibles comprise entre 60 et 75 cm selon l'Association Française de Génie Civil (AFGC), et entre 50 et 60 cm selon la norme japonaise. Il est primordial de vérifier l'absence de ségrégation visible à l'issue de l'essai, qui se manifesterait par la formation d'auréoles de laitance ou l'amoncellement de gros granulats au centre.
- La capacité de remplissage, évaluée à l'aide de l'essai de la boîte en L, doit atteindre un taux supérieur à 0,8. Dans le cas d'ouvrages de génie civil fortement ferrailés, il est possible d'adapter le dispositif en allégeant la configuration du ferrailage dans la boîte en L.
- Le béton doit présenter une stabilité dimensionnelle sous l'effet de la gravité, excluant tout phénomène de ségrégation, ainsi qu'une capacité de ressuage limitée. Cependant, l'essai d'étalement au cône d'Abrams ne constitue pas un critère suffisant. Il est indispensable de contrôler ce paramètre en recourant à test de stabilité au tamis.

II.4. DOMAINES D'APPLICATION DES BAP

Le BAP constitue une solution idéale pour :

- Toutes sortes de carreaux, incluant les carreaux de compression sur des poutrelles hourdis ;
- Dalles pleines et planchers chauffants ;
- Rehaussement de niveau lors de la rénovation ;
- Radiers ;
- poutres, poteaux et Voiles.

II.5. MISE EN ŒUVRE ET PRECAUTIONS D'EMPLOI DU BAP

Précautions et recommandations pour la mise en œuvre des bétons autoplaçants (BAP)

La fabrication, le transport et la mise en œuvre des bétons autoplaçants (BAP) s'effectuent avec les équipements couramment utilisés pour les bétons ordinaires. Cependant, Il est essentiel de considérer avec soin les aspects mentionnés ci-après :

- Pour toutes les applications :
- La vitesse de bétonnage doit être contrôlée et ne pas être trop rapide afin de permettre l'élimination de l'air excédentaire ;
- Les mannequins de réservations doivent être solidement fixés ;
- Les ajouts d'eau sont strictement interdits ;
- Le béton frais doit être protégé par des conditions de cure appropriées.
- L'étanchéité du coffrage doit être assurée, ainsi que sa résistance à la poussée hydrostatique ;
- Pour les ouvrages verticaux :
- La hauteur de chute du béton doit être maîtrisée, et l'utilisation d'un tube plongeur est recommandée.
- Pour les ouvrages horizontaux :
- Des renforts d'armatures doivent être mis en place au niveau des angles rentrants, en prolongation des murs, des réservations et des seuils de portes.
- Un calepinage des joints est nécessaire ;

II.6. Exigences fondamentales pour une mise en œuvre optimale des BAP

Les bétons autoplaçants se distinguent par leur comportement exceptionnel à l'état frais. Ce type de béton doit présenter une ouvrabilité et une déformabilité remarquables, tout en maintenant une stabilité dimensionnelle optimale. Ces propriétés sont essentielles pour assurer la réalisation de structures durables et de qualité [SEDRAN, 1995]. Voici les exigences rhéologiques qu'un BAP doit satisfaire :

- Un BAP doit s'écouler naturellement sous l'effet de son propre poids (avec un débit suffisant), ce qui nécessite un étalement et une vitesse d'étalement importants.
- Un BAP doit être capable de remplir des zones confinées sans vibration. Toutefois, une fluidité élevée du béton peut ne pas être adéquate pour atteindre cet objectif. Les gravillons cisailent le mortier au moment de leur écoulement au droit d'un obstacle et sont susceptibles d'entrer en contact les uns avec les autres si ce dernier ne résiste pas

suffisamment au cisaillement **figure 2.1**. Il est possible que des arches se forment et perturbent l'écoulement par colmatage. Afin d'éviter ce phénomène, il est essentiel qu'un BAP offre une résistance adéquate à la ségrégation en phase d'écoulement dans les zones restrictives.

- L'homogénéité des propriétés mécaniques d'un BAP doit être assurée par une résistance à la ségrégation statique jusqu'à la prise du béton.
- En outre, il est important de ne pas exagérer le ressuage d'un BAP, car cela peut entraîner une diminution de l'adhérence des armatures en partie supérieure des levées par rapport à celles situées en zone inférieure lors du coulage, ainsi que l'apparition de fissures.

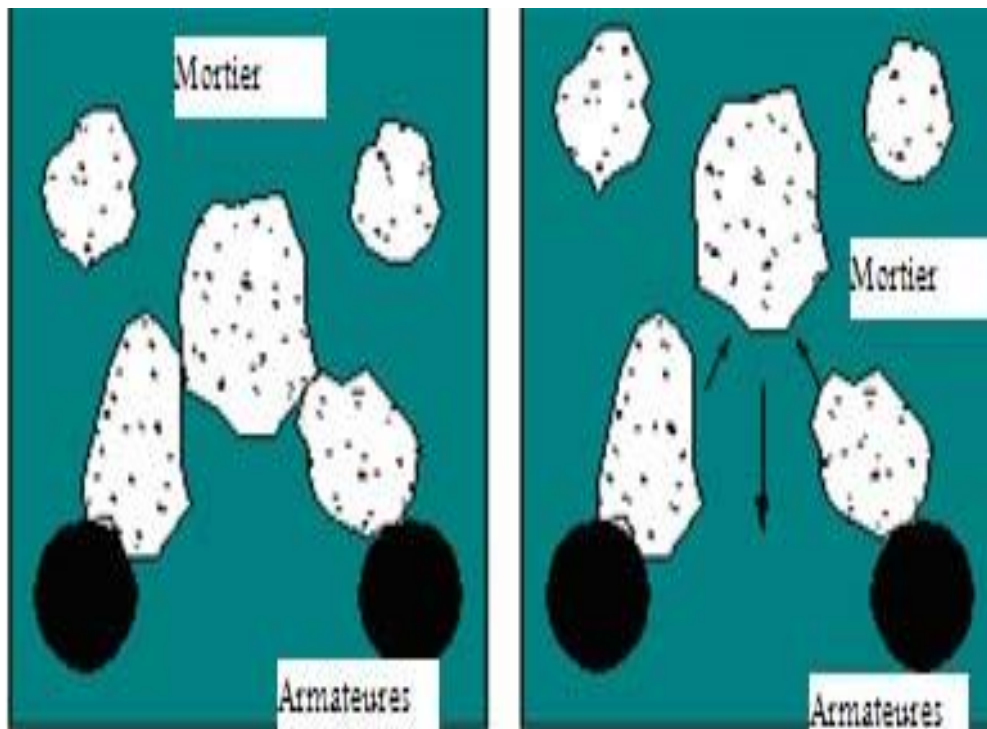


Figure 2.1 Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [SEDRAN,1995].

II.7. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE BAP

Bien que diverses approches puissent être adoptées pour la formulation des bétons autoplaçants (BAP), certaines qualités demeurent inhérentes à ces matériaux, malgré de légères variations d'une méthode à l'autre.

Pour répondre aux exigences spécifiques, la composition d'un BAP doit respecter les critères suivants [PROUGEAU, 2001 ; ABIB, 2004] :

1. Une proportion élevée en éléments fins : Afin d'assurer une cohésion optimale et une stabilité dimensionnelle adéquate, les BAP nécessitent une quantité importante de particules fines dans leur formulation.
2. Un volume de pâte conséquent : Pour garantir une fluidité et une déformabilité exceptionnelles, tout en évitant les phénomènes de ségrégation, la proportion de pâte dans un BAP doit être suffisamment élevée.
3. L'incorporation de superplastifiants : L'emploi d'adjuvants de type superplastifiant est indispensable pour obtenir une ouvrabilité remarquable, en réduisant la demande en eau et en maintenant une consistance fluide.
4. le recours à des agents de viscosité : Dans certains cas, l'ajout d'agents de viscosité, également appelés rétenteurs d'eau, peut s'avérer nécessaire pour améliorer la stabilité du BAP et prévenir la ségrégation des constituants.
5. Une fraction réduite de gravillons : Les BAP se caractérisent par un faible volume de gravillons dans leur composition, afin de faciliter leur écoulement et leur capacité à remplir les coffrages de manière optimale.

a) Quantité importante de fines

Les bétons autoplaçants (BAP) se distinguent par une proportion élevée d'éléments fins dans leur formulation, pouvant atteindre environ 500 kg/m³. Cette quantité importante de fines vise à minimiser les risques de ressuage et de ségrégation. Cependant, pour limiter les chaleurs d'hydratation et maîtriser le coût de la formule, le liant est souvent constitué d'un mixage de deux, voire trois composants.

Les critères de résistance à la compression, les critères de durabilité (DTU 21, normes **XP P 18-305** ou **EN 206, etc.**) et les paramètres d'ouvrabilité (fluidité) déterminent le choix et les proportions respectives de ces additions (cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire, etc.), ainsi que les paramètres d'ouvrabilité (fluidité).

L'intérêt des additions réside dans leurs propriétés physiques, notamment leur finesse. L'incorporation d'additions minérales modifie la compacité de la matrice cimentaire et influence les caractéristiques mécaniques du béton, tout en améliorant le comportement rhéologique à l'état frais **figure 2.2 [BILLBERG, 2001]**.

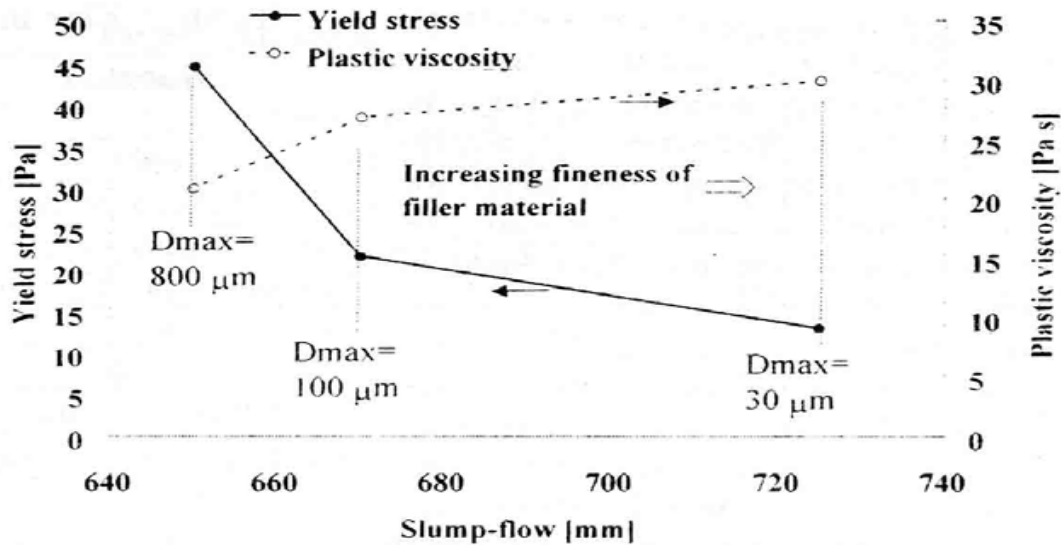


Figure 2.2 Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton [BILLBERG, 2001].

b) Volume de pâte élevé

L'étalement et la capacité de remplissage des bétons sont restreintes par les frottements entre les granulats. La pâte (ciment + ajouts + eau efficace + air) est cruciale pour éliminer les granulats. C'est la raison pour laquelle, dans les BAP, la quantité de pâte est importante, allant de 330 à 400 l/m³.

c) Emploi de superplastifiants

En ajoutant des superplastifiants, des adjuvants similaires à ceux utilisés pour les autres types de béton, tels que les polymères polycarboxylate et l'ester acrylique polyacrylate/polyacrylate, il est envisageable d'obtenir la fluidité des BAP. Ces adjuvants ne doivent pas être surdosés (assez proches du dosage de saturation) pour ne pas rendre le béton plus sensible aux variations de teneur en eau, ce qui pourrait entraîner des problèmes de ségrégation et de ressuage.

C'est à la surface que des particules de ciment et des éléments fins les superplastifiants, ce qui diminue le phénomène de floculation en présence d'eau. Selon **BARON (1999)**, les particules sont disséminées grâce à une combinaison d'effets stériques et électrostatiques, entraînant une élévation de la proportion d'eau libre [BARON, 1999].

d) Utilisation d'un agent de viscosité (rétenteur d'eau)

L'incorporation de superplastifiants permet d'améliorer la capacité d'ouverture du béton, tout en diminuant sa viscosité. Pour compenser ce dernier aspect, Les agents de viscosité présents dans les BAP sont souvent des dérivés celluloseux, des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses. Ces agents interagissent avec l'eau et augmentent la

viscosité. Leur rôle est de prévenir le ressuage et les risques de ségrégation en compactant la pâte et en assurant une distribution homogène des différents éléments.

Mais l'effet de ces agents est, dans une certaine mesure, opposé à celui des superplastifiants. Ainsi, pour créer un BAP, il est essentiel de adopter un couple agent de viscosité-superplastifiant compatible et d'optimiser leurs dosages. Ces produits sont bénéfiques pour les bétons avec des rapports élevés d'eau/liant (E/L), lorsque les éléments fins ne sont pas suffisants pour fixer l'eau dans le béton. Cependant, ils ne conviennent pas à des BAP qui ont des rapports E/L faibles (également inférieurs à 0,3). Les bétons intermédiaires nécessitent une étude individuelle pour leur utilisation.

Selon **SEDRAN (1999)**, les agents de viscosité ont également la réputation de diminuer la sensibilité des BAP aux variations de teneur en eau, Cela peut provoquer des excès d'entraînement d'air et une réduction de la fluidité [**SEDRAN , 1999**].

e) Faible volume de gravillons

On peut fabriquer des BAP en utilisant des granulats roulés ou concassés. Néanmoins, leur volume doit être restreint, car les granulats sont responsables du blocage du béton dans les zones restreintes. De plus, ils jouent un rôle dans l'augmentation de la taille du squelette granulaire du béton, ce qui permet de diminuer la quantité de liant requise pour assurer une bonne ouvrabilité et atteindre la résistance désirée.

Ces deux éléments entraînent l'utilisation d'un rapport gravillon/sable (G/S) d'environ 1, qui peut être modifié en fonction de la configuration de la structure étudiée.

En général, le diamètre maximal des gravillons (D_{max}) dans un BAP varie de 10 à 20 mm. Toutefois, les chances de blocage pour un confinement spécifique augmentent avec D_{max} , ce qui entraîne une réduction du volume de gravillons [**JACOBS, 1999**].

En bref, les éléments essentiels d'une formulation de BAP sont les mêmes que ceux d'une formulation de béton vibré, mais leurs proportions varient **figure 2.3**. Pour obtenir les caractéristiques nécessaires à l'état frais pour un BAP, il faut ajouter une quantité considérable d'éléments fins et utiliser des adjuvants, en particulier des superplastifiants.

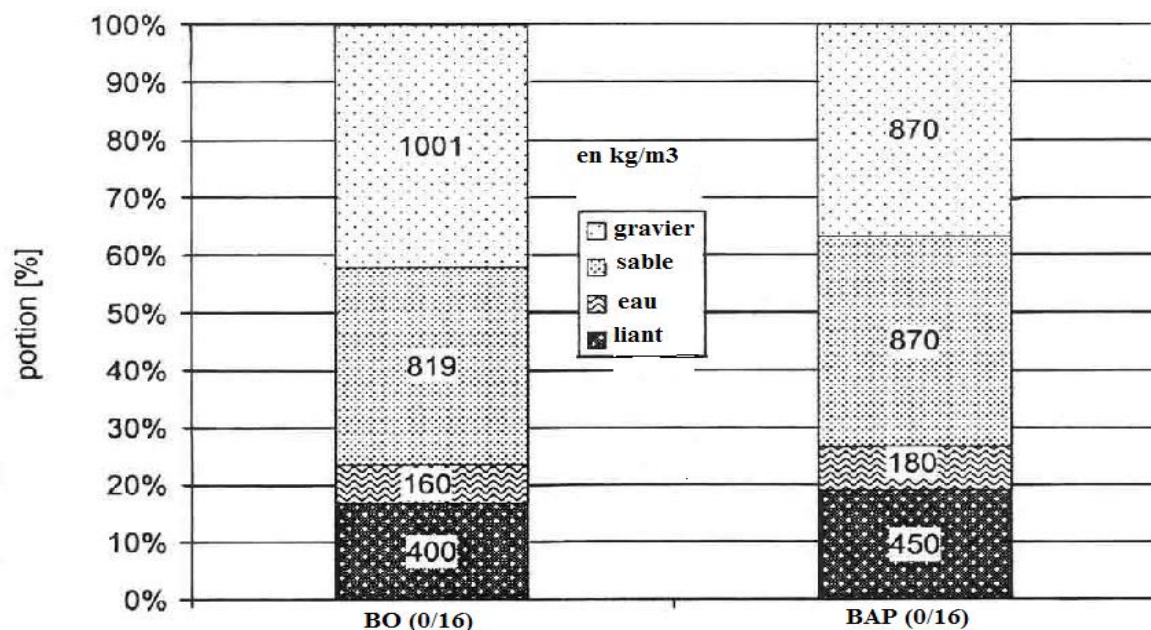


Figure 2.3 Exemple de comparaison entre une composition de BAP et celle d'un BO [JACOBS , 1999].

II.8. CONSTITUANTS DES BAP

Le béton autoplaçant (BAP) est composé des mêmes éléments de base que le béton ordinaire (ciment, gravillons, eau), avec des additions minérales comme le calcaire, la fumée de silice ou les cendres volantes, qui peuvent réduire le dosage en ciment. La formulation des BAP intègre des superplastifiants et des agents de viscosité pour modifier ses propriétés rhéologiques.

Selon [LOUKILI, 2003], les BAP se distinguent des bétons classiques par une teneur élevée en fines et l'utilisation fréquente d'un agent de viscosité. La composition inclut du ciment, de l'eau, des granulats, des fines, des adjuvants et un agent de viscosité pour garantir une résistance mécanique adéquate.

II.8.1 Le Ciment

La composition du ciment peut également inclure différents éléments tels que le la pouzzolane naturelle (Z), laitier de haut fourneau (S), les cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W), les schistes calcinés (T), la fumée de silice (D), le calcaire (L), des composants secondaires, des additifs et du sulfate de calcium (gypse, hémihydrates, anhydrite) [KHELIFA, 2002]. En général, on utilise du ciment Portland CPA-CEM I 42,5 pour fabriquer un BAP, avec au moins 95% de clinker et peut-être un composant secondaire, ou du ciment Portland constitué CPA-CEM II/A et B 42,5 ou 52,5, avec une contribution de clinker de 65 % à 94 %, le reste étant constitué d'un ou plusieurs ajouts [Rapport d'essais préliminaires, 2005].

II.8.2 Les Granulats

Afin de rendre le mélange plus fluide, la fabrication d'un bon BAP nécessite généralement l'utilisation de granulats roulés de rivière ainsi qu'une ajout plus important de fines (comme des fillers calcaires). La quantité de granulats est restreinte car les frottements entre les granulats restreignent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons. La proportion "granulats/sable" exprimée en masse est généralement d'environ 1 dans un BAP. L'augmentation du diamètre maximal (D_{max}) des granulats entraîne une augmentation du risque de blocage dans un environnement fortement ferrailé [FEBELCEM, 2005]. Le D_{max} des granulats doit donc se situer entre 10 et 20 mm.

II.8.3 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage, un ingrédient indispensable à la confection du béton, doit répondre à des critères de propreté stricts. Selon les recommandations de [DREUX, 1998], les matières en suspension ne doivent pas dépasser 5 g/l pour ceux à faible résistance et 2 g/l pour les bétons à haute résistance. Quant aux sels dissous, leur teneur maximale admissible est de 15 g/l pour les bétons à haute résistance et de 30 g/l pour les bétons à faible résistance.

Pour obtenir un béton autoplaçant (BAP) possédant une mobilité adéquate tout en évitant les phénomènes de ségrégation et de ressuage, il est essentiel d'incorporer une quantité élevée de fines et de limiter le rapport "eau/ciment" à des valeurs inférieures à 0,55, voire 0,50. L'utilisation de superplastifiants permet d'atteindre la fluidité souhaitée malgré cette faible teneur en eau.

Même si l'eau potable est supposée respecter les normes de la norme **NF EN 1008** pour la production des BAP, les autres sources d'eau (récupérée, souterraine, de surface, de rejet industriel, de mer ou saumâtre) nécessitent des tests de contrôle préalable ainsi que des analyses mécaniques et chimiques. La viscosité et la capacité de remplissage du béton autoplaçant sont fortement influencées par le dosage en eau.

II.8.4 Ajouts minéraux

La plupart des ajouts minéraux sont des sous-produits provenant de l'industrie et leur coût est souvent égal au coût du transport et de manipulation (broyage par exemple). L'incorporation de ces ajouts minéraux à la formulation de béton comme substituant du ciment (produit plus cher), contribue à réduire le coût du béton, à réduire la quantité de combustible utilisée pour l'industrie du ciment, ainsi que l'émission du CO₂ de l'industrie. Obtenus par broyage fin ou pulvérisation de roches telles que le calcaire, le basalte ou le kieselguhr, ils présentent trois atouts majeurs selon [Z.GUEMMADI, 2004].

cimentière dans la nature [EL BARRAK ,2003], et permet d'obtenir un ciment composé plus économique. De plus, Les ajouts minéraux réduisent la chaleur dégagée du béton lors de l'hydratation, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

Les ajouts minéraux substituant le ciment peuvent être classés en fines pouzzolaniques telles que la fumée de silice et la pouzzolane et fines inertes ou quasi inertes telles que le calcaire, la poussière. Une autre classification est basée sur la source de chaque produit d'où on trouve :

a) Les produits artificiels

- Les déchets de briques concassées ;
- filler calcaire ;
- les déchets céramiques ;
- Le laitier des hauts fourneaux ;
- Les cendres volantes ;
- La fumée de silice ;
- L'argile calcinée (méta kaolin) ;
- Les déchets d'incinération ;

b) Les produits naturels

- La pouzzolane naturelle (cendres volcaniques, scories) ;
- Le calcaire ;
- L'argile opaline (blanchâtre) ;
- Les additions siliceuses (sable) ;

Parmi ces ajouts minéraux cités ci-dessus, nous avons choisi les fines calcaires pour être un élément de substitution au ciment et au sable dans ce présent travail. On étudiera son influence sur la formulation et le comportement de béton autoplaçant à l'état frais, durci et sa durabilité.

L'augmentation du dosage des fines dans un béton, pour un dosage constant en ciment, implique l'augmentation de la concentration volumique en solides et donc, favorise généralement la croissance de la viscosité du béton. Par contre, pour un dosage en poudre (ciment et addition) constant, la substitution du ciment par de l'addition peut influencer l'écoulement du béton en fonction du type de l'addition. En effet, certaines additions comme la fumée de silice ont une demande en eau importante par rapport au ciment, ce qui peut réduire les propriétés d'ouvrabilité et mécaniques du béton, et augmenter la viscosité. D'autres additions comme les fines des laitiers de hauts fourneaux et les cendres micronisées ont de leur côté une faible demande en eau par rapport au ciment, et sont donc bénéfiques pour la formulation des bétons autoplaçants et à hautes performances, puisqu'ils permettent de baisser la viscosité et d'améliorer les propriétés mécaniques des bétons. [LANGE ET AL. 1997] et [CYR & MOURET 2003] L'utilisation de filler

calcaire dans les ciments complète, par sa grande finesse, la distribution granulométrique du mélange, ainsi il diminue le frottement inter-particules, assure une meilleure compacité du béton et libère une partie de l'eau de gâchage [YAHIA ET AL. 2005].

II.8.5 Adjuvants

Les adjuvants sont des substances chimiques organiques ou inorganiques qui sont incorporées en faible quantité (moins de 5 % de la masse du ciment) dans le mortier, le béton ou le coulis, conformément à la norme **NF EN 934-2**. Ils peuvent être incorporés en poudre ou en solution, avant ou pendant le processus de malaxage, afin de modifier certaines caractéristiques du mélange à l'état frais, pendant la prise et le durcissement ou à l'état durci.

II.8.5.1 Superplastifiants

Les superplastifiants font partie de ces adjuvants, qui sont ajoutés au mélange peu avant sa mise en place. Ils ont pour principale fonction d'entraîner une augmentation significative de l'ouvrabilité. Les polymères organiques solubles dans l'eau sont synthétisés de manière complexe, ce qui entraîne la formation de longues chaînes de molécules avec des masses moléculaires élevées, ce qui explique leur prix.

Les molécules à longues chaînes des superplastifiants ont principalement pour effet de s'enrouler autour des grains de ciment et de leur donner une charge très négative. La présence de cette charge entraîne une répulsion mutuelle et une dispersion des grains de ciment (**voir figure 2.4**). Malgré l'absence de changement dans la structure de la pâte de ciment hydratée, les superplastifiants favorisent une meilleure répartition des grains de ciment et, par conséquent, une meilleure hydratation **figure 2.5**. L'utilisation de superplastifiants pourrait expliquer dans certains cas une hausse de la résistance du béton à rapport eau/ciment constant [CRISTIEN, 2003].

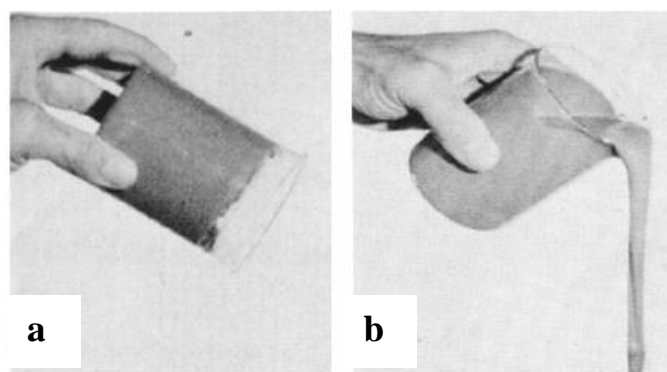


Figure 2.4 Effet de superplastifiant sur le ciment :

(a) ciment et eau, (b) ciment, eau et superplastifiant [CRISTIEN, 2003].

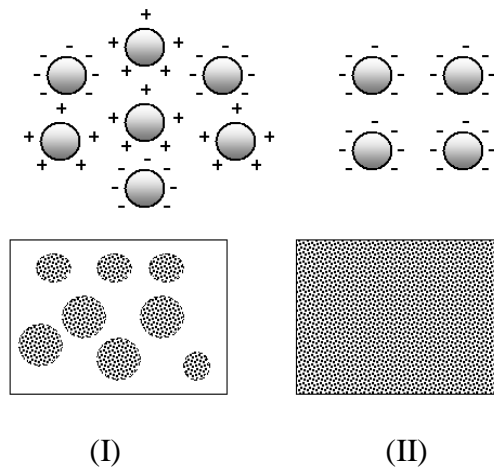


Figure 2.5 Action de dispersion des grains de ciment: (I) pâte floculée ; (II) pâte dispersée [CRISTIEN, 2003].

II.8.5.2 Agent viscosité

Néanmoins, les fluidifiants ont tendance à réduire la viscosité du béton, ce qui altère sa stabilité face au phénomène de ségrégation [HASNI, 1999]. C'est alors que les agents de viscosité interviennent, Ils se distinguent principalement par leur capacité à altérer le comportement rhéologique des milieux aqueux dans lesquels ils font usage. Il est intéressant d'utiliser ces agents dans la fabrication des bétons autoplaçants (BAP).

Dans la plupart des cas, les agents de viscosité proviennent de la cellulose, des colloïdes naturels, des polysaccharides ou des suspensions de particules siliceuses. Ils se mêlent à l'eau et accroissent sa viscosité (voir figure 2.6). Ils ont pour fonction principale de prévenir les risques de ségrégation et le ressuage en épaississant la pâte et en assurant une distribution homogène des composants.

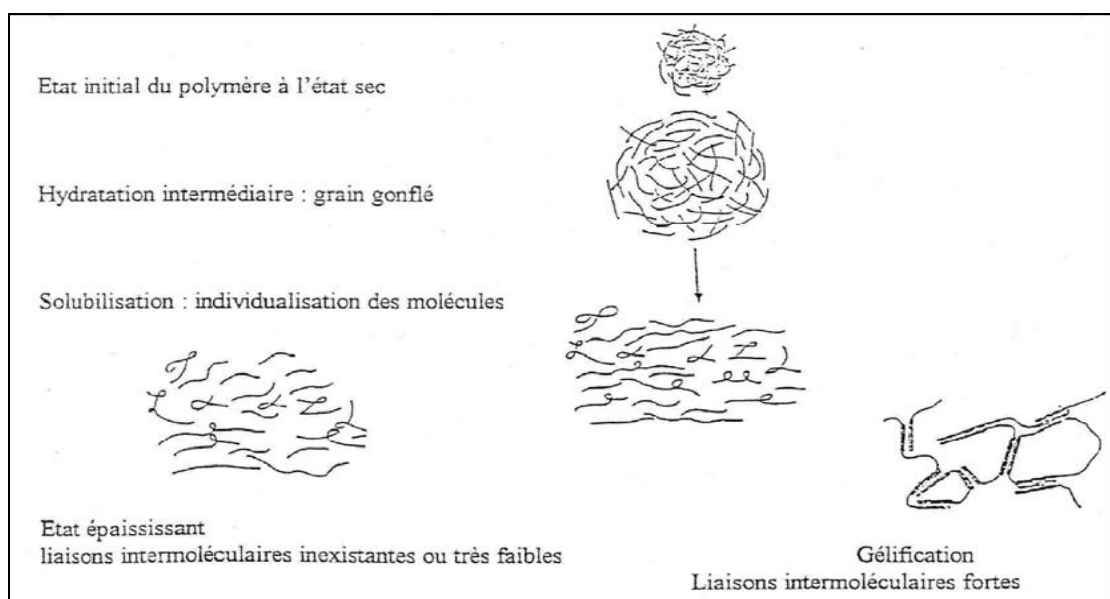


Figure 2.6. Interaction entre l'eau et les polysaccharides [L.HASNI, 1999].

En absorbant les molécules d'eau par les longues chaînes du polymère (liaison hydrogène), les agents de viscosité agissent. Le gonflement du polymère est causé par ce phénomène, ce qui entraîne une augmentation de la viscosité de l'eau et, par conséquent, celle de la pâte de ciment [KHAYAT, 2003].

En effet, pour un même squelette granulaire, il a été démontré que la combinaison d'un agent de viscosité et d'un superplastifiant permet d'améliorer les propriétés du béton frais et d'augmenter de façon significative la résistance à la ségrégation et au ressuage [SEDRAN, 1995].

II.9. LA FORMULATION DES BETONS ORDINAIRES

La formulation d'un béton, qui consiste à sélectionner les proportions adéquates de chaque constituant afin d'obtenir les propriétés mécaniques désirées, peut être réalisée selon deux approches principales : l'approche graphique et l'approche expérimentale. L'approche graphique comprend les méthodes Faury, Bolomey et Dreux-Gorisse, tandis que l'approche expérimentale inclut les méthodes Valette et d'Abrams.

Tout d'abord, il est essentiel que la composition d'un béton respecte les normes **NF EN 206-1**, qui limite la quantité maximale d'eau et la quantité minimale de ciment tolérée dans la formule sont limitées par cette norme, Selon le contexte dans lequel le béton sera installé. En outre, les producteurs doivent garantir une résistance à 28 jours sur des éprouvettes pour chaque environnement spécifique. Les dosages de ciment peuvent être plus ou moins élevés que les recommandations de la norme en fonction de l'expérience de chaque entreprise, qui varie selon les caractéristiques de ses matières premières, y compris la masse volumique des granulats.

L'utilisation de ciments spécifiques en fonction de l'agressivité du milieu est également requise par la norme **NF EN 206-1**, ainsi que l'ajout d'adjuvants qui confèrent des caractéristiques particulières à la pâte de ciment, telles que le temps de mise en œuvre, la plasticité ou la quantité

II.10.METHODES DE FORMULATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS

Au cours des dernières années, diverses méthodes de fabrication ont été mises au point pour la création de bétons autoplaçants (BAP). Parmi les techniques les plus répandues pour la formulation, on peut mentionner [PHILIPPE, 2004] :

- L'approche de l'optimisation des mortiers
- L'approche de l'optimisation du squelette granulaire
- L'approche optimale de la pâte
- L'approche chinoise

Peu importe l'approche utilisée, l'analyse de 51 études menées à travers le monde [DOMONE, 2006] montre que la composition des BAP repose sur :

- Un volume de pâte compris entre 30 et 42 % du volume total du BAP

- Un volume de gravillons compris entre 28 et 38 % du volume total du BAP
- Un rapport eau/liant (E/L) inférieur à 0,48 en poids de BAP
- Un dosage en superplastifiant proche de son dosage à saturation
- Un dosage en liant (ciment + additions) compris entre 385 et 635 kg/m³

II.10.1 Méthode basée sur l'optimisation du squelette granulaire

La méthode basée sur l'optimisation du squelette granulaire repose sur l'analyse granulaire du mélange, qui comprend une analyse à l'état sec pour prévoir la compacité et une analyse à l'état humide pour anticiper le comportement rhéologique. Un modèle d'optimisation des mélanges granulaires appelé "Modèle d'Empilement Compressible" (MEC) a été développé par De Larrard. Ce modèle décrit le comportement à l'état frais d'un béton à partir de sa structure granulaire et s'appuie sur les notions de compacité virtuelle et d'indice de serrage [DE LARRARD, 1992].

1. Compacité virtuelle d'un mélange granulaire

Dans un empilement granulaire, une compacité virtuelle (maximale) peut être atteinte par un arrangement optimal des grains. Pour un mélange constitué de n classes, la compacité virtuelle (γ_i) de la classe i est calculée selon une formule spécifique.:

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} [1 - \beta_j + b_{ij} \beta_j (1 - 1/\beta_i)] y_j - \sum_{j=i+1}^n [1 - a_{ij} \beta_i / \beta_j] y_j} \quad (1)$$

Où :

β_i et β_j - compacités résiduelles des classes i et j respectivement.

y_j - proportion volumique de la classe j .

a_{ij} et b_{ij} – sont des coefficients de desserrement et de l'effet de paroi respectivement.

Compacité réelle et la notion d'indice de serrage

En pratique, un mélange granulaire ne peut pas atteindre la compacité virtuelle (γ_i). Pour calculer la compacité réelle, un paramètre décrivant le degré de compactibilité d'un mélange granulaire a été introduit : l'indice de serrage (K):

$$K = \sum_i K_i = \sum_i \frac{y_i / \beta_i}{\frac{1}{\varphi} - \frac{1}{\gamma_i}} \quad (2)$$

Où :

K_i - indice de serrage de chacune des classes granulaires;

y_i - proportion volumique des grains de la classe i ;

β_i - compacité résiduelle de la classe i ;

ϕ - compacité réelle du mélange;

γ_i - compacité virtuelle lorsque la classe i est dominante.

II.10.2 Méthode basée sur l'optimisation du mortier

Cette méthode a été initialement proposée par des chercheurs japonais [OKAMURA, 1995 ; NAGATAKI, 1995]. Elle permet d'obtenir des formulations avec une forte concentration de ciment, ce qui entraîne des quantités de pâte considérables. Les bétons qui en résultent présentent une faible quantité de granulats, une surcharge de liants et sont économiquement peu rentables **tableau 2.1.**

La méthode repose sur les concepts suivants :

- ✓ Quantité de gravillons limitée à 50% de leur compacité (rapport entre le volume de grains solide et le volume total du système grains+vides) afin de minimiser les risques de blocage.
- ✓ Volume du sable arbitraire de l'ordre de 40% du volume total de mortier.
- ✓ Rapport « $\frac{E}{\text{Poudre}}$ » et un dosage en superplastifiant optimisés à partir d'essais sur mortier en utilisant des essais d'étalement au mini-cône et au V-Funnel. Ces essais offrent la possibilité de déterminer deux paramètres précis :

$$\Gamma_m = \frac{(D)^2 - (D_0)^2}{(D_0)^2} \quad (3)$$

et

$$R_m = \frac{10}{t} \quad (4)$$

Où D_0 est le diamètre inférieur du cône, D est l'étalement et t est le temps d'écoulement du mortier. Certains auteurs montrent que pour avoir un bon BAP: $\Gamma_m = 5$ et $R_m=1$ ([SEDRAN ,1999], [JIN ,2002] et [BETHMONT ,2005]).

Tableau 2.1 Exemples de différentes compositions utilisées au Japon (kg/m³).

	Ciment	Laitier	Cendres	Filler	Sable	Gravillon	Eau	SP	Agent de viscosité
HAYAKAWA <i>et al.</i> [30]	200	200	100	0	704	898	165	6	0
NAGATAKI <i>et al.</i> [43]	180	220	100	0	753	926	170	7.7	1.5

II.10.3 Méthode basée sur l'optimisation de la pâte

Cette approche, élaborée par Van Bui et Montgomery [BETHMONT,2005], vise à réduire la quantité de pâte tout en respectant deux critères en même temps:

- ✓ La fluidité de la pâte est un critère qui permet de définir un volume minimal de la pâte tel qu'indiqué dans l'équation 5:

$$V_{\text{pâte mini}} = 1 - \frac{1 - V_{\text{vides}}}{\left(\frac{e_{\text{mini}}}{D_{\text{moyen}}} + 1\right)^3} \quad (5)$$

Où D_{moyen} est le diamètre moyen des granulats (mm), e_{mini} est la distance minimale entre les granulats nécessaire pour fluidifier le béton.

- ✓ Il est nécessaire d'introduire un volume maximal de granulats, V_{bi} , de taille d_i , au-delà duquel le béton ne peut plus s'écouler en milieu confiné.

II.10.4 Méthode de formulation chinoise

De nombreux autres pays européens ont adopté et utilisé la méthode japonaise comme base pour le développement des BAP. Une nouvelle approche pour la composition des BAP, initialement fondée sur la granulométrie des granulats (sable et gravier), puis sur le remplissage des vides entre les granulats avec volume minimal et suffisant de pâte, a été proposée par [SUN KUNG, 2001 ; AITCIN, 2001]. Cette méthode, appelée méthode chinoise, est considérée comme plus simple, plus facile à exécuter et plus économique que la méthode japonaise.

A-Etape 1 : Calcul du dosage des granulats

La première étape de la méthode chinoise est le calcul du dosage des granulats. Le facteur de compacité PF des granulats joue un rôle dans le dosage des granulats dans le BAP, qui est défini comme le rapport entre la masse des granulats dans le cas où ils sont bien remplis et dans le cas où ils sont moins remplis. Une forte valeur de PF pourrait nécessiter une quantité importante de granulats gros et fins, ce qui pourrait diminuer la capacité d'autoplaçance et la résistance à la compression du béton. Il est donc crucial de trouver la valeur optimale de PF afin de concevoir une méthode de formulation d'un BAP.

On peut calculer la proportion de granulats gros et fins en utilisant les deux équations suivantes:

$$M_g = PF \times \rho_{gl} \left(1 - \frac{S}{G}\right) \quad (6)$$

$$M_s = PF \times \rho_{sl} \times \frac{S}{G} \quad (7)$$

M_g : Proportion des gros granulats (kg/m^3)

M_s : Proportion des petits granulats (kg/m^3)

ρ_{gl} : Masse volumique apparente des gros granulats (kg/m^3)

ρ_{sl} : Masse volumique apparente des petits granulats (kg/m^3)

S/G : volume de proportion des petits granulats sur le volume total des granulats (50% et 57%)

B-Etape 2 : Calcul du dosage de ciment

L'estimation du dosage de ciment est la deuxième étape. D'après la Société japonaise de génie civil (JSCE), il est conseillé d'utiliser un dosage de ciment de 270 à 290 kg/m^3 [JAPANESE, 1998].

En général, à Taïwan, les BAP ou BHP doivent avoir une résistance à la compression de 20 PSI (0,14 MPa) pour 1 kg de ciment. Ainsi, le dosage du ciment est établi en conséquence :

$$C = \frac{\sigma'c}{20} \quad (8)$$

C : dosage en ciment (kg/m^3)

$\sigma'c$: résistance à la compression (psi)

C-Etape 3 : Calcul du dosage en eau

La troisième étape consiste à calculer la quantité d'eau en utilisant le rapport eau/ciment établi expérimentalement à l'aide d'essais de compression. La littérature permet d'évaluer la quantité d'eau nécessaire pour les additions fines et le dosage du superplastifiant. Il est nécessaire d'adapter les proportions du mélange jusqu'à ce que le béton réponde aux exigences de qualification d'un BAP. Par exemple, si le BAP a une faible maniabilité, il est possible d'ajuster la valeur de PF afin d'améliorer l'ouvrabilité. Quelques résultats de la méthode chinoise appliquée à un BAP sont affichés dans le **tableau 2.2**. Résume quelques exemples de résultats de la méthode chinoise sur un BAP.

Tableau 2.2 Constituants du BAP (kg/m^3), [SUNKUNG,2001 ; AITCIN,2001].

$\sigma'c$ (MPa)	Gros granulats (kg/m^3)	Petits granulats (kg/m^3)	Ciment (kg/m^3)	Cendres (kg/m^3)	Pouzzolane (kg/m^3)	Eau (l/m^3)	SP (%)
27.5	743	961	200	157	67	176	7.6
34.3	731	945	250	154	66	173	8.5
41.2	718	928	300	148	63	172	8.2
48	706	912	350	142	61	170	8.8

II.10.5. Méthode basée sur le plan d'expérience (méthode statistique)

L'absence d'une méthode unique et universelle pour formuler les bétons autoplaçants (BAP) s'explique par la grande diversité des matériaux utilisés dans leur composition, contrairement à la méthode Dreux-Gorisse employée pour les bétons ordinaires. De plus, la formulation des BAP nécessite la réalisation de plusieurs gâchées pour prendre en compte tous les facteurs influençant les propriétés du béton à l'état 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 spécifiques. Ces méthodes établissent des modèles statistiques qui mettent en évidence l'effet de chaque paramètre de formulation et leurs interactions sur ces propriétés, tout en minimisant le nombre de gâchées nécessaires [BOUZIANI, 2012].

Une étude a été réalisée par Khayat et ses collègues (2000) en considérant les éléments suivants : le volume des gravillons, la quantité de fines (ciment et additions, notée C+A), le rapport massique entre l'eau et les fines E/(C+A), la quantité de superplastifiant et la substance de viscosité. Chaque facteur a été examiné sur une plage de cinq points, ce qui a donné un total de 25 compositions testées. Les modèles obtenus, tels que l'étalement et le taux de remplissage, ont été fournis par les auteurs en fonction de divers facteurs. Toutefois, ces modèles ne s'appliquent qu'aux composants spécifiques utilisés dans l'analyse. Cette méthode, au-delà d'une simple méthode de formulation, est principalement un outil pour rectifier une formule qui ne respecterait pas, par exemple, les critères de l'AFGC (2008) [BENABED, 2012].

II.10.5.1. Notions sur les plans d'expériences

Dans le champ des plans d'expériences, la grandeur d'intérêt, appelée réponse et généralement notée Y, est influencée par des variables nommées facteurs [GOUPY ET CREIGHTON, 2006]. Il existe plusieurs types de facteurs (continus, discrets, ordonnables, etc.), et la valeur attribuée à un facteur pour une expérience est appelée niveau. L'expression des niveaux implique une codification des valeurs réelles et un déplacement de l'origine de mesure, créant ainsi un nouveau paramètre : le pas, qui représente la moitié de la différence entre la valeur réelle du niveau haut et celle du niveau bas **figure 2.7**. Une formule permet de passer des variables d'origine A aux variables codées x, et inversement (A0 étant la valeur centrale en unités courantes):

$$x = \frac{A - A_0}{Pas} \quad (9)$$

Domaine d'étude du rapport Gravier/Sable (G/S)

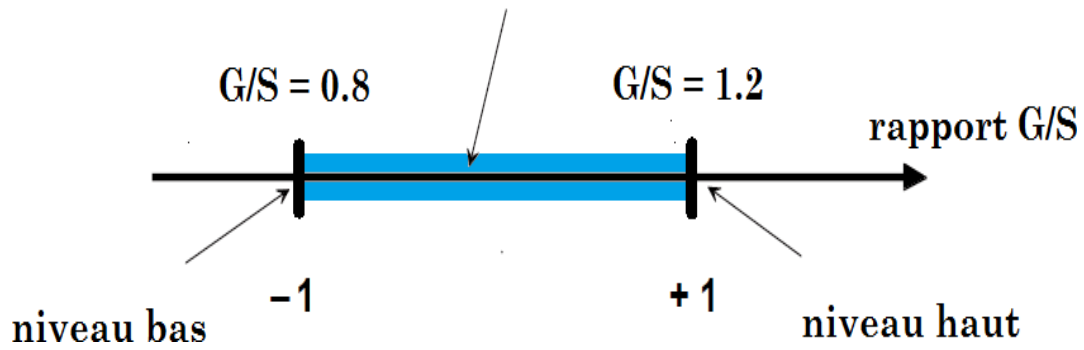


Figure 2.7 Le domaine de variation du rapport G/S [GOUPY ET CREIGHTON, 2006].

Dans le cas de l'analyse de l'effet d'un facteur, ses variations sont habituellement restreintes entre un seuil inférieur et un seuil supérieur, définies en fonction des particularités de l'analyse. Le domaine de variation du facteur englobe l'ensemble des valeurs que le facteur peut prendre entre ces deux niveaux **figure 2.8**. Quand plusieurs facteurs sont présents, chacun a son propre champ de variation. Il est essentiel de ramener tous les facteurs à une échelle commune afin d'obtenir une représentation commune [Goupy et Creighton, 2006].

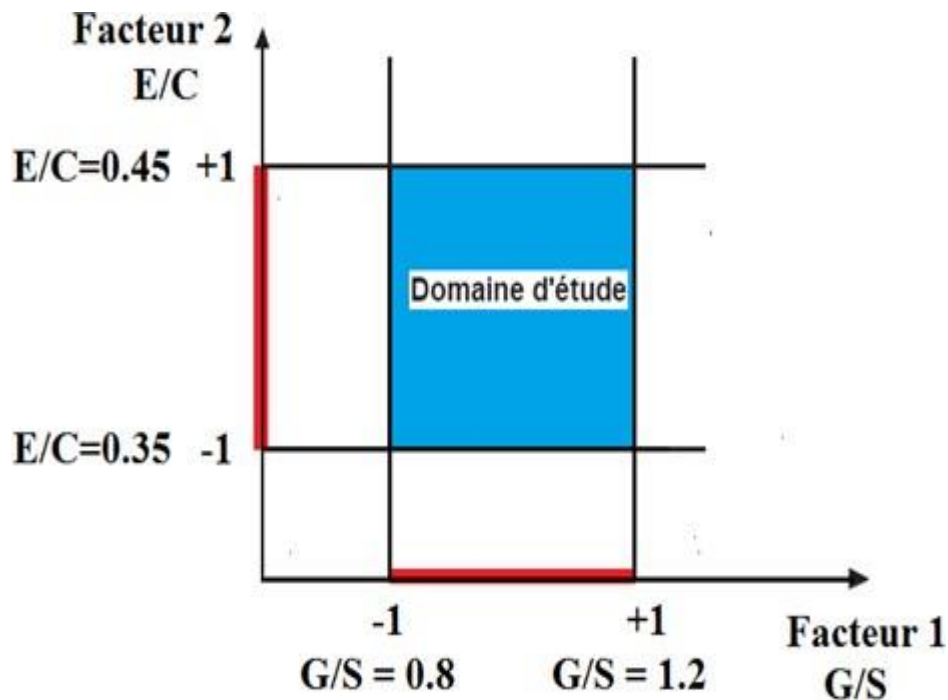


Figure 2.8. Domaine d'étude délimité par les facteurs G/S et E/C [GOUPY ET CREIGHTON, 2006]

II. 10.5.2. Modélisation mathématique de la réponse

Une fois le domaine expérimental optimisé, il est temps de procéder aux expériences proposées. Le but est de trouver un modèle capable de prédire comment les réponses varient en fonction des facteurs dans le domaine étudié.

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

$$y = f(x_1, x_1, x_1, \dots, x_n) \quad (10)$$

Pour approximer cette relation, le développement limité de Taylor-Mac Laurin est souvent utilisé [Goupy, 2007]. En considérant les dérivées comme des constantes, la relation prend la forme d'un polynôme de degré croissant:

$$y = a_0 + \sum_{i=1} a_i x_i + \sum_{\substack{i,j \\ i < j}} a_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1} a_{ii} x_i^2 + \dots \quad (11)$$

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} et a_{ii} sont les coefficients du polynôme.

Ce modèle, appelé modèle a priori ou postulé, permet de faire des prévisions dans un domaine d'étude bien défini. Lors de la modélisation de données expérimentales, deux ajustements supplémentaires sont nécessaires pour adapter le modèle mathématique théorique:

- 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 nécessite l'utilisation d'une méthode de régression, comme celle basée sur les critères d'optimisation des moindres carrés [GOUPY ET CREIGHTON, 2006; BOUZIANI, 2012].

II.10.5.3. Analyse de la variance

La méthode statistique de l'analyse de la variance permet de repérer les facteurs qui influencent les réponses pour comparer les moyennes des échantillons. Les tableaux les plus basiques d'analyse de la variance comprennent 5 colonnes (source de variation, somme des carrés, degrés de liberté, carré moyen et statistique de Fisher) et 4 lignes (titres, modèle corrigé de la moyenne, résidus et réponses mesurées corrigées de la moyenne) [GOUPY ET CREIGHTON, 2006].

La probabilité que les deux variances soient différentes est calculée en utilisant le rapport F de Fisher, qui correspond à la relation entre la variance du modèle et la variance des erreurs. Selon

[BOUZIANI, 2012]., un rapport F élevé suggère une faible probabilité que le modèle soit similaire à la moyenne.

II.10.5.4. Le coefficient de détermination R²

Le R² est un indicateur de la qualité du modèle. Un R² égal à 1 signifie que le modèle reproduit exactement les réponses mesurées, tandis qu'un R² égal à 0 indique que le modèle n'apporte pas plus d'informations que la moyenne des réponses. La valeur d'un bon R² varie selon les disciplines : un R² de 0,8 peut être considéré comme mauvais en ingénierie, alors qu'un R² de 0,3 peut être satisfaisant en psychologie. Le R² est un bon indicateur de la qualité du modèle si les résidus ne sont pas nuls. Si les résidus sont nuls, le R² est égal à 1 quelle que soit la qualité du modèle, ce qui se produit en l'absence de degrés de liberté. Ainsi, le R² est un bon indicateur si le nombre de points expérimentaux distincts est supérieur au nombre de coefficients dans le modèle postulé [GOUPY ET CREIGHTON, 2006].

$$R^2 = \frac{\text{Somme des carrés des réponses calculées}}{\text{Somme des carrés des réponses mesurées}} \quad (12)$$

II.10.5.5. La probabilité p-value

Le t de Student, qui compare un coefficient à son écart-type, est utilisé en statistique pour évaluer l'importance d'un coefficient. Il permet de déterminer la probabilité qu'un coefficient soit nul, important ou peu significatif [GOUPY ET CREIGHTON, 2006]. Cette probabilité est appelée p-value. Une p-value proche de 0 indique un coefficient influent, une p-value proche de 1 indique un coefficient négligeable, et une p-value intermédiaire suggère un coefficient légèrement significatif ou non significatif.

II.10.5.6. Plans pour surfaces de réponse

Les méthodes d'analyse des résultats les plus fréquemment utilisées sont les plans pour surfaces de réponse. Ils permettent de trier les éléments et peuvent donner lieu à des modélisations simples mais appropriées. Cette méthode utilise différents plans factoriels, comme les plans composites centrés, les plans de Box-Behnken et les plans de Doehlert.

Les plans centrés composites sont idéaux pour les études de suivi. Pour commencer l'étude, il est nécessaire de créer un plan factoriel complet ou fractionnaire, comprenant des points clés pour vérifier la validité du modèle PDAI (termes de premier degré et termes d'utilisation). Lorsque la réponse mesurée au centre du domaine est statistiquement égale à la réponse calculée au même point, les tests de validation sont généralement positifs. Si ce n'est pas le cas, des tests supplémentaires sont effectués afin de créer un modèle de second degré. Des points d'expérience sur les axes de coordonnées et de nouveaux points centraux illustrent ces expériences supplémentaires. Les points en étoile sur les axes de coordonnées sont appelés

figure 2.9 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_α) et des essais au centre (n_0) [GOUPY ET CREIGHTON, 2006]. On peut déterminer le nombre d'essais (n) d'un plan composite en utilisant une relation spécifique :

$$n = n_f + n_\alpha + n_0 \quad (13)$$

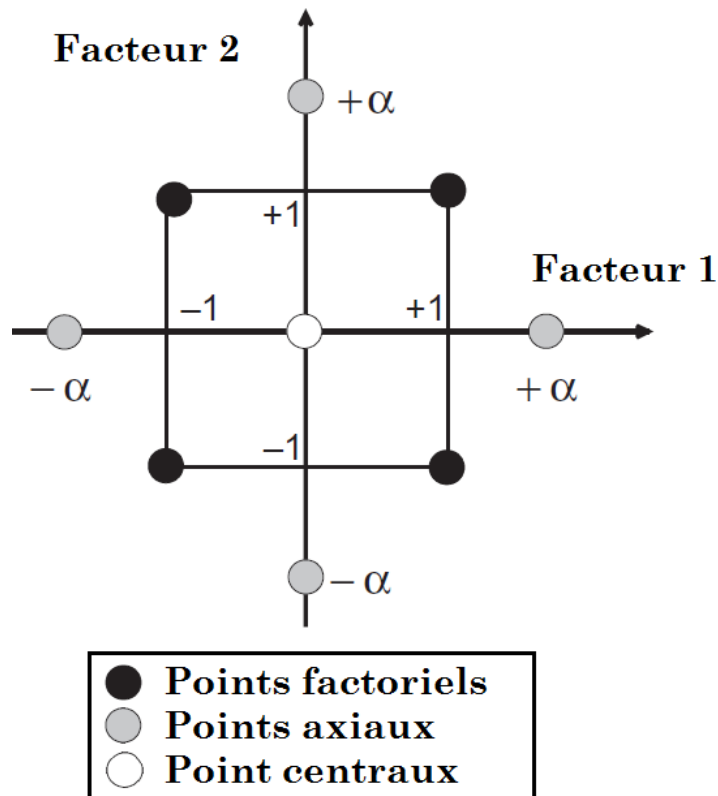


Figure 2.9 Plan composite pour l'étude de deux facteurs [GOUPY ETCREIGHTON, 2006]

II.10.5.7. Les plans de mélanges

Les plans de mélange sont des programmes d'expériences spécialement élaborés afin d'améliorer l'analyse des mélanges constitués de divers éléments. Selon ces plans traditionnels, il est supposé que les produits purs ont la propriété d'usage recherchée et qu'aucune contrainte ne les touche.

Les principaux types de plans de mélanges sont généralement classés selon l'emplacement des points représentatifs des compositions. On peut donc observer :

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

Les plans de mélange sont des instruments dédiés à l'amélioration des recherches sur des mélanges qui incluent plusieurs ingrédients. Selon ces plans, chaque composant pur a la propriété recherchée et il n'y a pas de contraintes qui les limitent.

Différents types de plans de mélanges peuvent être identifiés en fonction de la position des points représentant les compositions. Les trois principales catégories sont les plans de mélanges centrés augmentés, les plans de mélanges centrés et les plans en réseaux.

Les premiers modèles de mélanges ont été les modèles en réseaux, aussi appelés "designs de lattice Simplex". La répartition des points de composition dans l'espace d'étude est régulière. Pour les mélanges à trois composants, le plan de mélanges en réseaux le plus simple ne contient que les trois produits purs, dont les points représentatifs sont situés aux sommets d'un triangle équilatéral **figure 2.10**. Ce plan de base peut être enrichi par des points de composition moyenne, au milieu des côtés du triangle. Pour obtenir un réseau de points plus étroit, on divise la longueur des côtés par trois. La division de l'unité par m permet de continuer à construire des réseaux de plus en plus étroits. La convention de nommage de ces plans est la suivante : deux chiffres (q et m), séparés par une virgule et entre accolades. Le premier indicateur est le nombre de parties du mélange, tandis que le deuxième indicateur est le diviseur utilisé pour calculer le pas du réseau. Grâce à cette notation, il est facile de déterminer le nombre de compositions à préparer et à examiner, en prenant en compte le nombre de composants du mélange et le nombre m [Goupy et Creighton, 2006]. Pour un plan $\{q, m\}$, le nombre total de compositions différentes est de :

$$C_{q+m-1}^m = \frac{(q + m - 1)!}{(m)! (q - 1)!} \quad (14)$$

Les produits purs aux sommets du triangle équilatéral et les mélanges binaires aux côtés du triangle sont représentés sur le graphique d'un mélange ternaire. Un point est un mélange ternaire dans le triangle équilatéral. Les compositions de chaque produit sont visibles sur les côtés du triangle. Il est possible de lire la quantité de produit A sur le côté AB (échelle du produit A) en projetant le point M sur AB parallèlement à BC (côté opposé à A). L'échelle de B (côté BC) permet de lire la teneur en B en projetant le point M sur BC en parallèle avec AC (côté opposé à B). Finalement, la valeur de C peut être affichée sur l'échelle de C (côté AC) en projetant le point M sur AC parallèlement à AB (côté opposé à C), comme illustré dans la **figure 2.13** [GOUPY ET CREIGHTON, 2006].

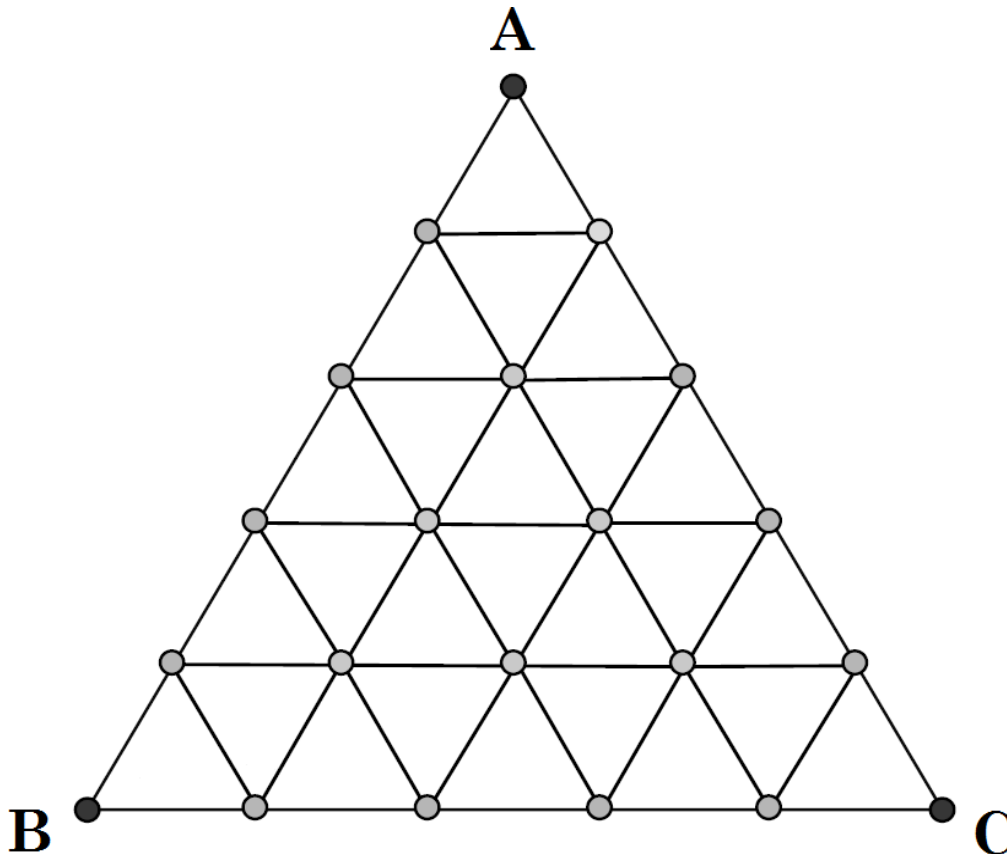


Figure 2.10 Plan de mélange en réseaux comportant 21 mélanges Ce plan est noté [AFGC ,2008;AISSOUN, B. M,2016].

Les modèles mathématiques utilisés pour les plans de mélanges sont similaires à ceux des plans factoriels classiques, en prenant en compte la contrainte fondamentale des mélanges. Par exemple, pour un mélange à trois types d'addition minérale (poudre de brique « PB », filaire calcaire « FC » et poudre céramique « PC ») on pourrait écrire :

$$Y = b_1 \times PB + b_2 \times FC + b_3 \times PC + b_4 \times (PB \cdot FC) + b_5 \times (PB \cdot PC) + b_6 \times (FC \cdot PC) \quad (15)$$

Où :

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

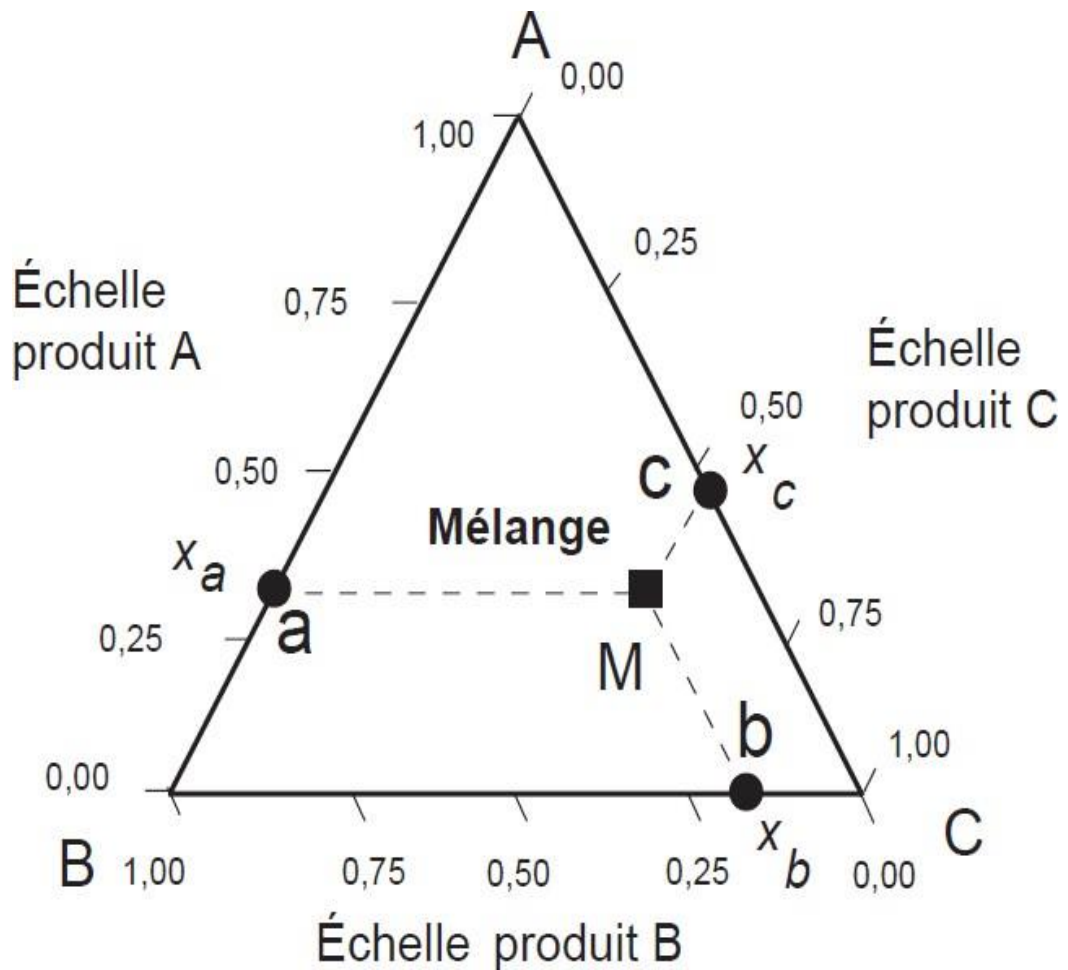


Figure 2.11. Représentation des mélanges à trios constituants à l'aide d'un triangle équilatéral [GOUPY ET CREIGHTON, 2006].

II .11. CARACTERISATION DES BAP A L'ETAT FRAIS

II .11.1.Essai de caractérisation des BAP

Afin d'évaluer les propriétés des BAP à l'état frais, plusieurs essais ont été mis au point, tant sur mortier que sur béton. Parmi les plus couramment utilisés, on retrouve l'essai d'étalement au cône d'Abrams (aussi appelé Slump flow), l'essai d'étalement modifié avec anneau (J-Ring), l'essai d'écoulement à la boîte en L (L-Box), l'essai d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel) et l'essai de stabilité [EFNARC, 2002; AFGC, 2008] ((voir annexe IV).

II . 12. PROPRIETES DES BAP A L'ETAT DURCI

Les propriétés mécaniques des bétons autoplaçants sont étudiées en raison des spécificités de leur composition, notamment les déformations instantanées et différées, qui sont supposées différentes de celles des bétons vibrés.

II .12.1. Propriétés mécaniques

La proportion de granulats dans un béton joue un rôle déterminant dans ses déformations, comme l'ont démontré de nombreux travaux [DE LARRARD, 1992]. En effet, le béton peut être assimilé à un matériau composite, constitué d'une matrice cimentaire durcie et d'inclusions granulaires. Les propriétés mécaniques globales de ce mélange, telles que le module d'élasticité, le retrait et le fluage, résultent donc des caractéristiques intrinsèques de chaque phase, de leur proportion respective, ainsi que de leur comportement individuel vis-à-vis des phénomènes de fluage et de retrait.

II .12.2. Résistance mécanique

L'ajout de fillers dans la formulation des bétons permet d'accélérer le gain de résistance mécanique au jeune âge [DE LARRARD, 1992]. Lorsque ces particules fines sont correctement dispersées par les superplastifiants, elles favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique de nucléation. Il en résulte une matrice cimentaire plus dense et plus compacte. Ces effets bénéfiques sur la résistance mécanique sont particulièrement marqués jusqu'à 28 jours, puis tendent à s'estomper progressivement au-delà de cette échéance.

Plusieurs études comparatives [JC. GIBBS, 1999] ,ont confirmé ces observations, en mettant en évidence une évolution plus rapide de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires par rapport à celle des bétons vibrés traditionnels (voir figure ci-dessous).

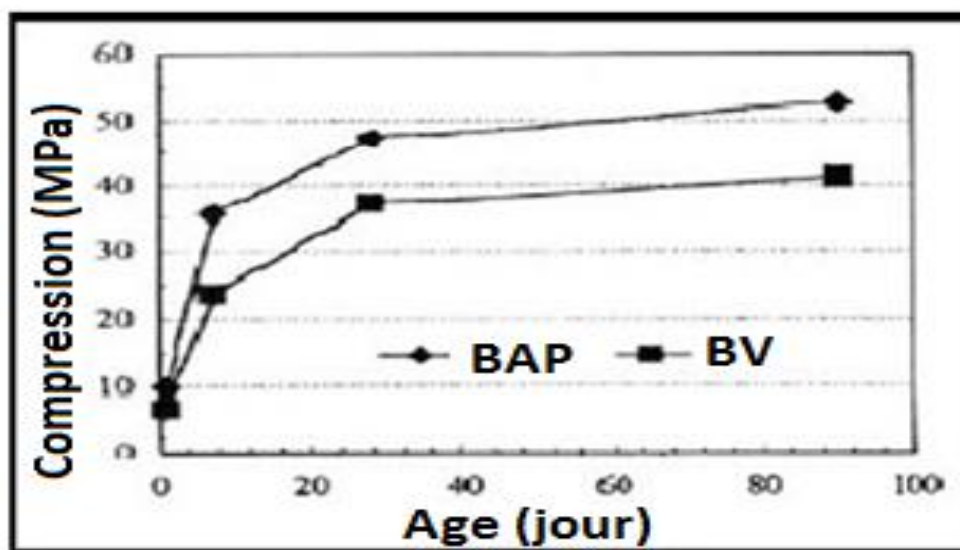


Figure 2.12 Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BV correspondant [JC. GIBBS , 1999]

De plus, certains chercheurs [OKAMURA.H, 2000] ,ont souligné que l'ampleur de ce gain de résistance est d'autant plus importante que la finesse du filler, exprimée en surface spécifique Blaine, est élevée. Cependant, cet effet s'atténue lui aussi au-delà de 28 jours.

Le dosage en adjuvants dans les formulations de BAP peut également avoir un impact sur l'évolution de leur résistance mécanique.

Ainsi, l'incorporation d'un agent de viscosité peut entraîner une diminution significative de la résistance mécanique d'un BAP au jeune âge [FELEKOGU .B, 2003].

De même, certains superplastifiants utilisés pour contrôler la fluidité des mélanges peuvent avoir pour effet secondaire de retarder la prise et d'accélérer le développement ultérieur de la résistance mécanique [SHI .C, 2002]. Compte tenu de la défloculation des grains de ciment qu'ils induisent, leur dosage élevé dans les BAP laisse présager une résistance supérieure à celle des bétons vibrés de composition initiale similaire.

II .12.3. Module d'élasticité (en compression)

Si l'on se réfère à la formule réglementaire du module d'élasticité ($E_{ij} = 11000 f_{cj}^{1/3}$), celui-ci ne dépend que de la résistance en compression du béton. À résistance égale, un BAP devrait donc présenter un module d'élasticité identique à celui d'un béton vibré.

Si cette hypothèse se vérifie dans certains cas, aux incertitudes de mesure près [PONS G, 2003] (voir figure 2.13), d'autres auteurs rapportent des modules d'élasticité inférieurs pour les BAP par rapport aux bétons vibrés [AFGC, 2000 ; KLUG Y, 2003].

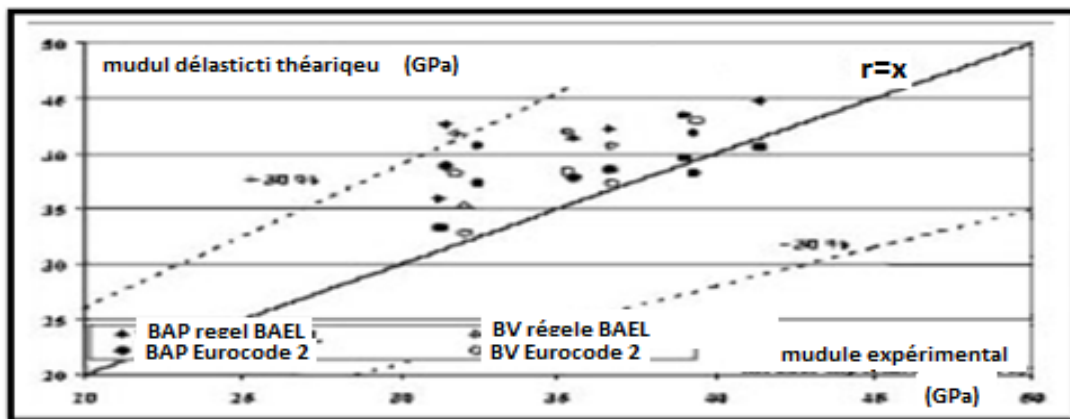


Figure 2.13 Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales [PONS G, 2003].

Ce phénomène peut s'expliquer par le volume de pâte plus important dans les BAP. En effet, dans un béton formulé avec des granulats courants, le module de la matrice cimentaire (25000 à 60000 MPa) est environ 3 à 15 fois plus faible que celui des granulats (60000 à 100000 MPa).

Un calcul tenant compte des fractions volumiques respectives des différentes phases (pâte, granulats) permet de comparer les modules d'élasticité résultants aux prévisions réglementaires.

[DE LARRARD , 1992] figure 2.14.

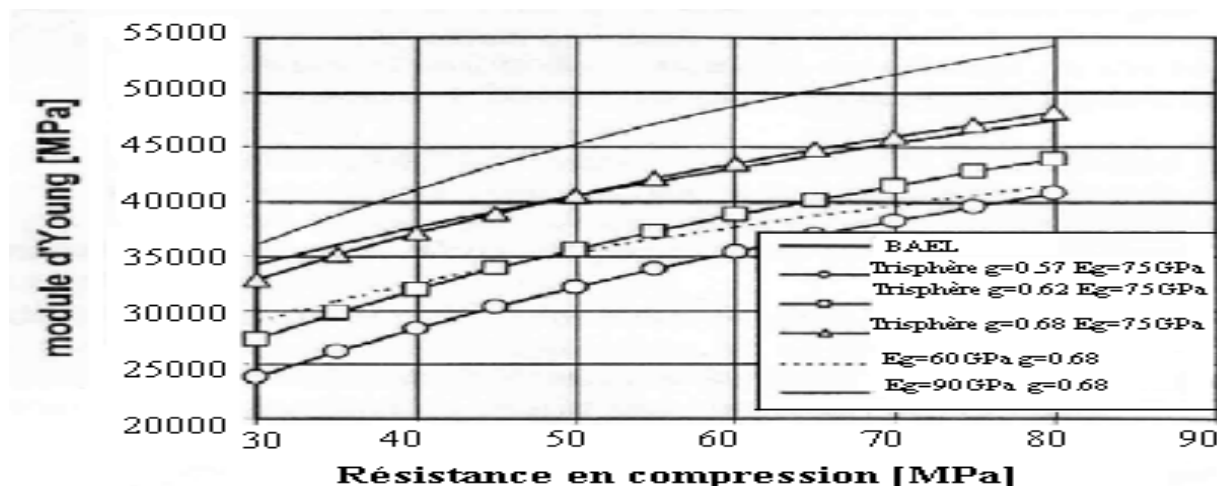


Figure 2.14 Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation [DE LARRARD, 1992].

Ainsi, pour des caractéristiques représentatives des bétons usuels, à savoir un module des granulats de 75000 MPa et une proportion volumique de granulats de 68%, les résultats obtenus sont très proches des valeurs prédites par le règlement BAEL. En définitive, les bétons autoplaçants présentent des spécificités mécaniques qui résultent de leur formulation particulière, caractérisée par un volume de pâte important et l'utilisation d'adjuvants et d'additions. Si leur résistance mécanique au jeune âge peut être favorisée par l'ajout de fillers, leur module d'élasticité tend à être légèrement inférieur à celui des bétons vibrés, en raison de la plus faible rigidité de la matrice cimentaire.

Néanmoins, ces différences de comportement restent relativement limitées et ne remettent pas en cause les excellentes performances mécaniques des BAP, qui s'avèrent comparables à celles des bétons conventionnels à résistance égale. Des études complémentaires demeurent nécessaires pour affiner la compréhension des mécanismes qui régissent les propriétés mécaniques des BAP et optimiser leur formulation en conséquence. La maîtrise de ces paramètres clés permettra de tirer pleinement parti du potentiel de ces bétons innovants, tout en garantissant leur adéquation avec les exigences de dimensionnement et de durabilité des structures.

II.13. Retrait

Le retrait, phénomène complexe et multifactoriel, revêt une importance particulière dans le cas des BAP, en raison de leur volume de pâte généralement plus élevé que celui des bétons conventionnels. Cette caractéristique pourrait laisser présager un retrait de dessiccation plus prononcé. Cependant, les données de la littérature spécifique ne permettent pas de dégager un

consensus, même si une tendance à un retrait plus marqué pour les BAP semble se dessiner.

A) - Retrait endogène

Concernant le retrait endogène, les BAP présentent des déformations comparables à celles observées sur les bétons vibrés. En effet, l'amplitude de ce retrait chimique est principalement gouvernée par le rapport eau/ciment (E/C), qui conditionne la quantité d'eau disponible pour les réactions d'hydratation. Ainsi, un béton avec un faible rapport E/C (ou une résistance en compression élevée) sera sujet à un retrait endogène plus important, indépendamment de son mode de mise en œuvre (BAP ou vibré). Certains auteurs [HU C, 1998] attribuent même aux bétons auto-nivelants (BAN) un retrait endogène inférieur ou égal à celui des bétons traditionnels (voir figure 2.15).

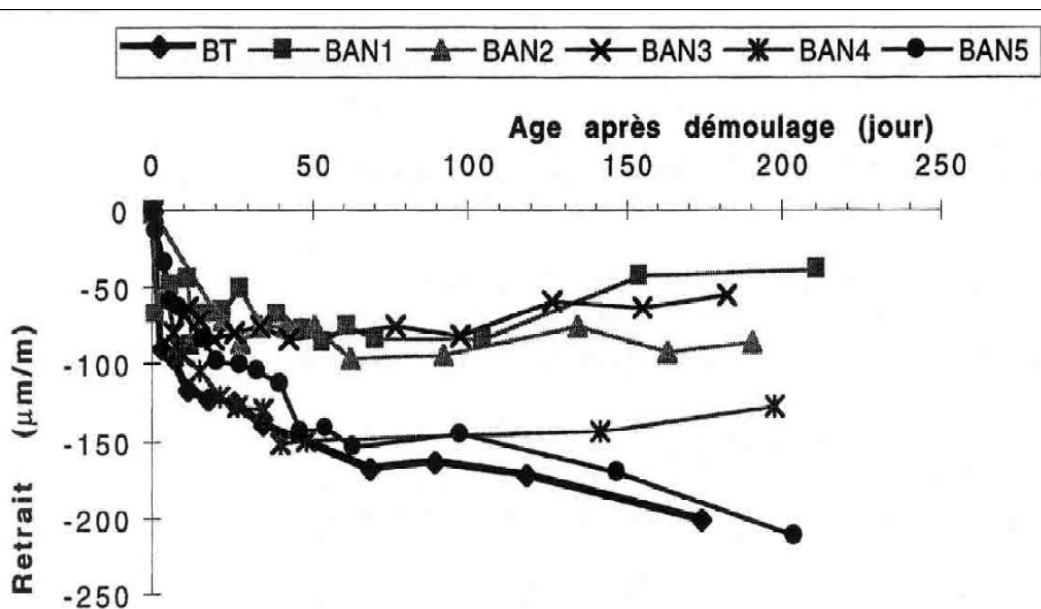


Figure 2.15 Comparaison des retraits endogènes d'un béton traditionnel et cinq BAP [HU C, 1998].

B) - Retrait de dessiccation

La littérature scientifique offre des données contradictoires quant au retrait de dessiccation des BAP. Certaines études [HU C, 1998] mettent en évidence des déformations plus importantes pour ces bétons par rapport aux bétons vibrés (voir figure 2.16).

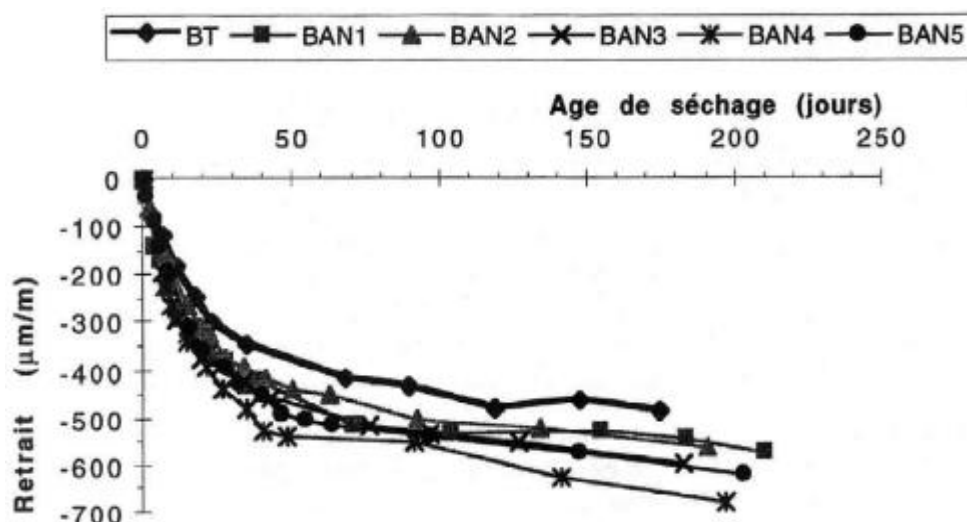


Figure 2.16 Comparaison des retraits de dessiccation d'un béton vibré et cinq BAP [HU C, 1998].

Avec un retrait d'autant plus faible que le rapport granulats/sable (G/S) des BAP est élevé. A contrario, d'autres chercheurs [PETERSSON, 1999 ; SAKATA, 1998], rapportent des retraits équivalents pour les deux types de béton, à résistance mécanique constante. Selon ces données, le retrait de dessiccation des BAP oscille entre 550 et 700 µm/m à 180 jours.

II .14. Comportement du BAP et bétons vis-à-vis des attaques acides

Introduction

Les structures en béton sont fréquemment exposées à des environnements agressifs, susceptibles d'altérer leurs propriétés mécaniques et physiques. Parmi ces menaces, les attaques acides, souvent liées à des processus industriels ou à l'activité urbaine (systèmes d'égoûts), figurent parmi les plus redoutables [M.T. BASSUONI, 2007]. L'acide sulfurique (H_2SO_4) et l'acide chlorhydrique (HCl) sont ainsi classés comme les agents naturels les plus agressifs pour les structures en béton

[S. TÜRKEL, 2007].

L'attaque acide se caractérise par la décomposition et la lixiviation des constituants de la pâte de ciment. Compte tenu de leur volume de pâte élevé, l'étude de la résistance des BAP vis-à-vis de ces agressions revêt une importance capitale. Selon [P. DINAKAR, 2008], le comportement des BAP face aux acides peut être influencé positivement ou négativement, en fonction des propriétés physiques et chimiques des matériaux utilisés dans leur formulation.

Les travaux pionniers de L. Vicat [M. TENNICH, 2016], menés dès le milieu du XIXe siècle, ont mis en lumière la dégradation chimique des bétons due à la présence d'ions sulfates ou de chlorures dans l'eau de mer. Ses recherches ont notamment démontré que les sels de magnésium ($MgCl_2$ et $MgSO_4$) comptent parmi les agents les plus agressifs pour le béton.

II.14.1. Mécanisme d'attaques de HCl et H₂SO₄

A) Attaque de l'HCl

L'acide chlorhydrique (HCl) réagit avec l'hydroxyde de calcium (portlandite, Ca(OH)₂), libéré lors de l'hydratation des silicates de ciment, pour former du chlorure de calcium (CaCl₂), un sel hautement soluble dans l'eau, selon la réaction suivante :



Le chlorure de calcium formé est facilement éliminé de la pâte de ciment, fragilisant ainsi la structure globale du béton et réduisant sa cohésion [K. SAMIMI, 2016; M. BEDERINA, 2013; M. CHERRAK, 2013]. Cette dégradation se traduit par une perte de masse du béton et une diminution de ses propriétés mécaniques.

B) Attaque de H₂SO₄

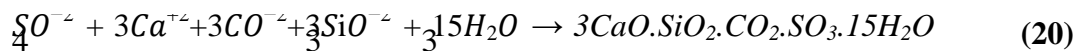
L'acide sulfurique, un agresseur redoutable pour les structures en béton

Comparé à l'acide chlorhydrique, l'acide sulfurique (H₂SO₄) se révèle être un ennemi bien plus redoutable pour l'intégrité des structures en béton. Telle une armée d'envahisseurs, les ions sulfates pénètrent insidieusement dans la matrice cimentaire, déclenchant une série de réactions chimiques dévastatrices. Ces attaques sournoises provoquent une expansion incontrôlée, une fissuration généralisée, un écaillage de la surface et, à terme, une décomposition pure et simple du béton.

L'acide sulfurique, véritable chef d'orchestre de cette symphonie destructrice, s'en prend avec voracité aux composants les plus vulnérables du béton. La portlandite (Ca(OH)₂), sentinelle alcaline, est la première à succomber, suivie de près par le monosulfoaluminate (C₃A.CaSO₄.12H₂O) et l'aluminate tricalcique résiduel (C₃A). De ces réactions chimiques naissent deux produits expansifs particulièrement néfastes : le gypse (CaSO₄.2H₂O) et l'ettringite secondaire (C₃A.3CaSO₄.32H₂O) [M. OMRANE, 2017; A. BENOSMAN, 2011]. Ces composés, tels des chevaux de Troie, s'immiscent dans les pores du béton, générant des pressions internes qui fissurent et détériorent inexorablement la surface du matériau. Les réactions suivantes illustrent le mécanisme de cette attaque :



Mais le cauchemar ne s'arrête pas là. Lorsque les conditions environnementales s'y prêtent, avec une présence de carbonates, de bicarbonates, une humidité élevée et une température ambiante basse (inférieure à 15°C), un autre ennemi se profile à l'horizon : la thaumasite ($3CaO.SiO_2.CO_2.SO_3.15H_2O$) [N.J. CRAMMOND, 2003]. Cette espèce minérale, véritable caméléon, se forme directement à partir des silicates de calcium hydratés (C-S-H), piliers de la résistance mécanique du béton, selon la réaction suivante :



Face à ces agressions chimiques impitoyables, comment prolonger la durée de vie des structures en béton ? La clé réside dans la minimisation de la teneur en matériaux cimentaires, véritables talons d'Achille face aux attaques acides. En effet, les acides ont une affinité particulière pour les constituants du ciment, qu'ils s'empressent de dissoudre et de décomposer. Ainsi, plus la fraction volumique de ciment est élevée, plus le béton est vulnérable, subissant une perte de masse significative.

Dès lors, la formulation d'un béton durable passe par une optimisation de sa composition, visant à réduire la proportion de ciment tout en maintenant les performances mécaniques et rhéologiques requises. L'utilisation judicieuse d'additions minérales, telles que les cendres volantes, les laitiers de hauts fourneaux ou les fumées de silice, permet de substituer une partie du ciment tout en améliorant la compacité et la résistance chimique du béton.

En outre, une cure adaptée et un contrôle rigoureux de la porosité sont essentiels pour limiter la pénétration des agents agressifs. Une matrice cimentaire dense et peu perméable agit comme un bouclier protecteur, ralentissant la progression des ions sulfates et autres espèces délétères.

L'acide sulfurique représente une menace sérieuse pour la pérennité des structures en béton, en raison des réactions chimiques complexes et des produits expansifs qu'il génère. Pour contrer cette agression, les concepteurs doivent privilégier des formulations optimisées, limitant la teneur en ciment et intégrant des additions minérales aux propriétés bénéfiques. Une mise en œuvre soignée et une cure appropriée sont également indispensables pour renforcer la résistance du béton face à cet ennemi redoutable. Ainsi armées, les structures pourront affronter les assauts de l'acide sulfurique avec une résilience accrue, garantissant leur intégrité et leur durabilité à long terme.

II .15. DURABILITÉ DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS

II .15.1. Perméabilité à l'eau

La perméabilité, véritable sentinelle de la durabilité des bétons, se définit comme la capacité du matériau à résister à l'infiltration de l'eau. Tel un réseau de canaux invisibles, la porosité du béton gouverne sa perméabilité : une porosité réduite agit comme un bouclier protecteur, limitant la pénétration des fluides, tandis qu'une porosité élevée ouvre la voie à leur intrusion. Dans cette quête d'imperméabilité, les bétons autoplaçants (BAP) tirent leur épingle du jeu, grâce à leur teneur élevée en éléments fins.

Une étude comparative menée par Zhu et al. [ZHU. W, 2005]. a mis en lumière la supériorité des BAP en termes de résistance à la pénétration de l'eau, par rapport aux bétons vibrés de même classe de résistance. Les particules fines, telles des sentinelles, comblent les interstices de la matrice cimentaire, réduisant ainsi la taille des pores et entravant la progression de l'eau. Cette microstructure densifiée confère aux BAP une perméabilité réduite, gage d'une durabilité accrue face aux agressions extérieures. Kapoor et al. [KAPOOR. Y, 2012]. ont quantifié cet avantage, rapportant une profondeur de pénétration d'eau deux fois moindre pour un BAP (5 mm) que pour un béton vibré (10 mm). Ces résultats éloquents témoignent de l'efficacité des BAP à contrer l'infiltration de l'eau, véritable cheval de Troie des agents agressifs.

Mais la quête de l'imperméabilité ne s'arrête pas là. Uysal et al. [UYSAL. M, 2012]. ont exploré les pistes d'optimisation de la formulation des BAP, en étudiant l'influence de diverses additions minérales sur leur perméabilité. Cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, poudres de calcaire, de marbre et de basalte ont été passés au crible. Les résultats sont sans appel : l'incorporation judicieuse de ces matériaux peut réduire significativement la profondeur de pénétration d'eau, la faisant passer d'une fourchette de 4,42 à 12,58 mm à des valeurs bien plus faibles.

Parmi ces adjuvants, les laitiers de hauts fourneaux se sont révélés les plus performants. Un BAP contenant 20% de ces laitiers a affiché une profondeur de pénétration d'eau remarquablement basse, de seulement 4,42 mm. Ce résultat s'explique par la finesse et la réactivité des laitiers, qui agissent comme un bouclier supplémentaire contre l'intrusion de l'eau, en affinant la structure poreuse du béton.

II .15.2. Pénétration des chlorures

Les bétons, de par leur pH élevé (environ 13 à 13,5), constituent des milieux alcalins. Cette alcalinité favorise la formation d'une couche d'oxydes protectrice sur les armatures, assurant

leur passivation et les préservant de la corrosion. Cependant, la pénétration des ions chlorure à travers le réseau poreux du béton, véhiculés par l'eau, peut entraîner une dépassivation, voire une corrosion des armatures lorsque leur teneur dépasse certains seuils critiques au voisinage de celles-ci [DE LARRARD, F, 2002]. L'ampleur de cette pénétration est étroitement liée à la perméabilité du béton.

Les BAP se distinguent par une résistance accrue à la pénétration des chlorures, en comparaison avec les bétons conventionnels [KAPOOR, Y, 2012]. Plusieurs auteurs [SIDDIQUE, R, 2011; UYSAL, M, 2012] ont mis en évidence l'effet bénéfique des ajouts minéraux sur cette propriété. Ainsi, Siddique [UYSAL, M, 2012] a montré que l'incorporation de cendres volantes dans les BAP réduit considérablement la pénétration des ions chlorure, et ce d'autant plus que le taux de substitution du ciment par ces cendres est élevé. Ce phénomène pourrait s'expliquer par la forme sphérique des particules de cendres volantes, qui contribue à l'amélioration de la compacité de la matrice cimentaire.

II .15.3. Résistance à l'effet gel-dégel

Les cycles répétés de gel-dégel figurent parmi les facteurs les plus préjudiciables à la durabilité des bétons. Lorsque l'eau présente dans le béton gèle, elle provoque des dommages internes tels que la microfissuration, le gonflement et, à terme, l'éclatement du matériau. La répétition de ces cycles favorise la propagation des fissures et peut conduire à la destruction totale de l'élément en béton [DE LARRARD, F, 2002].

Grâce à leur microstructure dense et leur faible perméabilité, les BAP présentent une meilleure résistance aux effets délétères des cycles de gel-dégel [SAFIUDDIN, M, 2008; HAYAKAWA, M, 1995]. Cette caractéristique est essentielle pour assurer la pérennité des ouvrages en béton autoplaçant dans les régions soumises à des conditions climatiques hivernales rigoureuses.

II .15.4. Résistance aux attaques sulfatiques d'origine externe

Les ions sulfate, présents dans les sols, les eaux souterraines et l'eau de mer, en association avec des cations tels que le magnésium, le sodium, le calcium et le potassium, constituent une menace sérieuse pour la durabilité du béton. L'attaque sulfatique se traduit par l'expansion, la fissuration et, dans les cas les plus sévères, la détérioration complète des éléments en béton, qu'il s'agisse de ponts, de fondations ou de conduites [M. AL-AKHRAS, 2006].

Le mécanisme de dégradation implique la réaction des ions sulfate avec la portlandite (Ca(OH)_2), les aluminates de calcium hydratés et les silicates de calcium hydratés (C-S-H), conduisant à la formation de gypse et d'ettringite [BROWN, P.W, 1982; WEE, T.H, 2000]. Ces produits de réaction présentent un volume supérieur de 1,2 à 2,2 fois à celui des réactifs

initiaux [HOOTON, R.D, 1993], ce qui engendre des contraintes internes et favorise l'expansion et la fissuration du béton. La perméabilité accrue qui en résulte facilite la pénétration des eaux agressives au cœur du matériau, accélérant ainsi sa détérioration [MEHTA, P.K, 2006].

Face à cette problématique, les BAP offrent des perspectives intéressantes. Leur microstructure optimisée, caractérisée par une porosité réduite et une matrice cimentaire dense, limite la pénétration des agents agressifs et ralentit la cinétique des réactions délétères. De plus, l'utilisation judicieuse d'ajouts minéraux, tels que les cendres volantes ou les laitiers de hauts fourneaux, peut contribuer à renforcer la résistance des BAP aux attaques sulfatiques, grâce à leur capacité à consommer la portlandite et à affiner la structure poreuse du béton.

II.16. Étapes d'une attaque sulfatique

Une agression sulfatique se déroule selon un processus progressif, débutant à la surface du béton et se propageant vers son cœur au fil du temps. [R. Khelifa, M,2009] résume les principales étapes de cette attaque comme suit :

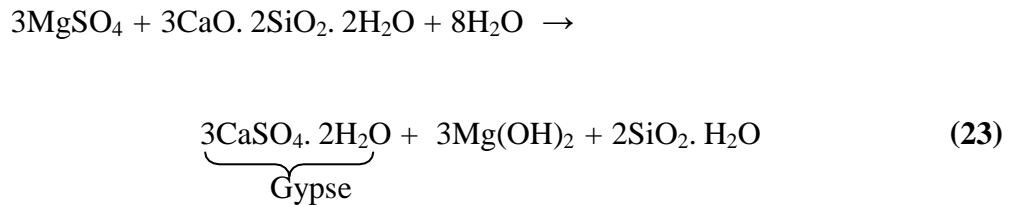
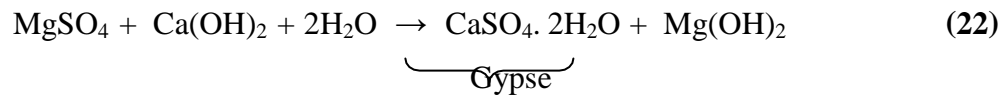
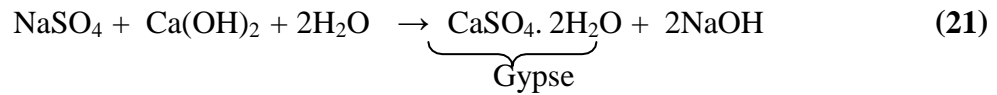
- ♣ Transfert des ions sulfate dans le milieu poreux : cette étape est régie par la perméabilité et la diffusivité du matériau cimentaire ;
- ♣ Réactions chimiques entre les ions $\text{SO}_4^{(2-)}$ et les composants de la pâte de ciment : l'ampleur et la nature de ces réactions dépendent du type de ciment utilisé et de l'apport en ions sulfate;
- ♣ Expansion résultant de la cristallisation de nouveaux hydrates : cette étape, qui découle des réactions chimiques précédentes, est à l'origine des dommages observés dans le béton.

II.17. Mécanisme de formation des produits expansifs

Lors de l'hydratation des silicates calciques (C_3S et C_2S), deux composés principaux sont formés : les silicates de calcium hydratés (C-S-H) et l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), également appelé portlandite (CH). Les C-S-H, qui représentent 50 à 70% d'une pâte de ciment durcie ordinaire, jouent un rôle prépondérant dans le développement des résistances mécaniques [ERGUN. A, 2011]. La portlandite, quant à elle, constitue 25 à 27% de la pâte et revêt une importance cruciale du point de vue de la durabilité [DE LARRARD. F, 2002].

En présence de sulfates, tels que le sulfate de magnésium (MgSO_4) ou le sulfate de sodium (Na_2SO_4), les C-S-H et la portlandite réagissent pour former un composé expansif : le gypse.

Les équations suivantes illustrent ces réactions [MEHTA. P.K,2006]:

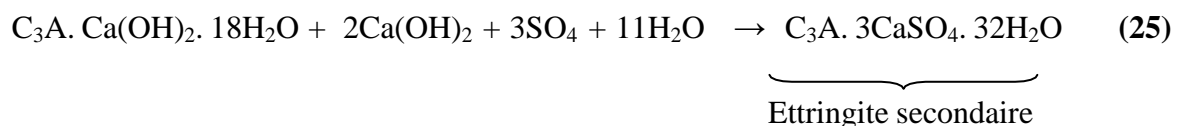
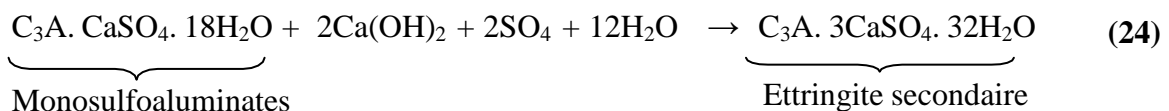


La formation de gypse entraîne une série de conséquences néfastes pour le béton : réduction du pH, perte de rigidité et de résistance, expansion, fissuration et, à terme, transformation du matériau en une masse fragile et incohésive [MEHTA. P.K, 2006].

Il est à noter que l'attaque par le sulfate de magnésium s'avère plus agressive que celle impliquant le sulfate de sodium. En effet, outre la formation de gypse, le sulfate de magnésium produit de l'hydroxyde de magnésium, un composé insoluble qui réduit l'alcalinité du béton (pH faible) et compromet la stabilité des C-S-H. À l'inverse, l'attaque par le sulfate de sodium génère, en plus du gypse, de l'hydroxyde de sodium, qui maintient l'alcalinité du système (pH élevé) et préserve ainsi la stabilité des C-S-H [MEHTA. P.K, 2006].

Le second produit expansif résultant d'une attaque sulfatique est l'ettringite secondaire, à ne pas confondre avec l'ettringite primaire non expansive. La formation d'ettringite secondaire est principalement conditionnée par la teneur en aluminat tricalcique (C₃A) du ciment [MEHTA. P.K, 2006]. Lorsque cette teneur excède 5%, les aluminates de calcium hydratés de la pâte de ciment se présentent majoritairement sous forme de monosulfoaluminates. Si la teneur en C₃A dépasse 8%, la pâte contient également du C₃A.Ca(OH)₂.18H₂O.

La réaction entre ces composés dérivés des aluminates de calcium hydratés, la portlandite et les ions sulfate conduit à la formation d'ettringite secondaire, selon les équations suivantes :



L'expansion induite par la cristallisation de l'ettringite secondaire dans la matrice cimentaire est à l'origine de dommages significatifs, tels que la fissuration et la dégradation des propriétés mécaniques du béton.

II.18. Facteurs affectant l'attaque sulfatique

L'ampleur de la détérioration du béton est directement liée à la concentration des ions sulfate dans l'environnement agressif. Plus cette concentration est élevée, plus les dommages subis par le béton seront importants.

Cependant, la perméabilité du béton apparaît comme le facteur prépondérant dans la résistance aux agressions sulfatiques. En effet, une faible perméabilité est synonyme d'une meilleure résistance à l'attaque par les sulfates, car elle limite la pénétration des agents agressifs au cœur du matériau. Pour réduire la perméabilité, plusieurs leviers peuvent être actionnés - Utilisation d'une teneur en ciment élevée

- Limitation du rapport E/C
- Optimisation de la mise en place du béton
- Amélioration des conditions de cure

La teneur en ciment et la proportion d'aluminate tricalcique (C_3A) dans le ciment sont deux paramètres clés influençant la vitesse de dégradation du béton soumis à une attaque sulfatique.

La figure 2.17 illustre l'effet de ces deux facteurs sur la durabilité du béton.

Les résultats présentés mettent en évidence l'impact prépondérant de la teneur en ciment par rapport à celui de la teneur en C_3A . En effet, une augmentation de la teneur en ciment se traduit par une diminution significative de la vitesse de dégradation du béton, phénomène attribué à la réduction de la porosité et, par conséquent, de la perméabilité. En revanche, l'influence de la teneur en C_3A sur la vitesse de détérioration du béton est plus nuancée : elle est faible lorsque la teneur en ciment est élevée, mais devient importante lorsque cette dernière est faible.

Pour protéger efficacement les bétons contre les attaques sulfatiques, il est recommandé de limiter la teneur en C_3A du ciment ou d'opter pour un ciment Portland résistant aux sulfates, dont la teneur en C_3A est inférieure à 5% (ciment de type V selon la norme **ASTM C1157-03**).

[MEHTA, P.K,2006].

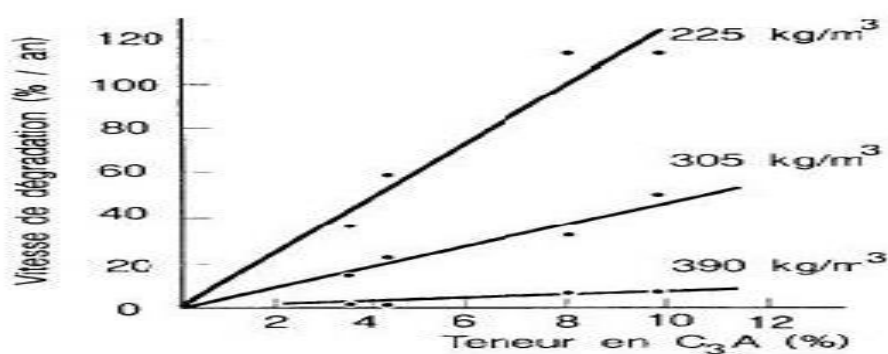


Figure 2.17 Effet de la quantité du ciment et de la teneur en C_3A sur la vitesse de détérioration du béton [Verbeck, G.J,1967].

L'incorporation d'ajouts minéraux en substitution partielle du ciment constitue une stratégie efficace pour améliorer la résistance des bétons aux sulfates. **La figure 2.18** met en évidence l'effet bénéfique des cendres volantes sur la vitesse d'expansion du béton soumis à une attaque sulfatique.

Les résultats montrent que l'utilisation de cendres volantes permet de réduire significativement la vitesse d'expansion du béton, et ce, même avec une teneur moyenne en ciment (200 kg/m³). Cette amélioration de la durabilité peut être attribuée à la réaction pouzzolanique des cendres volantes, qui consomme l'hydroxyde de calcium (portlandite) et affine la structure poreuse du béton.

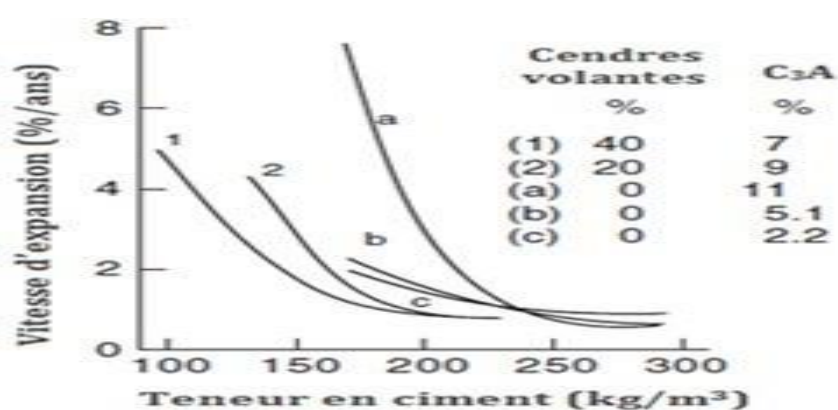


Figure 2.18 Influence des cendres volantes sur l'expansion du béton [BROWN.G.E,1982].

D'autres ajouts minéraux, tels que le métakaolin, se sont également révélés efficaces dans la lutte contre les attaques sulfatiques. Des bétons incorporant 10 à 15% de métakaolin ont ainsi démontré d'excellentes performances face à ces agressions [M. AL-AKHRAS. N, 2006].

Enfin, l'utilisation de ciments composés, comme les ciments Portland aux laitiers de haut fourneau (teneur en laitier supérieure à 50%) ou les ciments pouzzolaniques (teneur en pouzzolane supérieure à 25%), s'avère une solution pertinente pour renforcer la résistance des bétons aux sulfates. En effet, ces ciments contribuent à réduire la quantité d'hydroxyde de calcium présent dans la pâte de ciment hydraté, composé particulièrement vulnérable lors d'une attaque sulfatique [M. AL-AKHRAS. N, 2006; NEVILLE. A.M, 2000].

II .19. Résistance des bétons autoplaçants aux agressions sulfatiques

Bien que les travaux consacrés à l'effet des attaques sulfatiques sur les BAP soient encore peu nombreux, quelques études ont mis en évidence la résistance accrue de ces bétons face à ce type d'agression. Safiuddin et al. [SAFIUDDIN. M, 2008] et Nagai et al. [NAGAI. T, 1999]. ont ainsi rapporté une meilleure tenue des BAP aux sulfates, en comparaison avec les bétons conventionnels. Cette performance supérieure est attribuée à deux caractéristiques clés des BAP :

leur faible rapport eau/poudre (E/P) et leur teneur élevée en fines. En effet, ces particules fines occupent les vides de la matrice cimentaire, réduisant ainsi la taille des pores et, par conséquent, la perméabilité du béton. Cette microstructure densifiée limite la pénétration des agents agressifs, renforçant de fait la durabilité du matériau.

L'incorporation d'ajouts minéraux dans la formulation des BAP s'est également révélée bénéfique pour améliorer leur résistance aux sulfates. Uysal et Sumer [UYSAL. M, 2011]. ont étudié l'influence de divers ajouts, tels que les cendres volantes, les laitiers de hauts fourneaux, la poudre de calcaire, la poudre de basalte et la poudre de marbre, sur le comportement des BAP face aux agressions sulfatiques. Leurs travaux ont montré que la substitution partielle du ciment par ces additions conduit à une diminution de la perte de résistance du béton exposé aux sulfates. Cette amélioration est particulièrement marquée dans le cas des cendres volantes et des laitiers de hauts fourneaux, en raison de leur activité pouzzolanique. En effet, ces ajouts réagissent avec l'hydroxyde de calcium (portlandite) issu de l'hydratation du ciment pour former des composés stables et durables, renforçant ainsi la résistance de la matrice cimentaire face aux attaques chimiques.

II .20. Cas d'attaque de béton par les sulfates

De nombreux ouvrages ont été attaqués par les sulfates à travers le monde. À titre d'exemple citons: le pilier du barrage à Magdeburg (Allemagne), l'ouvrage hydraulique à Californie (États-Unis) et le barrage de Fort Peck au Montana (États-Unis) [MEHTA.P.K,2006].

Le barrage de Fort Peck est le plus élevé des six grands barrages le long de la rivière Missouri, situé dans le nord du Montana dans les États-Unis. Il est destiné à la production de l'électricité. La construction du barrage de Fort Peck a commencé en 1933, et a été achevée en 1940. La mise en service de ce barrage était en 1943.

Le béton de ce barrage est constitué d'un ciment Portland de teneur en C_3A de 7% à 9% et d'une teneur en ciment de 335 kg/m³, son rapport E/C est 0,49. La qualité de ce béton est estimée bonne (faible perméabilité). Ce barrage a consommé presque 1 million m³ de béton.

Après 20 ans de son inauguration, le contrôle de l'ensemble du barrage a montré que son état est très bon. Cependant, quelques attaques sulfatiques ont été remarquées dont une est présentée sur la **figure 2.19** La prospection de la source de cette attaque sulfatique a montré qu'elle provient de l'eau souterraine qui contient une forte concentration en sulfate de sodium allant à 10000 mg/l [MEHTA. P.K,2006].

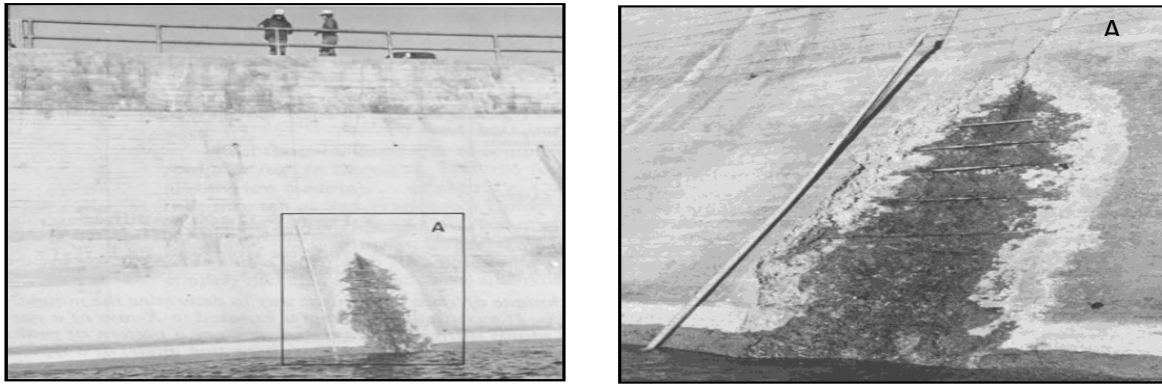


Figure 2.19 Détérioration du béton par une attaque sulfatique : Barrage Fort Peck sur la rivière Missouri au Montana (États-Unis) [MEHTA, P.K,2006].

L'examen de la même zone endommagée après 13 ans, a montré qu'elle a été élargie et que son épaisseur a atteint 200 mm. L'analyse minéralogique d'une pâte de ciment du béton détérioré, qui est présenté sur la **figure 2.20**, indique qu'une grande quantité de gypse et de l'ettringite a été formée à la place de la portlandite, les C-S-H et les aluminates de calcium hydratés [MEHTA. P.K,2006].

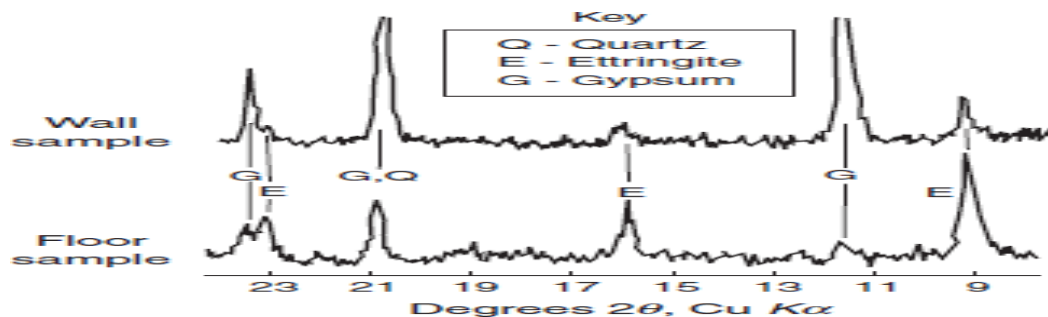


Figure 2.20 Analyse du béton détérioré par diffraction aux rayons X (DRX) [MEHTA. P.K,2006].

II.21. CONCLUSION

Les bétons autoplaçants (BAP) se développent rapidement en Europe, promettant de remplacer les bétons vibrés traditionnels grâce à leurs avantages techniques et économiques, comme la réduction du bruit, la facilité de couler des zones complexes et une qualité de béton optimisée, indépendamment des compétences des ouvriers. Leur usage permet également de diminuer les coûts et le temps de travail dans les processus industriels. Cependant, la formulation du BAP est complexe et nécessite un dosage précis de plusieurs constituants. L'utilisation de méthodes statistiques, telles que les plans d'expériences, permet de modéliser l'impact de chaque paramètre tout en réduisant le nombre de tests nécessaires.

Malgré les nombreuses recherches, des questions persistent, notamment sur l'influence des additifs minéraux sur les propriétés du BAP. Ce chapitre explore l'usage de modèles mathématiques pour étudier l'effet de trois additifs minéraux (filler calcaire, poudre céramique, et poudre de brique) sur le béton de sable auto-plaçant (BSAP).

Il présente également des tests sur les propriétés des BAP à l'état frais, comme la mobilité et la stabilité, ainsi qu'à l'état durci, en examinant des aspects comme la résistance mécanique, le module d'élasticité, et la durabilité face à des conditions externes (acidité, produits chimiques). La faible perméabilité des BAP, liée à leur rapport eau/ciment, leur confère une meilleure résistance aux attaques chimiques, comme celles des sulfates.

Enfin, ce chapitre souligne l'importance de la composition du béton et de sa perméabilité pour garantir sa durabilité, tout en illustrant ces concepts par des exemples d'attaques chimiques sur des structures en béton.

Deuxième partie
Étude
expérimentale



Chapitre III



Caractérisation des matériaux utilisés et méthodes d'essais

III.1. INTRODUCTION

Nous présentons dans ce chapitre, en premier lieu, les principales caractéristiques des matériaux utilisés dans notre travail (sables, ciment, fillers calcaire ,poudre de brique ,poudre de céramique (**sanitaire**), superplastifiant). Ces matériaux ont fait l'objet des caractérisations physique, microstructurale et chimique. Ensuite, nous exposons les différentes méthodes, outils et procédures de mises en œuvre lors de la réalisation des essais expérimentaux. Nous avons consacré une bonne partie à la préparation de plan d'expériences appliqué et à la description des essais de caractérisation de béton de sable auto-plaçant (BSAP) à l'état frais et durci et durabilité de béton.

III.2. Matériaux

III.2.1. Granulats

Pour formuler nos compositions de béton de sable auto-plaçant BSAP, nous avons utilisé deux types de sables locaux : sable alluvionnaire (SA) et sable de dunes (SD) de la région de Laghouat. Le **Tableau 3.1** résume les principales propriétés des sables utilisés. Ce tableau montre que le SD est caractérisé par une capacité d'absorption d'eau plus élevée, une finesse plus élevée et une grande propreté par rapport au SA. Il montre aussi que le SD est un sable fin ($D_{max}=0.63mm$) par rapport au SA ($D_{max}=5mm$).

Tableau 3.1. Propriétés principales des sables utilisés.

Sable	Taille (mm)	Densité	Coeff. d'Abs. (%)	Module de finesse	Equivalent de sable
SA	0/5	2.65	1.79	3.00	87.7
SD	0/0.63	2.67	2.18	0.9	91

La **figure 3.1** représente les courbes granulométriques des sables utilisés.

D'après cette figure, on remarque que la granularité du SD est plus serrée que celle du SA.

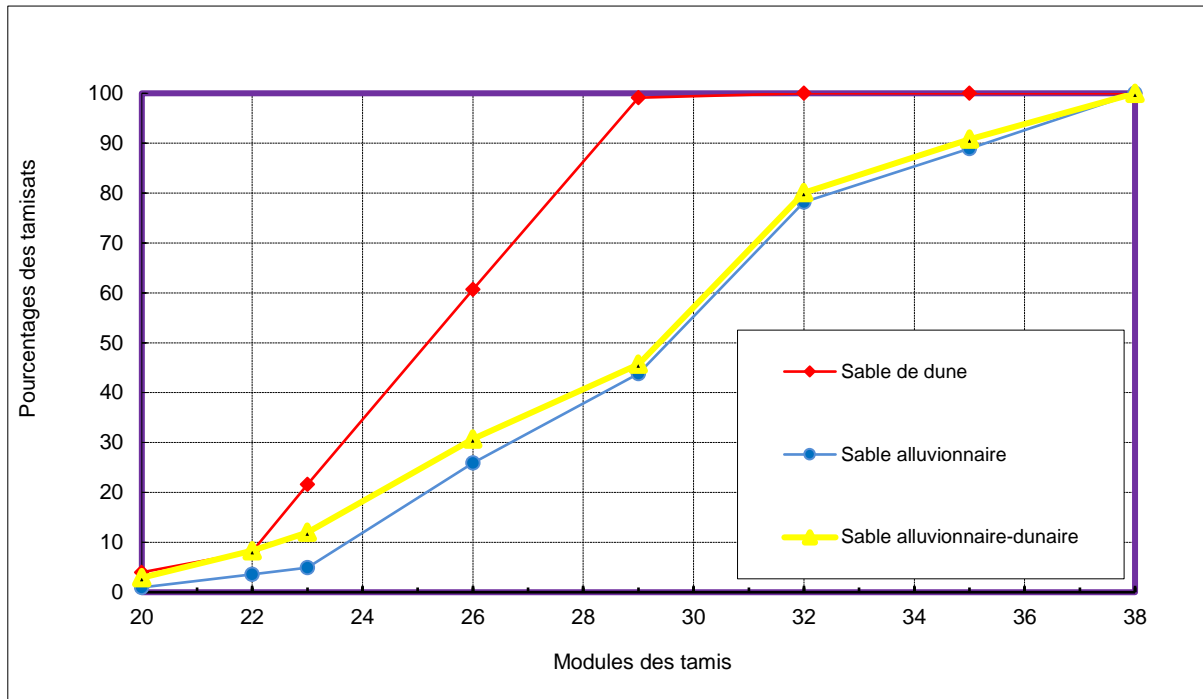


Figure 3.1. Distributions granulométriques des sables utilisés.

Les photos MEB (obtenues par Microscope Electronique à Balayage) présentées dans les figures 3.2 et 3.3, visualisent la forme des grains de SA et de SD respectivement. Les photos MEB montrent la forme roulée des grains de sables. La photo présentée dans la figure 3.4 montre clairement la finesse et la granulométrie serrée de SD par rapport au SA.

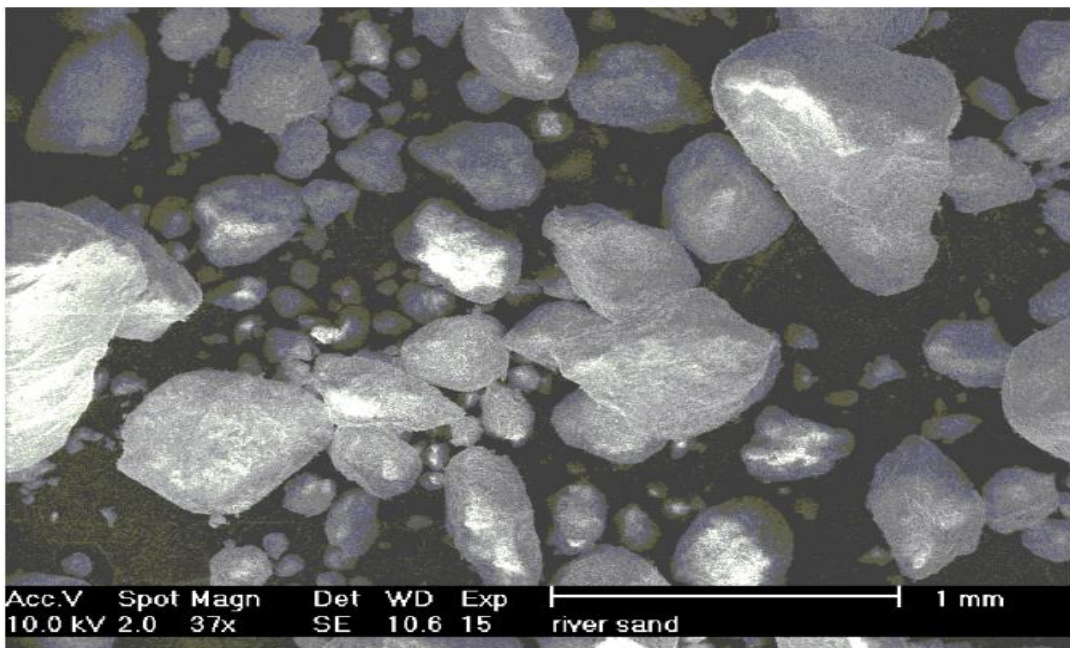


Figure 3.2. Photo MEB du sable alluvionnaire.

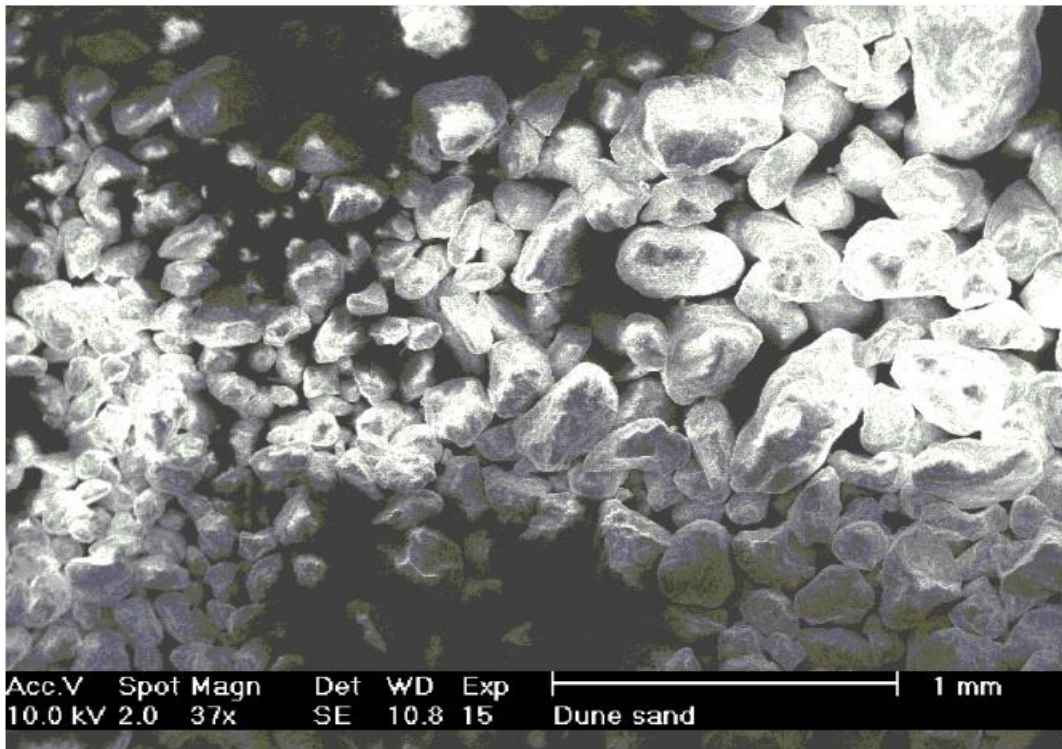
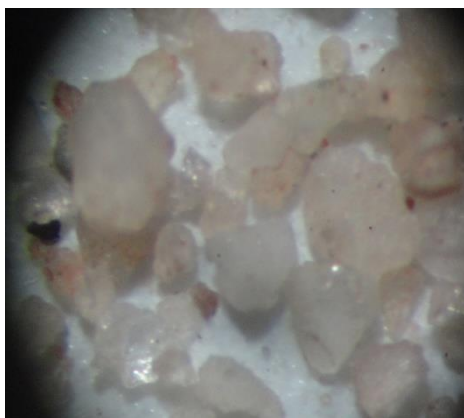


Figure 3.3. Photo MEB du sable de dunes.

Les photos MEB montrent que les sables alluvionnaire et dunaire sont de forme arrondie (roulé) avec une surface lisse. 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 qui reste collées à la surface des grains du sable alluvionnaire.

L'analyse granulométrique révèle que le sable alluvionnaire est un sable grossier et présente 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.



a. sable alluvionnaire



b. sable de dune

Figure 3.4. Aspect général des grains des différents sables utilisés visualisé au Microscope Electronique ZIEZ 2000.

L'analyse DRX du sable alluvionnaire et du sable dunaire est illustrée sur les figures 3.5 et 3.6 :

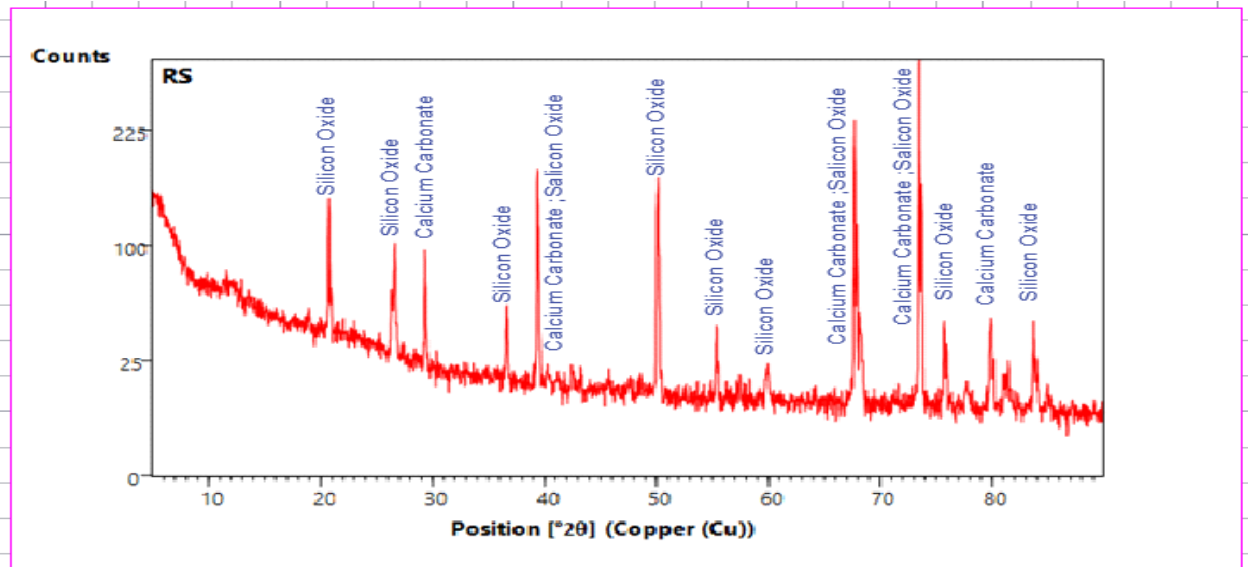


Figure 3.5. Diffraction des rayons X du sable alluvionnaire

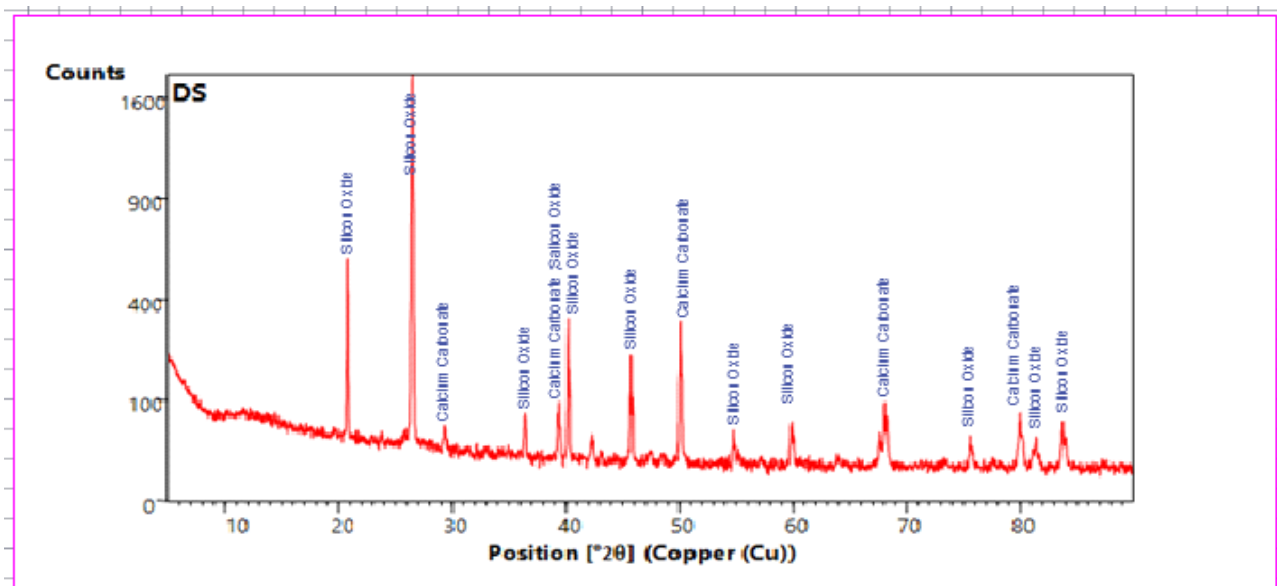


Figure 3.6. Diffraction des rayons X du sable dunaire

L'analyse DRX des deux sables alluvionnaire et dunaire montre leur nature siliceuse (le quartz (SiO₂)) en présence du calcite (CaCO₃) conformément à Belferrag [ALLAOUA, BELFERRAG,2016]. L'absence de fragments de roches carbonatées actives comme la dolomite signifie que les sables étudiés ont une composition chimiquement stable, capables de produire des mortiers sans réaction alcali-granulats .

Le sable alluvionnaire utilisé est un sable local prélevé d'Oued M'Zi (région de Laghouat), il se caractérise par sa forme arrondie et sa dureté (cf. **figure 3.2**).

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 4.3). Le sable de dune utilisé provient aussi de la région de Laghouat.

III.2.2. les additions minérales utilisées

Les trois types de minéraux utilisés dans cette étude, sont la poudre de filler calcaire, la poudre de brique et la poudre céramique (sanitaire) La quantité nécessaire à la réalisation de ces travaux a été collectée de la région.

III.2.2.1. Caractérisation du filler calcaire

➤ Dans cette étude, nous nous concentrons sur les additions de type 1 conformément à la norme EN 206-1 de 2004. Il s'agit de fillers calcaires de 0/100 μm issus du concassage de la carrière. La roche est de nature calcaire dolomitique. Les fillers calcaires présentent une densité absolue = 2,70 kg/m³.

Les principales caractéristiques fournies par le producteur ont été synthétisées dans le tableau 4-5. Ces fillers sont principalement composés de calcite, avec une teneur en CaCO₃ de 88,5 %. La teneur en MgCl enregistrée est très faible, inférieure à 0,6 %.

Ce résultat a également été confirmé par la diffraction aux rayons X, où un taux élevé de calcite a été observé, ainsi que du calcaire dolomitique CaMg(CO₃). (**voir figure 3.7**). La finesse Blaine des fillers, mesurée à 270 m²/kg, est similaire à celle du ciment utilisé, qui est en moyenne de 400 m²/kg. La valeur de la teneur en argile, indiquée par la valeur au bleu de 0,58 g/100g, démontre en particulier que les fillers sont quasiment exempts d'argile. Cette valeur respecte la norme NF P 18 508, qui tolère jusqu'à 1 g/100g.

Le filler calcaire est souvent broyé en une fine poudre, avec une granulométrie pouvant varier en fonction de son utilisation. Les particules peuvent être très fines.

Une analyse minéralogique par diffraction des rayons X (**DRX**) a été effectuée à **CRAPC** (Centre de Recherche en Apprentissage et en Pédagogie Collaborative), comme illustré dans la **figure 3.8**.

III.2.2.1.1. Caractéristiques physico-chimiques

Les résultats physico-chimiques du filler calcaire utilisé sont donnés dans les tableaux suivants

Tableau 3.2 Caractéristiques physiques du filler calcaire utilisé.

Caractéristiques physiques		
Masse volumique apparente (kg/m ³)	Masse volumique Absolue (kg/m ³)	Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)
1530	2700	2800±100

Tableau 3.3 Caractéristiques chimiques du filler calcaire utilisé.

Composant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl ⁻	PAF
Contenu (%)	0.76	0.41	0.23	54.9	0.61	0.24	0.04	0.61	0.005	36.3

Les différents minéraux sont donnés par le diffractogramme DRX de la (figure 3.7) .et Le photo

MEB figure 3.8

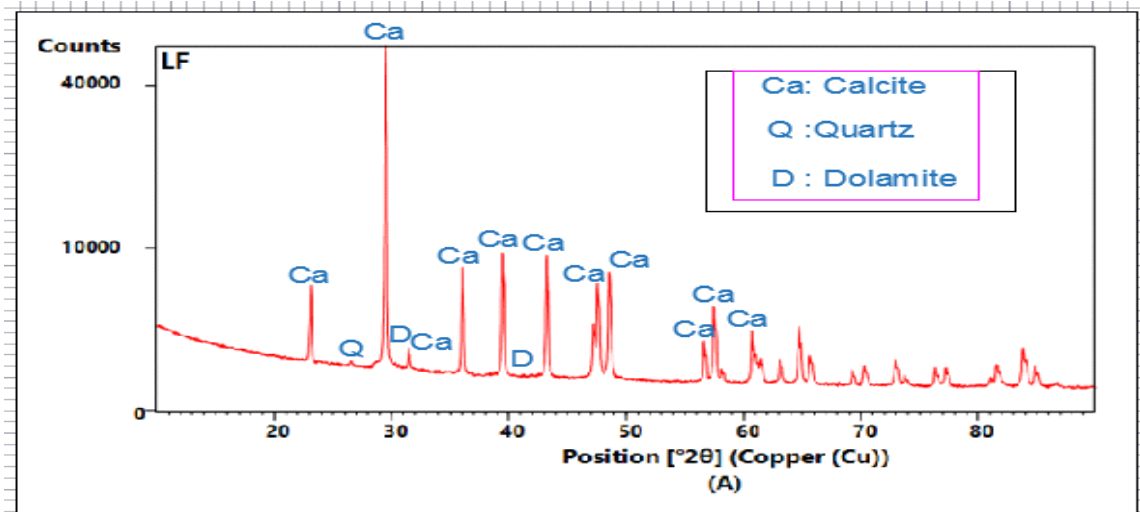


Figure 3.7. Diffraction des rayons X du filler calcaire.

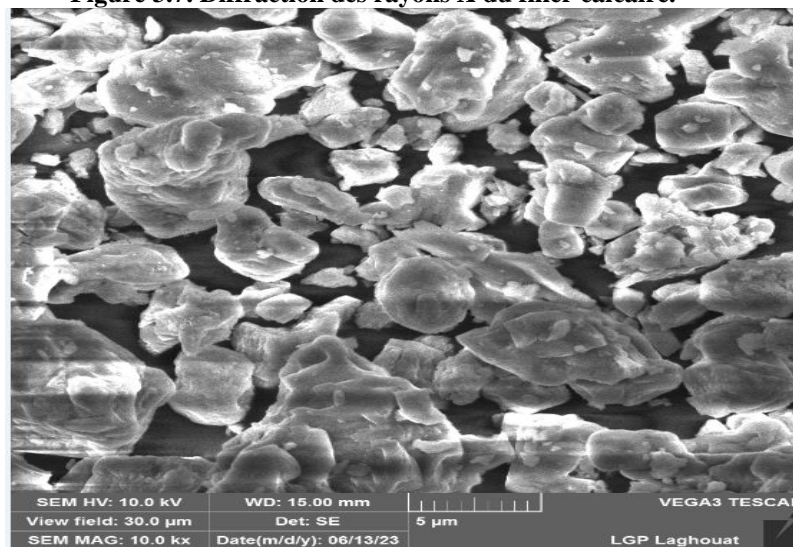


Figure 3.8. Photo MEB du filler calcaire.

La (**figure 3.9**) présente les résultats d'un test de microscopie électronique à balayage (**MEB**). Ce test fournit des informations précieuses sur la forme des particules des matériaux testés, notamment sur la taille plus réduite du calcaire de remplissage du filler calcaire (**FC**).

III.2.2.2. caractérisation de la poudre de briques

➤ Les poudres utilisées dans la composition de notre béton de recherche proviennent de déchets de briques récupérés à la décharge de l'usine de briques appartenant à "**AMOURI Toufik**", située dans la partie sud de la ville de Laghouat, en Algeria, dans la zone industrielle de Boussâada. Elles sont disponibles en grande quantité.

Après leur collecte, elles ont été triées et réduites en petits morceaux à l'aide de la machine de concassage illustrée **figure 3.11**. Ensuite, elles ont été soumises à un processus de broyage dans une machine "Los Angeles" équipée de 11 billes métalliques pour effectuer des chocs à l'intérieur du tambour de l'appareil. Le test est réalisé en faisant fonctionner l'appareil pendant 500 cycles à une vitesse constante variant entre 30 et 35 cycles par minute.

Cette opération est suivie d'un tamisage manuel à sec du produit broyé, et les fines particules récupérées se caractérisent par leur finesse avec un diamètre inférieur à 80 μ m(micromètres) par sédimentation suivant la norme NF P 94-057. Elles sont utilisées comme additif minéraux. Les propriétés chimiques et physiques de cette poudre sont répertoriées dans le **tableau 3.4-3.5**,

La préparation des additions est réalisée au laboratoire de LME (Laboratoire de Génie Civil), Université de Laghouat, Laghouat, en Algérie.

Il est à noter que plus le taux de déchet de brique augmente, plus le taux de silice ($\text{SiO}_2=66.52\%$) augmente et plus le taux de chaux CaO diminue. Ceci suggère un changement dans la cinétique d'hydratation du ciment, ayant ainsi un impact sur les propriétés physico-chimiques et mécaniques du béton.

Une analyse minéralogique par diffraction des rayons X (**DRX**) a été effectuée à **CRAPC** (Centre de Recherche en Apprentissage et en Pédagogie Collaborative Université de Laghouat), comme illustré dans la **figure 3.9**.

Tableau 3.4. Caractéristiques physiques des fines de brique utilisées.

Densité	Masse volumique apparente (g/cm^3)	Masse volumique Absolue (g/cm^3)	Surface spécifique de Blaine (cm^2/g)
2.72	0.76543	3.11538	2847 \pm 100

Tableau 3.5. Caractéristiques chimiques des fines de brique utilisées.

Composant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	MnO	P.F
Contenu (%)	66.52	14.20	5.45	6.06	2.35	2.09	0.73	0.15	/	1.0

L'analyse minéralogique a été effectuée par diffractométrie DRX; elle a signalé la présence de Kaolinite. (Figure 3.9). et Le photo MEB figure 3.10

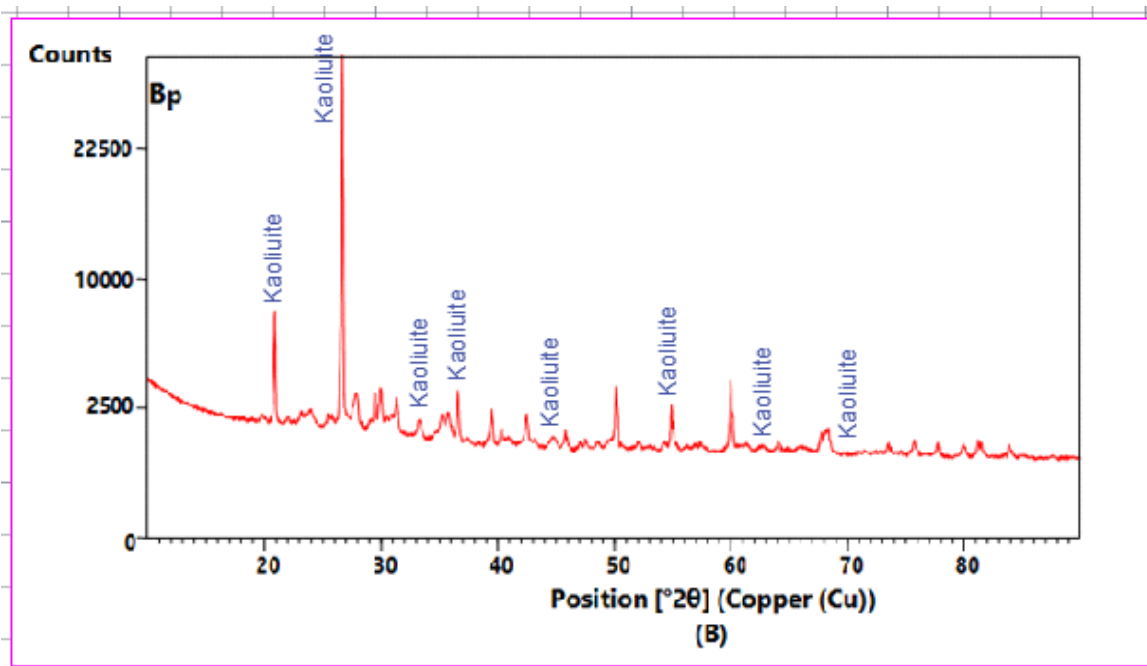


Figure 3.9. Diffraction des rayons X des poudres des briques.

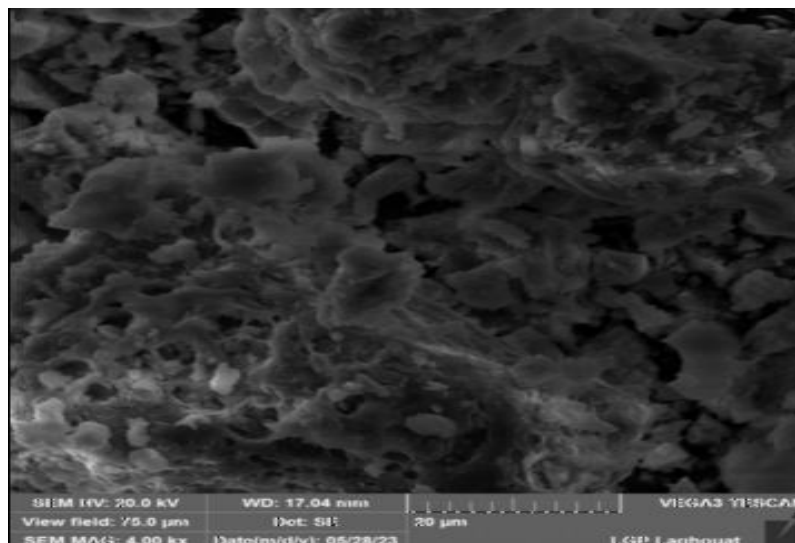


Figure 3.10 Photo MEB des poudres des briques.

La **figure 3.10** expose les conclusions d'une analyse effectuée par microscopie électronique à balayage (MEB). Cette méthode apporte des données précieuses sur la structure des particules des matériaux examinés, montrant que les particules de poudre de brique (PB) ont une forme rugueuse et angulaire.

III.2.2.3. poudre de céramique (sanitaire)

J'ai collecté des déchets de céramique sanitaire cassés de la décharge de la région, que j'ai ensuite transportés vers la zone industrielle située au nord de la ville de Laghouat, en Algérie. Ces déchets comprenaient des éléments tels que des baignoires, des lavabos, des toilettes et des éviers, ainsi que des éviers de cuisine. Ils seront utilisés comme ajout minéral dans le cadre de notre recherche visant à comprendre le comportement du béton après purification, séchage et broyage en petits morceaux à l'aide de la machine de broyage illustrée dans la **figure 3.11**



Figure 3.11 Image d'une machine de concassage des différents ajouts minéraux utilisés dans ce travail.

Ensuite, le processus de broyage a été effectué à l'aide de la machine "Los Angeles", en suivant la même méthode que celle utilisée pour les déchets de briques. Par la suite, un tamisage manuel a été réalisé pour obtenir des granulés fins ayant un diamètre de 80 micromètres (μm). Les propriétés chimiques et physiques de cette poudre sont présentées dans le **tableau 3.6 ,3.7**.

Les principaux constituants sont le dioxyde de silicium et l'oxyde d'aluminium. Nous avons observé une prédominance de la silice dans tous les matériaux (plus de 65 % pour la poudre de brique et plus de 60 % pour les déchets de céramique sanitaire). Ensuite, par ordre décroissant des pourcentages d'oxydes, on trouve l'aluminium (AlO_2O_3), le calcium (CaO) et le fer (Fe_2O_3), ainsi que le potassium (K_2O). Les deux éléments (SO_3 et Na_2O) sont présents en quantités inférieures à 1 % sous forme de traces.

Une analyse minéralogique par diffraction des rayons X (**DRX**) a été effectuée à **CRAPC** (Centre de Recherche en Apprentissage et en Pédagogie Collaborative), comme illustré dans la **figure 3.11**.

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés et méthodes d'essais

Tableau 3.6. Caractéristiques physiques des fines céramiques utilisées.

Caractéristique physique		
Masse volumique apparente (kg/cm ³)	Masse volumique Absolue (kg/cm ³)	Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)
0.1462	2.660	2765±100

Tableau 3.7. Caractéristiques chimiques des fines céramiques utilisées

Composant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	TiO ₂ -	Mno
Teneur(%)	62.00	21.50	2.11	4.89	0.54	1.20	0.63	0.02	4.26	2.10

L'analyse minéralogique a été effectuée à L'UATL par diffractométrie DRX ; elle a signalé la présence de Calcite avec Quartz. **Figure 4.12.** et La photo MEB **figure 3.13**

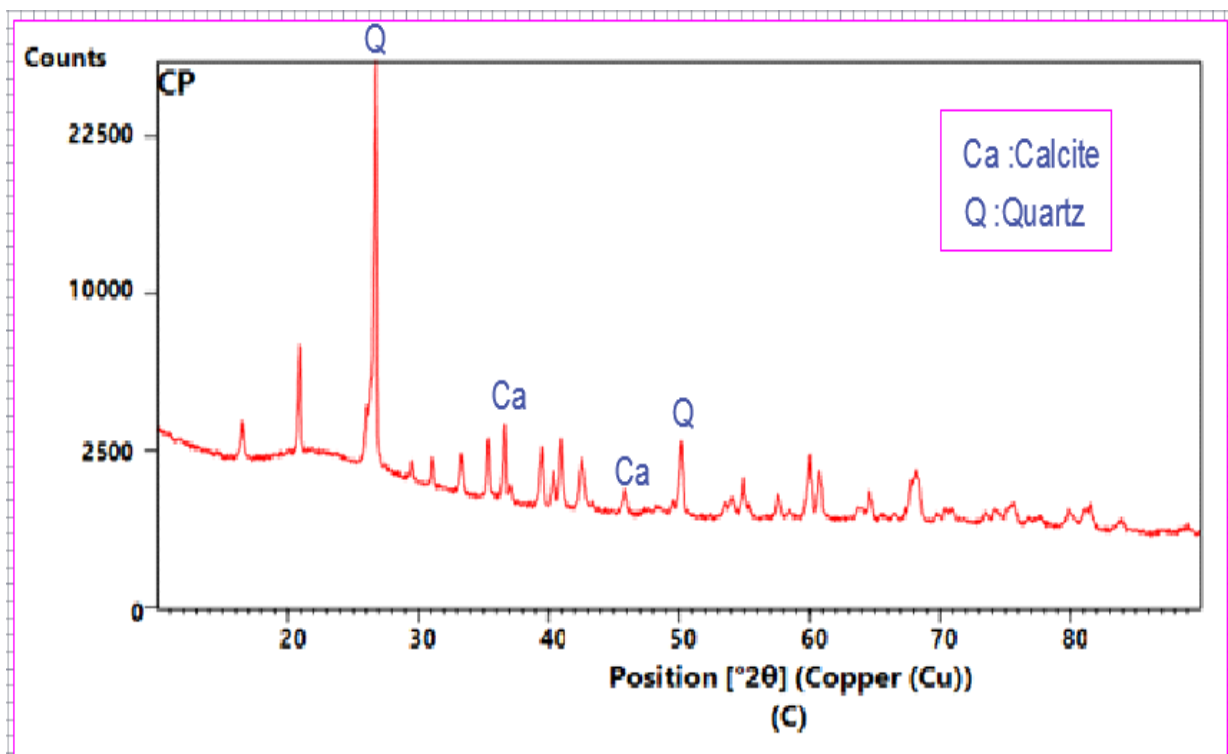


Figure 3.12. Diffraction des rayons X des poudres céramiques.

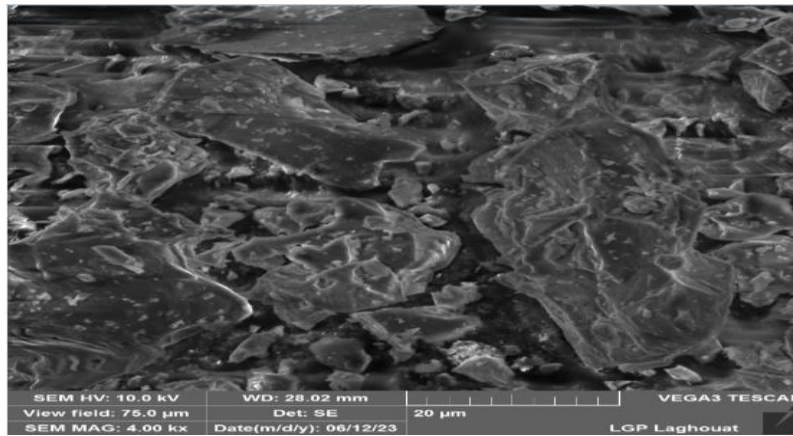


Figure 3.13. Photo MEB des poudres céramiques.

La **Figure 3.13** présente les résultats d'une analyse réalisée par microscopie électronique à balayage (MEB). Cette technique fournit des informations précieuses sur la morphologie des particules des matériaux étudiés, montrant que les particules de poudre céramique (PC) se distinguent par leur forme lisse et arrondie.

III.2.3 Caractérisation du ciment

III.2.3.1. Définition

Le ciment est une poudre fine artificielle, obtenue par broyage du mélange d'un clinker et éventuellement d'un ou plusieurs additifs. [Le clinker provient d'un ensemble d'étapes de cuisson effectuées sur le mélange primaire de calcaire et l'argile (25% d'argile et 75% de calcaire)].

Le choix d'un ciment se fait à partir de sa classe, de sa résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu, etc. , d'une façon plus générale, de la composition du béton et de l'usage auquel on le destine.

Pour cette étude, le ciment utilisé est un ciment portland résistant aux sulfates (ciment pour béton en milieux agressifs: «CEM II/B -CPJ 42,5-ES NA443» (voir annexe I), c'est un ciment de référence), il contient au moins 95 % de clinker, Le reste est composé de constituants secondaires tel que le gypse comme régulateur de prise.



Figure 3.14 Ciment utilisé dans la confection des bétons étudiés.

III.2.3.2. Analyse chimique et minéralogique

Les **tableaux (3.8) et (39.)** représentent la composition chimique et minéralogique du ciment utilisé.

Tableau 3.8. Composition chimique du ciment utilisé.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	CaO libre	Cl ⁻	Ins	P,F
22.3	5.10	3.99	63.60	1.44	0.70	0.34	1.24	0.57	-	-	1.18

Tableau 3. 9. La composition minéralogique du ciment utilisé.

oxydes	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaOI	Gypse	Ajouts
Teneur (%)	52,13	23,55	6,76	12,13	-	05	sans

III.2.3.3. Classe de résistance

a) Principe

L'essai consiste à la détermination de la résistance mécanique à la compression à 28 jours, des éprouvettes de forme prismatique de dimensions (4×4×16) cm³ selon la norme européenne EN 196-1 [AFNOR, 1994].

b) Préparation des échantillons

Nous avons préparé des éprouvettes prismatiques de dimensions (4x4x16 cm³) selon les deux compositions indiquées dans le Error! Reference source not found. et le Error! Not a valid bookmark self-reference. (la composition 2 dans le Error! Not a valid bookmark self-reference. est destinée pour calculer l'indice d'activité de ciment utilisé, voir caractéristiques de filler calcaire).

Tableau 4.10 Les dosages de composition 1

Composition 1	Dosage en (g)
Ciment	450
Sable	1350
Eau	225
E / C	0.5

Tableau 4.11 Les dosages de composition 2

Composition 2	Dosage en (g)
Ciment	337.5
Sable	1350
Filler calcaire	112.5
Eau	225
E / C	0.5

La résistance mécanique à la compression à l'âge de 28 jours, est calculée par la relation suivante :

$$R_{c-28} = \frac{f_c}{1600 \text{ (mm}^2\text{)}} \quad (26)$$

Où : f_c représente la charge d'écrasement en N/mm^2 .

c) Expression des résultants

La résistance à la compression après 28 jours:

Composition 1 : $R_{c1} = 43 \text{ MPa}$.

Composition 2 : $R_{c2} = 34.4 \text{ MPa}$.

III.2.4. Le Superplastifiant (SP)

Le **MEDAFLOW-RE25** est le superplastifiant utilisé, développé par la société **GRANITEX en Algérie**, comme indiqué dans la **figure 4.15**. Il s'agit d'un superplastifiant de troisième génération à haut réducteur d'eau, présenté sous forme liquide avec une teinte jaunâtre, conforme à la norme **EN 934-2 [AFONR, 2002]** et élaboré à partir de polycarboxylates. Sa densité, son pH et son extrait sec sont respectivement de $1,06 \pm 0,01$, 7 et 25 %.

Le **MEDAFLOW-RE25** permet de réduire le rapport eau/ciment ($E/C=0,38$) tout en améliorant significativement la fluidité du béton. Il contribue également à accroître les résistances mécaniques à court et à long terme (**voir annexe I**).

La plage de dosage recommandée du **MEDAFLOW-RE25** se situe entre 1,0 et 2,5 %. Toutefois, il est conseillé de rechercher le dosage optimal en fonction du type de béton et des propriétés recherchées lors de la réalisation des mélanges en laboratoire.

1- Les caractéristiques du **MEDAFLOW 25** sont :

- ✚ Formeliquide.
- ✚ Couleur.....Brai clair.
- ✚ Densité $1,06 \pm 0,01$.
- ✚ pH7.
- ✚ Teneur en chlore..... $< 0.1 \text{ g/l}$.
- ✚ Extrait sec25 %.

2- Propriété set effets:

Grace à ses propriétés le **MEDAFLOW 25** (voir annexe I). permet:

Sur béton frais :

- ✓ Une très bonne maniabilité.
- ✓ Béton plastiques à fluides.
- ✓ Un long maintien de l'ouvrabilité.
- ✓ De faciliter la mise en œuvre du béton.

Sur béton durci :

- ✓ Bonne résistance initiale et finale.
- ✓ De diminuer la porosité.
- ✓ De diminuer le retrait.



Figure 4.15 Superplastifiant GRANITEX-MEDAFLOW25

III.2.5. Eau de gâchage

L'eau de gâchage ne doit pas contenir des substances qui pourraient avoir un effet négatif appréciable sur la qualité et la durabilité des BSAP. C'est pour cette raison-là qu'on a effectué une analyse chimique sur l'eau utilisée. L'eau de gâchage est bien l'eau potable de robinet de la ville de Laghouat (PH=7.77).

Tableau 3.12. Analyse chimique de l'eau utilisée [Damene Z., 2005]

Espèces chimiques	Quantité (mg/l)
Ca ⁺²	119.04
Mg ⁺²	32.93
Na ⁺	144.90
K ⁺	5.69
Cl ⁻	169.96
SO ₄ ⁻²	420
HCO ₃ ⁻	153.80
NO ₃ ⁻	11.07

On remarque que l'eau de gâchage contient des ions minéraux qui peuvent attaquer la pâte de ciment ou l'acier dans le béton armé [Neville A., 2000]. .

III.3. METHODES ET ESSAIS

III .3.1 Introduction

Le BSAP est un béton fin, principalement composé de sable, devant allier une grande fluidité et une stabilité vis-à-vis de la ségrégation. Sa formulation doit ainsi répondre à ces exigences en trouvant un équilibre entre les matériaux utilisés et en recherchant les dosages adéquats pour chaque composant.

Dans le but de comprendre le rôle joué par les différents constituants (dosages des sables, dosages des additions minérales et de superplastifiant) et l'effet du rapport eau/liant, il est nécessaire d'effectuer on Généralement, la démarche d'une étude est basée sur la variation de chaque paramètre séparément afin d'observer son influence sur l'évolution des propriétés étudiées.

Ainsi, une méthodologie expérimentale est requise pour prendre en compte l'effet de chaque paramètre et des interactions entre eux sur les propriétés étudiées, tout en réalisant le minimum d'essais en laboratoire possible. Une méthode bien établie à cet effet est la méthode du plan d'expérience, qui, grâce à une approche statistique, permet de mener un nombre défini d'essais et d'obtenir des résultats révélant l'effet de chaque paramètre étudié individuellement ainsi que ses interactions avec d'autres paramètres.

Plusieurs travaux ont démontré la faisabilité d'utiliser les approches expérimentales basées sur ces plans d'expériences pour identifier l'importance relative des paramètres de composition et leurs effets couplés sur les propriétés pertinentes des bétons auto- plaçants [KHAYAT, 2000; SONEBI, 2001; YAHIA, 2001].

❖ La première partie consiste d'étudier l'effet des paramètres de formulation tel que : pourcentage de poudre céramique, pourcentage filler calcaire , pourcentage de poudre de brique, le rapport eau/ciment (E/C) et le dosage du superplastifiant (SP), sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des BSAP .

❖ Dans la deuxième partie de cette étude, deux essais de durabilité ont été menés : l'essai d'évaluation de la résistance face à l'attaque par l'acide chlorhydrique HCl, l'acide sulfurique H₂SO₄ et l'eau pure.

Pour comprendre l'influence des différents paramètres de formulation étudiés dans la première partie, une approche expérimentale est nécessaire. Elle doit permettre d'évaluer l'effet de chaque paramètre ainsi que les interactions entre eux sur les propriétés étudiées, tout en minimisant le nombre d'essais en laboratoire requis.

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés et méthodes d'essais

L'utilisation de logiciels statistiques facilite la conception des plans d'expérience et les calculs nécessaires à leur interprétation. Ces outils offrent également des représentations graphiques claires des résultats, ce qui améliore la compréhension des phénomènes étudiés [BOUZIANI, 2012]. Dans notre étude, la construction et l'analyse des plans d'expérience sont réalisées à l'aide d'un logiciel statistique. **JMP7(cf. figure 4.16) (voir annexe III).**

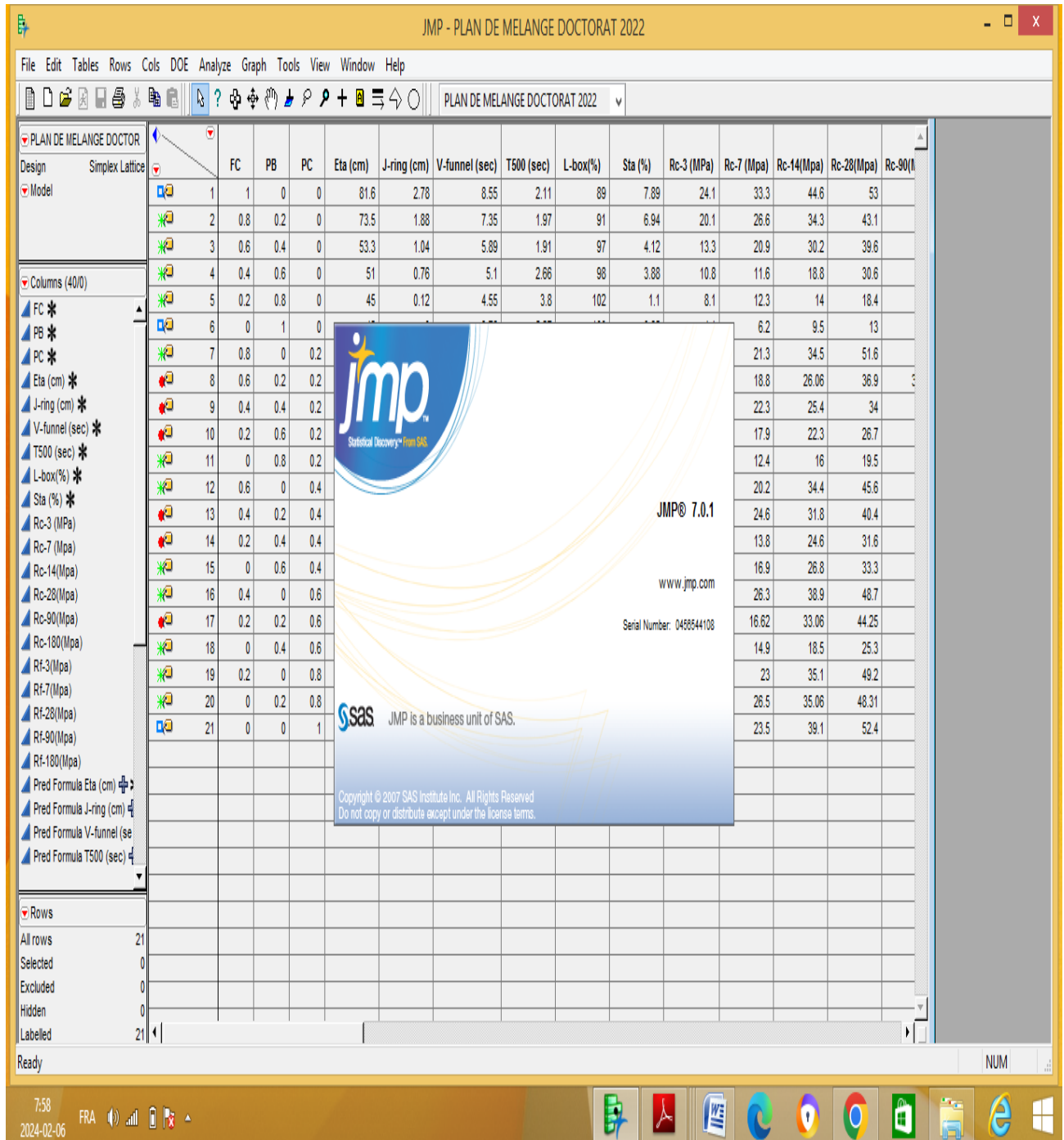


Figure 4.16 Logiciel de modélisation statistique JMP

III.3.2 Choix et préparation des plans d'expérience

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 réponses choisies sont :

- ❖ Etalement au cône d'Abrams (slump-flow test) ;
- ❖ Etalement modifié (J-Ring) ;
- ❖ Le temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel) ;
- ❖ T500 (qui mesure le temps que fait le béton pour arrivée à 50 cm d'étalement) ;
- ❖ Le rapport H2/H1 de l'essai L-box ;
- ❖ L'essai de stabilité au tamis ;
- ❖ les résistances à la Compression ;
- ❖ les résistances de la traction par flexion.

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 (4) des mesures et on change les unités de mesures [GOUPY ET CREIGHTON, 2006].

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 une série de techniques de plan d'expériences couramment utilisée pour élaborer des modèles après avoir identifié les facteurs importants à l'aide de plans factoriels ou de plans de criblage.

Les plans composites centrés sont capables d'ajuster un modèle quadratique complet. Ils sont souvent privilégiés lorsqu'une expérimentation séquentielle est requise, car ces plans peuvent incorporer des données issues d'une expérience factorielle correctement planifiée [MINITAB, 2018].

III.3. 3.Essais de durabilité

Deux essais de durabilité ont été réalisés : essai de l'absorption capillaire ou la sorptivité et l'essai de l'évaluation de la résistance vis-à-vis de l'attaque par les acides chlorhydrique HCl et sulfurique H₂SO₄ et Eau pure (voir annexe V) .

III.3. 3.1.CONFECTION DES ÉPROUVETTES

Éprouvettes 40 × 40 × 160 mm³

Les éprouvettes utilisées au cours de l'étude étaient coulées dans des moules en acier de dimensions (40 × 40 × 160) mm³. Le matériau est coulé en deux couches successives. Chacune des couches est mise en place par 30 chocs pour favoriser l'évacuation des bulles d'air, puis piquées pour favoriser l'adhérence inter-couches. Les éprouvettes sont conservées au laboratoire dans une enceinte (température 20°±2, une humidité relative 49±2%). Elles sont démoulées vingt-quatre heures après le coulage [NF P 18 404].

III.3. 3.2.MILIEUX DE CONSERVATION

Afin d'étudier le comportement physico-mécanique et la durabilité des BSAP vis-à-vis des agressions chimiques, différents milieux de conservation ont été envisagés. Ces milieux sont : [MAKHOULFI Z., 2012].

A. *Essai de dégradation dans les acides HCl et H₂SO₄*

L'objectif de l'essai d'attaque par les acides est d'évaluer la capacité du béton à résister à la dégradation lorsqu'il est exposé à un environnement agressif contenant des acides. Dans cette étude, dix (10) compositions de BSAP ont été testées pour évaluer leur résistance à l'agressivité. Le BSAP témoin (formulation sans ajout de minéraux) ainsi que les BSAP contenant les combinaisons suivantes d'additions minérales ont été examinés : 100% FC, 100% PB, 100% PC, et 60% FC + 40% PB, 60% PB + 40% PC, 60% PC + 40% PB, 60% FC + 20% PC + 20% PB, 60% PB + 20% FC + 20% PC, 60% PC + 20% FC + 20% PB. Les éprouvettes prismatiques de (40×40×160) mm³ pour les dix (10) compositions de BSAP, âgées de 28 jours et conservées dans l'eau, ont été entièrement immergées dans deux solutions : HCl et H₂SO₄, avec une concentration de 5%. Cette concentration est couramment utilisée dans la littérature [SAMIMI K.,2016 ; OMRANE M.,2017 ; BENOSMAN A.,2011 ; OMRANE M.,2018]. Une concentration plus faible demanderait un temps d'essai plus long. C'est pourquoi

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés et méthodes d'essais

la concentration de 5% a été choisie, représentant le seuil maximal pour un milieu très agressif. Une concentration de 98% d'acide H_2SO_4 et de 38% d'acide HCl a été utilisée pour préparer la solution agressive à la concentration de 5%. Avant l'immersion, les échantillons ont été laissés à sécher à 20 °C et à 50% d'humidité relative pendant 24 heures afin d'enregistrer leur masse initiale. Les échantillons de toutes les compositions de BSAP ont été placés dans le même récipient pour chaque solution agressive. La **figure 4.17** présente les photos de l'essai. Les échantillons ont été immergés dans un milieu acide pendant 180 jours, au cours desquels la perte de masse des échantillons a été mesurée tous les 15 jours, ainsi que la résistance à la compression et à la flexion aux périodes de 28 jours, 60 jours et 180 jours.



Figure 4.17. Conservation des éprouvettes dans les milieux agressifs : 5% HCl et 5% H_2SO_4

Tous les échantillons sont recouverts de récipients pour prévenir l'influence des facteurs externes tels que la poussière et autres. Ces mesures préventives visent à garantir que les résultats soient précis et fiables lors de l'évaluation de la résistance du béton aux acides.

Remarque : L'eau distillée a été utilisée pour immerger les échantillons avant d'ajouter les acides H_2SO_4 et HCl . Cela est dû au fait que l'eau distillée ne contient aucune impureté ni chimique pouvant affecter les résultats.

B. Essai de conservation dans l' Eau Pure

Nous plongeons les échantillons dans de l'eau du robinet et recouvrons le récipient pour prévenir toute influence des facteurs externes sur les résultats. Voici quelques conseils à suivre pour obtenir des résultats précis :

- 1- Choisir sur un récipient propre et adapté à la taille des échantillons à immerger. Il est préférable d'utiliser un récipient muni d'un couvercle afin d'éviter toute évaporation de l'eau et d'empêcher l'accès des éléments extérieurs aux échantillons.
- 2- Avant d'immerger les échantillons, s'assurer de la propreté de l'eau utilisée. Si l'eau dans votre région n'est pas potable ou contient des impuretés, il est préférable d'utiliser de l'eau purifiée, telle que de l'eau en bouteille ou de l'eau distillée.
- 3- Une fois les échantillons plongés dans l'eau, veillez à bien refermer le récipient afin d'éviter toute évaporation de l'eau et toute exposition des échantillons à l'air extérieur. Utilisez un couvercle hermétique ou bien couvrez le récipient avec du papier de manière étanche.
- 4- Placer le récipient dans un endroit stable pour éviter tout risque de chute ou de renversement, ce qui pourrait contaminer les échantillons ou entraîner des fuites d'eau.
- 5- Veillez à maintenir le récipient dans un environnement approprié en respectant les conditions requises. Avant d'utiliser les échantillons immergés dans l'eau, séchez-les soigneusement afin d'éviter toute influence de l'eau résiduelle sur les résultats.

En suivant ces consignes, vous devriez être en mesure de conserver les échantillons de manière optimale et de les protéger contre les effets externes lors de leur immersion dans l'eau du robinet.

La **figure 4.18** présente les photos de l'essai :



Figure 4.18. Conservation des éprouvettes dans l'Eau Pure

L'évaluation de la dégradation due aux acides ou à l'eau pure a été réalisée après 28, 90 et 180 jours d'immersion. À chaque mesure, les échantillons ont été retirés de la solution, rincés à l'eau du robinet pour éliminer les produits de réaction en vrac, puis laissés à sécher à une

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés et méthodes d'essais

température de 20.00 °C et un taux d'humidité relative de 50 % pendant 60 minutes avant l'évaluation. La résistance à la dégradation par les acides a été évaluée visuellement (examen visuel), physiquement (variation de masse) et mécaniquement (variation de la force de rupture à la compression).

La variation de la masse de chaque échantillon est calculée en utilisant la formule suivante :

$$\Delta M(\%) \equiv \frac{M_0 - M_j}{M_0} \times 100 \quad (27)$$

Avec :

ΔM : Perte de la masse de l'éprouvette en (%)

M_0 : La masse de l'éprouvette avant l'immersion dans l'acide ou Eau pure en (g)

M_j : La masse après l'attaque (15 jours pendant une période totale de 180 jours(12cycles)) en (g)



Figure 4.19. Mesure de la masse à l'aide d'une balance électronique

III.3. 3.3.Essais de compression

La résistance à la compression est exprimée par la relation :

$$R_c(\text{MPa}) = \frac{F}{S} * 1000 \quad (28)$$

F : force de rupture (KN).

S : surface de chargement ($S = 40 \times 40 = 1600 \text{ mm}^2$).

Le pourcentage de variation de la résistance à la compression est calculé en utilisant la formule suivante:

$$\Delta F(\%) = \frac{F_0 - F_j}{F_0} \times 100 \quad (29)$$

Avec

ΔF : Perte de la force de rupture à la compression en (%)

F_0 : La force de rupture à la compression avant l'immersion dans l'acide en (kN)

F_j : La force de rupture à la compression à « j » jours (j=28, 90 et 180 jours) en (kN)

Les demi-éprouvettes obtenues dans l'essai de la traction par flexion sont soumises à un essai de compression au moyen d'une presse mécanique [NF P 18-455].



Figure 4.20.a. Lecture des résultats de l'essai de compression



Figure 4.20.b. Appareil de compression

III.3. 3.4. Essais de traction par flexion

La rupture est effectuée sous charge concentrée à l'aide d'une machine conforme à la norme

[NF P 18-433] et munie d'un dispositif de flexion à 3 rouleaux (voir annexe II).

La relation qui calcule la résistance à la flexion est :

$$R_f(\text{MPa}) = \frac{3}{2} * \frac{F * l}{d^3} * 1000 \quad (30)$$

F : force de rupture (KN).

l : distance entre les deux rouleaux inférieurs (l = 120 mm).

d : côté de l'éprouvette (d = 40 mm).

Le pourcentage de variation de la résistance à la flexion est calculé en utilisant la formule suivante:

$$\Delta F(\%) = \frac{F_0 - F_j}{F_0} \times 100 \quad (31)$$

Avec

ΔF : Perte de la force de rupture à la flexion en (%)

F_0 : La force de rupture à la flexion avant l'immersion dans l'acide en (kN)

F_j : La force de rupture à la flexion à « j » jours (j=28, 90 et 180 jours) en (kN)



Figure 4.21.a. Lecture des résultats de l'essai de traction par flexion



Figure 4.21.b. La forme des échantillons après l'expérience de flexion

III.4. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Tableau 3.13. Programme expérimental des essais mécaniques : Compression et flexion

Formulation	Solution Eau Pure		Solution de H ₂ SO ₄		Solution d'HCl	
	Jours	Nombre des éprouvettes	Jours	Nombre des éprouvettes	Jours	Nombre des éprouvettes
F témoin S A M	28	1*3	28	1*3	28	1*3
F1:100% FC		1*3		1*3		1*3
F6:100% BP		1*3		1*3		1*3
F21:100% PC		1*3		1*3		1*3
F3:60% FC+40% PB	90	1*3	90	1*3	90	1*3
F15 :60% PB + 40 % PC		1*3		1*3		1*3
F18 : 60% PC + 40% PB		1*3		1*3		1*3
F8:60% FC +20%PC+20%PB		1*3		1*3		1*3
F10:60%PB+20%FC+20%PC	180	1*3	180	1*3	180	1*3
F17:60%PC+20%FC+20%PB		1*3		1*3		1*3
NOMBRE TOTAL DES EPROUVETTES = 90						

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés et méthodes d'essais

Tableau 3.14. Programme expérimental des essais physiques : variation de la masse

Essais physiques : variation en masse (4 * 4 * 16) cm ³							
Formulation	Solution Eau Pure		Solution de H ₂ SO ₄		Solution d'HCl		
	Jours	Nombre des éprouvettes	Jours	Nombre des éprouvettes	Jours	Nombre des éprouvettes	
F témoin sans A M	28	1*3	28	1*3	28	1*3	
F1:100% FC			90		90		90
F6:100% BP							
F21:100% PC							
F3:60% FC+40% PB	90	1*3	90	1*3	1*3		
F15 :60% PB + 40 % PC							
F18 : 60% PC + 40% PB							
F8:60% FC +20%PC+20%PB	180	180	180	180	180		
F10:60%PB+20%FC+20%PC							
F17:60%PC+20%FC+20%PB							
NOMBRE TOTAL DES EPROUVETTES = 27							

IV.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, les étapes expérimentales sont revues en détail, notamment la caractérisation des différents matériaux utilisés dans cette recherche ainsi que la formulation de bétons à propriétés particulières (BSAP) avec diverses combinaisons d'adjuvants. Ces combinaisons ont été élaborées à partir des caractéristiques de deux types de culture utilisés, en plus des trois types d'adjuvants introduits tout au long de l'étude. Nous avons fourni une description précise de toutes les expériences menées, telles que l'étude des compositions d'additifs minéraux et du ciment utilisé, ainsi que de leurs propriétés mécaniques et physiques, en examinant l'ouvrabilité des BSAP. Nous avons également décrit le programme employé pour faciliter l'obtention des résultats et garantir la qualité de leur analyse dans la première partie de la thèse, avant de passer progressivement à la deuxième partie. Celle-ci a détaillé la méthode, les étapes et la durée de conservation des échantillons dans différents milieux acides pour cette recherche, et a étudié leur durabilité face aux attaques acides.

Le dernier chapitre visera à présenter les résultats obtenus, en plus de fournir une interprétation et une analyse de ces résultats. Il se concentrera sur l'étude de l'effet combiné des mélanges d'additifs minéraux FC, PB et PC dans des systèmes mono-, binaires et ternaires, ainsi que sur l'effet des régimes de durcissement sur différentes propriétés du BSAP.

Chapitre IV



Résultats des Essais et Interprétations

IV.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 bétons de sable autoplaçants (**BSAP**).

Parallèlement à ce travail, nous proposons un nouveau test simple et rapide qui permet de contrôler l'ouvrabilité et la stabilité statique des **BSAP**. 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).

L'objectif de cette étude consiste à étudier l'influence mélange de deux types de sable (sable alluvionnaire, sable de dune) d'additions minérales (Filler calcaire FC, Poudre de Brique PB et Poudre céramique PC) Divers mélanges (binaires et ternaires) ait permis d'étudier le comportement rhéologique et mécanique des **BSAP**, en mettant plus de lumière sur la stabilité statique et en s'appuyant sur la méthode du plan d'expérience et les résultats de la première partie de l'étude.

Une modélisation statistique basée sur l'utilisation de la méthode des plans d'expériences a été choisie **Fig4.1**. 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 d'additions minérales (plan mélange).

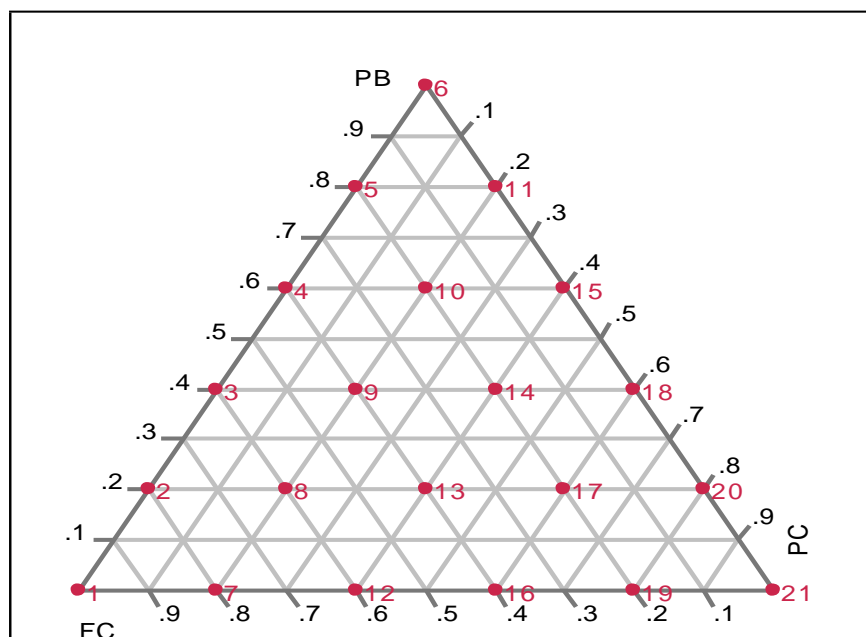


Figure 4.1 Plan utilisé pour l'étude de l'influence l'addition minérales

Chapitre IV : Résultats des Essais et Interprétations

Tableau 4.1 présente les différents Compositions Utilisées dans le plan D'expériences

Additions Formulations	Filler Calcaire	Poudre de Brique	Poudre Céramique
F1	1	0	0
F2	0.8	0.2	0
F3	0.6	0.4	0
F4	0.4	0.6	0
F5	0.2	0.8	0
F6	0	1	0
F7	0.8	0	0.2
F8	0.6	0.2	0.2
F9	0.4	0.4	0.2
F10	0.2	0.6	0.2
F11	0	0.8	0.2
F12	0.6	0	0.4
F13	0.4	0.2	0.4
F14	0.2	0.4	0.4
F15	0	0.6	0.4
F16	0.4	0	0.6
F17	0.2	0.2	0.6
F18	0	0.4	0.6
F19	0.2	0	0.8
F20	0	0.2	0.8
F21	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 de trois différents types d'additions minérales sur les caractéristiques des **BSAP** selon les Recommandations établies par l'**EFNARC** [THE EUROPEAN PROJECT GROUP, 2005] .

Chapitre IV : Résultats des Essais et Interprétations

Nous avons gardé le dosage total du sable constant ($SA+SD = 1498 \text{ kg/m}^3$) pour toutes les compositions. Le dosage du ciment est maintenu aussi constant (472 kg/m^3). La quantité d'eau à ajouter est calculée selon les rapports E/L donnés, avec une correction de la quantité d'eau et dosage de Superplastifiant (SP) constant (voir annexe III).

Les différentes compositions des **BSAP** obtenues pour les différents types d'additions minérales utilisés sont présentées dans le **tableau 4.2**.

Tableau 4.2 Composition des formulations étudiées[SABLOCRETE]

N°	FC (kg/m ³)	PB (kg/m ³)	PC (kg/m ³)	Sable alluvionnaire (kg/m ³)	Sable dunaire (kg/m ³)	Ciment (kg/m ³)	E/L	Eau de gâchage (kg /m ³)	Sp (kg/m ³)
1	156.0	0	0	1217	281	472	0.29	180	6.28
2	124.8	31.2	0						
3	93.6	62.4	0						
4	62.4	93.6	0						
5	31.2	124.8	0						
6	0	156.0	0						
7	124.8	0	31.2						
8	93.6	31.2	31.2						
9	62.4	62.4	31.2						
10	31.2	93.6	31.2						
11	0	124.8	31.2						
12	93.6	0	62.4						
13	62.4	31.2	62.4						
14	31.2	62.4	62.4						
15	0	93.6	62.4						
16	62.4	0	93.6						
17	31.2	31.2	93.6						
18	0	62.4	93.6						
19	31.20	0	124.8						
20	0	31.2	124.8						
21	0	0	156.0						

IV.2. REALISATION DES ESSAIS ET MODELISATION

Les réponses sélectionnées sont :

- ❖ Etalement au cône d'Abrams (slump-flow test) ;
- ❖ Etalement modifié (J-Ring) ;
- ❖ Temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel) ;
- ❖ et T500 (qui mesure le temps que fait le béton pour arrivé au 50 cm d'étalement) ;
- ❖ Rapport H2/H1 de l'essai L-box ;
- ❖ Stabilité au tamis ;
- ❖ Résistance à la Compression à différents âges et résistances de la traction par flexion.

IV.3. PROCEDURES DES ESSAIS

Le mode de malaxage doit être adaptée 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 utilisé pour tous les mélanges sont ceux proposés par [DEMONE et al ;2001] 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

IV.4.CONFECTION DES BSAP

La séquence de malaxage et la composition du béton ont un rôle important pour avoir une hydratation correcte, ce qui conduit à l'obtention d'un béton performant et durable.

Les mélanges ont été confectionnés dans un malaxeur traditionnel d'une capacité de 30 litres selon les caractéristiques souhaitées et les composants du béton, les auteurs suivent plusieurs séquences. Pour notre cas, la séquence était comme suit :



IV.5. INFLUENCE DES ADDITIONS MINÉRALES

Les tableaux 4.3 , 4.4 et 4.5 récapitulent les combinaisons des additions minérales et les résultats des différents essais à l'état frais et durci de 21 différents **BSAP** étudiés. Tandis que les tableaux 4.6 et 4.7et 4.8 présentent les coefficients et les paramètres des modèles trouvés à l'état frais et à l'état durci des **BSAP** étudiés.

On constate que les coefficients des corrélations des modèles postulés sont généralement bons (de 0.71 à 0.95).

Chapitre IV : Résultats des Essais et Interprétations

Tableau 4.3. Résultats des essais rhéologiques (à l'état frais) et de la stabilité statiques

N°	Combinaison Des additions			Etalement (cm)	J-Ring (cm)	V-Funnel (S)	T500 (S)	Essai de la boîte en (L-BOX) (%)	Stabilité au tamis (%)
	FC	PB	PC						
1	1	0	0	81.6	2.78	8.55	2.11	89	7.89
2	0.8	0.2	0	73.5	1.88	7.35	1.97	91	6.94
3	0.6	0.4	0	53.3	1.04	5.89	1.91	97	4.12
4	0.4	0.6	0	51.0	0.76	5.1	2.66	98	3.88
5	0.2	0.8	0	45.0	0.12	4.55	3.8	102	1.1
6	0	1	0	42.0	0.0	3.76	5.27	100	0.65
7	0.8	0	0.2	72.0	2.2	7.2	2.76	86	6.36
8	0.6	0.2	0.2	76.6	2.36	7.6	2.32	84	5.6
9	0.4	0.4	0.2	55.6	1.9	5.56	2.56	96	4.74
10	0.2	0.6	0.2	55.0	0.76	5.8	2.9	85	4.46
11	0	0.8	0.2	76.2	1.32	7.74	5.15	89	1.35
12	0.6	0	0.4	77.0	2.1	7.51	3.83	82	6.32
13	0.4	0.2	0.4	74.0	1.57	7.45	2.5	83	5.57
14	0.2	0.4	0.4	65.5	1.23	6.5	2.98	93	4.01
15	0	0.6	0.4	61.2	1.2	6.72	3.42	92	3.51
16	0.4	0	0.6	67.2	1.36	6.86	4.8	78	2.52
17	0.2	0.2	0.6	64.0	1.25	6.4	4.82	70	4.68
18	0	0.4	0.6	66.5	0.76	6.6	3.61	72	4.54
19	0.2	0	0.8	69.0	2.17	6.9	4.76	74	5.48
20	0	0.2	0.8	68.1	1.71	6.8	3.51	77	6.15
21	0	0	1	77.7	2.69	8.23	6.08	81	7.5

Chapitre IV : Résultats des Essais et Interprétations

Tableau 4.4. Résultats des essais mécaniques à l'état durci-Résistances à la compression.

N°	Combinaison			Rc-3j (MPa)	Rc-7j (MPa)	Rc-14j (MPa)	Rc-28j (MPa)	Rc-90j (MPa)	Rc-180j (MPa)
	Des additions								
	FC	PB	PC						
1	1	0	0	24.1	33.3	44.6	53.0	59.0	64.0
2	0.8	0.2	0	20.1	26.6	34.3	43.1	49.3	53.5
3	0.6	0.4	0	1.3	20.9	30.2	39.6	40.1	45.3
4	0.4	0.6	0	10.8	11.6	18.8	30.6	35.0	38.4
5	0.2	0.8	0	8.1	12.3	14.0	18.4	26.0	27.0
6	0	1	0	4.1	6.2	9.5	13.0	18.0	20.12
7	0.8	0	0.2	19.4	21.3	34.5	51.6	54.4	55.1
8	0.6	0.2	0.2	13.68	18.8	26.06	36.9	39.05	43.4
9	0.4	0.4	0.2	18	22.3	31.0	34	34.2	37.5
10	0.2	0.6	0.2	11.8	17.9	22.3	26.7	30.4	32.0
11	0	0.8	0.2	9.6	12.4	16.0	19.5	27.6	28.7
12	0.6	0	0.4	19.1	20.2	34.4	45.6	48.5	52.0
13	0.4	0.2	0.4	20	24.6	31.8	30.4	44.8	45.6
14	0.2	0.4	0.4	9.8	13.8	24.6	31.6	34.9	35.0
15	0	0.6	0.4	12.3	16.9	26.8	33.3	37.8	38.0
16	0.4	0	0.6	19.5	26.3	38.9	48.7	50.0	53.0
17	0.2	0.2	0.6	12.25	16.62	33.06	44.25	45.7	47.31
18	0	0.4	0.6	10.1	14.9	18.5	25.3	34.3	39.8
19	0.2	0	0.8	11.81	23	35.1	49.2	54.3	55.0
20	0	0.2	0.8	13.37	26.5	35.06	48.31	52	52.0
21	0	0	1	15.6	23.5	39.1	52.4	57.2	60.1

Chapitre IV : Résultats des Essais et Interprétations

Tableau 4.5. Résultats des essais mécaniques à l'état durci- Résistance à la traction par flexion .

N°	Combinaison			Rt-3j (MPa)	Rt-7j (MPa)	Rt-14j (MPa)	Rt-28j (MPa)	Rt-90j (MPa)	Rt-180j (MPa)
	Des additions								
	FC	PB	PC						
1	1	0	0	2.53	3.39	4.14	5.16	5.42	6.82
2	0.8	0.2	0	1.85	3.25	3.71	4.14	5.73	5.86
3	0.6	0.4	0	1.72	2.28	2.89	3.75	4.12	4.45
4	0.4	0.6	0	0.73	2.6	3.48	3.99	4.24	4.36
5	0.2	0.8	0	0.51	0.74	1.39	2.56	3.58	3.66
6	0	1	0	0.44	0.85	1.76	2.08	2.15	2.45
7	0.8	0	0.2	2.83	3.46	4.25	4.64	5.45	5.74
8	0.6	0.2	0.2	1.8	2.34	3.01	3.75	3.99	4.15
9	0.4	0.4	0.2	1.5	1.78	2.1	3.5	3.74	3.99
10	0.2	0.6	0.2	1.2	1.68	2.3	3.2	3.4	4.1
11	0	0.8	0.2	0.52	0.71	1.9	2.7	3.0	3.1
12	0.6	0	0.4	1.65	2.2	2.7	2.64	4.65	4.67
13	0.4	0.2	0.4	1.37	1.81	2.27	3.26	4.33	4.99
14	0.2	0.4	0.4	1.92	2.56	3.96	3.94	4.1	4.23
15	0	0.6	0.4	1.6	1.9	3.2	3.8	4.5	4.8
16	0.4	0	0.6	1.47	2.53	3.88	4.11	4.39	5.81
17	0.2	0.2	0.6	1.98	2.84	3.55	4.2	4.73	4.95
18	0	0.4	0.6	1.66	1.97	2.07	3.35	4.79	4.88
19	0.2	0	0.8	1.91	2.85	3.74	4.6	5.48	6.2
20	0	0.2	0.8	1.3	1.61	2.61	3.64	4.1	5.14
21	0	0	1	1.7	2.36	3.67	4.61	5.72	6.3

Chapitre IV : Résultats des Essais et Interprétations

Tableau 4.6. Coefficients et paramètres des modèles des essais rhéologiques (à l'état frais) et de la stabilité statique.

Terms	Etalement (cm)		J-Ring (cm)		V-Funnel(s)		T500 (s)		L-Box (%)		Stabilité au tamis (%)	
	R2=0.70		R2=0.75		R2=0.70		R2=0.88		R2=0.76		R2=0.70	
	P<0,0014		P<0,0004		P<0,0014		P<0,0001		P<0,0003		P<0,0014	
	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value
FC	83.51	<0.0001	2.78	<0.0001	8.61	<0.0001	2.10	<0.0001	89.0	<0.0001	83.51	<0.0001
PB	48.10	<0.0001	0.19	0.5872	4.62	<0.0001	5.66	<0.0001	100.78	<0.0001	48.10	<0.0001
PC	71.23	<0.0001	2.26	<0.0001	7.39	<0.0001	5.71	<0.0001	76.73	<0.0001	71.23	<0.0001
FC*PB	-48.69	0.0579	-1.62	0.2880	-4.30	0.1053	-6.87	0.0009	12.64	0.4832	-48.69	0.0579
FC*PC	-20.75	0.3951	-2.38	0.1256	-3.62	0.1678	0.81	0.6291	-16.07	0.3754	-20.75	0.3951
PB*PC	35.16	0.1587	0.020	0.9889	-4.10	0.1213	-8.71	<0.0001	-29.91	0.1098	35.16	0.1587

Tableau 4.7. Coefficients et paramètres des modèles des essais mécaniques et à l'état durci- Resistance a la compression .

Terms	Rc-3j (MPa)		Rc-7j (MPa)		Rc-14j (MPa)		Rc-28j (MPa)		Rc-90j (MPa)		Rc-180j (MPa)	
	R2=0.79		R2=0.75		R2=0.88		R2=0.92		R2=0.94		R2=0.97	
	P<0,0001		P<0,0004		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
FC	23.35	<0.0001	30.70	<0.0001	42.12	<0.0001	52.94	<0.0001	59.06	<0.0001	63.75	<0.0001
PB	5.24	0.0252	7.06	0.0297	10.20	0.0033	13.27	0.0006	20.46	<0.0001	21.63	<0.0001
PC	13.50	<0.0001	25.27	<0.0001	39.42	<0.0001	53.76	<0.0001	59.044	<0.0001	61.46	<0.0001
FC*PB	-	-	-	-	-	-	-1.99	0.8789	-16.33	0.1339	-13.18	0.1080
FC*PC	-2.24	0.8015	-24.39	0.0651	-23.28	0.0756	-25.15	0.0696	-40.066	0.0015	-40.36	<0.0001
PB*PC	-	-	-	-	-	-	-11.73	0.3764	-13.18	0.2202	-14.56	0.0784

Chapitre IV : Résultats des Essais et Interprétations

**Tableau 4.8. Coefficients et paramètres des modèles des essais mécaniques et à (l'état durci)- Résistance
à la traction par flexion .**

Terms	Rt-3j (MPa)		Rt-7j (MPa)		Rt-14j (MPa)		Rt-28j (MPa)		Rt-90j (MPa)		Rt-180j (MPa)	
	R2=0.79		R2=0.72		R2=0.52		R2=0.67		R2=0.78		R2=0.86	
	P<0,0001		P<0,0008		P=0.0345		P<0,0028		P<0,0002		P<0,0001	
	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value
FC	2.65	<0.0001	3.48	<0.0001	4.16	<0.0001	4.88	<0.0001	5.72	<0.0001	6.57	<0.0001
PB	0.24	0.3651	0.59	0.1447	1.69	0.0079	2.195	<0.0001	2.49	<0.0001	2.78	<0.0001
PC	1.59	<0.0001	2.44	<0.0001	3.61	<0.0001	4.66	<0.0001	5.62	<0.0001	6.50	<0.0001
FC*PB	-	-	-	-	-	-	0.58	0.7375	0.27	0.8716	-1.34	0.4072
FC*PC	-1.04	0.3500	-1.58	0.3397	-1.91	0.4191	-4.29	0.0248	-4.34	0.0192	-5.43	0.0037
PB*PC	2.54	0.0327	-	-	-	-	0.43	0.822	0.29	0.8612	-0.68	0.6716

IV.6.MODELES MATHEMATIQUES

Les coefficients issus de la modélisation, les coefficients de corrélation (R²), les rapport- t et les probabilités *p-value* des réponses sont regroupés D'après les modèles retenus des réponses Eta, Vf, et Rc-28,Rt-28 un exemple de calcule s'écrivent respectivement comme suit :est présents dans ce qui suit :

$$\text{Eta(cm)} = 83.51*FC + 48.10*PB + 71.23*PC - 48.69(FC* PB) - 20.75(FC* PC) + 35.16 (PB*PC) \quad (32)$$

$$\text{Vf(sec)} = 8.61*FC + 4.62*PB + 7.39*PC - 4.30(FC* PB) - 3.62(FC* PC) + 4.10 (PB*PC) \quad (33)$$

$$\text{Rc-28 jours(Mpa)} = 52.94*FC + 13.27*PB + 53.76*PC - 1.99(FC* PB) - 25.15(FC* PC) - 11.73(PB*PC) \quad (34)$$

$$\text{Rt-28 jours(Mpa)} = 4.88*FC + 2.19*PB + 4.66*PC + 0.58(FC* PB) - 4.29(FC* PC) + 0.43(PB*PC) \quad (35)$$

Chapitre IV : Résultats des Essais et Interprétations

Les modèles étant en unités codées, il faut effectuer des calculs afin de les transformer en unités réelles.

Les coefficients de signe négatif indiquent qu'une augmentation dans la valeur de variable associée fait diminuer la réponse et les coefficients de signe positif indiquent qu'une augmentation dans la valeur de variable fait augmenter la réponse. Par exemple, l'augmentation du dosage de PB, de rapport E/L et de SP diminue le temps d'écoulement mesuré en v-funnel (Vf). Par contre l'augmentation du dosage de (SA+SD)+FC fait augmenter Eta et Vf.

IV.7.ANALYSE DE LA VARIANCE

Les analyses de la variance de chacune des réponses modélisées sont présentées dans le **Tableau 5.9** suivant :

Tableau 4.9. Analyse de la variance des réponses.

Réponse	Source de variation	Degré de liberté (DDL)	Somme des carrés des écarts (SCE)	Estimation de la variance	Rapport <i>F</i>
Eta (cm)	Modèle	5	1783.89	356.77	7.08
	Erreurs	15	755.51	50.367	
	Total	20	2539.40	<i>p-value</i> <0.0014	
Vf (sec)	Modèle	5	19.82	3.96	6.14
	Erreurs	15	8.40	0.56	
	Total	20	28.22	<i>p-value</i> <0.0014	
T500 (sec)	Modèle	5	26.00	5.20	21.07
	Erreurs	15	3.70	0.24	
	Total	20	29.70	<i>p-value</i> <0.0001	
L-box (%)	Modèle	5	1316.92	263.38	9.49
	Erreurs	15	416.02	27.73	
	Total	20	1732.95	<i>p-value</i> <0.0003	
J-Ring (cm)	Modèle	5	8.82	1.76	9.11
	Erreurs	15	2.90	0.19	
	Total	20	11.72	<i>p-value</i> <0.0004	
Sta (%)	Modèle	5	67.88	13.57	15.61
	Erreurs	15	13.04	0.86	
	Total	20	80.93	<i>p-value</i> <0.0001	
Rc-28j (Mpa)	Modèle	5	2640.01	528.00	35.57
	Erreurs	15	222.60	14.84	
	Total	20	2862.62	<i>p-value</i> <0.0001	
Rt28j (Mpa)	Modèle	5	8.09	1.61	6.09
	Erreurs	15	3.98	0.26	
	Total	20	12.07	<i>p-value</i> <0.0028	

On remarque d'après le Tableau 5.9 que les Rapports F (de Fisher) les réponses à, la résistance à la compression à 28 jours (R_c-28) et le J-Ring Stabilité au Tamis (Sta) sont largement grands, par contre les réponses étalement (Eta); à la traction par flexion $R_t -28$ jours et écoulement au v- funnel (Vf)

b) sont faibles par rapport aux précédentes, mais sont acceptables. Ils sont tous supérieurs à 1, ce qui est confirmé aussi par les faibles valeurs de $p-values$.

Donc , on peut dire que les modèles postulés ne représentent pas uniquement la moyenne des mesures et les variations des réponses sont bien dues aux variations des facteurs.

La Figure 4.2 présente la relation entre les valeurs prévues et celles mesurées des réponses étudiées, avec un intervalle de confiance de 95 % (courbes pointillées en rouge). Généralement, lorsque les droites des moyennes ne seront pas complètement couvertes par les courbes des intervalles de confiances à 95 %, on peut conclure que les modèles représentent bien les résultats expérimentaux [GOUPY, 2007].

IV.8.EXPLOITATION DES MODELES

Les différents modèles trouvés par la méthode de plan d'expériences, permettent de tracer des courbes iso réponses afin de visualiser les effets des paramètres de formulation (dosage de FC, dosage de PC et PB avec rapport E/L valeur fixe et dosage de SP valeur fixe) dans les limites du domaine

d'étude du plan, qui sont définies par les niveaux haut et bas des facteurs, sur les réponses: Eta , Vf ,

J-Ring, Stabilité au Tamis et R_c-28 et R_t28 . Comme le montre **La Figure 4.2**.

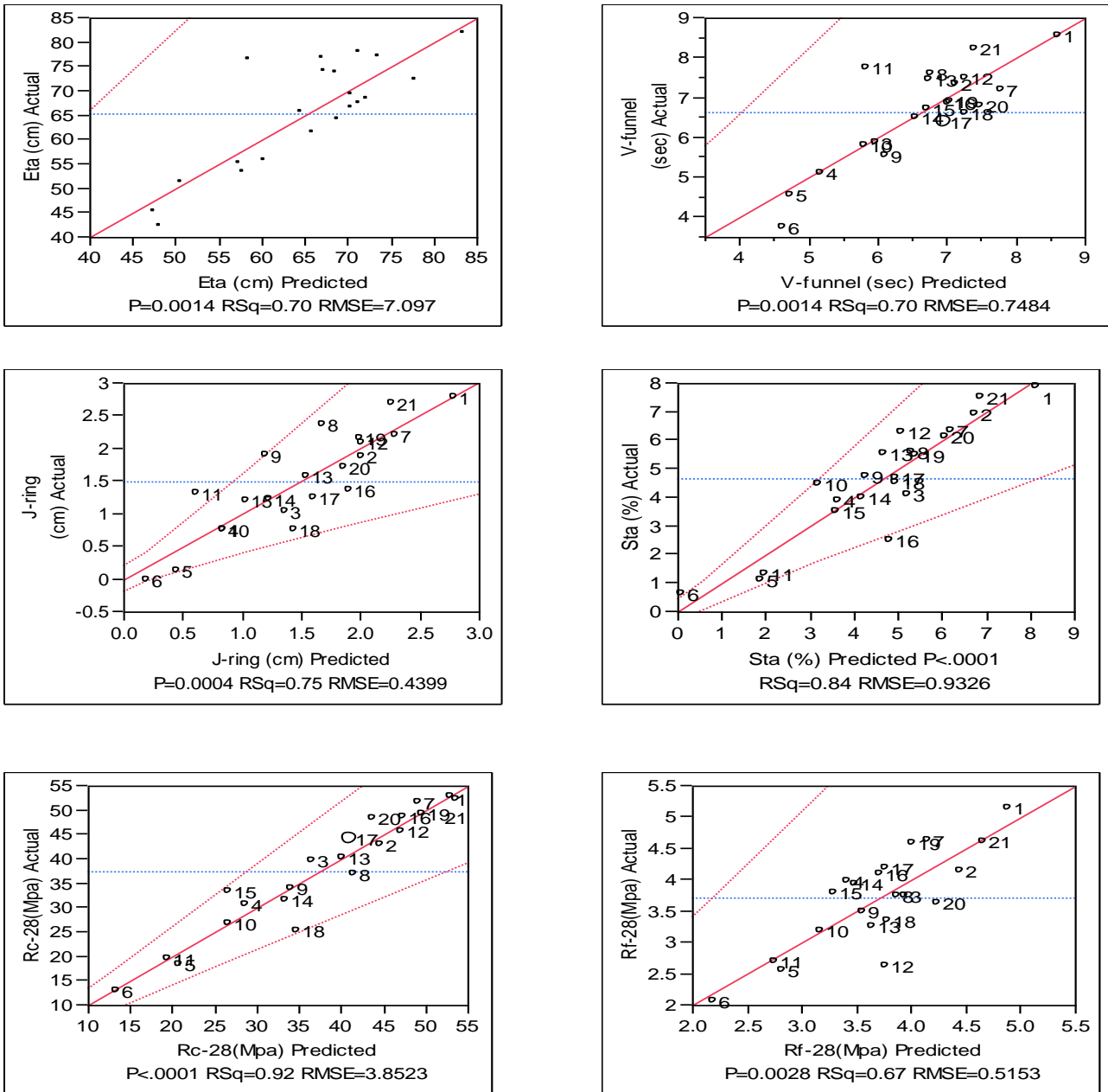


Figure 4.2. Valeurs observées en fonction des valeurs modèles des réponses : (1) Eta, (2) Vf, (3) J-Ring, (4) Sta et (5) Rc-28 et (5) Rt-28.

LEGENDE :	
ETA(cm)/ Etalement au cône d'Abrams.	---V-funnel(sec)/ Le temps d'écoulement .
j-ring(cm)/ Etalement modifié.	---Sta(%)L'essai de stabilité au tamis.
Rc-28(Mpa)/ résistances à la Compression Age 28 jours.	- - - Predicted/ Prédite.
Rf-28(Mpa)/ résistances de la traction par flexion Age 28 jours. Actual/ Réelle.
RSquare/ coefficients des corrélations	---P/ modèles des réponses

Remarque: cette figure nous donne une bonne satisfaction car au vu des valeurs de Coefficient de détermination R^2 qui représente le rapport de la somme des carrés des écarts des réponses calculées à la somme des carrés des écarts des réponses mesurées (SCEm/SCEt). Généralement, on dit qu'un modèle

mathématique est de bonne qualité lorsque son R^2 est proche de 1. De plus, il est clair que la distribution du temps d'écoulement à l'état frais, ainsi que les résultats des essais de résistance à la compression et à la flexion pour les mélanges, ont un impact notable sur le coefficient de corrélation le plus bas [ABDERRAHMANE G. ;2022] de la figure 6 (0,70, 0,88, 0,92 et 0,67), ainsi que sur la valeur d'écart type la plus élevée pour ces résultats de propriétés.

IV.9.INTERPRETATION DES RESULTATS A L'ETAT FRAIS

IV.9.1.Influence de l'addition minérale sur l'étalement

Les résultats, tels qu'ils sont représentés sur la figure 4.3, révèlent que le test d'étalement du béton montre une augmentation du pourcentage d'ajout de FC, ce qui se traduit par une meilleure fluidité du béton. De même, il a été observé que l'ajout de jusqu'à 35 % de PC dans les systèmes ternaires (FC, PB, PC) contribue à améliorer la maniabilité des bétons de sable autoplaçants (BSAP).

De plus, la valeur d'étalement la plus élevée (70 cm) a été obtenue pour les proportions de 50 % FC, 40 % PC et 10 % PB. Ces mêmes résultats ont également indiqué que l'écart diminuait à mesure que le pourcentage de PC augmentait. Cela a été particulièrement remarqué pour la formulation (F6-100% PB), car la quantité d'eau est maintenue constante [DJOUAL BELKACEM ;2023].

En revanche, l'amélioration de la maniabilité peut s'expliquer par la présence d'un empilement plus dense des particules ajoutées, ce qui génère un excès de pâte pouvant servir à lubrifier les grains solides du mélange. Le même constat peut être fait dans le cas d'un pourcentage de 100 % de FC.

Il a été démontré que l'incorporation de poudre de déchets de céramique en remplacement de jusqu'à 15 % du ciment améliore la fluidité des bétons de sable autoplaçants. Cependant, lorsque la combinaison comprend 50 % de FC et de PC, un saignement devient perceptible. En résumé, le remplacement d'une partie du ciment par des poudres céramiques et des fillers calcaires améliore généralement la fluidité et l'homogénéité du béton, sauf dans les cas où 50 % de FC et de PC sont utilisés. Ces résultats concordent avec les résultats rapportés dans la référence [ABOUBAKEUR BOUKHELKHAL;2021].

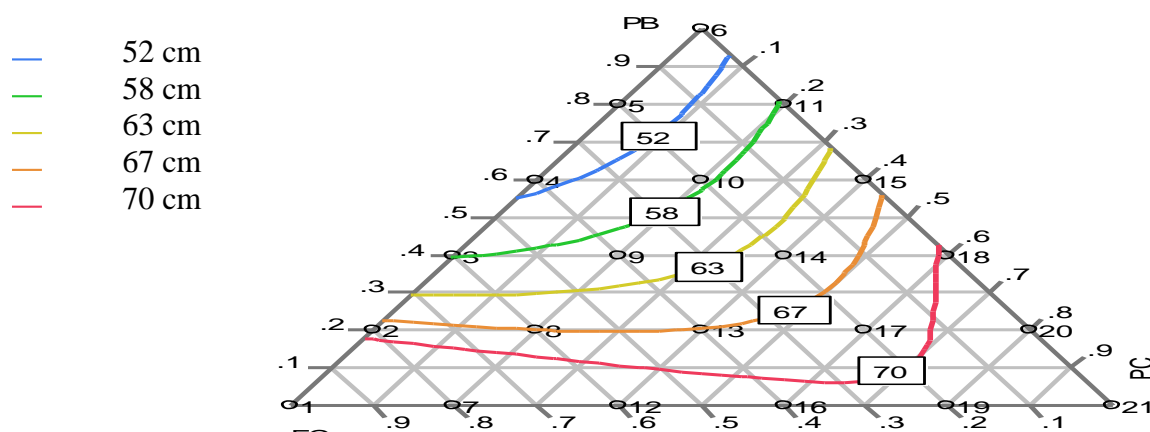


Figure 4.3. Diagramme ternaire de l'étalement (cm) en fonction du type d'addition minérale



Figure 4.4. Exemple d'étalement sur BSAP frais (cas de la formulation F1).

IV.9.2. Influence des additions minérales sur le temps d'écoulement du (J-Ring) T500J

L'essai de l'anneau en J est un test important dans l'évaluation des mélanges de béton de sable autoplaçant (**BSAP**). Il évalue la capacité du béton à remplir les vides et offre des informations essentielles sur sa maniabilité. Dans cette étude, le temps d'écoulement (T500J) des différents mélanges **BSAP** est examiné, comme représenté sur la figure 55. Les résultats montrent que le temps d'écoulement (T500) se situe dans la plage de 1,25 à 2,40 secondes, en présence de l'anneau en J, et cette plage est considérée acceptable par rapport aux tests réalisés sans l'anneau en J, quel que soit le type de **BSAP** [SAAD CHAIB ;2022].

Ces résultats mettent en évidence une similitude frappante entre le comportement du SCSC dans le test de l'anneau en J et son comportement dans le test d'étalement. Cette similité est particulièrement notable dans un système ternaire spécifique (composé de FC, PB et PC) avec un temps d'étalement de 1,8 seconde. Il est intéressant de noter que ces résultats ont été obtenus pour un mélange composé de 20 % de FC, 10 % de PB et 70 % de PC [DJOUAL BELKACEM ;2023].

Ces constatations suggèrent que le **BSAP** présente une excellente fluidité grâce aux renforcements et au confinement, principalement parce qu'il ne contient pas de gros agrégats qui pourraient autrement provoquer des blocages en cas d'obstacles. La **figure 4.5** ci-dessous illustre l'étalement (en centimètres) du **BSAP** à l'état frais.

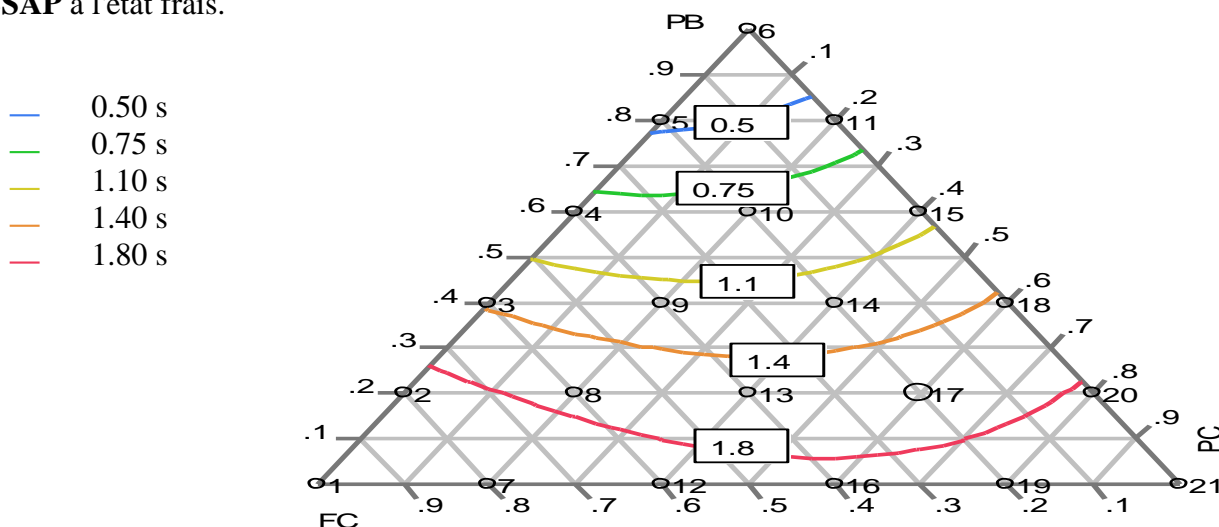


Figure 4.5. Diagramme ternaire de l'étalement modifié (J-Ring) en fonction du type d'addition minérale



Figure 4.6. Exemple d'étalement J-ring sur BSAP frais (cas de la formulation F21).

IV.9.3 Influence des ajouts de minéraux sur le temps d'écoulement

La figure 4.7 illustre la variation du temps d'écoulement (T500) pour différents groupes de mélanges avec différents pourcentages d'ajouts de minéraux. Il est important de noter que le comportement de l'écoulement des bétons de sable autoplaçants (BSAP) ne présente guère de changement significatif. Dans ce contexte, la valeur maximale de T500 dans le mélange est atteinte à 3,45 secondes, pour un mélange composé de 30 % de FC, 50 % de PC et 20 % de PB [DJOUAL BELKACEM ;2023]. Il est à souligner que la quantité totale d'additifs minéraux représente 23 % de la quantité totale de sable utilisée, ce qui a pour conséquence un compactage insuffisant. Cette situation est principalement due à l'homogénéité du sable de dunes [DOUARA T;2017].

De plus, il convient de noter que le sable des dunes présente un faible coefficient de finesse, ce qui signifie qu'il nécessite une grande quantité d'eau [BOUZIANI T ;2012, BENABED B;2014]. On observe également que l'utilisation de PC et de PB entraîne une augmentation du temps d'écoulement, car ces deux composants requièrent des quantités d'eau plus importantes. Il est intéressant de noter que les temps d'écoulement à T500 pour tous les BSAP sont inférieurs à ceux suggérés par Domone et Chai [DOMONE. P.L;2021]. Cela est probablement dû à la viscosité élevée des mélanges. Le temps d'écoulement le plus court a été enregistré dans le mélange F3 (60 % FC + 40 % PB), ce qui peut s'expliquer par la pente importante et la hauteur élevée (533 mm) ainsi que la valeur minimale de T500 égale à 1,91 seconde.

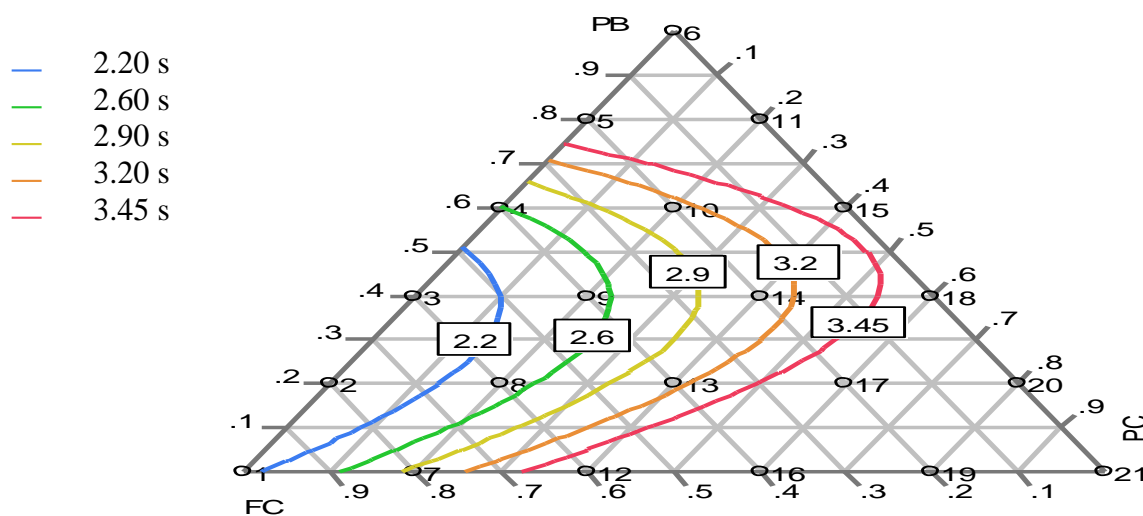


Figure 4.7. Diagramme ternaire de T500 (s) en fonction du type d'addition minérale

IV.9.4 Influence des de d'additions minérale sur le temps d'écoulement au V-funnel.

Une méthode courante pour évaluer la viscosité et la résistance à la ségrégation des bétons de sable autoplaçants (BSAP) est d'utiliser le test d'écoulement à travers l'entonnoir en V. Selon les travaux de Domone et Jin [DOMONE P.L;1999], la plage de valeurs acceptables pour le temps d'écoulement se situe entre 2 et 10 secondes. Les résultats obtenus montrent que tous les mélanges BSAP produisent de bons résultats, avec des temps d'écoulement compris entre 3,76 et 8,55 secondes [DJOUAL BELKACEM ;2023].

La figure 56 représente la variation du temps d'écoulement en entonnoir en V des compositions étudiées en fonction des dosages de sable de dune (SD) et de filler calcaire (FC). Les résultats indiquent que FC a une influence plus marquée sur le temps d'écoulement que PB. De plus, le temps d'écoulement maximal observé pour les mélanges BSAP ternaires est de 6,95 secondes, ce qui correspond à un mélange contenant 50 % de FC, 40 % de PC et 10 % de PB [DJOUAL BELKACEM ;2023].

Par ailleurs, les résultats montrent que les temps d'écoulement en entonnoir en V (compris entre 8 et 12 secondes) de toutes les compositions étudiées sont inférieurs aux valeurs recommandées pour les bétons autoplaçants (BAP) [SAAD CHAIB ;2022], à l'exception des deux compositions F1 (100 % FC) et F21 (100 % PC), en raison d'une augmentation de l'activité pouzzolanique.

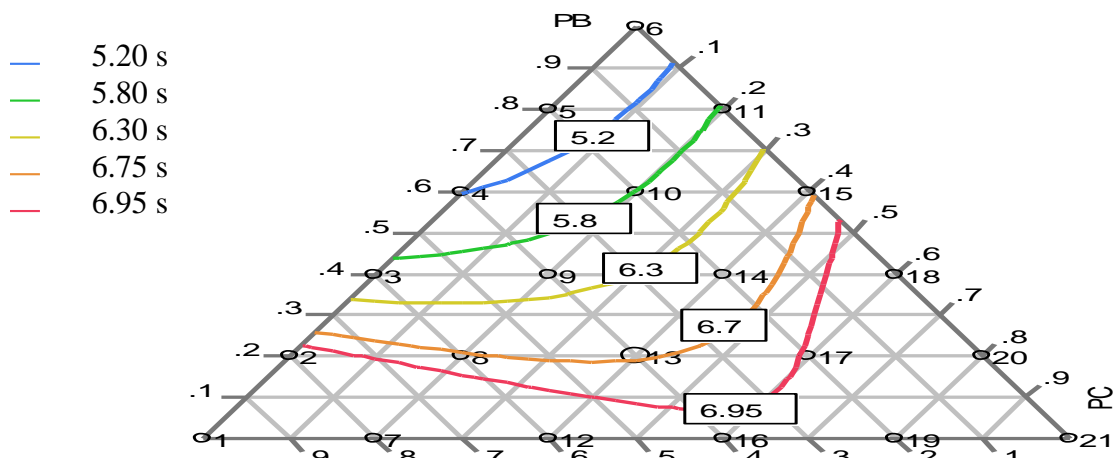


Figure 4.8. Diagramme ternaire de temps d'écoulement au V-funnel en fonction du type d'addition minérale



Figure 4.9. Exemple temps d'écoulement au V-funnel sur BSAP frais (cas de la formulation F1).

IV.9.5 Influence des additions minérales sur d'écoulement à la boîte (L-box)

la Figure 4.10 représente les résultats de l'écoulement à la boîte en L (L.BOX). exprimée par les rapports H2/H1 des compositions étudiées ou H2 et H1 représentent les hauteurs du BSAP, mesurées aux extrémités de la partie horizontale et la partie verticale de la boîte en L (L.BOX).

Dans la même figure, les résultats montrent aussi que dans la composition ternaire (FC, PB, PC) on a enregistré la valeur (95%) selon les pourcentages suivants : (FC30%, PB60%, PC10%).

- Dans le cas des compositions, les faibles taux de remplissage sont dus aux faibles dosages du FC [BOUZIANI, 2012].
- Les compositions étudiées ne montrent aucun signe de blocage durant le passage à travers les armatures, ce qui indique l'absence du phénomène de ségrégation. Cependant, on remarque un faible taux de remplissage dans le cas des compositions (F17, F18, F16, F19, F20). (taux de remplissage inférieurs à 0.8, valeur minimale recommandée par l'AFGC) [DJOUAL BELKACEM ;2023].

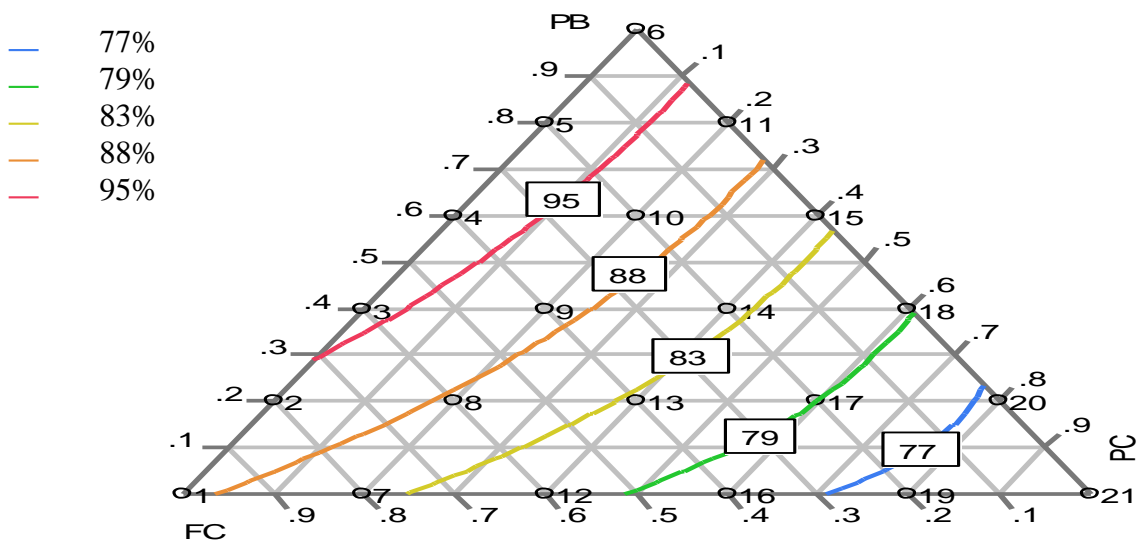


Figure 4.10. Diagramme ternaire d'écoulement à la boîte en L en fonction du type d'addition minérale



Figure 4.11. Exemple temps d'écoulement à la boîte (L-box)

IV.9.6 Influence des additions minérales sur la stabilité au tamis

les résultats des essais de la stabilité au tamis ont été représentés par la **Figure 4.12**. en fonction des combinaisons d'additions (FC,PB,PC).

D'après ces résultats, on remarque que tout le mélange est inférieur à 15% ce qui explique l'homogénéité et la stabilité du **BSAP** cela montre que l'addition du FC a un effet sur la résistance de la ségrégation des **BSAP**.

les résultats montrent aussi que la valeur PI diminue en fonction de l'augmentation des proportions de PB et PC. dans le système ternaire (FC,PB,PC) à l'ordre de 4.8% et augmente dans le système binaire FC.PC à l'ordre de 6.9 % [DJOUAL BELKACEM ;2023].

en utilisant les poudres on a remarqué que les proportions ont augmenté en occupant l'espace entre les granula du SA ce qui a permis de réduire le risque de ségrégation, une fois que le vide soit complètement rempli le granulat SD et les poudres additionnés commencent à occuper la place du granulat SA.

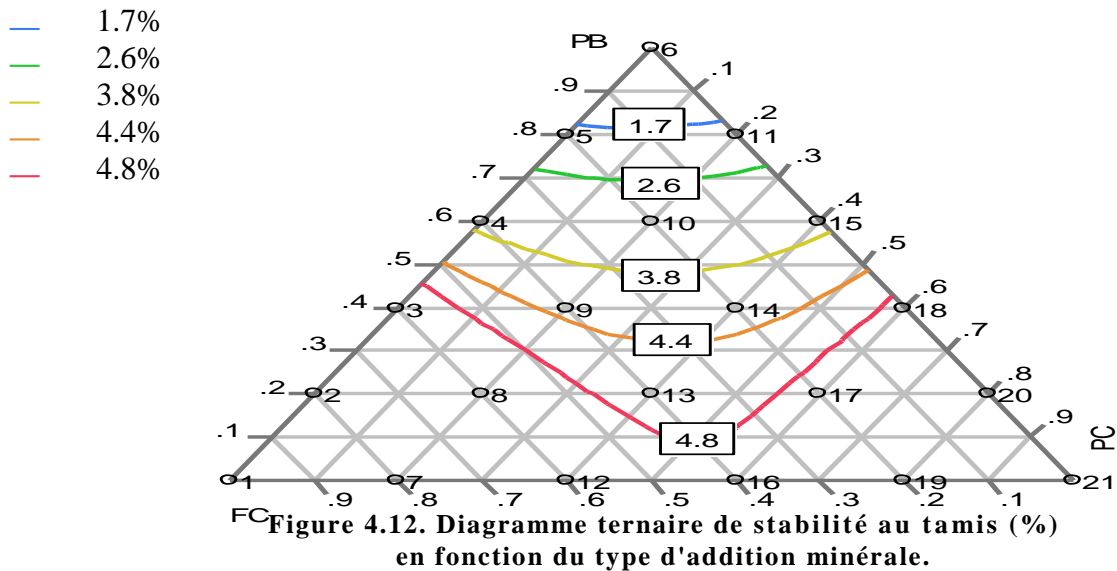


Figure 4.13. Exemple de l'essai de la stabilité au tamis sur BSAP frais. (cas de la formulation F1).

IV.10. RESISTANCES MECANIQUES

Des essais de résistance mécanique, comprenant à la fois des mesures de résistance à la compression et de flexion, ont été systématiquement réalisés à différents âges, notamment à 3 jours, 7 jours ; 14 jours ; 28 jours; 90 jours et 180 jours, en stricte conformité avec les normes NF EN 12390-2 et NF EN 12390-3. Ces essais complets ont été effectués en utilisant des éprouvettes prismatiques spécifiquement conçues pour le béton de sable autoplaçant (**BSAP**), et chaque échantillon a été préparé avec un soin méticuleux, suivant les directives précises des normes en vigueur.

Lors de la préparation des échantillons **BSAP**, le béton a été coulé minutieusement dans des moules de dimensions (4x4x16)cm³., les échantillons ont été soumis Ensuite à un processus de serrage sur une table vibrante, une étape essentielle visant à éliminer toutes les bulles d'air emprisonnées, garantissant ainsi une composition homogène et cohérente.

IV.10.1 Influence des additions minérales sur la résistance à la traction

▪ Les diagrammes ternaires présentés dans les **Figures 4.14** illustrent les résultats des tests. Ces figures montrent que la résistance à la traction en flexion augmente à mesure que les proportions de FC (Filler calcaire) et de PC (poudre céramique) augmentent. De manière intéressante, il a été constaté que la PB (poudre de brique) n'a pas d'influence significative sur ce paramètre de résistance. de 28 jours, la résistance à la traction en flexion atteint son maximum, avec une valeur de 3,7 MPa. Il est à noter qu'une quantité substantielle de fines dans le mélange entraîne l'enchevêtrement des grains de FC [**BENABED B;2014, MUCTEBA UYSAL;2022**].

▪ L'incorporation de poudre de déchets céramiques à un taux de substitution de 60 % a entraîné une augmentation de la résistance à la traction en flexion. Cette amélioration peut être attribuée aux niveaux plus élevés de silice et d'alumine présents à la fois dans la brique et les poudres céramiques, ce qui favorise la formation de composés aluminosilicates de sodium et d'hydroxyde de calcium, essentiels pour le processus de géopolymérisation [**MUCTEBA UYSAL;2022**].

Les observations ont montré que la résistance en flexion augmente avec des temps de durcissement plus longs. De plus, l'inclusion de la poudre de brique (BP) a entraîné une réduction de la résistance en flexion, avec une diminution plus marquée à mesure que la teneur en PB augmentait [**ABOUBAKEUR BOUKHELKHAL;2019**]; nos résultats corroborent ces observations. La valeur la plus basse enregistrée étant dans la combinaison triple (PB 80 % + FC 10 % + CP 10 %) ,**Figures 4.14**, mesurant 2,7 MPa 28 jours. Des tendances similaires ont été observées dans d'autres résultats de tests.

▪ La présence de la poudre de calcaire et des poudres céramiques, individuellement ou combinées à des niveaux dépassant 20 %, a entraîné une diminution significative de la résistance en flexion. Notamment, à 28 jours, la résistance était de 2,7 MPa, et à 180 jours elle est passée à 3,3 MPa. Cette diminution était plus prononcée dans les mélanges contenant 60 % de poudre de brique.

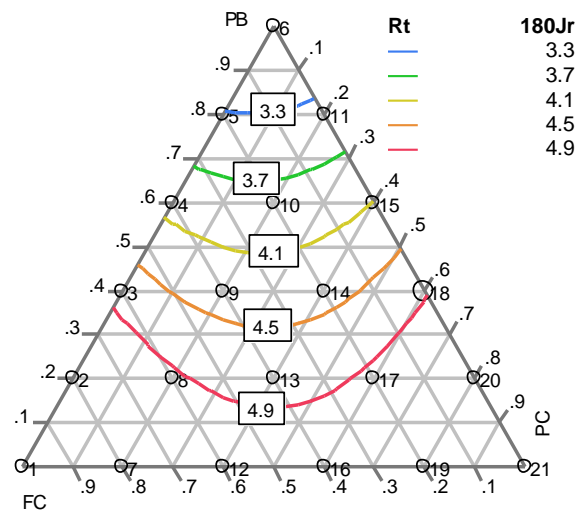
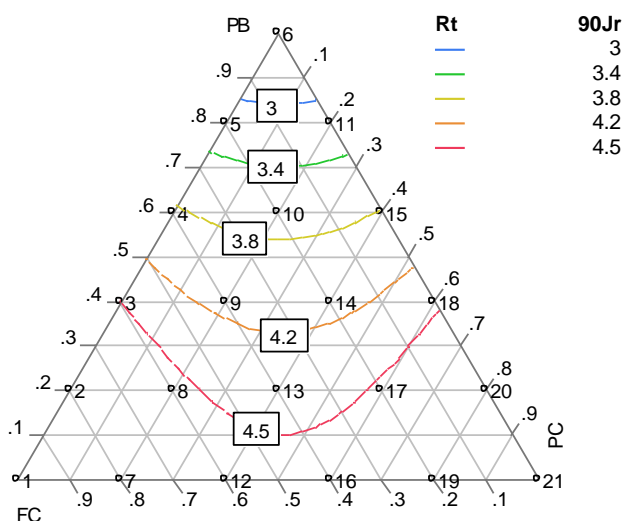
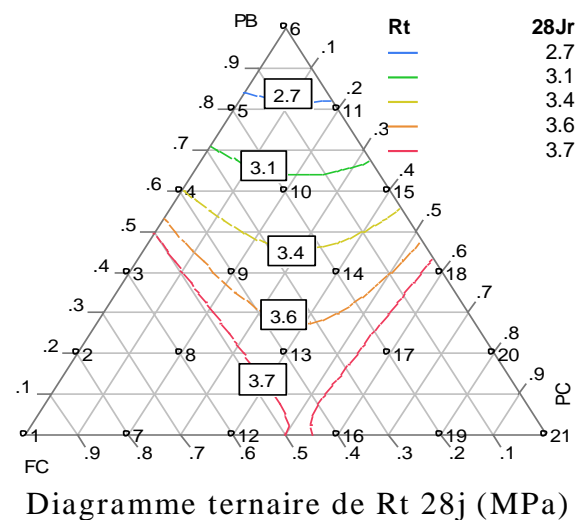
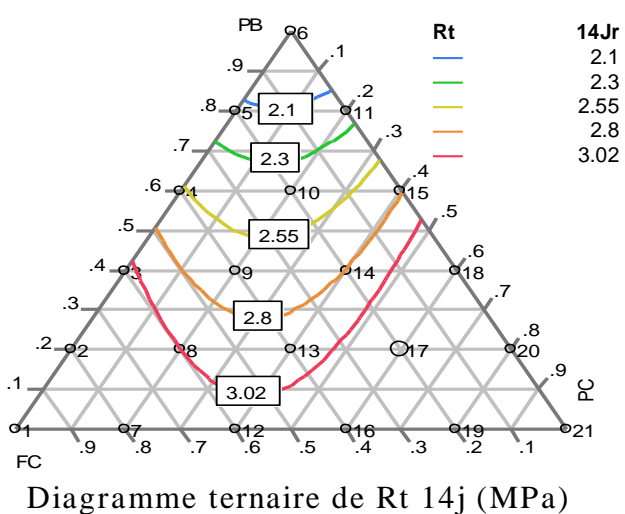
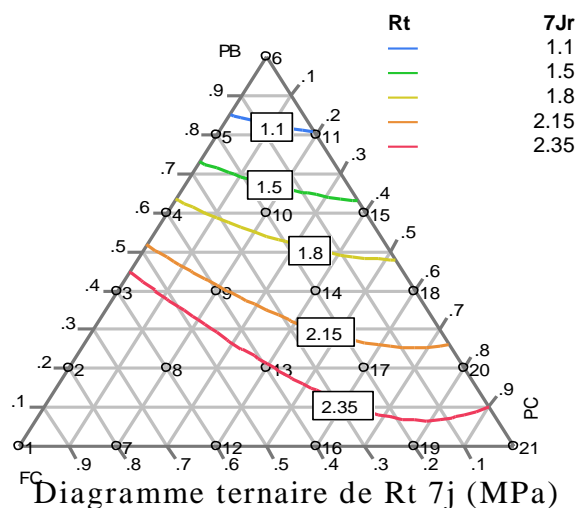
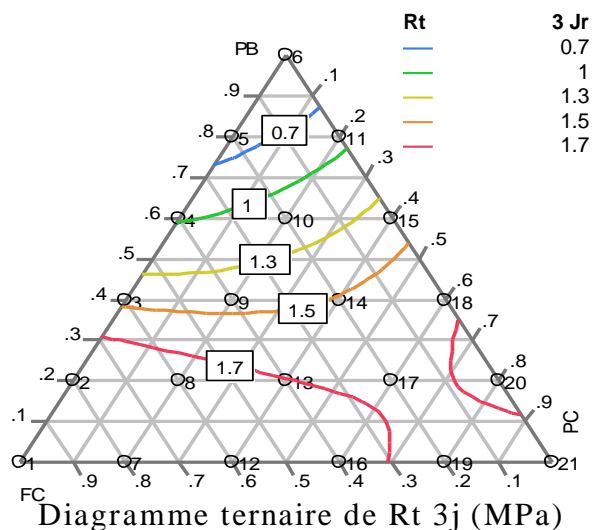


Figure 4.14. Diagrammes ternaires a la traction par flexion en fonction du type de l'addition minérale.

IV.10.2 Influence des additions minérales sur la résistance à la compression

L'impact de la poudre céramique, du filler calcaire et de la poudre de brique sur la résistance à la compression à 3,7,14, 28, 90 et 180 jours peut être observé dans **la Figure 4.15** est à noter que les rapports FC et PC dans les systèmes binaires et ternaires conduisent à une meilleure résistance à la traction, avec une compression enregistrée de 43 MPa à 28 jours pour les mélanges du système binaire avec les ratios suivants (60 % PB + 40 % PC) **Fig. 4.15**-90 jours. De même, pour les mélanges ternaires à 180 jours, la compression était de 48 MPa avec des ratios (50 % FC + 40 % PC + 10 % PB) Fig. 63-180 jours. Les mêmes résultats ont été observés à 3 jours et 7,14 jours[[DJOUAL BELKACEM ;2023](#)].

L'amélioration de la résistance à la compression des mélanges contenant moins de 20 % de PB et plus de 60 % de PC sur une période de 180 jours a montré une réponse positive à la composition ternaire des additifs minéraux. En incorporant des fines poudres pouzzolaniques, une pression maximale d'environ 48 MPa a été atteinte dans le mélange ternaire (60 % PC + 20 % PB + 10 % FC). Ce phénomène contribue à la densification des vides et des pores, augmentant leur densité globale avec le temps. La réaction pouzzolanique entre SiO_2 , (provenant des poudres) et l'hydroxyde de calcium entraîne la formation de nouveaux composés (silicates d'hydroxyde de calcium) et remplit les vides fins, conduisant à un meilleur rapport compression/résistance. Ces résultats sont en accord avec ceux présentés dans l'étude [[ABOUBAKEUR BOUKHELKHALET AL;2021](#), [MUCTEBA UYSAL ET AL;2022](#)].

D'autre part, il est également observé que les mélanges à forte teneur en FC offrent une meilleure résistance à la compression. De plus, l'inclusion de PC procure le même effet sur la résistance à la compression en raison de la forme des particules qui composent chaque composition et de leur interaction avec le ciment utilisé.

À rapport E/C constant, la résistance dépend du dosage en fines d'addition. De même, à rapport E/C constant, le temps d'écoulement dépend également du dosage et de la nature des fines d'addition : le béton devient plus maniable avec l'ajout de filler calcaire[[MITICHE . RATIBA KETTAB;2007](#)].

En outre, le mélange de pâte de ciment hydraté a été préparé avec un mélange de sable alluvionnaire (SA) et de sable de dune (SD), et l'ajout de FC a donné une texture rugueuse, bien que les particules de sable alluvionnaire et de dune aient des formes arrondies [[AISSOUN, B. M;2016](#)].

L'incorporation de poudre céramique augmente considérablement la résistance à la compression au fil du temps, en particulier au-delà de la période de durcissement de 28 jours en raison de l'activité pouzzolanique accrue. Le filler calcaire, riche en CaCO_3 , améliore les performances du béton, affectant positivement la résistance à la compression, grâce à son interaction synergique avec la composition du ciment et du sable.

L'incorporation de poudre de brique a donné des résultats favorables en termes de résistance à la compression et à la flexion, en particulier lorsqu'elle constituait un composant d'un mélange ternaire à des pourcentages inférieurs, généralement inférieurs à 20 %. Néanmoins, lorsque la proportion de poudre de

Chapitre IV : Résultats des Essais et Interprétations

brique dépassait ce seuil, son impact sur les propriétés mécaniques diminuait par rapport aux résultats associés aux autres additifs minéraux examinés dans cette étude. **la figure 4.16** représente un exemple de résistance à la compression et a la flexion du **BSAP**.

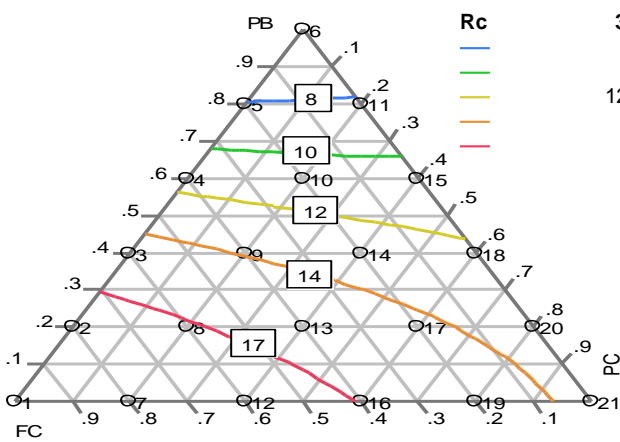


Diagramme ternaire de Rc 3j (MPa)

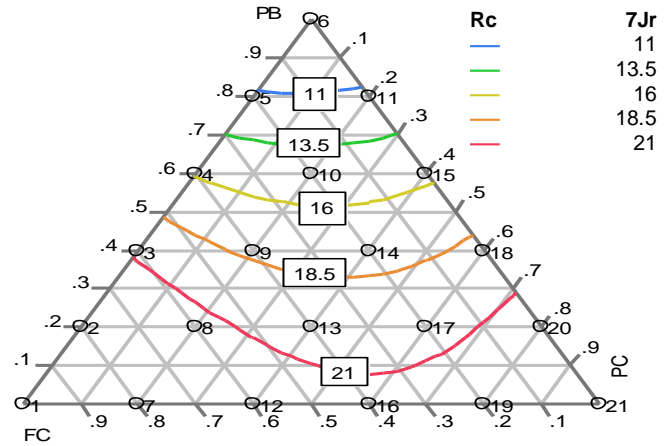


Diagramme ternaire de Rc 7j (MPa)

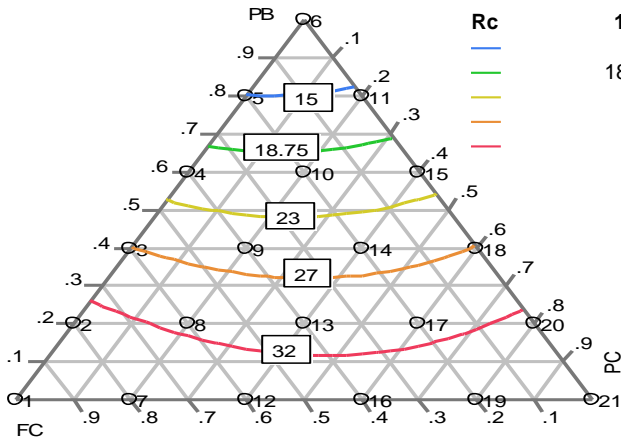


Diagramme ternaire de Rc 14j (MPa)

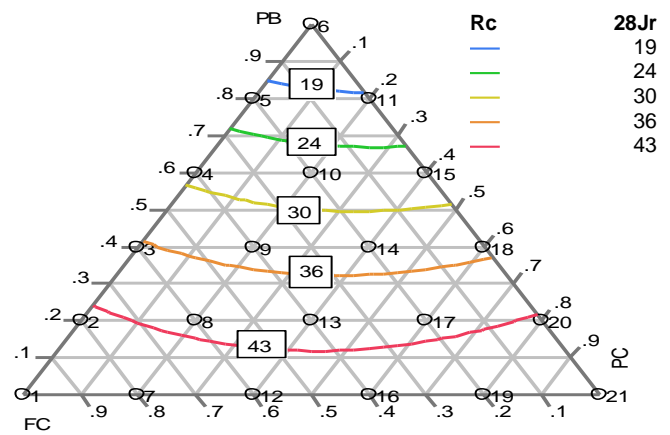


Diagramme ternaire de Rc 28j (MPa)

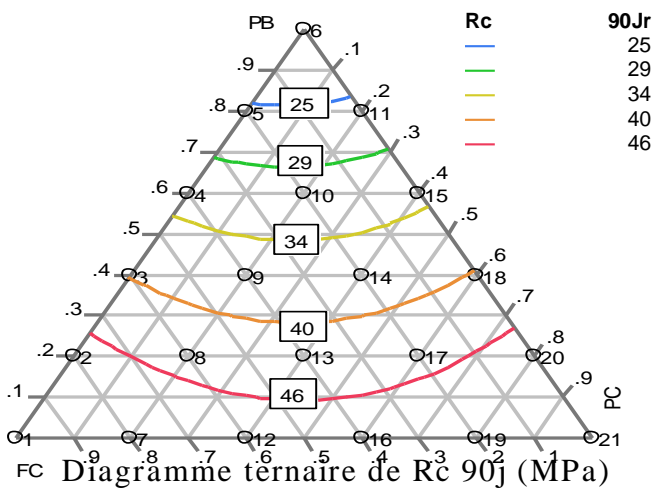


Diagramme ternaire de Rc 90j (MPa)

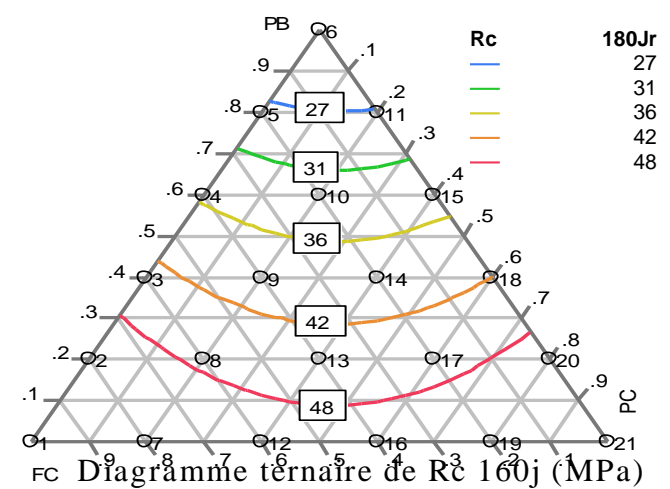


Diagramme ternaire de Rc 160j (MPa)

Figure 4.15. Diagramme ternaire a la compression en fonction du type d'addition minérale.



Figure 4.16. Exemple du procédé de mesure de la résistance à la compression et à la flexion du BSAP (formulation F1).

IV.11. CONCLUSION

Nous avons étudié l'impact de certains ajouts minéraux sur les propriétés du béton de sable autoplaçant (BSAP). Les résultats ont été obtenus :

- L'essai d'étalement du béton a montré que l'augmentation du pourcentage de filler calcaire (FC) améliorait l'ouvrabilité des BSAP.
- La plus grande valeur d'étalement de 70 cm a été obtenue en utilisant un mélange comprenant 50 % FC, 40 % PC et 10 % de poudre de brique (PB). Cependant, une quantité excessive de PB entraînait une réduction de la propagation.
- L'amélioration de la maniabilité a été attribuée à la disposition plus compacte des particules supplémentaires, qui à leur tour ont fourni une pâte supplémentaire pour la lubrification, comme l'indique le temps d'écoulement du J-Ring Slump (T500J).
- Le temps d'écoulement de l'entonnoir en V a montré des résultats positifs pour tous les mélanges de BSAP, allant de 3,76 à 8,55 secondes. Parmi les composants, le filler calcaire (FC) a eu l'impact le plus prononcé sur le temps d'écoulement. Le PC et le PB ont contribué à une augmentation du temps d'écoulement en raison de leur demande en eau plus élevée.
- Des tests de résistance mécanique ont été réalisés à des intervalles de temps différents : (3,7,14, 28,90 et 180 jours). La résistance à la traction et à la flexion a montré une tendance à la hausse avec des proportions accrues de FC et de PC dans le mélange.
- La résistance à la traction par flexion s'est améliorée lorsque la poudre de déchets céramiques a été incorporée à un taux de substitution de 60 %.
- L'ajout de poudre de brique (PB) a entraîné une diminution de la résistance à la flexion, la diminution la plus notable étant observée dans le cas de la combinaison triple (80 % PB + 10 % FC + 10 % PC). La résistance à la compression à 28 jours atteint 43 MPa pour les mélanges binaires constitués de 60 % FC et 40 % PC, et elle augmente jusqu'à 48 MPa pour les mélanges ternaires contenant 50 % FC, 40 % PC et 10 % PB.

Ces résultats suggèrent que l'ajout de poudres minérales, en particulier filler calcaire (FC) et poudre céramique (PC), peut améliorer l'ouvrabilité et les propriétés mécaniques des BSAP.

IV.12.ÉTUDE DE LA DURABILITE

IV.12.1. Introduction

Dans cette partie, nous examinerons neuf compositions , ainsi qu'une composition de référence (sans ajout de minéraux), afin de comparer les résultats obtenus. Cette démarche nous permettra d'analyser le comportement du béton en présence d'additifs minéraux (à différents niveaux de perte de masse), en étudiant sa durabilité aux âges de 28 jours, 90 jours et 180 jours, et en mettant l'accent sur les propriétés de compression et de flexion du béton. De plus, nous surveillerons à la perte de masse tous les 15 jours jusqu'à la fin de la période de 180 jours. Comme précédemment mentionné dans le troisième chapitre, On utilise différents milieux de conservation tels que l'eau pure, l'acide sulfurique (H_2SO_4) et l'acide chlorhydrique (HCl) **concentré à 5%** et Afin d'accélérer le processus de vieillissement de la composition étudiée, nous soumettrons celle-ci à des cycles répétés de séchage et d'immersion.

IV.12.2.variation de masse

Les variations de masse des éprouvettes de dimensions (4 x 4 x 16) cm³ correspondant aux différents BSAP (F témoin - sans ajout de minéraux, F1 - 100% FC, F2 - 100% PB, F3 - 100% PC, F4 - 60% FC + 40% PB, F5 - 60% PB + 40% PC, F6 - 60% PC + 40% PB, F7 - 60% FC + 20% PC + 20% PB, F8 - 60% PB + 20% FC + 20% PC, F9 - 60% PC + 20% FC + 20% PB) ont été mesurées sur une période allant jusqu'au 180^{ème} jour. Ces éprouvettes ont été conservées dans trois types de solutions : l'acide chlorhydrique (HCl), l'acide sulfurique (H_2SO_4) concentré à 5%.et de l'eau pure, Les valeurs de perte de masse sont consignées dans **le tableau 4.10** :

Tableau 4.10. Perte de masse dans différents solutions

Milieux d'immersion Formulations	Immerger dans de l'eau pure			Immersion dans une solution (H ₂ SO ₄) 5%			Immersion dans une solution (HCl) 5%		
	28 jours	90 jours	180 jours	28 jours	90 jours	180 jours	28 jours	90 jours	180 jours
F témoin SAM	0.69	2.40	1.28	2.20	3.06	4.95	0.13	2.99	0.56
100% FC	1.59	2.39	0.64	0.43	0.99	2.64	1.56	20.86	4.31
100% PB	-0.32	1.32	0.38	0.43	1.06	1.03	1.79	4.26	11.81
100% PC	0.67	0.36	0.72	2.55	5.25	-2.28	1.28	-2.30	4.59
60% FC + 40% PB	0.13	0.15	0.15	0.50	1.99	0.74	2.82	7.07	3.54
60% PB + 40% PC	0.53	2.86	0.36	2.81	7.52	5.59	1.85	6.11	2.07
60% PC + 40% PB	0.05	4.18	0.65	3.71	-0.27	1.00	2.32	2.40	-1.90
60% FC + 20% PC + 20% PB	0.65	3.57	0.22	2.98	5.48	1.04	0.46	4.25	2.22
60% PB + 20% FC + 20% PC	0.71	4.42	2.38	0.54	0.79	0.11	2.23	24.61	-0.73
60% PC + 20% FC + 20% PB	0.28	0.87	2.62	3.20	3.97	2.56	2.13	20.71	3.36

Les données **du tableau 4.10** peuvent être illustrées à l'aide des graphiques suivants :

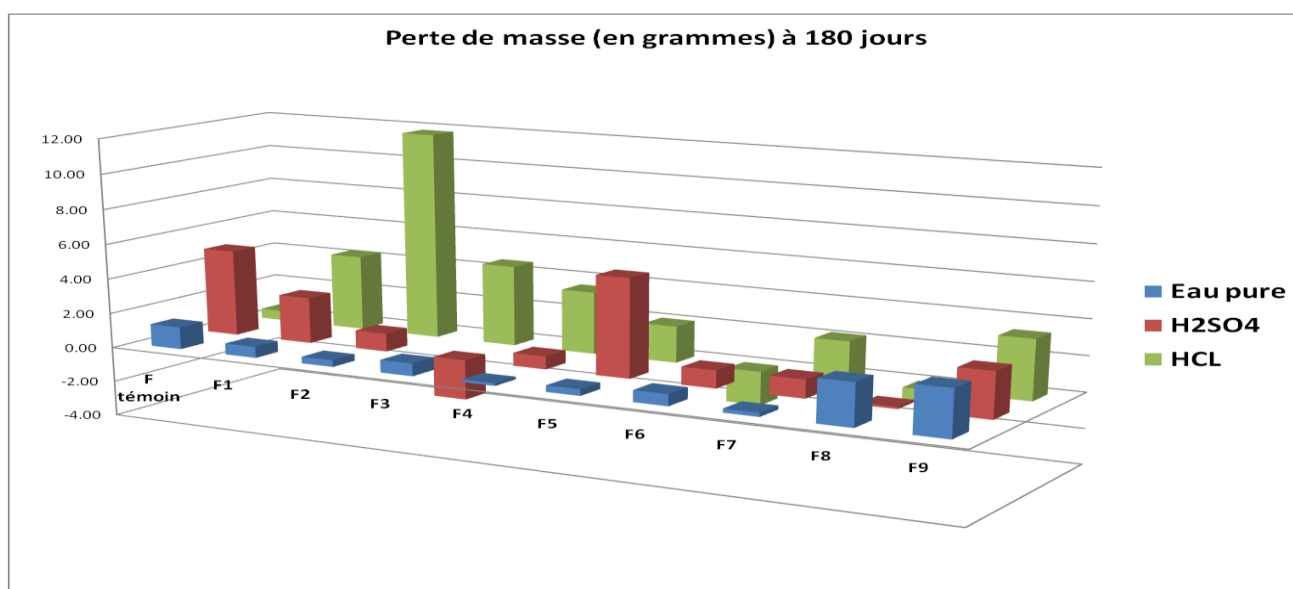
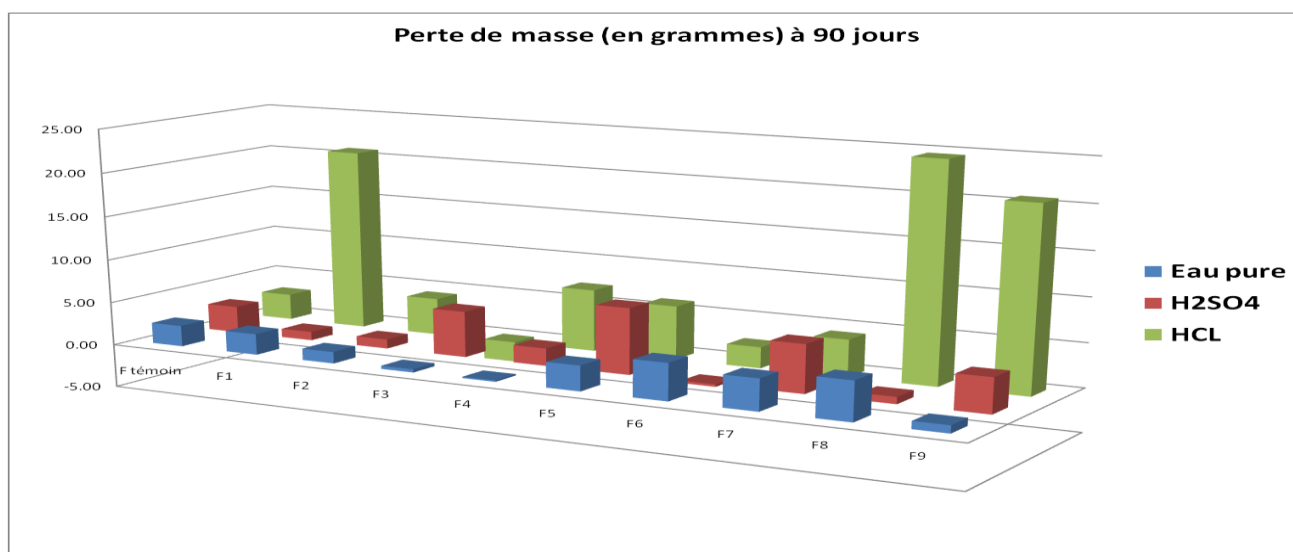
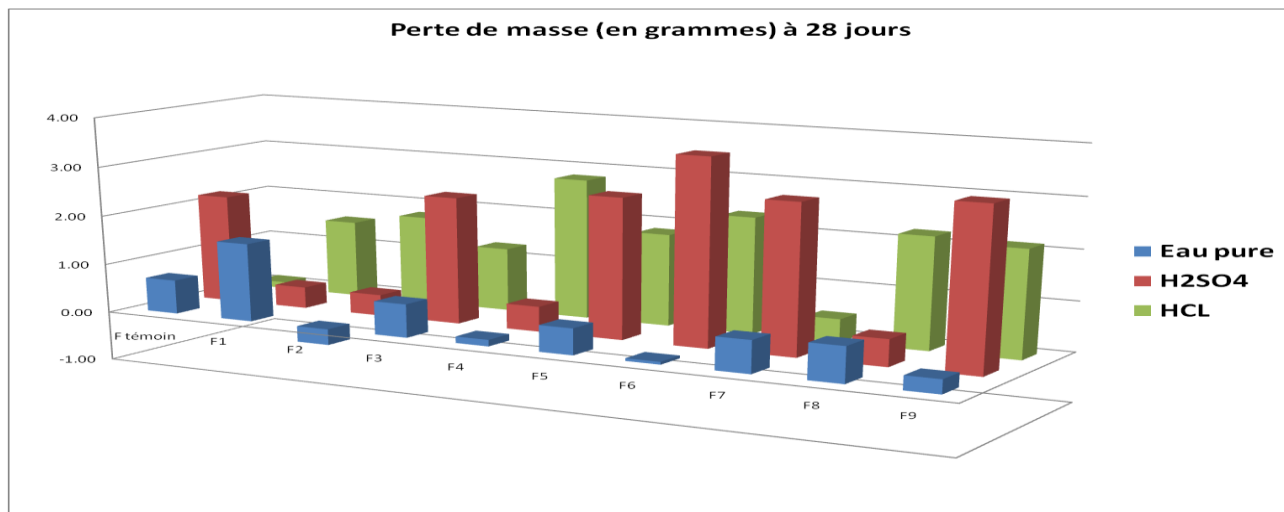


Figure 4.17. Variation de la masse en fonction de la période d'immersion dans une solution

(5% H₂SO₄ , 5% HCl et Eau pure) Age 28 ,90 et 180 jours.

Le graphique présenté dans la **Figure 4.17** illustre l'évolution de la masse (%) mesurée à la fin de chaque période d'immersion pour différents **BSAP** conservés dans deux milieux acides distincts ainsi que dans de l'eau pure du robinet.

Il est possible de constater sur ce graphique une augmentation progressive de la masse des **BSAP** tout au long des différentes périodes d'immersion, ce qui suggère que tous les **BSAP** ont gagné en masse. Cette augmentation de la masse varie de 0,13% à 0,41% après 180 jours d'immersion dans les trois milieux.

Il convient de noter qu'une perte de masse plus significative a été observée dans le milieu HCl après 90 jours, en particulier dans la composition comprenant 60% PB + 20% FC + 20% PC, atteignant une valeur de 24,61 g. Les gains de masse enregistrés sont attribués à la poursuite de l'hydratation des grains de ciment grâce à la présence d'eau, ce qui contribue à la formation de nouveaux CSH, rendant ainsi la structure du béton plus dense [BASSUONI ET AL.,2017, MAKHLOUFI ET AL.,2012]. Cette observation a été particulièrement marquée dans les compositions contenant un pourcentage de poudre de brique dépassant 40%, en raison de la capacité d'absorption supérieure des briques par rapport aux autres poudres d'additifs minéraux utilisées dans cette étude.

De plus, il est à noter que les deux composites contenant les compositions (F SDM) et (60% FC + 40% PB) ont présenté le gain de masse le plus faible à 28 jours et 90 jours, ce qui est constant dans les trois milieux. Cette différence peut s'expliquer par la plus grande compacité de ces deux types de béton. En outre, cette observation peut également être justifiée par le faible coefficient d'absorption capillaire de ces deux bétons, indiquant ainsi qu'ils sont les compositions les moins poreuses parmi celles étudiées.

La perte de masse entre 90 et 180 jours est due à la précipitation de la substance étrangère secondaire expansive, provoquant un gonflement remarquable des éprouvettes [HEKAL E.E. ET AL., 2002].

On peut également noter que l'acide HCl attaque à la fois les granulats calcaires et la pâte de ciment durcie, ce qui permet de réduire l'impact de l'acide sur la pâte de ciment, jouant un rôle d'adhérence entre les grains. En fait, les granulats protègent la pâte [BELARIBI O. ET AL., 2001; BENKADDOUR M. ET AL., 2009].

Un exemple de calcul de perte de masse dans les solutions utilisées dans cette recherche est présenté dans la **Figure 4.18**.



Figure 4.18. Mesure de la perte de masse à l'aide d'une balance électronique.

IV.12.3. Comportement des BSAP vis-à-vis des milieux H₂SO₄ et HCl

L'examen visuel

L'inspection visuelle des photos présentées dans la **Figure 4.19** permet de mettre en évidence la dégradation des BSAP induite par l'acide chlorhydrique HCl. Ces images révèlent que l'état de surface des échantillons présente des signes de détérioration superficielle, et l'attaque chimique semble être relativement modérée. De plus, la lixiviation de la pâte de ciment n'a atteint que des profondeurs limitées [CHERRAKM, M ET AL., 2013]. À chaque étape du processus, après avoir retiré les échantillons de l'acide, nous avons observé la présence de cristaux sphériques transparents attachés à la surface des échantillons. De plus, les images révèlent que l'acide H₂SO₄ est plus corrosif que l'acide chlorhydrique HCl.

L'immersion des échantillons de **BSAP** dans l'acide H₂SO₄ a entraîné des dommages significatifs au béton et une lixiviation de la pâte de ciment, révélant les granulats grossiers, comme illustré dans les photos de la **Figure 4.19**. Ce processus de dégradation a également été constaté par plusieurs chercheurs [SAMIMI, 2016; CHERRAKM ET AL., 2013, OMRANE ET AL., 2017]. Après chaque étape du processus, lorsque les échantillons ont été retirés de l'acide, une couche de sous-produits blanchâtres recouvrait la surface extérieure des échantillons, ce qui a également été noté par Samimi [SAMIMI, 2016] et Omrane et al.

[OMRANE ET AL., 2017]. Il est à noter que cette couche peut être facilement éliminée par lavage à l'eau. Les photos de la **Figure 4.20** ont été prises après ce lavage, mettant en évidence l'état de dégradation consécutif à l'attaque de l'acide sulfurique [SKENDER ZAKARIA., 2020].

L'immersion des échantillons de **BSAP** dans de l'Eau pure a donné lieu à la formation d'une fine couche qui peut être facilement éliminée en utilisant de l'eau distillée. Ensuite, les échantillons étaient essuyés et laissés sécher pendant une heure avant de procéder à la mesure de la perte de masse et des propriétés mécaniques du béton, telles que la résistance à la compression et à la flexion. Les mêmes étapes ont été suivies pour les échantillons de béton immergés dans les milieux HCl et H₂SO₄. Les images de la **Figure 4.19** montrent l'apparence des échantillons après leur extraction de l'eau pure.



Figure 4.19. Comparaison visuel des éprouvettes exposées aux différents milieux (âge 90 jours)



Figure 4.20. Une couche de sous-produits blancs recouvre l'extérieur des échantillons immergés dans le milieu acide H_2SO_4 , avec le FSDM comme exemple.

IV.12.4. résistance mécanique

Des mesures de résistance mécanique (compression et flexion) ont été réalisées à la fin de chaque cycle de vieillissement (28 jours, 90 jours et 180 jours) pour les trois milieux utilisés dans les expériences de durabilité du béton de sable auto-plaçant **BSAP**.

IV.12.4.A. Effet de la dégradation de l'acide chlorhydrique (HCl 5%) sur la résistance à la compression et à la flexion en traction.

La détermination de la perte de résistance à la compression et à la flexion due à l'attaque de l'acide chlorhydrique (HCl) est particulièrement complexe, car la surface de l'éprouvette en contact avec le plateau de la machine est considérablement altérée, ce qui ne permet pas d'obtenir une section plane bien définie; Cela complique l'analyse des résultats de résistance. Pour cette raison, notre intérêt se concentre uniquement sur l'effet de la dégradation de l'acide sur la perte de la force à la rupture en compression et en flexion.

Les résultats relatifs à la perte de force après 28, 90 et 180 jours d'immersion dans l'acide chlorhydrique sont regroupés dans le **Tableau 4.11**

Chapitre IV : Résultats des Essais et Interprétations

Tableau 4.11. Force de rupture en flexion et en compression dans une solution de 5% HCl.

Milieu d'immersion Formulations	Valeurs de résistance à la traction par flexion d'échantillons de béton conservés dans une solution d'acide chlorhydrique (HCl) Mpa.			Valeurs de résistance à la compression d'échantillons de béton conservés dans une solution d'acide chlorhydrique (HCl). Mpa		
	28 jours	90 jours	180 jours	28 jours	90 jours	180 jours
	F témoin SAM	5.16	5.64	6.49	23.85	26.61
100% FC	6.35	7.67	8.07	22.65	25.43	36.29
100% PB	4.50	5.37	5.81	5.87	10.11	13.65
100% PC	8.24	6.35	6.61	30.68	29.09	33.13
60% FC + 40% PB	6.05	6.52	6.52	21.99	25.11	28.22
60% PB + 40% PC	6.82	7.11	6.82	28.61	32.82	32.61
60% PC + 40% PB	5.09	5.46	5.77	20.25	22.56	25.00
60% FC + 20%PC + 20%PB	4.40	4.89	4.97	21.68	23.61	23.83
60% PB + 20%FC + 20%PC	4.47	4.73	5.33	19.52	22.38	33.75
60% PC + 20%FC +20%PB	5.68	5.74	5.85	27.94	28.54	30.54

Les données **du tableau 4.11** peuvent être illustrées à l'aide des graphiques suivants :

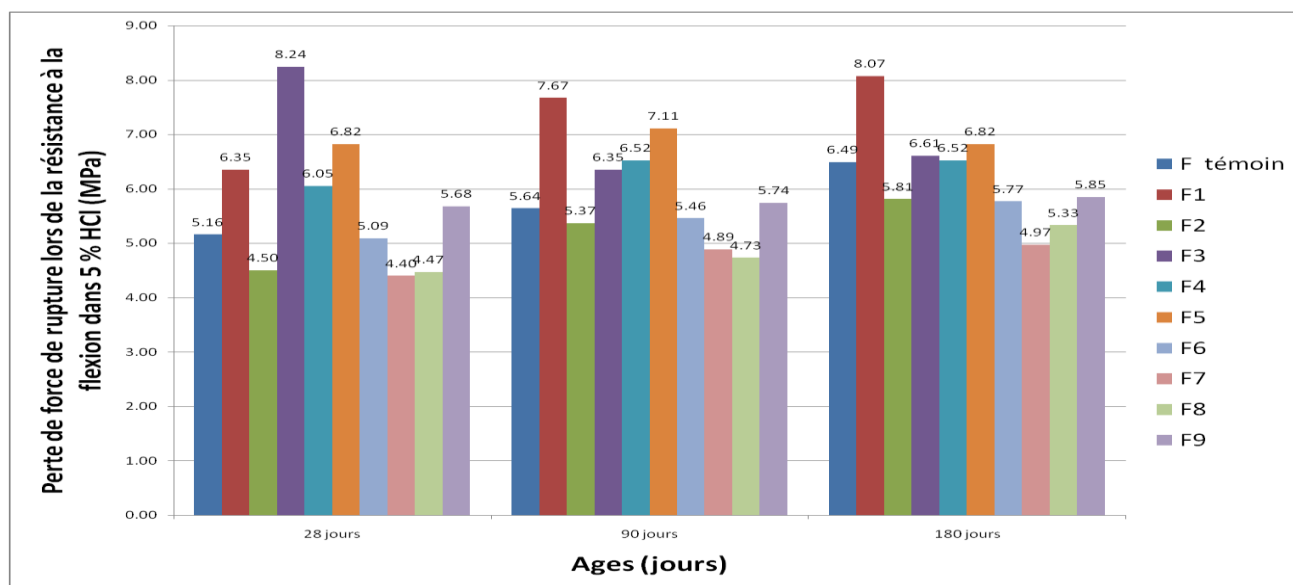


Figure 4.21. Variation de la résistance à la flexion du BSAP conservés dans la solution d' HCl (5%).

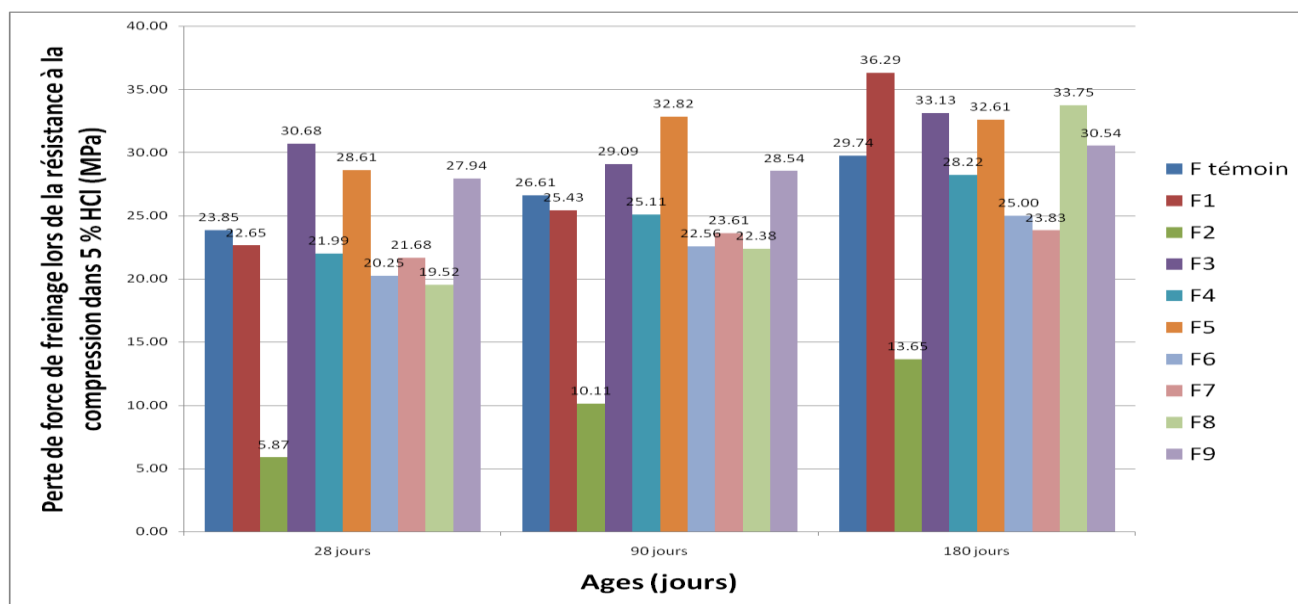


Figure 4.22. Variation de la résistance à la compression du BSAP conservé dans la solution d' HCl (5%).

D'après les **figures 4.21-4.22**, On observe que la perte de résistance à la rupture augmente proportionnellement à la durée d'immersion pour toutes les compositions de béton étudiées. Une diminution de la charge de rupture est particulièrement notable dans l'expérience de flexion pour la composition contenant 100% de poudre de brique (PB). À un âge d'immersion de 28 jours, la résistance à la flexion était de 4,50 MPa, et elle a atteint sa valeur maximale à cet âge, atteignant 8,24 MPa dans la composition contenant 100% de poudre céramique. Ce schéma se reproduit également dans la composition contenant 100% de filler calcaire après 180 jours d'immersion. En revanche, dans les compositions ternaires, on note que la valeur minimale a été enregistrée dans la composition ternaire 60% PB + 20% FC + 20% PC, avec une résistance de 4,47 MPa à l'âge de 28 jours, tandis que la valeur maximale a été estimée à 5,68 Mpa pour la composition triple 60% PC + 20% FC + 20% PB., Il est possible de conclure que plus la proportion de poudre de granulats est élevée, plus la résistance à la flexion du béton est réduite [SKENDER ZAKARIA., 2020]. L'effet du filler calcaire et de la poudre céramique sur le comportement à la flexion du **BSAP** est similaire à celui de la poudre de granulats.

En ce qui concerne les forces de compression, il est à noter que, par exemple, dans la composition où la proportion de poudre céramique était de 100%, à 180 jours d'immersion, la résistance à la compression atteignait 37,13 MPa, (la valeur la plus élevée). Cela est également observé pour les compositions contenant des charges calcaires, qu'il s'agisse de compositions simples, doubles ou triples, avec la valeur la plus basse à 13,65 MPa pour la composition 100% PB. Il convient également de noter que la résistance à la compression et à la flexion augmente avec le temps d'immersion pour les dix échantillons utilisés dans cette étude, avec des valeurs supérieures pour les compositions contenant des additifs minéraux par rapport à la composition de référence exempte d'additifs minéraux, à l'exception de la formule contenant plus de 40 % de poudre de brique..

Ces résultats mettent en évidence l'importance des ajouts minéraux dans le comportement du béton exposé à l'immersion en milieu acide, ainsi que l'étendue de sa durabilité.

Cependant, il convient de noter que les valeurs de résistance à la flexion et à la compression du **BSAP** immergé dans l'acide chlorhydrique HCl étaient inférieures à celles du béton immergé dans l'acide H₂SO₄ et dans de l'eau pure, comme nous le verrons ultérieurement.

Il est également important de noter que les différentes compositions étudiées lors de l'exposition à des solutions d'acide chlorhydrique ont subi une attaque de l'acide sur la pâte de ciment, ce qui a conduit à la formation de chlorures de calcium hydrosolubles, provoquant ainsi une porosité accrue et une réduction de la durabilité mécanique [BASSUONI ET AL., 2007 ; BENOSMAN ET AL., 2009]. La variation de la résistance des **BSAP** en milieu acide dépend de facteurs autres que la solution agressive, notamment le type de ciment utilisé et le type d'additifs minéraux.

La diminution de la résistance mécanique des différents mortiers étudiés exposés à la solution d'acide HCl est due à l'attaque de la pâte de ciment par l'acide qui conduit à la formation des chlorures de calcium qui sont solubles dans l'eau [BENOSMAN A. S. ET AL., 2009], ce qui développera ainsi une porosité importante menant à une forte perméabilité qui diminuera la durabilité des matériaux et par conséquent la résistance mécanique [BOUBEKEUR T. ET AL., 2010; KAZI AOUAL-BENSLAFA F. ET AL., 2011].

IV.12.4. B. Effet de la dégradation de l'acide sulfurique (H₂SO₄ 5%) sur la force à la rupture

Les résultats de la résistance à la rupture en compression et à la flexion en fonction de l'âge d'immersion dans l'acide sulfurique sont présentés dans le **Tableau 4.12**.

Tableau 4.12. force de rupture en flexion et en compression dans une solution de 5% H₂SO₄.

Milieu d'immersion Formulations	Valeurs de résistance à la traction par flexion d'échantillons de béton conservés dans une solution (H ₂ SO ₄). (Mpa)			Valeurs de résistance à la compression d'échantillons de béton conservés dans une solution (H ₂ SO ₄). (Mpa)		
	28 jours	90 jours	180 jours	28 jours	90 jours	180 jours
F témoin SAM	5.42	6.56	6.68	26.41	30.16	34.60
100% FC	7.10	7.80	8.16	29.74	36.48	40.56
100% PB	5.31	5.93	4.92	6.98	10.31	16.50
100% PC	7.05	8.22	8.22	32.63	36.00	37.40
60% FC + 40% PB	7.47	6.63	6.67	26.36	27.40	30.20
60% PB + 40% PC	8.04	7.16	8.11	30.64	34.30	36.50
60% PC + 40% PB	5.18	5.55	6.07	22.18	23.44	28.60
60% FC + 20%PC + 20%PB	4.68	4.77	5.11	23.42	24.75	27.90
60% PB + 20%FC + 20%PC	4.42	4.64	4.53	19.16	21.48	26.56
60% PC + 20%FC +20%PB	6.25	6.36	6.33	31.03	31.13	32.60

Les données du tableau 4.12 peuvent être illustrées à l'aide des graphiques de la **figure 4.23** :

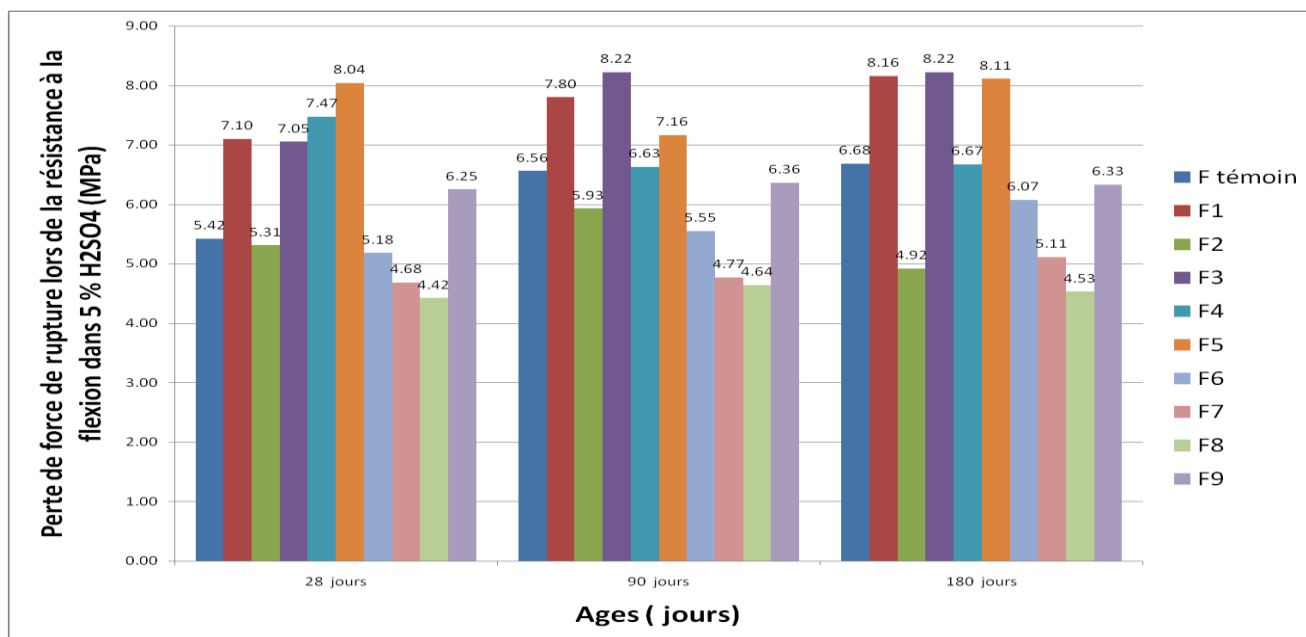


Figure 4.23. Variation de la résistance à la flexion du BSAP conservé dans la solution H₂SO₄ (5%).

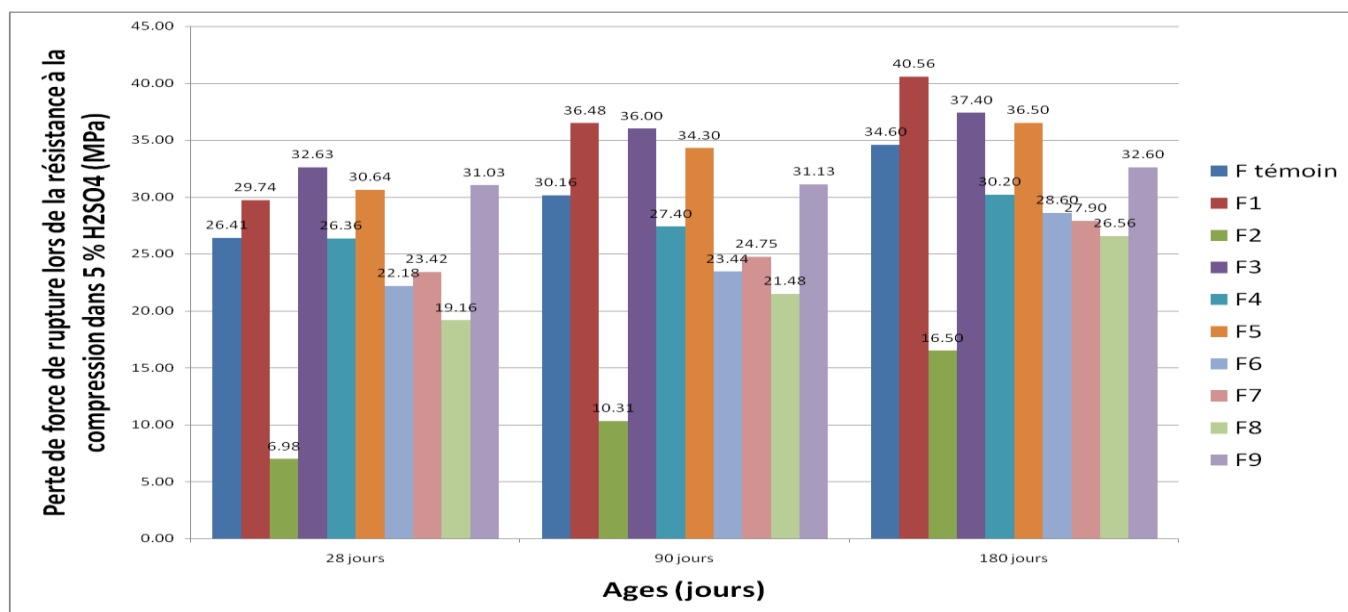


Figure 4.24. Variation de la résistance à la compression du BSAP conservé dans la solution H₂SO₄ (5%).

D'après les données des **figures 4.23 et 4.24**, il est évident que le milieu contenant de l'acide sulfurique (H₂SO₄) est moins corrosif pour le béton que l'acide chlorhydrique (HCl), comme le suggèrent clairement les valeurs mécaniques enregistrées. L'immersion dans H₂SO₄ entraîne toutefois une diminution de la capacité de résistance du **BSAP** à la compression et à la flexion pour toutes les compositions testées. Cette diminution de la capacité portante des échantillons immergés dans la solution H₂SO₄ est principalement

due à des altérations significatives de la surface des échantillons, provoquant la désagrégation des granulats de la pâte de ciment et entraînant la formation de fissures dans le béton. En conséquence, la section de l'éprouvette soumise à la charge n'est plus plane, ce qui réduit sa capacité à résister aux efforts de compression.

Notamment, après une période d'immersion de 180 jours, la plus grande valeur de résistance à la compression a été enregistrée pour la composition contenant uniquement des additifs minéraux, soit 100% FC, avec une valeur de 40,56 MPa. En revanche, la valeur la plus basse a été observée pour toutes les compositions utilisées dans cette étude, avec 16,50 MPa pour la composition composée à 100% de poudre de brique (PB). En ce qui concerne les compositions mixtes, la valeur maximale de résistance à la compression a été enregistrée pour la combinaison binaire de 60% PB + 40% PC, atteignant 36,50 MPa à un âge d'immersion de 180 jours. Cela suggère que l'utilisation d'une proportion de poudre de brique supérieure à 60% avec du filler calcaire améliore la résistance aux forces de compression. Quant aux compositions ternaires, la valeur maximale de résistance à la compression à un âge d'immersion de 90 jours a été de 32,60 MPa pour la composition 60 % PC + 20 % FC + 20 % PB, tandis que la valeur minimale a été enregistrée pour la composition 60 % PB + 20 % FC + 20 % PC, avec 26,56 MPa à 90 jours. La valeur minimale de résistance à la compression a été de 10,91 Mpa pour la composition à 100% PB à 90 jours. En ce qui concerne les efforts de flexion, le comportement est similaire à celui du béton en compression, mais avec des valeurs différentes. Par exemple, à un âge d'immersion de 180 jours, la valeur maximale de résistance mécanique a été de 8,22 Mpa pour la composition à 100 % PC, tandis que la valeur minimale a été observée pour la composition à 100 % PB, avec une valeur de 4,92 Mpa.

IV.12.4 .C. Effet de la dégradation d' Eau pure sur la résistance à la compression et à la flexion en traction.

Les résultats de la résistance à la rupture en compression et à la flexion en fonction de l'âge d'immersion dans Eau pure sont présentés dans le **Tableau 4.13**.

Tableau 4.13. force de rupture en flexion et en compression dans une solution d'Eau pure

Milieu d'immersion Formulations	Valeurs de résistance à la flexion d'échantillons de béton conservés dans une solution (Eau pure). (Mpa)			Valeurs de résistance à la compression d'échantillons de béton conservés dans une solution (Eau pure). (Mpa)		
	28 jours	90 jours	180 jours	28 jours	90 jours	180 jours
F témoin SAM	6.82	7.15	7.24	37.74	39.26	41.75
100% FC	8.13	8.22	8.33	36.29	38.64	50.88
100% PB	8.2	4.83	5.94	37.89	33.50	37.89
100% PC	8.51	7.1	8.57	38.13	39.54	39.57
60% FC + 40% PB	7.59	5.71	5.56	28.22	32.74	34.84
60% PB + 40% PC	8.16	9.16	9.24	37.61	44.48	45.76
60% PC + 40% PB	6.93	8.08	8.74	35.00	37.66	40.25
60% FC + 20%PC + 20%PB	5.23	5.16	5.2	32.83	27.25	32.83
60% PB + 20%FC + 20%PC	5.31	8.03	9.66	33.75	40.61	48.88
60% PC + 20%FC +20%PB	7.98	8.18	9.22	40.54	42.42	45.54

Les données du tableau 4.13 peuvent être illustrées à l'aide des graphiques de la figure 4.25 :

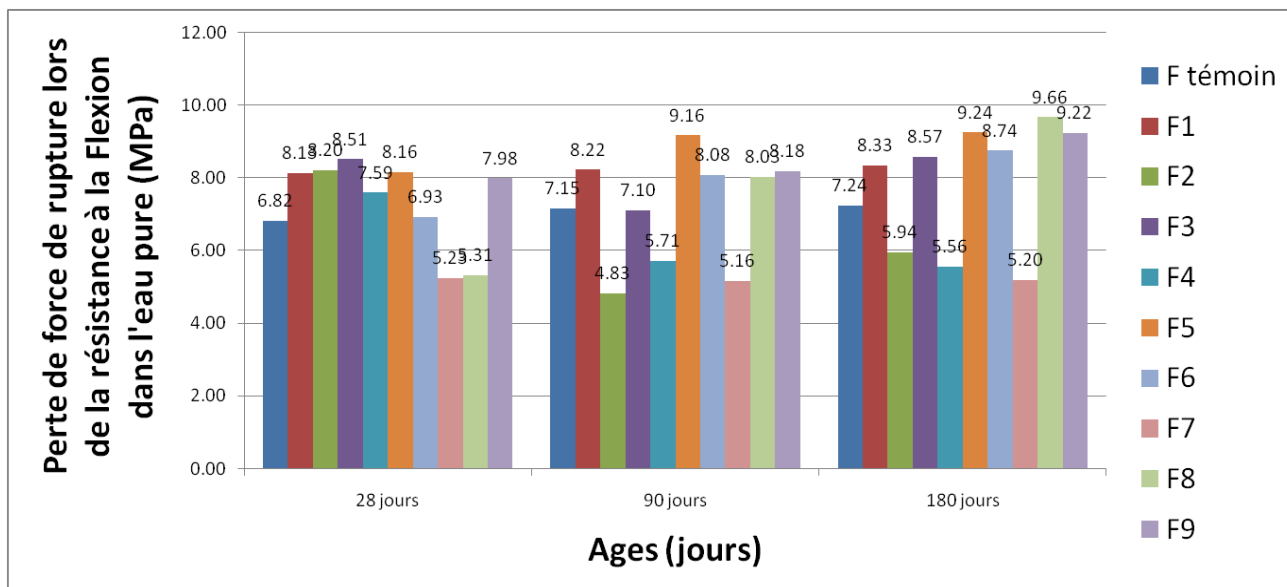


Figure 4.25. Variation de la résistance à la flexion du BSAP conservé dans la solution l'Eau pure

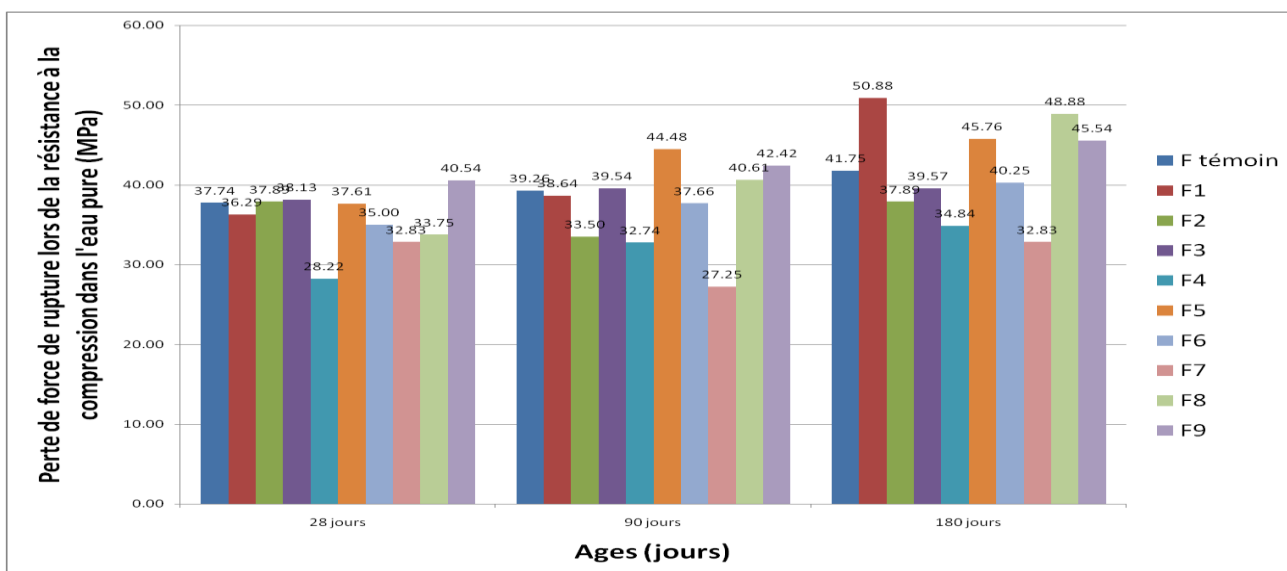


Figure 4.26. Variation de la résistance à la compression du BSAP conservé dans la solution Eau pure.

Il est généralement observé que les valeurs de résistance mécanique des différents échantillons de béton étudiés, immergés dans de l'eau pure, sont supérieures aux valeurs de résistance mécanique du béton immergé dans les deux milieux agressifs (H_2SO_4 et HCl). Cela indique que l'effet de l'eau pure n'était pas significatif sur le comportement du béton étudié dans cette recherche.

Ce constat suggère que l'eau pure n'a pas eu d'impact négatif sur la résistance mécanique du béton et que le béton a conservé sa capacité à résister aux charges même après une immersion prolongée dans de l'eau pure. Cette observation est cohérente avec l'idée que l'eau pure en elle-même n'est pas corrosive pour le béton et n'entraîne pas de dégradation significative de sa résistance mécanique.

Il convient cependant de noter que les résultats peuvent varier en fonction de la composition du béton, de la qualité des matériaux et des conditions environnementales spécifiques. Il est important de prendre en compte ces facteurs pour évaluer correctement l'impact de l'eau sur la résistance mécanique du béton dans un contexte particulier.

- Il est possible de fournir des images illustratives dans **la figure 4.27** concernant le calcul des forces mécaniques de compression et de flexion de certains échantillons utilisés dans l'expérience de durabilité du béton, parmi toutes les solutions d'immersion utilisées.



Figure 4.27. Photographies des échantillons pendant les essais mécaniques sur le BSAP.

IV.13. Conclusion

Dans le cadre de ce chapitre, notre objectif était d'analyser les résultats de l'effet combiné des formulations linéaires, binaires et ternaires des additifs minéraux filler calcaire (FC), poudre de brique (PB) et poudre céramique (PC), et de les comparer avec une formulation sans additifs minéraux, aux caractéristiques rhéologiques, mécaniques et les propriétés de durabilité face à l'attaque de l'acide chlorhydrique et de l'acide sulfurique (H_2SO_4) sur du béton de sable autoplaçant.

Concernant l'effet de l'attaque par 5% d'acide chlorhydrique et 5% d'acide sulfurique (H_2SO_4) :

- La combinaison de 60% de FC et 40% de PC permet au béton de sable autoplaçant de résister aux infiltrations acides grâce à sa structure plus compacte par rapport à la structure témoin.
- La perte de résistance à la rupture augmente proportionnellement à la durée d'immersion pour toutes les compositions de béton étudiées, ce qui signifie une perte de résistance à la compression.
- Il existe une relation linéaire entre la perte de résistance et la porosité du sable pour toutes les périodes d'immersion dans 5% d'acide chlorhydrique ou 5% d'acide sulfurique (H_2SO_4).
- L'effet de l'acide sulfurique (H_2SO_4) est très agressif. L'immersion des échantillons de béton de sable autoplaçant dans H_2SO_4 a entraîné des dommages notables au béton et une infiltration dans le ciment, laissant des granulats grossiers visibles.
- La perte de résistance à la rupture est très importante, d'environ 4% pour les échantillons de béton de sable autoplaçant ayant une combinaison de 60% de FC et 40% de PC. En revanche, le pourcentage de perte de résistance à la rupture pour les échantillons de béton de sable autoplaçant contenant la combinaison de 60% de PB et 40% de PC est de 29%. Cette différence peut être attribuée à la porosité des mélanges.
- La perte de résistance à la rupture lors de la compression de béton de sable autoplaçant immergés dans une solution de H_2SO_4 Ou de HCl dépend à la fois de l'état de surface dégradé de l'éprouvette et de la consistance du mélange de sable utilisé.

CONCLUSION



GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale et perspectives

Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre de plusieurs projets de recherches qui visent à valoriser les sables des (oueds) SA et les sable dunaire SD dans notre région en ajoutant des additions minérales locales formulant un béton de sable auto-plaçant (BSAP), et on essayé d'appréhender les rôles qui peuvent être joués par ces différents additions sur les propriétés à l'état frais et durci et de mettre en évidence les interactivités entre elles.

les bétons de sable représentent une solution favorable contre les probables pénuries des ressources, en gros granulats, notamment dans les régions du Sud de l'Algérie

- Les particularités des bétons de sable par rapport aux bétons traditionnels, suit notamment le volume élevé en pâte, la simple mise en place et l'absence ou la limitation de dosage des gros granulats; elles constituent un atout important lorsque, en plus, on peut les fluidifier afin d'améliorer certaines performances. C'est ainsi que S'est développée, récemment, à travers le monde entier, la technologie des bétons auto-plaçants, technologie à laquelle le concept des bétons de sable répond parfaitement.

- La méthode des plans d'expériences s'est avérée très utile dans notre cas, Nous avons utilisé un plan composite de 3 facteurs : dosage de filler calcaire (FC), dosage de poudre de brique (PB) et dosage de poudre de céramique (PC) avec l'utilisation d'un mélange de proportions fixes ne changeant pas avec le changement d'addition minérale ; il consiste en sable alluvionnaire (SA) 70% sable de dunes

(SD)30%, superplastifiant (SP) et rapport eau/liant (E/L).

- L'application de ce plan a nécessité la détermination d'un domaine expérimental autour d'une composition centrale, en définissant les niveaux haut et bas de chaque facteur qui a conduit à la réalisation de 21 compositions.

- Grâce au logiciel JMP®, élaboré par la société SAS Institute Inc., qui est particulièrement bien adapté pour la construction et l'analyse des plans d'expériences, nous avons pu analyser et interpréter les résultats trouvés dans notre travail. Les résultats montrent aussi que les modèles ajoutés sont de bonnes qualités et donnent les informations Recherchées.

- Le test de propagation du béton a montré que l'augmentation du pourcentage de filler calcaire (FC) améliorerait la maniabilité des BSAN (béton compacté autonivelant).
- La valeur de propagation la plus élevée de 70 cm (étalement au cône d'Abrams) a été obtenue lors de l'utilisation d'un mélange comprenant 50 % de FC, 40 % de PC et 10 % de poudre de brique (PB). Cependant, une quantité excessive de BP a entraîné une réduction de la propagation.
- La meilleure maniabilité a été attribuée à l'arrangement plus compact des particules supplémentaires, c-odonner ce qui a fourni une pâte supplémentaire pour la lubrification, comme indiqué par le temps d'écoulement du cône J-Ring (T500J).
- Le temps d'écoulement du cône en V a montré des résultats positifs pour tous les mélanges BSAP, allant de 3,76 à 8,55 secondes. Parmi les composants, le FC a eu l'impact le plus prononcé sur le temps d'écoulement. Le PC et le PB ont contribué à augmenter le temps d'écoulement en raison de leur demande en eau plus élevée.
- Des tests de résistance mécanique ont été effectués à des intervalles de temps différents : (3, 7, 14, 28, 90 et 180 jours). La résistance à la flexion a montré une tendance à la hausse avec l'augmentation des proportions de FC et de PC dans le mélange.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

- La résistance à la traction a montré une amélioration lorsque de la poudre de déchets céramiques a été incorporée à un taux de substitution de 60 %.
- Impact de la poudre de brique (PB) sur la résistance à la flexion :
L'ajout de poudre de brique a entraîné une réduction de la résistance à la flexion, particulièrement significative dans la triple combinaison (80% PB + 10% FC + 10% PC), mesurant 2,7 MPa au bout de 28 jours.

Cohérence des résultats des tests :

Des tendances similaires ont été observées dans divers résultats de tests, indiquant que l'impact négatif sur la résistance à la flexion était cohérent avec l'inclusion de poudre de brique dans des proportions différentes.

- La résistance à la compression à 28 jours a atteint 43 MPa pour les mélanges binaires composés de 60 % de FC et 40 % de PC, et elle est passée à 48 MPa pour les mélanges ternaires contenant 50 % de FC, 40 % de PC et 10 % de PB.
- Ces résultats suggèrent que l'ajout de poudres minérales, en particulier FC et PC, peut améliorer la maniabilité et les propriétés mécaniques des BSAP (béton compacté autonivelant).

Dans une deuxième phase, liée à l'étude de la durabilité du béton dans deux milieux acides, notre étude a permis d'analyser en profondeur le comportement du béton en présence d'additifs minéraux, en se concentrant sur sa durabilité aux âges de 28, 90 et 180 jours. , ainsi que sur ses propriétés de résistance à la compression et à la flexion. Nous avons également surveillé la perte de masse pendant la période d'immersion, en utilisant différents supports de conservation, notamment de l'eau pure, de l'acide sulfurique 5% (H_2SO_4) et de l'acide chlorhydrique concentré à 5% (HCl). De plus, nous avons soumis les échantillons à des cycles répétés de séchage et d'immersion pour accélérer le processus de vieillissement.

- Les résultats de notre étude ont montré que l'immersion dans des milieux acides, tels que l'acide chlorhydrique (HCl) et l'acide sulfurique (H_2SO_4), entraînait une diminution de la résistance mécanique du béton, notamment en ce qui concerne les problèmes de résistance à la flexion. Cependant, le dans l'eau pure a montré des valeurs de résistance mécanique plus élevées, indiquant que l'eau pure n'a pas d'effet significatif sur la résistance du béton.
- Il est intéressant de noter que la composition du béton, notamment la proportion d'additifs minéraux, a affecté les résultats. Les formulations contenant des fillers calcaires ont montré une meilleure résistance mécanique en immersion dans des milieux acides que celles contenant une forte proportion de poudre de brique. De plus, les formulations à base de poudre de brique ont révélé une perte de masse significative en milieu acide HCl, en raison de la capacité d'absorption supérieure des briques.
- Au final, notre étude a mis en évidence l'importance des adjuvants minéraux dans le comportement du béton en présence d'environnements agressifs, ainsi que la variabilité des résultats en fonction de la composition du béton. Ces résultats sont précieux pour la conception et la durabilité des structures en béton exposées à des environnements corrosifs.

L'étude met en évidence l'importance des adjuvants minéraux pour améliorer la résistance et la durabilité du béton, tout en réduisant l'utilisation de ciment dans les bétons autoplaçants. Elle souligne également la nécessité de choisir les additifs adaptés selon les environnements acides. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour comprendre l'impact des acides sur le béton et améliorer sa résistance.

Recommandations et orientations

1. Étudier davantage les proportions optimales des ajouts comme le filler calcaire, la poudre de brique et la poudre de céramique pour améliorer la fluidité et la résistance du béton.
2. Explorer d'autres types de sables locaux et analyser leur impact sur les propriétés du béton pour trouver la meilleure combinaison.
3. Chercher des alternatives au ciment en utilisant des ajouts minéraux pour réduire les coûts et l'empreinte environnementale, tout en améliorant la durabilité.
4. Développer des stratégies pour améliorer la résistance du béton aux attaques acides et aux conditions sévères, en ajoutant des matériaux résistants ou en utilisant des revêtements.
5. Encourager l'utilisation des déchets de céramique et de brique dans le béton pour réduire les coûts et l'impact environnemental.
6. Optimiser la conception et l'analyse des formulations de béton grâce à des logiciels et des simulations numériques.
7. Mener des études à long terme sur la durabilité du béton dans des environnements acides et climatiques extrêmes.
8. Encourager l'investissement public et privé dans la recherche et le développement du béton de sable auto-plaçant (BSAP) pour une construction durable.

REFFÉRENCES



BIBLIOGRAPHIQUES

- (AFGC), Association Française de Génie Civil «Béton Auto-Plaçants », Recommandations provisoires, , Annales du bâtiment et des travaux publics juin(2000).
- (AFGC), Association Française de Génie Civil (AFGC), " Recommandations pour l'emploi des bétons auto-plaçants ", Projet National - B@P, , pp. 64. (2008)
- (AFNOR), **NF P 15-433**. "Méthodes d'essais des ciments- Détermination du retrait et de gonflement", France, (1994).
- (AFNOR). " Béton et constituants des bétons, Tome1 : Spécification du béton et de ses constituants ", 5ème édition, Recueil des Normes : Bâtiment et travaux publics, (2002).
- **ALLAOUA, BELFERRAG**. Contribution à l'amélioration des propriétés mécaniques et rhéologiques des bétons de sable de dune. mémoire Doctorat. Biskra Algérie : s.n., (2016).
- **ABDERRAHMANE G. , YACINE A.:** Physical and Mechanical Properties of Dune Sand Mortar Reinforced with Recycled Pet Fiber: An Experimental Study, *Advances in Materials*,24.1,(2022)41-56.
- **ABOUBAKEUR BOUKHELKHAL , ABDERRAMANE HAMDAOUI , BELKACEM SEBGUIG.**2021 «Some engineering properties of sustainable self-compacting mortar made with ceramic and glass powders». Received: 29. 03. (2021)
- **ABOUBAKEUR BOUKHELKHAL , BENCHAA BENABED** «Fresh and hardened properties of self-compacting repair mortar made with a new reduced carbon blended cement» Received: 13. 07. (2019).
- **A. BENOSMAN**, Performances mécaniques et durabilité des matériaux cimentaires modifiés par ajout de polymère (PET), Thèse Doctorat, Université d'Oran, (2011).
- **A.KOMAR**, « matériaux et éléments de construction », troisième édition MIR pages ; 1 à 56. Moscou (1976).
- **A.LOUKILI AND PH. TURCRY**. "Effect of a viscosity agent on mechanical properties of self compacting concrete", In Proceedings of the Conference ICPCM A new era of building, 18-20 février (2003).
- **ABIDELAH A, BOUCHAIR A, KERDAL D. et AYED K.** «characterization of a Self-Compacting Sand-concrete using the quarry waste». *Canadian Journal of Civil Engineering*. Vol. 36 pp (2009).
- **AISSOUN, B. M., HWANG, S.-D. ET KHAYAT, K.H.**« Influence of aggregate characteristics on workability of superworkable concrete », *Materials and Structures*. Springer, 49(1- 2), p. 597- 609. (2016)
- **ASTM C1621/c 1621**-standard test method for passing Ability of self-Consolidating Concret by J-Ring. Norme ASTM international (2003).
- **ASTM C29/C29M-97**, Bulk Density ("Unit Weight) and Voids in Aggregate, reapproved. (2003).
- **AMBROISE, AMBROISE J.** "Bétons de sable fluides. Propriétés mécaniques et physiques". Rapport de recherche, Institut National des Recherches Appliquées, INSA, Lyon, Mars (1993).
- **BARON.J et. OLLIVIER.J-P**, « Les bétons : bases et données pour leur formulation », Eyrolles, (1999).

- **BATATA A. et MEROUANI Z.**, « Le béton de sable de dune : sa formulation et ses propriétés » séminaire international sur la qualité du béton en climat chaud, Ghardaia, Algérie, Mars (1994).
- **BASSUONI, M.T., NEHDI, M. , & AMIN, M.** Self-compacting concrete: using limestone to resist sulfuric acid, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials. 160 113– 123. doi:10.1680/coma.160.3.113. (2007)
- **BATIMAG**, revue spécial huitième salon BATIMATEC, Mai (2005).
- **BENAISSA A., MORLIER P. et TRAM V.**, « le béton de sable un matériaux non fissurant » Algérie équipement, N°6, p : 7-11, Octobre (1992).
- **BENOSMAN, A., MOULI, M., TAÏBI, M., BELBACHIR, M., SENHADJI, Y., BAHLOULI, I., & HOUIVET, D.** L'influence de l'ajout polymère sur la résistance des mortiers vis-a-vis d'une attaque chimique d'acide chlorhydrique, in: SBEIDCO. In: 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries. ENSET Oran(Algérie): pp. 383–90. Algeria. (2009)
- **B. BENABED, L. AZZOUZ, E. KADRI, S.E. BELAIDI, H. SOUALHI**, Propriétés physico-mécaniques et durabilité des mortiers à base du sable de dunes, in: XXXe Rencontres AUGC-IBPSA, Chambéry, Savoie, 6 Au 8 Juin 2012, 2012: pp. 1–11.
- **BETHMONT S.** « mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçant (BAP) : « étude expérimentale des interactions granulaire ».Thèse de doctorat à l'école nationale des ponts et chaussées, décembre (2005).
- **BENOSMAN, A.** Performances mécaniques et durabilité des matériaux cimentaires modifiés par ajout de polymère (PET), Thèse Doctorat, Université d'Oran, (2011).
- **BENABED, B.** Influence de la qualité et de la nature des sables sur les performances et la durabilité des bétons autoplaçants (Doctoral dissertation, Université de Laghouat-Amar Telidji) (2014).
- **BENKADDOUR, M. , KAZI AOUAL, F. & SEMCHA, A.** Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle .,Revue Nature et Technologie, pp 63-73.. (2009).
- **BELAIDI, A. S. E.** « 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. (2013).
- **BELARIBI, O. , BELAS BELARIBI, N. , MEBROUKI, A. , BOUHAMOU N. , & SIFODIL, D.** Comportement d'un béton autoplaçant vis-à-vis des attaques acides ., XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil, Tlemcen, Algérie, pp 32-42. .(2011).
- **BILLBERG P,** «Influence of filler characteristics on SCC rheology and early hydration, Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp. 285-294, 23-25 Octobre (2001).
- **BOUZIANI, T.** Formulation d'un béton de sable autoplaçant: rôle de la granularité et de dosages des constituants sur le comportement rhéologique. Université M'Hamed Bougara de Boumerdès. (2012)
- **BOUZIANI T., BENMOUNAH A, BEDERINA M et LAMARA M.** « Effect of marble powder on the properties of Self-Compacting Sand-Concrete». *The Open Construction and Building Technology Journal*. Vol. 5 pp. 25-29,(2012).
- **BOUKENDAKDJI, O.** « Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant ». Thèse de doctorat. Université Saâd Dahleb de Blida, p. 182. (2010).

- **BOUBEKEUR, T., BOULEKBACHE, B., & MAKHELOUFM A.,** Influence du laitier sur les propriétés des ciments à base de calcaire., Symposium International sur la Construction en Zone sismique, Université Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie), pp 1-8. Algérie. (2010).
- **BROWN, P.W,** “ Evaluation of the sulfate resistance of cements in a controlled environment ”, *Cement and Concrete Research*; 11: 719–27. (1982).
- **BRAQUENIER J-C et J.DESNYTER.J,** « le béton autoplaçant ou autocompactant », (2000).
- **CYR, M. & MOURET, M.** “Rheological characterization of superplasticized cement pastes containing mineral admixtures: consequences on self-compacting concrete design“. *Special Publication*, 217, 241-256 (2003)..
- **CNERIB,** Centre National d’Etudes et Recherches Intégrées du Bâtiment, « bétons de sable » Tipaza, Algérie, Décembre (1992).
- **CRISTIEN DRUTA B.S. (MECHANICAL ENG.),** Polytechnic University of Bucharest, August 2003, «Tensile Strength and Bonding Characteristics Of Self-Compacting Concrete», A thesis Submitted to the Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural college in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Engineering Science in The Department of Engineering Science (1995) .
- **CHERRAKM M., A., BALI, . K. , & SILHADI.** Concrete mix design containing calcareous tuffs as a partial sand substitution, *Constr. Build. Mater.* doi:10.1016/j.conbuildmat..05.051. .(2013).
- **DI CRISTINA,** Manlio, Zhicheng Dou, Matteo Lunghi, Geetha Kannan, My-Hang Huynh, Olivia L. McGovern, Tracey L. Schultz et al. "Toxoplasma depends on lysosomal consumption of autophagosomes for persistent infection." *Nature microbiology* 2, no. 8 (2017): 1-7.
- **DE LARRARD, F,** “ Construire en béton. L’essentiel sur les matériaux ”, Presses de l’École Nationale Ponts et Chaussées, France, (2002).
- **DREUX G. et Festa J.,** « Nouveau guide du béton et de ses constituants », 8^{ème} édition, Eyrolles, (1998).
- **DOUARA, T. ET GUETTALA, S.** « Effets de divers types de sables sur les propriétés d’un béton autoplaçant », (2017).
- **DOMONE. P.L., CHAI. H.W. JIN J.** “Optimum mix proportioning of selfcompacting concrete. roceeding on international conference on innovation in concrete structures: design and construction” University of Dundee. ed Dhir RK and Jones MR. Thomas Telford. London. (2021)
- **DOMONE P.L. JIN J.** “Properties of Mortar for Self-Compacting Concrete dz. Proceedings of the 1st International Symposium on Self-Compacting Concrete” RILEM Proceedings (PRO 7). Edited by A. Skarendahl and Petersson Stockholm. Sweden.. pp. 109. (1999).
- **DJOUAL, BELKACEM, RATIBA MITICHE KETTAB, ABDERRAHMANE GHRIEB, TAYEB BOUZIANI, AND REBIH ZAITRI.** "The influence of mineral additives and sands on the performance of self-compacting sand concretes." *Advances in Materials Science* 24, no. 1 (2024): 104-126.

- **(EFNARC)**, Specification and Guidelines for self-compacting concrete ". The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, (2002).
- **ERGUN, A.**, " Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete ", Construction and Building Materials; 25: 806–12. (2011).
- **EL BARRAK, M.**, " Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des Bétons Auto-Plaçants (BAP) à l'état frais",. *Revue Française de Génie Civil*, 7, 115-115 (2003)..
- **FEBELCEM** – Fédération de l'Industrie Cimentière Belge, « Les bétons autoplaçants, Bruxelles, août (2005).
- **FELEKOGLU B., YARDIMCI M. Y. and BARADAN B.**, "A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting-concrete", Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting-Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp. 446-456, 17-20 août (2003).
- **G. GLUAIS et J. P. BRU**, « Confortement d'une digue en enrochements par injection de béton de sable ». Bulletin de liaison, laboratoire central des ponts et chaussées, LCPC, N° 183, Paris (1993).
- **GOUPY, J. ET CREIGHTON, L.** (2446) Introduction aux plans d'expériences - 3^{ème} édition. Dunod (Technique et ingénierie), p. 324. (2006)
- **HOOTON, R.D.**, " Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack, freezing and thawing, and alkalisilica reactivity ", ACI Materials Journal; 90(2): 143–51. (1993)
- **HAYAKAWA M. , MATSUOKA Y. and YOKOTA K. ,** "Application of superworkable concrete in the construction of 70-story building in Japan", Second CA NMET/ACI on advances in concrete technology, Las Vegas, ACI 154-20, pp. 381-397, (1995).
- **HEKAL, E.E. , KHISHAR, E.; & MOSTAFA, H.**, Magnesium sulfate attack on hardened blended Cements pastes under different circumstances ., Faculty of science, Ain Chems University, Cairo, Egypt, pp1421-1427(2002).
- **HU C. et BARBIERI B.**, « Comparaison des retraits des bétons autonivelants et d'un béton fluide traditionnel », Science des matériaux et propriétés des bétons, pp.265-272, 1ere Rencontre Internationale, Toulouse, 5-6 mars (1998).
- **JACOBS F. and HUNKELER F.** « Design of self-compacting concrete for durable concrete structures », Proceedings of First International Symposium on Self- Compacting Concrete, (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 397-407, 13-15 septembre (1999).
- **JAPANESE SOCIETY** of civil Engineering, Guide to Construction of High Flowing Concrete engineering, Gihoudou Pub, Tokyo, au Japan, (1998).
- **JC. GIBBS and W. ZHU.** Strength of hardened self-compacting concrete. Proceedings of First international RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède: 199–209, (1999).
- **JIN**, « Properties of mortar for self-compacting concrete », PhD thesis de l'Université de Londres , , 398 pages (2002).

- **KAPOOR Y.P.** Self Compacting Concrete An Economical Approach, Masterbuilder. 92–96. <https://www.masterbuilder.co.in/data/edata/Articles/July2012/92.pdf>. (2012)
- **KHAYAT K.H.** “Use of viscosity-modifying admixture to reduce top-bar effect of anchored bars cast with fluid concrete”, *ACI Material journal*, vol.95 N°2, march-avril (1998).
- **KAZI AOUAL-BENSLAFA, F., MAAROUF, H., SEMCHA, A., & MEKERTA, B.,** « Durabilité des mortiers à base de sédiments de dragage du port d’Oran », Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime, Edition 2, Tanger, Maroc, pp 195-198. Maroc. (2011)
- **KHAYAT K. H., GHEZAL A. and Hadriche M. S.** "Utility of statistical models in proportioning self-consolidating concrete", *Materials and Structures*, 33: 338-344. (2000)
- **KHELIFA R.**, «Influence des ciments à base d’ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques des mortiers et des bétons, Thèse de Magistère en Génie Civil,(2000).
- **KHELIFA R.**, «L’impact des cimenteries sur l’environnement – Cas de la cimenterie de Ain-Touta», Mémoire de DEA en Aménagement, Développement et Environnement, Université d’Orléans, le 18 Septembre (2002).
- **KLUG Y. and HOLSCHMACHER K.**, “Material properties of hardened self-compacting concrete”, *ICPCM - A new era of building*, Le Caire, Egypte, 18-20 février (2003).
- **K. SAMIMI**, "Contribution à l’étude de la durabilité des BAP dans les milieux agressifs : effets des pouzzolanes naturelles", INSA Rennes, (2016).
- **LANGE, F., MÖRTEL, H. & RUDERT, V.** , "Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties". *Cement and concrete research*, 27, 1481- 1488 (1997)..
- **L.HASNI**, « béton autoplaçant ». Rapport de recherche N°98 – 004/98-006. Juillet Par CEBTP (centre de saint- Remy) (1999).
- **LOUKILI A. and TURCRY PH.**. “Effect of a viscosity agent on mechanical properties of self compacting concrete”, In *Proceedings of the Conference ICPCM A new era of building*, 18-20 février (2003).
- **M. AL-AKHRAS, N.** , “ Durability of metakaolin concrete to sulfate attack ”, *Cement and Concrete Research* (2006).
- **Makhloufi Z., Kadri E.H., Bouhicha M., Benaissa A.**,« *Resistance of limestone mortars with quaternary binders to sulfuric acid solution* », *Construction and Building Materials*, Volume 26, Issue 1, pp 497-504. (2012)
- **M. BEDERINA, Z. MAKHLOUFI, A. BOUNOUA, T. BOUZIANI, M. QUÉNEUDEC**, Effect of partial and total replacement of siliceous river sand with limestone crushed sand on the durability of mortars exposed to chemical solutions, *Constr. Build. Mater.* doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.037. (2013).
- **MAKHLOUFI .Z., KADRI E.H.; BOUHICHA M.; & BENAÏSSA A.** Resistance of limestone mortars with quaternary binders to sulfuric acid solution, *Constr. Build. Mater.* 26 (2012)
- **METHODES** d’essais des ciments, partiel : « détermination des résistances mécaniques ». P15-471 AFNOR , Aout (1995).

- **MEHTA P. KUMAR, J.M. PAULO MONTEIRO**, Concrete- Microstructure, Properties and Materials, Third Edit, McGraw-Hill, 2006.
- **MITICHE RATIBA .KETTAB.**, « Contribution à la valorisation du sable de dunes». thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique Alger, (2007).
- **MUCTEBA UYSAL, YURDAKUL AYG"ORMEZ.**«Investigation of using waste marble powder, brick powder, ceramic powder, glass powder, and rice husk ash as eco-friendly aggregate in sustainable red mud-metakaolin based geopolymer composites» 361 129718. (2022)
- **M. AL-AKHRAS, N**, “ Durability of metakaolin concrete to sulfate attack ”, Cement and Concrete Research (2006)
- **M. TENNICH, M. BEN OUEZDOU, A. KALLEL**, Behavior of self-compacting concrete made with marble and tile wastes exposed to external sulfate attack, Constr. Build. Mater. 135 (2017) 335–342. doi:10.1016/j.conbuildmat.(2016).
- **M.T. BASSUONI, M. NEHDI, M. AMIN**, Self-compacting concrete: using limestone to resist sulfuric acid, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials. 2007.160.3.113. 160 113–123. doi:10.1680/coma. (2007)
- **M. CHERRAK, A. BALI, K. SILHADI**, Concrete mix design containing calcareous tuffs as a partial sand substitution, Constr. Build. Mater. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.051. (2013)
- **M. OMRANE, S. KENAI, E.H. KADRI, A. AÏT-MOKHTAR**, Performance and durability of self compacting concrete using recycled concrete aggregates and natural pozzolan, J. Clean. Prod. 415–430. doi:10.1016/j.jclepro.2017.07.139. 165 (2017)
- **MINITAB**. Disponible sur: <https://support.minitab.com/fr-fr/minitab/18/>.(2018)
- **NAGATAKI S. and FUJIWARA H.** , “Self compacting property of highly flowable concrete”, Second CANMET/ACI on advances in concrete technology, Las Vegas, ACI 154-20, pp. 301-314, (1995).
- **NAGAI, T., KOJIMA, T., AND MIURA, T** “ Application of high-strength/super-workable concrete to thin- wall prestressed concrete products ”, Magazine of Concrete Research 1999; 51(3): 153-62.
- **NORME FRANÇAISE AFNOR** « Granulats : Mesures des masses volumiques, coefficient d’absorption et teneur en eau des sables », décembre (1990).
- **NEVILLE, A.M**, “ Propriétés des Bétons ”, traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, éd. Paris Eyrolles, (2000).
- **N.J. CRAMMOND**, The thaumasite form of sulfate attack in the UK, Cem. Concr. Compos. doi:10.1016/S0958-9465(03)00106-9. . 25 809–818(2003)
- **R. KHELIFA, M**, “ Effet de l’attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants ”, Thèse de doctorat de l’Université d’Orléans et de l’Université de Constantine, (2009).
- **OMRANE, M., & KENAI, S.** Durabilité d'un BAP à base des agrégats recyclés et depouzzolane naturelle dans des milieux agressifs. Academic Journal of Civil Engineering, 35(1), 611-618 (2017).
- **OMRANE M**, Performance et durabilité d’un béton autoplaçant a base d’agrégats recycles et de pouzzolane naturelle, thèse de doctorat, Université Saâd Dahleb de Blida, (2018).

- **OKAMURA H. and WA K.** « Mix design for self compacting concrete », Concrete - library of JSCE, N° 25, pp 107-120, (1995).
- **OKAMURA.H, OZAWA.K, and OUCHI.M** « Self-compacting concrete. Structural Concrete» March (2000).
- **P. C. AITCIN**, « Sur les propriétés minéralogiques des sables de laitier de haut fourneau de fonte Thomas et leur utilisation dans les mortiers en bétons », Revue des matériaux de construction, pp 185-194, Mai (1968).
- **P. C. AITCIN, C., F. AUTEFAGE., A. CARLES-GIBERGUES., A. VAQUIER.,** « comparative Study of the Cementitious properties of different Fly Ashes », ACI SP-91, pp 91-114, (2004).
- **P. DINAKAR, K.G. BABU, M. SANTHANAM**, Durability properties of high volume fly ash self compacting concretes, Cem. Concr. Compos. 30 880–886. doi:10.1016/j.cemconcomp.(2008).
- **PETERSSON.P, P. BILLBERG, and B. K. VAN.** “A model for self- compacting concrete”. In Proceedings of International RILEM Conference on Production methods and workability of concrete.RILEM, (1999).
- **PONS G., PROUST E. and ASSIE S.,** “Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete?” .Proceedings of 3 International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33). Reykjavik, Iceland, pp. 645-645, 17-20 août (2003).
- **PHILIPPE Turcry**, "Retrait et fissuration des bétons autoplaçants- influence de la formulation", thèse doctorat l'école centrale de Nantes, février 2004.
- **PRODUITS DE CIMENT COUILLARD**, « Les superplastifiants», <http://www.betoncouillard.com>, Internet, (2008).
- **PROUGEAU.P et CH MARRY DIPPE, FRANCY.O,** « Les BAP : synthèse des connaissances et campagne expérimentale », CERIB, février (2001).
- **RAPPORT D'ESSAIS PRELIMINAIRES**, «Etude de ciments aux ajouts», Entreprise (2002).
- **SAAD CHAIB , LAKHDAR AZZOUZ , BENCHAA BENABED** «Use of recycled aggregates from different sources in the production of SCC Part I: Mix design and fresh properties» Received: 03. 03. (2022)
- **SABLOCRETE**, projet national de recherche et développement, « Bétons de sable : caractéristiques et pratiques d'utilisation » presse de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris (1994).
- **SAMIMI, K..** Contribution à l'étude de la durabilité des BAP dans les milieux agressifs : effets des pouzzolanes naturelles, INSA Rennes, French. (2016)
- **SAFIUDDIN, M., WEST, J.S., AND SOUDKI, K.A,** “ Durability performance of self-compacting concrete ”, Journal of Applied Sciences Research; 4(12): 1834–40. (2008)
- **SAKATA K.,** “Durability of self-compacting concrete and low heat high performance concrete”, CONSEC 98, International Conference 2, pp.2057- 2064, Tronso, GB,(1998).

- **SEDRAN.T**, Les bétons autonivelants (BAN) synthèse bibliographique, Bulletin de liaison LCPC, mars (1995).
- **SEDRAN.T**. « Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants ». Thèse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, (1999).
- **SHI C., WU Y., SHAO Y. and RIEFLER M.**, “Comparison of two design approaches for self-consolidating concrete”, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, ACBM center, pp. 349-354, 12-13 November (2002).
- **SONEBI M.**, "Factorial design modelling of mix proportion parameters of underwater composite cement grouts", *Cement and Concrete Research*, 31: 1553-1560. (2001)
- **SIDDIQUE, R.**, “ Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash ”, *Materials and Design*; 32: 1501–7.(2011)
- **STAMATOPOLOS A.C. et C.KOTZIAS P.**, « Concrete without coarse aggregate » *ACI Journal*, N° 68-60, Septembre (1971).
- **SKENDER .ZAKARIA .**, «Durabilité Du à Base de Sable de Concassage». thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique Alger, (2020).
- **SU N., KUNG-CHUNG HSU, HIS-W CHAI**, “A simple mix design method for self-compacting-concrete”, *Cement and concrete Research* 31, 2001, pp.(1799- 1807).
- **TUMIDAJSKI, P.J., CHAN, G.W., AND PHILIPPOSE, K.E.**, “ An effective diffusivity for sulfate transport into concrete ”, *Cement and Concrete Research*; 25(6): 1159–63.(1995)
- **THE EUROPEAN PROJECT GROUP** « The European Guidelines for Self- Compacting Concrete », *The European Guidelines for Self Compacting Concrete*, (May), p. 63. doi: 0 9539733 4 4. (2005)
- **VERBECK, G.J.**, “ Field and laboratory studies of the sulphate resistance of concrete ”, *Proceeding of a Symposium in Honour of Thorbergur Thorvaldson, Candana.*; 113–24. (1967)
- **WEE, T.H., SURYAVANSHI, A.K., WONG, S.F., AND ANISUR RAHMAN, A.K.M.**, “ Sulfate resistance of concrete containing mineral admixtures ”, *ACI Materials Journal*; 97 (5): 536–49. (2000).
- **YAHIA A. AND KHAYAT K. H.** "Experiment design to evaluate interaction of high-range water-reducer and antiwashout admixture in high-performance cement grout", *Cement and Concrete Research*, 31: 749-757. (2001).
- **YAHIA, A., TANIMURA, M. & SHIMOYAMA, Y.** "Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio". *Cement and concrete Research*, 35, 532-539(2005)..
- **Z.GUEMMADI, G.ESCADECUAS, B.TOUMI, H.HOUARI, P.CLASTRES**, « Influence des fillers calcaires sur les performances mécaniques des pâtes de ciment ».1er congrès international sur la technologie et la durabilité du béton, U.S.T.H.B Alger- Algérie, pp 1-8, 24- 26 Mai (2004).

- **ZHU W, P.J. BARTOS**, Microstructure and Properties of Interfacial Transition Zone in SCC, in: 1st International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, RILEM Publications SARL,; pp. 319–327.
doi:10.1617/2912143624.033. (2005)

Annexe I: Fiches techniques des produits

Fiche technique du ciment

MOKAOUEM
Ciment pour béton en milieux agressifs
CPJ-CEM I/B 42,5 –ES NA 443



FICHE TECHNIQUE

Réf : DC/FT MK.A v02

Analyses et caractérisation

Analyses chimiques

Perte au feu (%), (NA 5042):	1,00 – 3,00
Résidus insolubles (%), (NA 5042):	<0,7
Teneur en sulfates SO ₃ (%), (NA 5042):	2,00 – 2,50
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%):	1,9 – 2,2
Teneur en chlorures (%), (NA 5042):	0,012 – 0,025

Composition hypothétique du clinker (Bogue)

Aluminates tricalciques C ₃ A (%):	≤ 5
(C ₄ AF) + 2(C ₃ A)	≤ 20%

Propriétés physiques

Consistance normale de la pâte de ciment (%):	25,5 – 28,50
Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231):	3 000 – 3 650
Chaleur d'hydratation J/g	< 270
Retrait à 28 jours en µm/m	<1 000
Expansion en mm	<5

Temps de prise à 20°C (NA 230)

Début de prise (min)	145 à 185
Fin de prise (min)	230 à 280

Résistance à la compression (NA 234)

02 jours (MPa)	≥ 10
28 jours (MPa)	≥ 42,5

Algerian Cement Company (SPA)

Hamмам Dalaï, M'sila (ACC)
Tel: +213.35.50.78.20
Fax: +213.35.55.70.30

Direction générale

33, Rue des Pins, Hydra, Alger
Tél: +213 (0) 21 48 16 65
Fax: +213 (0) 21 48 16 71

Ciment Blanc Algérien (SPA)

Usine Oggaz (CIBA)
BP 67, 29350, Mascara
Tél. / Fax: +213 (0) 45 84 88 98

 LAFARGE
لافارج

Fiche technique du superplastifiant

NOTICE TECHNIQUE

Version 03

Edition février 2017

2

1

3

5

MEDAFLOW RE 25

Conforme à la norme NA 774 , NA 5102 et NA 5075

**Super plastifiant–Haut réducteur d'eau
Pour travaux de préfabrifications**

Description

Le MEDAFLOW RE 25 est un super plastifiant haut réducteur d'eau. Il est conçu à base de polymères de synthèse et son utilisation dans le béton permet l'obtention d'un rapport E/C très bas.

Le MEDAFLOW RE 25 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

Domaines D'application

- Bétons à hautes performances
- Réduction du temps de décoffrage
- Accélération de la rotation des moules
- Bétons précontraints et architecturaux

Propriétés

Grâce à ses propriétés le MEDAFLOW RE 25 permet :

Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très bas
- Amélioration considérable de la fluidité
- Faciliter la mise en œuvre du béton
- Décoffrage rapide

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait

DESIGNATION	Rc (MPA)	
	1J	28J
Jours	5,4	28,0
Témoin	13,2	39,5
MEDAFLOW RE25 (%)	5,4	28,0

Ciments CPJ = 42.5 = 350Kg/m³
E/C = 0.38

Caractéristiques :

- Aspect..... liquide
- Couleur.....Brun clair
- pH.....7
- Densité.....1,06 + 0,01
- Teneur en chlore.....< 0,1 g/l
- Extrait sec..... 25%

Mode D'emploi :

Il est recommandé d'ajouter le MEDAFLOW RE 25 dans le béton après introduction des ¾ de l'eau de gâchage. Il est conseillé de réaliser des essais dans les conditions de chantier afin de déterminer le dosage adéquat pour les résultats recherchés.

Il peut être aussi ajouté directement dans le camion malaxeur (toupie), puis malaxer à grande vitesse : 1min/m3.

Par temps chaud, le MEDAFLOW SR25 peut être combiné à un retardataire de prise (MEDARETARD GR).

Dosage :

Plage de dosage recommandée :

1.0 à 2.5% du poids de ciment soit 0,93 litres à 2,36 litres.

Pour 100 Kg de ciment.

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

Conditionnement Et Stockage :

Le MEDAFLOW RE 25 est conditionné en bidons de 11 kg , fûts de 240 kg et cubétenaire 1100 kg.

Délai de conservation :

12 mois dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < t < 35°C)

Lors d'une exposition du produit au soleil, sa couleur est sujette à changer de ton.

Précautions D'emploi :

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la fiche de données de sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

NB : Les produits à base de Poly carboxylates d'Ether (PCE), exposé aux UV, changent dans la couleur mais sans aucun incident sur les propriétés et les effets de l'adjuvant.

PV d'essais conforme aux normes, établi par le **CNERIB en 06 FEV 2012**

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



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 - E-mail: granitex@granitex.dz



Annexe II: Formule de calcul la résistance à la traction par flexion

Formule de calcul la résistance à la traction par flexion à quatre points.



Designation: C 78 – 02

Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)¹

This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.61 on Testing for Strength. Current edition approved Jan. 10, 2002. Published March 2002. Originally published as C 78 – 30T. Last previous edition C 78 – 00.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the flexural strength of concrete by the use of a simple beam with third-point loading.

1.2 The values stated in inch-pound units are to be regarded as the standard. The SI equivalent of inch-pound units has been rounded where necessary for practical application.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

C 31 Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field²

C 42 Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete²

C 192 Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory²

C 617 Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens²

C 1077 Practice for Laboratories Testing Concrete and Concrete Aggregates for Use in Construction and Criteria for Laboratory Evaluation²

E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines³

3. Significance and Use

3.1 This test method is used to determine the flexural strength of specimens prepared and cured in accordance with Test Methods C 42 or Practices C 31 or C 192. Results are calculated and reported as the modulus of rupture. The strength determined will vary where there are differences in specimen size, preparation, moisture condition, curing, or where the

beam has been molded or sawed to size.

3.2 The results of this test method may be used to determine compliance with specifications or as a basis for proportioning, mixing and placement operations. It is used in testing concrete for the construction of slabs and pavements (Note 1).

4. Apparatus

4.1 The testing machine shall conform to the requirements of the sections on Basis of Verification, Corrections, and Time Interval Between Verifications of Practices E 4. Hand operated testing machines having pumps that do not provide a continuous loading in one stroke are not permitted. Motorized pumps or hand operated positive displacement pumps having sufficient volume in one continuous stroke to complete a test without requiring replenishment are permitted and shall be capable of applying loads at a uniform rate without shock or interruption.

4.2 *Loading Apparatus*—The third point loading method shall be used in making flexure tests of concrete employing bearing blocks which will ensure that forces applied to the beam will be perpendicular to the face of the specimen and applied without eccentricity. A diagram of an apparatus that accomplishes this purpose is shown in Fig. 1.

4.2.1 All apparatus for making flexure tests of concrete shall be capable of maintaining the specified span length and distances between load-applying blocks and support blocks constant within ± 0.05 in. (± 1.3 mm).

4.2.2 The ratio of the horizontal distance between the point of application of the load and the point of application of the nearest reaction to the depth of the beam shall be 1.0 ± 0.03 .

4.2.3 If an apparatus similar to that illustrated in Fig. 1 is used: the load-applying and support blocks should not be more than $2\frac{1}{2}$ in. (64 mm) high, measured from the center or the axis of pivot, and should extend entirely across or beyond the full width of the specimen. Each case-hardened bearing surface in contact with the specimen shall not depart from a plane by more than 0.002 in. (0.05 mm) and shall be a portion of a cylinder, the axis of which is coincidental with either the axis of the rod or center of the ball, whichever the block is pivoted upon. The angle subtended by the curved surface of each block should be at least 45° (0.79 rad). The load-applying and support blocks shall be maintained in a vertical position and in

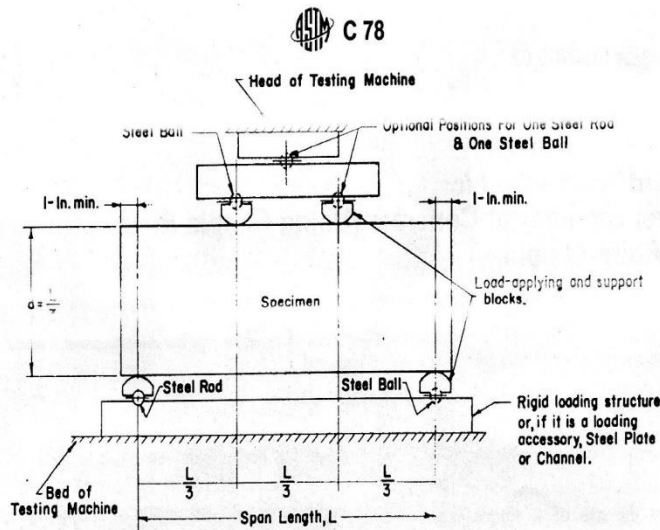
¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.61 on Testing for Strength.

Current edition approved Jan. 10, 2002. Published March 2002. Originally published as C 78 – 30T. Last previous edition C 78 – 00.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

Annexe II: Formule de calcul la résistance à la traction par flexion



NOTE 1—This apparatus may be used inverted. If the testing machine applies force through a spherically seated head, the center pivot may be omitted, provided one load-applying block pivots on a rod and the other on a ball.
NOTE 2—1 in. = 25.4 mm.

FIG. 1 Diagrammatic View of a Suitable Apparatus for Flexure Test of Concrete by Third-Point Loading Method

contact with the rod or ball by means of spring-loaded screws that hold them in contact with the pivot rod or ball. The uppermost bearing plate and center point ball in Fig. 1 may be omitted when a spherically seated bearing block is used, provided one rod and one ball are used as pivots for the upper load-applying blocks.

5. Testing

5.1 The test specimen shall conform to all requirements of Test Method C 42 or Practices C 31 or C 192 applicable to beam and prism specimens and shall have a test span within 2% of being three times its depth as tested. The sides of the specimen shall be at right angles with the top and bottom. All surfaces shall be smooth and free of scars, indentations, holes, or inscribed identification marks.

5.2 The technician performing the flexural strength test should be certified as an ACI Technician—Grade II, or by an equivalent written and performance test program.

NOTE 1—The testing laboratory performing this test method may be evaluated in accordance with Practice C 1077.

6. Procedure

6.1 Flexural tests of moist-cured specimens shall be made as soon as practical after removal from moist storage. Surface drying of the specimen results in a reduction in the measured flexural strength.

6.2 When using molded specimens, turn the test specimen on its side with respect to its position as molded and center it on the support blocks. When using sawed specimens, position the specimen so that the tension face corresponds to the top or bottom of the specimen as cut from the parent material. Center the loading system in relation to the applied force. Bring the load-applying blocks in contact with the surface of the specimen at the third points and apply a load of between 3 and 6% of the estimated ultimate load. Using 0.004 in. (0.10 mm) and 0.015 in. (0.38 mm) leaf-type feeler gages, determine whether

any gap between the specimen and the load-applying or support blocks is greater or less than each of the gages over a length of 1 in. (25 mm) or more. Grind, cap, or use leather shims on the specimen contact surface to eliminate any gap in excess of 0.004 in. (0.10 mm) in width. Leather shims shall be of uniform 1/4 in. (6.4 mm) thickness, 1 to 2 in. (25 to 50 mm) width, and shall extend across the full width of the specimen. Gaps in excess of 0.015 in. (0.38 mm) shall be eliminated only by capping or grinding. Grinding of lateral surfaces should be minimized inasmuch as grinding may change the physical characteristics of the specimens. Capping shall be in accordance with the applicable sections of Practice C 617.

6.3 Load the specimen continuously and without shock. The load shall be applied at a constant rate to the breaking point. Apply the load at a rate that constantly increases the extreme fiber stress between 125 and 175 psi/min (0.86 and 1.21 MPa/min) until rupture occurs. The loading rate is calculated using the following equation:

$$r = Sbd^2/L \quad (1)$$

where:

r = loading rate, lb/min (MN/min),

S = rate of increase in extreme fiber stress, psi/min (MPa/min),

b = average width of the specimen, in. (mm),

d = average depth of the specimen, in. (mm), and

L = span length, in (mm).

7. Measurement of Specimens After Test

7.1 To determine the dimensions of the specimen cross section for use in calculating modulus of rupture, take measurements across one of the fractured faces after testing. For each dimension, take one measurement at each edge and one at the center of the cross section. Use the three measurements for each direction to determine the average width and the average depth. Take all measurements to the nearest 0.05 in. (1 mm). If

Annexe II: Formule de calcul la résistance à la traction par flexion



the fracture occurs at a capped section, include the cap thickness in the measurement.

8. Calculation

8.1 If the fracture initiates in the tension surface within the middle third of the span length, calculate the modulus of rupture as follows:

$$R = PL/bd^2 \quad (2)$$

where:

R = modulus of rupture, psi, or MPa,

P = maximum applied load indicated by the testing machine, lbf, or N,

L = span length, in., or mm,

b = average width of specimen, in., or mm, at the fracture, and

d = average depth of specimen, in., or mm, at the fracture.

NOTE 2—The weight of the beam is not included in the above calculation.

8.2 If the fracture occurs in the tension surface outside of the middle third of the span length by not more than 5 % of the span length, calculate the modulus of rupture as follows:

$$R = 3Pa/bd^2 \quad (3)$$

where:

a = average distance between line of fracture and the nearest support measured on the tension surface of the beam, in., (or mm).

NOTE 3—The weight of the beam is not included in the above calculation.

8.3 If the fracture occurs in the tension surface outside of the middle third of the span length by more than 5 % of the span length, discard the results of the test.

9. Report

9.1 Report the following information:

9.1.1 Identification number,

9.1.2 Average width to the nearest 0.05 in. (1 mm),

9.1.3 Average depth to the nearest 0.05 in. (1 mm),

9.1.4 Span length in inches (or millimeters)

9.1.5 Maximum applied load in pound-force (or newtons),

9.1.6 Modulus of rupture calculated to the nearest 5 psi (0.05 MPa),

9.1.7 Curing history and apparent moisture condition of the specimens at the time of test,

9.1.8 If specimens were capped, ground, or if leather shims were used,

9.1.9 Whether sawed or molded and defects in specimens, and

9.1.10 Age of specimens.

10. Precision and Bias

10.1 *Precision*—The coefficient of variation of test results has been observed to be dependent on the strength level of the beams.⁴ The single operator coefficient of variation has been found to be 5.7 %. Therefore, results of two properly conducted tests by the same operator on beams made from the same batch sample should not differ from each other by more than 16 %. The multilaboratory coefficient of variation has been found to be 7.0 %. Therefore, results of two different laboratories on beams made from the same batch sample should not differ from each other by more than 19 %.

10.2 *Bias*—Since there is no accepted standard for determining bias in this test method, no statement on bias is made.

11. Keywords

11.1 beams; concrete; flexural strength testing; modulus of rupture

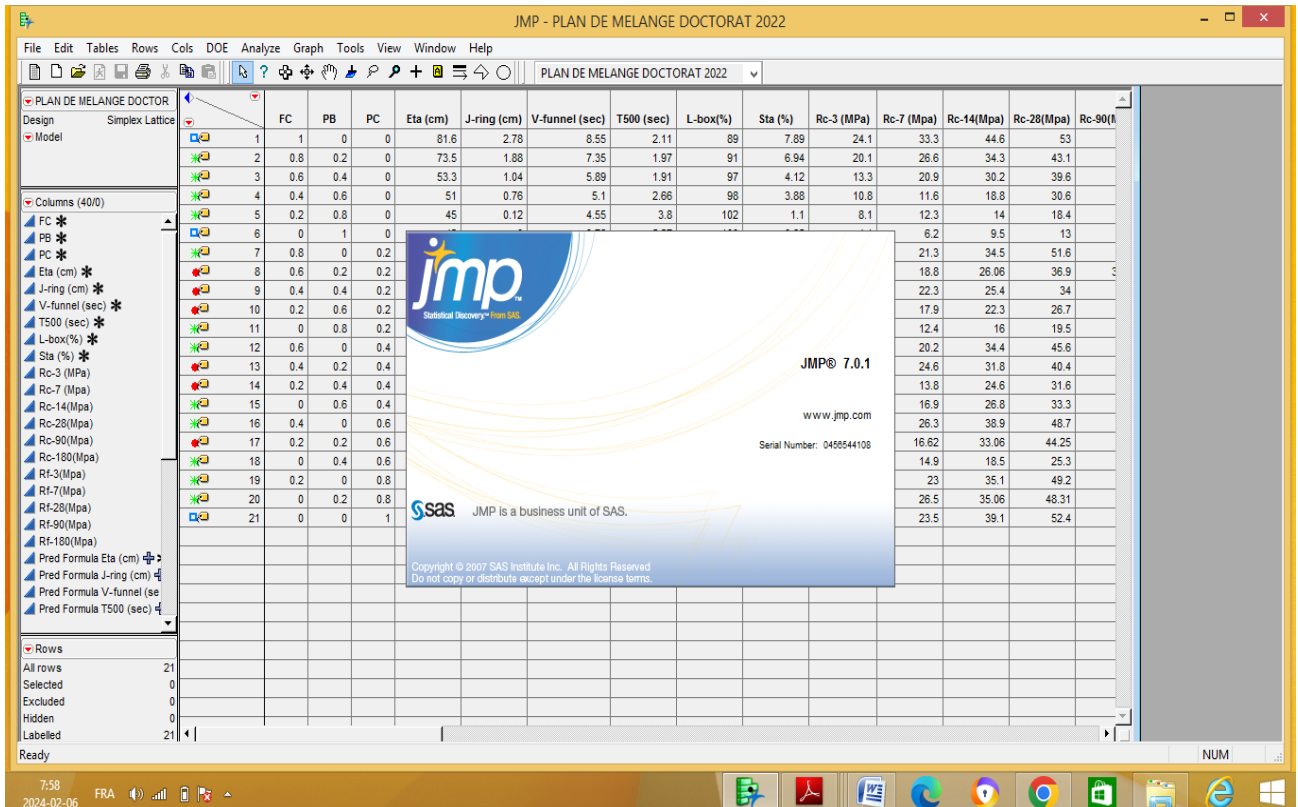
⁴ See "Improved Concrete Quality Control Procedures Using Third Point Loading" by P. M. Carrasquillo and R. L. Carrasquillo, Research Report 119-IF, Project 3-9-87-1119, Center For Transportation Research, The University of Texas at Austin, November 1987, for possible guidance as to the relationship of strength and variability.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).

- Annexe III : Logiciel de modélisation statistique JMP



The screenshot shows the JMP 7.0.1 software interface. The main window displays a data table titled 'PLAN DE MELANGE DOCTORAT 2022'. The table has 21 rows and 15 columns. A splash screen for JMP 7.0.1 is overlaid on the table, displaying the JMP logo, the text 'JMP® 7.0.1', 'www.jmp.com', and 'Serial Number: 0495944108'. The splash screen also includes the SAS logo and the text 'JMP is a business unit of SAS.' and 'Copyright © 2007 SAS Institute Inc. All Rights Reserved. Do not copy or distribute except under the license terms.'

	FC	PB	PC	Eta (cm)	J-ring (cm)	V-funnel (sec)	T500 (sec)	L-box(%)	Sta (%)	Rc-3 (MPa)	Rc-7 (Mpa)	Rc-14(Mpa)	Rc-28(Mpa)	Rc-90(Mpa)
1	1	0	0	81.6	2.78	8.55	2.11	89	7.89	24.1	33.3	44.6	53	
2	0.8	0.2	0	73.5	1.88	7.35	1.97	91	6.94	20.1	26.6	34.3	43.1	
3	0.6	0.4	0	53.3	1.04	5.89	1.91	97	4.12	13.3	20.9	30.2	39.6	
4	0.4	0.6	0	51	0.76	5.1	2.66	98	3.88	10.8	11.6	18.8	30.6	
5	0.2	0.8	0	45	0.12	4.55	3.8	102	1.1	8.1	12.3	14	18.4	
6	0	1	0								6.2	9.5	13	
7	0.8	0	0.2								21.3	34.5	51.6	
8	0.6	0.2	0.2								18.8	26.06	36.9	
9	0.4	0.4	0.2								22.3	25.4	34	
10	0.2	0.6	0.2								17.9	22.3	26.7	
11	0	0.8	0.2								12.4	16	19.5	
12	0.6	0	0.4								20.2	34.4	45.6	
13	0.4	0.2	0.4								24.6	31.8	40.4	
14	0.2	0.4	0.4								13.8	24.6	31.6	
15	0	0.6	0.4								16.9	26.8	33.3	
16	0.4	0	0.6								26.3	38.9	48.7	
17	0.2	0.2	0.6								16.62	33.06	44.25	
18	0	0.4	0.6								14.9	18.5	25.3	
19	0.2	0	0.8								23	35.1	49.2	
20	0	0.2	0.8								26.5	35.06	48.31	
21	0	0	1								23.5	39.1	52.4	

Présentation du logiciel

Le logiciel de plan d'expériences utilisé dans notre étude permet de faire des analyses statistiques des données, d'une manière interactive et facile. Le logiciel *JMP* (prononcé *jump*), de la société SAS Institute, consacre une grande partie aux plans d'expériences. Nous avons utilisé dans nos travaux la version *JMP7.0.1*.

Ce logiciel permet de construire des plans, d'éliminer les difficultés liées aux calculs et de réaliser rapidement des graphiques mettant en valeur les principaux résultats de l'expérimentation. Il nous offre aussi la méthode et les outils pour que nous ne fassions moins d'expériences et que nous en tirions le maximum de renseignements.

Nous allons présenter dans ce qui suit, les différentes phases de construction d'un plan d'expériences. Puis, nous verrons les notions de base qui permettent de bien définir une étude et comment l'on interprète et exploite les résultats des essais.

Phases de construction d'un plan d'expériences

Afin de collecter le maximum de données liées à un problème donné, on commence par se poser des questions. Ces questions ont pour but de délimiter ce problème et viser les travaux à exécuter par la suite. Dans ce but, les réponses de ces questions peuvent être résolues par une simple recherche bibliographique ou un calcul théorique sur le sujet traité. Dans le cas contraire, il est nécessaire de faire des expériences préliminaires pour avoir les réponses voulues.

La construction et l'exécution d'un plan d'expériences reposent sur les principales étapes suivantes :

Préparation de l'étude

La préparation d'une étude pour faire un plan d'expériences passe en premier lieu par la définition de ses objectifs et le choix des réponses permettant de les atteindre. Ensuite, il est nécessaire de décrire les essais sur lesquels va porter l'expérimentation et de rechercher les facteurs, qui pourraient être influents sur ces réponses.

Formulation de la composition du centre

Cette étape est d'une grande importance, car elle permet de délimiter le domaine d'étude en définissant les niveaux hauts et bas des facteurs. Dans notre étude, nous avons utilisé la **méthode théorique "Sablocrete"** [SABLOCRETE, 1994], basée sur l'optimisation de la compacité du squelette granulaire, pour la formulation de la composition du centre.

Dans notre cas, nous avons un béton de sable superplastifié d'un diamètre maximal $D=5\text{mm}$, avec un ciment CEM II/B -CPJ 42,5-ES NA443 (d'une classe vraie : $R_{c-v}=44$ MPa). La quantité totale des fines peut être estimée par la relation suivante:

$$\text{Fines} = 0,5V_0 (0,08/D)^{0,2} \quad (\% \text{ vol.}) \quad (\text{III.B-1})$$

Si nous prenons $V_0=0.75$ (entre 0.7 et 0.8):

On aura un volume total des fines: $\text{Fines}=164 \text{ l/m}^3$

La porosité minimale (eau + vide) est donnée par la formule suivante:

$$(e + v)_{\min} = V_0 (d/D)^{0,2} \quad (\text{III.B-2})$$

L'estimation de la valeur de d dépend de la défloculation du mélange. Avec un mélange défloculé, comme c'est notre cas, d peut être déterminé en fonction de la finesse du ciment (f) et sa densité (ρ) par la relation suivante:

$$d = 60/(f.\rho) \quad (\text{mm}) \quad (\text{III.B-3})$$

Avec $f = 2790 \text{ cm}^2/\text{g}$ et $\rho = 3.1$, nous obtenons:

$$(e + v)_{\min} = 207 \text{ l/m}^3$$

Dans les bétons fins comme les bétons de sable, le volume d'air piégé (v) est relativement plus important à celui dans le cas des bétons traditionnels (il est de l'ordre de 2.5 à 5%).

Puisque nous formulons un BSAP, qui se caractérise par une grande fluidité, nous choisissons une valeur minimale du v (2.5%):

Donc:

$$v=25 \text{ l/m}^3 \text{ et } e=\boxed{182 \text{ l/m}^3}.$$

Il reste maintenant de déterminer le dosage du ciment (C), du filler calcaire (FC) et de sable.

L'indice d'activité du FC est égal à 0.79, donc avec un ciment CPJ, on peut aller jusqu'à un rapport FC/C=0.8.

Dans un travail récent réalisé par Bouziani *et al.* (2011-b) sur l'effet du FC sur la viscosité des BSAP, il a été trouvé qu'un dosage de 250 kg/m³ du FC donne une meilleure viscosité initiale (ce qui traduit une bonne stabilité vis-à-vis du phénomène de ségrégation) et une bonne fluidité aux grandes vitesses de rotation, par rapport aux dosages 150 et 350 kg/m³

Donc nous choisissons un dosage de **250 kg/m³**, ce qui correspond à un rapport FC/C=0.7.

Si nous visons une résistance à la compression à 28 jours (*Rc28*) de 35 MPa, on peut utiliser la formule de Bolomey pour estimer le dosage du ciment nécessaire.

$$R_{c28} = R_{cv} \cdot G \left(\frac{L}{E} - 0.5 \right) \quad (\text{II.B-4})$$

Où, *G* est un coefficient granulaire ($G=0.45$) et *L* est le liant équivalent.

Sachant que le FC utilisé est un filler actif (indice d'activité est supérieur à 0.71), le liant équivalent peut être estimé par la relation suivante:

$$L = C + 0.25 \cdot FC \quad (\text{III.B-5})$$

On trouve donc un dosage du ciment : **C=350 kg/m³**. On

déduit aussi que le rapport **E/L = 0.29**.

Le sable utilisé est un mélange de deux sables : sable alluvionnaire (SA) et sable de dunes (SD). Le choix de la valeur centrale de dosage du SD a été effectué selon la masse volumique apparente du sable mélange (Figure - 1). D'après cette figure, nous constatons qu'une valeur dans l'intervalle de 10 à 30% du SD, conduit à l'obtention d'une masse volumique maximale et par conséquent une compacité maximale du sable mélange. A cet effet, nous avons choisis la valeur centrale du pourcentage du SD à 25%.

Finalement le dosage du sable peut être calculé par la relation suivante: Sable =

$$1000 \cdot [\text{fines}] - e - v \quad (l/m^3) \quad (\text{III.B-6})$$

Soit:

$$\text{Sable} = 564 \quad l/m^3.$$

Avec une masse spécifique de 2.58, le dosage du sable est de **1498 kg/m³**.

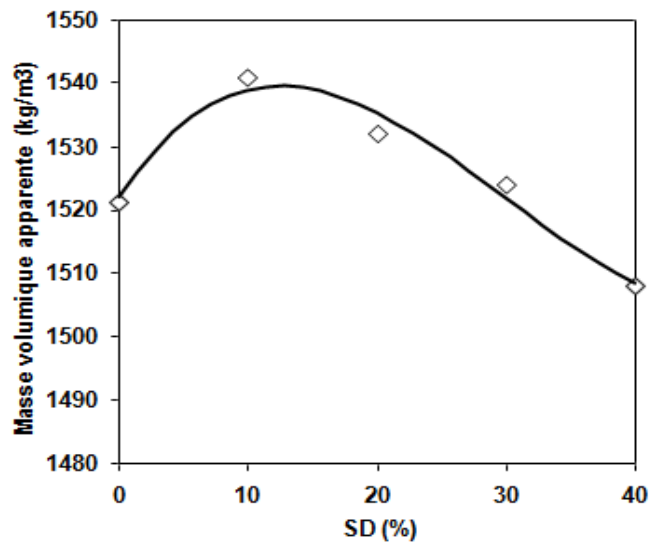


Figure 1. Evolution de la masse volumique apparente du SA en fonction de SD

Le dosage du superplastifiant est choisi en fonction de l'étalement du béton de sable. Une valeur de 1.3% du superplastifiant a été prise comme valeur centrale (**SP=1.3%**), parce qu'elle conduit à l'obtention d'un étalement dans l'intervalle de 26-30 cm, recommandée par Nawal et *al.* (1998).

IV .CARACTERISATION DES BAP A L'ETAT FRAIS

Test	Grandeurs à mesurer	Observations à retirer
Etallement au cône d'Abrams (slump)	<ul style="list-style-type: none"> - Temps T500 : temps pour atteindre une galette de diamètre 500 mm. - Diamètre final de la galette 	- L'aspect de la galette donne une indication sur la ségrégation
Etallement modifié (J-ring)	<ul style="list-style-type: none"> - Diamètre final de la galette en présence de l'anneau. - Profondeurs Ji et Je, mesurées respectivement à l'intérieure et à l'extérieure de l'anneau. 	L'aspect de la galette donne une indication sur la fluidité en présence des obstacles.
Ecoulement à la boîte en L (L-box)	- Taux de remplissage (H2/H1).	- Le blocage à travers les armatures donne une idée sur la ségrégation en présence des obstacles.
Ecoulement à l'entonnoir en forme de V (V-funnel)	- Temps d'écoulement	- Le blocage lors d'écoulement donne une idée sur la ségrégation.
Stabilité	- Indice visuel de stabilité (IVS)	<ul style="list-style-type: none"> - Si IVS=0 (Stabilité satisfaisante) - Si IVS=1 (Stabilité critique) - Si IVS=2 (Mauvaise stabilité due au ressuage) - Si IVS=3 (Mauvaise stabilité due à la ségrégation)

IV.1. Essai de caractérisation des BAP

Afin d'évaluer les propriétés des BAP à l'état frais, plusieurs essais ont été mis au point, tant sur mortier que sur béton. Parmi les plus couramment utilisés, on retrouve l'essai d'étalement au cône d'Abrams (aussi appelé Slump flow), l'essai d'étalement modifié avec anneau (J-Ring), l'essai d'écoulement à la boîte en L (L-Box), l'essai d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel) et l'essai de stabilité [EFNARC, 2002; AFGC, 2008].

IV. 2. Essai d'étalement au cône d'Abrams

L'essai d'étalement au cône d'Abrams (voir figure 1) s'impose comme la méthode la plus répandue pour caractériser la mobilité du béton en milieu confiné, grâce à sa simplicité de mise en œuvre. Contrairement à la mesure traditionnelle de l'affaissement, le diamètre de la galette de béton obtenue après étalement fournit une indication plus pertinente de la fluidité du matériau.

En complément, la vitesse d'étalement du béton, souvent exprimée par le temps nécessaire pour atteindre une galette de 50 cm de diamètre (T500), offre un excellent indice de sa capacité à s'écouler aisément.

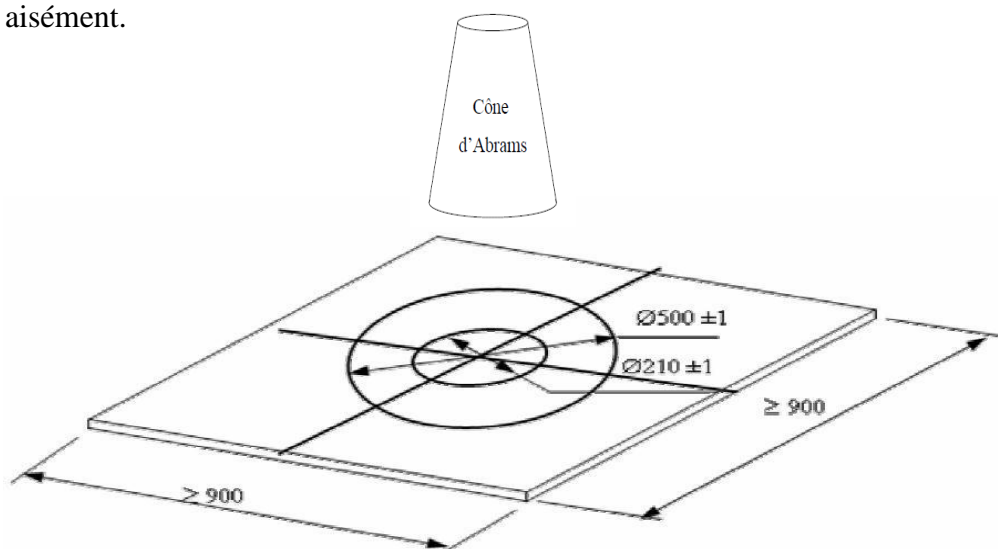


Figure 1. Cône d'Abrams et plaque d'étalement (dimension en mm).

En 2008, l'Association Française de Génie Civil (AFGC) préconise une plage d'étalement admissible comprise entre 600 et 750 mm. Depuis, une classification plus fine des BAP a été établie en fonction de leur domaine d'application spécifique [AFGC, 2000] :

- Classe SF1 : étalement entre 550 et 650 mm, adapté aux structures faiblement ferraillées ou nécessitant une grande fluidité
- Classe SF2 : étalement entre 660 et 750 mm, polyvalent et approprié à la majorité des applications courantes
- Classe SF3 : étalement entre 760 et 850 mm, idéal pour les structures très ferraillées, les formes complexes ou le remplissage de coffrages par le bas

Cette classification affinée permet d'optimiser le choix du BAP en fonction des exigences propres à chaque projet, garantissant ainsi une mise en œuvre efficace et une qualité de résultat optimale.

En conclusion, l'essai d'étalement au cône d'Abrams demeure la référence pour caractériser rapidement et simplement la fluidité et la mobilité des BAP. Associé à d'autres tests complémentaires et encadré par des recommandations précises, il contribue à la maîtrise de ces bétons innovants, ouvrant la voie à leur utilisation dans un nombre croissant d'applications du génie civil.

IV.3. Essai d'étalement modifié (J-Ring)

L'essai d'étalement modifié, également connu sous le nom de J-Ring, partage le même principe de base que l'essai au cône d'Abrams, à la différence près que le béton doit s'écouler au travers d'un réseau de barres d'armatures [AFGC, 2000]. Cet essai vise à évaluer la propension du béton au blocage lors de son écoulement.

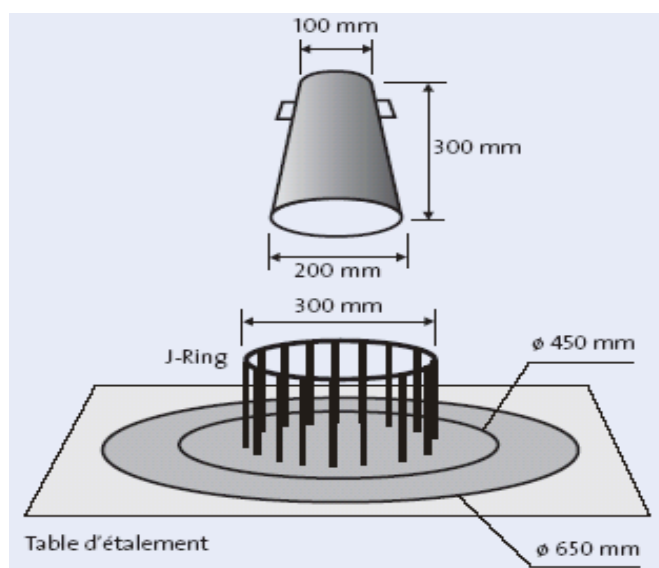


Figure 2. Dispositif de l'essai d'étalement modifié (J-Ring).

Pour réaliser cet essai, le cône est placé au centre d'un anneau métallique de 300 mm de diamètre, sur lequel sont fixées des barres d'armatures espacées régulièrement. Le diamètre de ces barres varie généralement de 16 à 28 mm, avec un espacement correspondant à environ 2,5 fois leur diamètre. Si le béton s'écoule de manière homogène à travers cet obstacle, sans ségrégation apparente des granulats entre l'intérieur et l'extérieur de l'anneau (**voir figure 2**), on peut alors considérer qu'il répond pleinement aux critères de fluidité, de résistance à la ségrégation et de capacité à enrober correctement les armatures.

IV.4 .Essai de la boîte en L

La caractérisation de la mobilité du béton en milieu confiné, qui reflète sa résistance à la ségrégation dynamique, ne fait pas encore l'objet d'un essai de référence unanimement reconnu. Néanmoins, plusieurs méthodes ont été développées dans le but d'évaluer l'aptitude du béton à s'écouler dans des zones restreintes, tout en détectant d'éventuels problèmes de blocage liés à la formation de voûtes granulaires.

Parmi ces essais, on trouve notamment la boîte en L (**voir figure 3**). Afin de mener à bien cet essai, on remplit la partie verticale de la boîte de béton en une seule étape. Après avoir ouvert la trappe, le béton s'écoule à travers un renfort standard, constitué de 3 barres de 12 mm de diamètre espacées de 41 mm, créant ainsi des conditions de renfort dense. Cependant, il est possible d'adapter cet essai à des configurations moins exigeantes en augmentant l'espace libre entre les barres à 59 mm [AFGC, 2000].

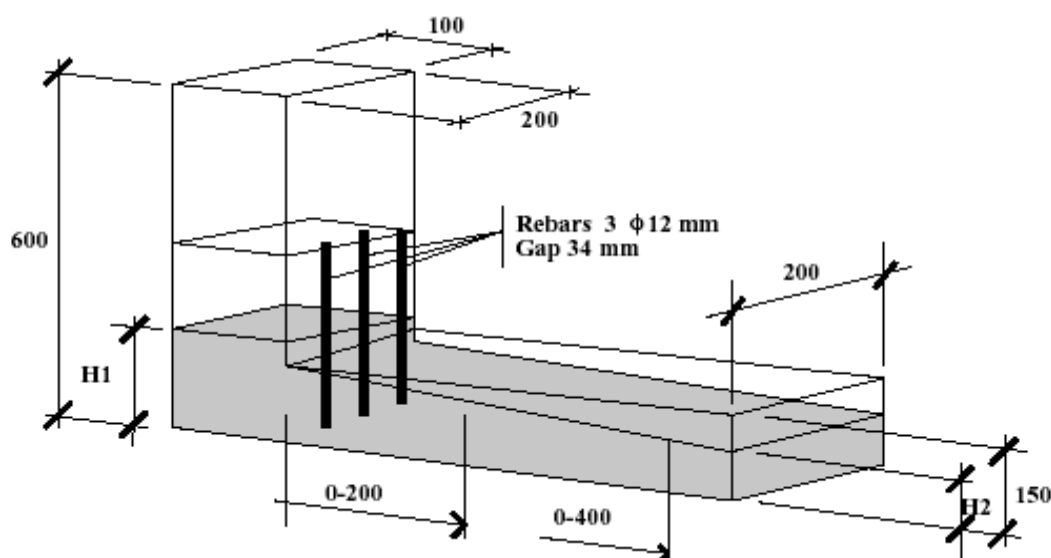


Figure 3. Boîte en L (L-Box).

Selon les recommandations de l'AFGC (2000), un béton autoplaçant est considéré comme acceptable si le taux de remplissage de la boîte en L, défini comme le rapport des hauteurs $H2/H1$ (**voir figure 3**), est supérieur à 0,8. En complément, la mesure des temps d'écoulement peut fournir des indications précieuses sur la viscosité du béton testé.

IV.5 .Essai de l'entonnoir en forme de V (V-funnel)

L'essai de l'entonnoir en V, ou V-funnel, a pour objectif de mesurer le temps d'écoulement du béton dans un espace restreint (**voir figure 4**), tout en évaluant sa stabilité lors de cet écoulement [BRAQUENIER, 2000].

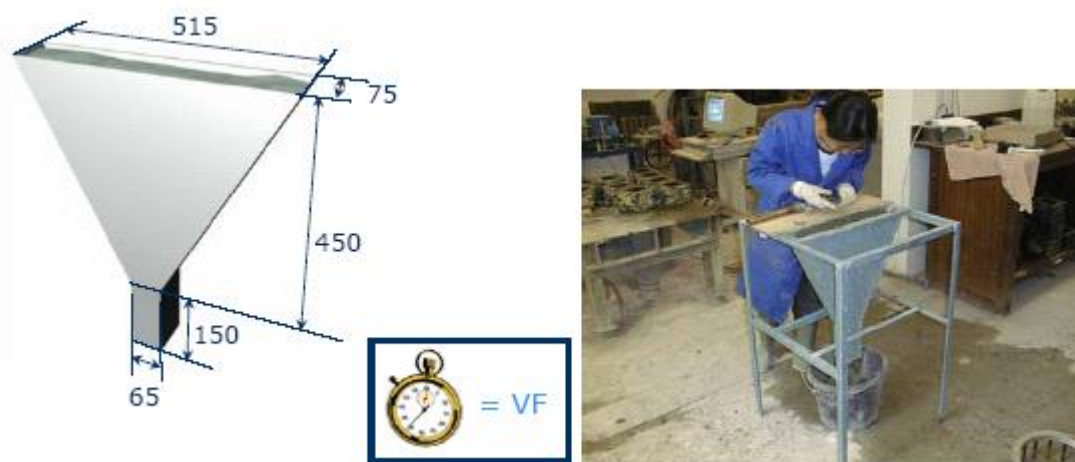


Figure 4. Essai de l'entonnoir en forme de V.

Concrètement, ce dispositif permet de chronométrer le temps nécessaire à un échantillon de 12 litres de béton pour s'écouler à travers une ouverture étroite. Plus ce temps est court, plus la fluidité du béton est élevée.

II.11.2.4. Essai de la stabilité au tamis

L'essai de stabilité au tamis (**voir figure 5**) vise à évaluer le risque de ségrégation des bétons autoplaçants. Pour ce faire, 10 litres de béton fraîchement malaxé sont versés dans un seau, qui est ensuite couvert pour éviter la dessiccation du matériau. Après un temps de repos de 15 minutes, 5 kg de béton sont déversés au centre d'un tamis de 5 mm d'ouverture, depuis une hauteur de chute de 50 cm. Le béton passant à travers le tamis est récupéré dans un récipient.

Le pourcentage de laitance par rapport au poids de l'échantillon ayant traversé le tamis est mesuré deux minutes après le début de l'essai. Ce taux permet d'évaluer les différentes formules de béton autoplaçant en fonction des critères suivants. [AFGC, 2000] :

✚ $0\% \leq P_{\text{laitance}} \leq 15\%$ Stabilité satisfaisante ;

✚ $15\% < P_{\text{laitance}} \leq 30\%$ Stabilité critique ;

✚ $P_{\text{laitance}} > 30\%$ Stabilité très mauvaise.

Il est à noter que lorsque le pourcentage de laitance est compris entre 0 et 5%, la résistance à la ségrégation est jugée "trop importante". Cela signifie que la pâte ou le mortier est trop visqueux pour s'écouler correctement à travers le tamis, ce qui peut nuire à la qualité des parements.

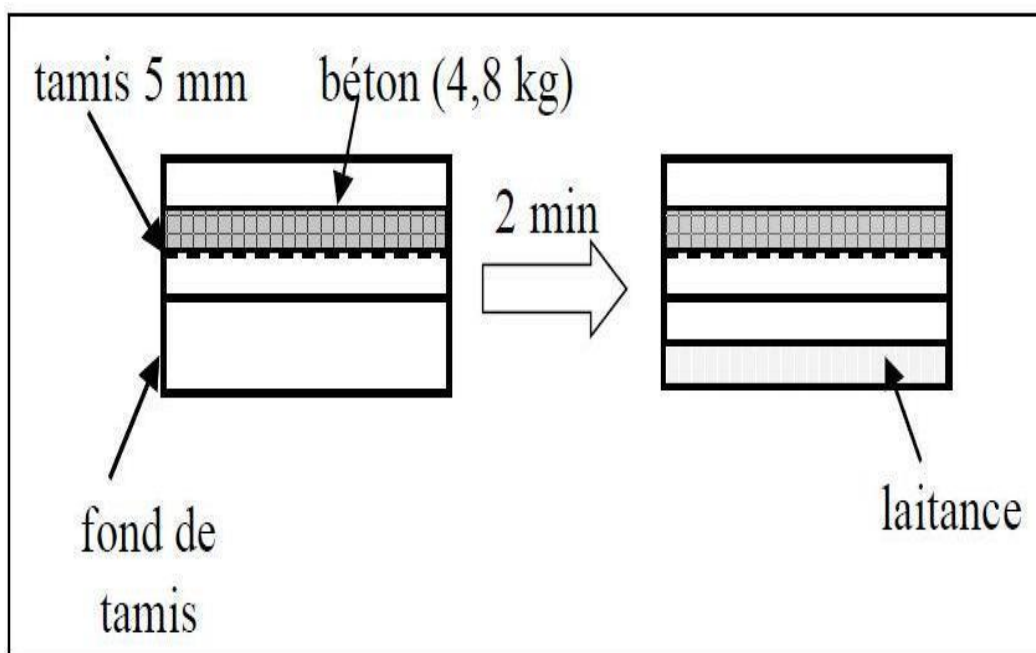


Figure 5. Essai de la stabilité au tamis.

Annexe V: Variations en masse (en g)

ANNEXE (III) : Résultats expérimentaux

Variations en masse (en g)

Solution l'eau pure

Formulations	F TEMOIN	F1	F6	F21	F3	F15	F18	F8	F10	F17
	F - SDM	100 % FC	100 % PB	100 % PC	60 %FC + 40%PB	60 %PB + 40%PC	60 %PC + 40%PB	60%FC+20%PB+20%PC	60%PB+20%FC+20%PC	60%PC+20%FC+20%PB
M0	565.40	573.60	529.30	506.40	537.50	569.20	559.70	462.60	451.00	463.30
<u>3 jours</u>	564.50	570.50	532.50	504.00	538.00	568.70	561.00	467.20	451.00	462.40
<u>15 jours</u>	563.60	568.00	531.40	502.20	537.50	567.00	560.00	466.00	446.00	462.50
<u>28 jours</u>	561.50	564.50	531.00	500.00	536.80	566.20	559.40	465.60	447.80	462.00
<u>45 jours</u>	558.50	549.00	533.50	498.00	537.00	564.00	558.00	466.50	449.50	461.00
<u>60 jours</u>	456.30	559.50	530.00	505.00	537.00	566.50	560.50	466.00	451.50	462.00
<u>75 jours</u>	553.00	550.00	529.00	515.50	439.00	558.00	542.00	453.50	436.00	459.00
<u>90 jours</u>	548.00	551.00	524.00	511.00	536.00	550.00	536.00	449.00	428.00	458.00
<u>180 jours</u>	541.00	547.50	522.00	615.00	536.00	563.00	532.50	448.00	458.00	446.00

Annexe V: Variations en masse (en g)

ANNEXE (III) : Résultats expérimentaux

Variations en masse (en g)

Solution d'H₂SO₄ (essais accélérés)

Formulations	F TEMOIN F - SDM	F1 100 % FC	F6 100 % PB	F21 100 % PC	F3 60 %FC + 40%PB	F15 60 %PB + 40%PC	F18 60 %PC + 40%PB	F8 60%FC+20%PB+20%PC	F10 60%PB+20%FC+20%PC	F17 60%PC+20%FC+20%PB
M0	568.50	556.40	539.50	522.00	554.80	577.40	569.10	470.50	446.40	462.60
<u>3 jours</u>	567.00	556.00	545.50	521.50	553.50	573.50	564.50	470.00	448.00	459.50
<u>15 jours</u>	559.40	555.60	538.00	514.60	552.40	568.50	561.20	464.20	445.00	451.20
<u>28 jours</u>	556.00	554.00	537.20	508.70	552.00	561.20	548.00	456.50	444.00	447.80
<u>45 jours</u>	543.50	553.50	536.50	501.00	550.00	556.00	550.80	443.50	443.50	442.50
<u>60 jours</u>	441.00	551.00	534.50	491.20	548.20	545.60	551.00	439.40	442.30	439.50
<u>75 jours</u>	440.20	550.20	532.60	485.00	544.80	532.40	550.00	436.80	441.00	435.00
<u>90 jours</u>	539.00	548.50	531.50	482.00	541.00	519.00	549.50	431.50	440.50	430.00
<u>180 jours</u>	512.30	534.00	526.00	493.00	537.00	490.00	544.00	427.00	440.00	419.00

Annexe V: Variations en masse (en g)

ANNEXE (III) : Résultats expérimentaux

Variations en masse (en g)

Solution d'HCL (essais accélérés)

Formulations	F TEMOIN F - SDM	F1 100 % FC	F6 100 % PB	F21 100 % PC	F3 60 %FC + 40%PB	F15 60 %PB + 40%PC	F18 60 %PC + 40%PB	F8 60%FC+20%PB+20%PC	F10 60%PB+20%FC+20%PC	F17 60%PC+20%FC+20%PB
M0	552.20	569.40	536.00	571.80	547.00	525.20	468.90	519.80	450.80	455.70
<u>3 jours</u>	550.50	567.50	533.00	569.00	554.50	520.50	467.00	514.50	457.50	554.00
<u>15 jours</u>	551.50	564.00	530.20	567.20	542.50	518.60	461.50	518.60	451.50	553.20
<u>28 jours</u>	551.50	560.50	526.40	564.50	531.60	515.50	458.00	522.20	546.50	552.00
<u>45 jours</u>	551.00	458.40	523.50	561.00	513.50	512.00	454.00	529.00	438.00	452.40
<u>60 jours</u>	549.60	454.60	521.80	550.20	507.80	501.50	455.00	509.80	432.00	548.50
<u>75 jours</u>	548.50	453.00	519.00	537.00	501.50	493.00	456.00	512.00	421.00	442.00
<u>90 jours</u>	535.00	443.60	504.00	577.50	494.00	484.00	447.00	500.00	412.00	437.70
<u>180 jours</u>	532.00	424.50	444.50	551.00	476.50	474.00	455.50	488.90	415.00	423.00