



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

Faculté de la Technologie

Département d'Hydraulique et de Génie Civil

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Présenté par :

- 1. Khennoufa Anouar**
- 2. Laggoun Aimane**

Intitulé :

**Optimisation de l'effet de l'ajout de sable de dune, de
granulats de caoutchouc et de poudre de céramique sur les
propriétés mécaniques du béton de sable auto-plaçant**

Soutenue le : 27/05/2025

Devant le jury composé de :

Dr. Labiod Bachir

Président

Dr. Farik Ali

Examineur

Dr. KAAB Mohamed Zohaïr

Encadreur

Année académique : 2024/2025

م
م
م
م

The image features four large, bold, black Arabic letters arranged vertically. From top to bottom, they are 'م', 'م', 'م', and 'م'. The letters are stylized with thick strokes. To the right of the letters, there are three blue diamond shapes: one between the first and second 'م', one between the second and third 'م', and two overlapping diamonds at the bottom. The entire composition is enclosed in a thin blue rectangular border.

Remerciements

Au terme de ce travail, nous remercions tout d'abord Dieu pour la force et la patience qu'Il nous a accordées afin de le mener à bien.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadrant, le Dr. KAAB Mohamed Zohaïr, pour ses conseils et son aide précieuse.

Ce travail n'aurait pas été possible sans sa contribution très précieuse.

Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à toutes les personnes qui n'ont pas été nommées dans ces lignes, mais qui ont contribué, de près ou de loin, à l'achèvement de ce travail en toute fluidité.

Nous remercions également tous les enseignants du Département de Génie Civil de la Faculté des Sciences et Technologies, Université Hamma Lakhdar d'El Oued, pour les efforts qu'ils ont fournis tout au long de notre parcours universitaire.

Nos remerciements les plus chaleureux vont également aux membres du jury qui nous ont honorés en évaluant notre travail

Dédicace

C'est avec fierté et gratitude que je dédie ce modeste travail :

À la plus grande bénédiction de ma vie, mes chers parents, qui ont toujours été mon soutien indéfectible à chaque étape. Je leur adresse mes plus sincères remerciements et prie Dieu de les préserver et de leur accorder une longue vie.

À mon père :

« Merci, mon père, pour ton soutien constant et tes conseils avisés qui ont éclairé mon chemin tout au long de ma vie. »

À ma mère :

« Merci, ma mère, pour ta patience, tes sacrifices et la chaleur de ton amour qui m'ont toujours donné la force de surmonter les épreuves. »

À mes frères et sœurs bien-aimés, qui ont toujours été une source de soutien et d'encouragement inépuisable.

À tous les membres de ma famille, qui m'ont transmis les valeurs de l'effort et de la persévérance.

À mes chers enseignants, à toutes les étapes de mon parcours scolaire, mes remerciements les plus sincères pour leurs efforts et leur dévouement dans la transmission du savoir.

À mes camarades du département Matériaux - Génie Civil, avec qui j'ai partagé des années de travail, de défi et de solidarité.

À mes fidèles amis, qui ont été à mes côtés dans les moments de joie comme dans les difficultés, et qui ont laissé une empreinte inoubliable dans ma vie.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, en espérant que Dieu nous accorde à tous la réussite et le succès.



Résumé



ملخص

في مواجهة الأزمة البيئية وندرة الموارد الطبيعية، يسعى قطاع البناء إلى الابتكار من خلال دمج النفايات الصناعية والطبيعية في مواد البناء. وفي هذا السياق، يهدف هذا العمل إلى تطبيق التصاميم التجريبية لطريقة تاجوتشي لإيجاد النتائج المثلى ورؤية العلاقات المختلفة بين العوامل المستهدفة (رمل الكتبان بنسبة 7% و14% و21%؛ والركام المطاطي بنسبة 6% و12% و18%؛ ومسحوق السيراميك بنسبة 5% و10% و15%) ودراسة تأثيرها على الخصائص الميكانيكية للخرسانة الرملية ذاتية الدمك.

تركز الدراسة على الاستبدال الجزئي للرمل الرسوبي والأسمنت بهذه العوامل، وتقييم تأثيرها على قابلية التشغيل وقوة الشد والضغط عند 7 و28 يومًا. يمكن أيضًا استغلال هذه النتائج باستخدام طريقة تاجوتشي لتطوير نماذج رياضية تنبؤية تساعد في فهم العوامل الرئيسية التي تتحكم في السلوك الميكانيكي للخرسانة الرملية ذاتية الضغط.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة الرملية ذاتية الدمك، رمال الكتبان، ركام المطاط، مسحوق السيراميك، طريقة تاجوتشي، أمثلية.

Résumé

Face à la crise environnementale et à la raréfaction des ressources naturelles, le secteur de la construction cherche à innover en intégrant des déchets industriels et naturels dans les matériaux de construction. Dans ce contexte, l'objet du travail est d'appliquer les plans d'expériences de la méthode de Taguchi pour trouver les résultats optimaux et pour voir les différentes relations entre les facteurs ciblés (sable de dune à 7%, 14% et 21%; granulats de caoutchouc à 6%, 12% et 18%; et poudre de céramique à 5%, 10% et 15%) et étudier leur effet sur les propriétés mécaniques du béton de sable auto-plaçant (BSAP).

L'étude se concentre sur le remplacement partiel du sable alluvionnaire et du ciment par ces facteurs, en évaluant leur influence sur l'ouvrabilité, la résistance à la traction et à la compression à 7 et 28 jours. Ces résultats peuvent également être exploités à l'aide de la méthode Taguchi pour développer des modèles mathématiques prédictifs qui permettent de comprendre les principaux facteurs contrôlant le comportement mécanique du béton de sable auto-plaçant.

Mots clés : Béton de sable auto-plaçant, Sables de dune, Granulats de caoutchouc, Poudre de céramique, Méthode de Taguchi, Optimisation.

Abstract

Faced with the environmental crisis and the scarcity of natural resources, the construction sector is seeking to innovate by incorporating industrial and natural waste into building materials. In this context, the objective of this study is to apply the Taguchi method's experimental designs to find optimal results and to examine the various relationships between the targeted factors (7%, 14%, and 21% dune sand; 6%, 12%, and 18% rubber aggregates; and 5%, 10%, and 15% ceramic powder) and to study their effect on the mechanical properties of self-compacting sand concrete (SCSC).

The study focuses on the partial replacement of alluvial sand and cement with these factors, evaluating their influence on workability, tensile strength, and compressive strength at 7 and 28 days. These results can also be used to develop predictive mathematical models using the Taguchi method to understand the key factors controlling the mechanical behavior of self-compacting sand concrete.

Keywords: Self-compacting sand concrete, Dune sand, Rubber aggregates, Ceramic powder, Taguchi method, Optimization.



Les Index

Table des matières

Le Titre	N°
<i>Résumé</i>	
<i>Table des matières</i>	I - V
<i>Liste de Figures</i>	VI - VIII
<i>Liste de Tableau</i>	IX-X
<i>Liste des abréviations et des symboles</i>	XI - XII
<i>Introduction Generale</i>	XIII - XIV
Chapitre I. Synthèse bibliographique	01
<i>I.1 Introduction</i>	02
<i>I.2 Types de déchets et leurs usages en construction du</i>	03
<i>I.2.1 Classification des déchets, leur composition chimique et leur rôle dans les applications du génie civil</i>	03
<i>I.2.1.1 Les déchets</i>	03
<i>I.2.1.2 La composition chimique des déchets</i>	03
<i>I.2.1.3 Applications des Déchets Recyclés dans le Génie Civil Durable</i>	03
<i>I.2.1.4. Types de gestion des déchets</i>	04
<i>I.2.1.5. Objectif et Processus du Recyclage des Déchets</i>	07
<i>I.2.1.6. Les Techniques Modernes de Recyclage des Déchets</i>	07
<i>I.2.2. Bienfaits du recyclage</i>	08
<i>I.3. Caoutchouc et déchets caoutchouc</i>	09
<i>I.3.1. Caoutchouc</i>	09
<i>I.3.1.1. Définition</i>	09
<i>I.3.1.2. Historique</i>	10
<i>I.3.1.3. Types de caoutchoucs</i>	11
<i>I.3.1.4. Les étapes de fabrication du caoutchouc</i>	14
<i>I.3.1.5. Déchets caoutchouc en chiffres</i>	15
<i>I.4. CERAMIQUE ET POUDRE DE CERAMIQUE</i>	15
<i>I.4.1. Céramique</i>	15
<i>I.4.1.1. Définition</i>	15
<i>I.4.1.2. Historique</i>	16

<i>I.4.1.3. Composition de céramiques</i>	17
<i>I.4.1.4. Les différentes étapes de fabrication en céramique</i>	17
<i>I.4.1.5. Poudre de céramique PC</i>	18
<i>I.5. Béton de sable auto-plaçant (BSAP)</i>	19
<i>I.5.1. Béton de sable (BS)</i>	19
<i>I.5.1.1. Historique</i>	19
<i>I.5.1.2. Définition</i>	20
<i>I.5.1.3. Le composant du béton de sable</i>	20
<i>I.5.1.4. Propriétés essentielles du béton de sable</i>	23
<i>I.5.1.5. Applications du béton de sable</i>	26
<i>I.5.1.6. Méthodes de formulation du béton de sable</i>	27
<i>I.5.2. Béton auto-plaçant (BAP)</i>	28
<i>I.5.2.1. Historique</i>	28
<i>I.5.2.2. Définition</i>	28
<i>I.5.2.3. Les principaux constituants des BAP</i>	29
<i>I.5.2.4. Les propriétés du béton auto-plaçant (BAP)</i>	32
<i>I.5.2.5. Caractérisations des BAP à l'état frais</i>	35
<i>I.5.2.6. Fabrication des BAP</i>	37
<i>I.5.2.7. Méthode de formulation</i>	37
<i>I.5.2.8. Les avantages des bétons auto-plaçants</i>	40
<i>I.6. Présentation de la méthode de Taguchi</i>	40
<i>I.6.1. La méthode de Taguchi</i>	40
<i>I.6.2. But de la méthode de Taguchi</i>	41
<i>I.6.3. Optimisation par la méthode de Taguchi</i>	41
<i>I.6.4. Étapes de mise en œuvre de la méthode de Taguchi</i>	41
Chapitre II. Matériaux et procédures expérimentales	43
<i>II.1. Introduction</i>	44
<i>II.2. Matériaux utilisés</i>	44
<i>II.2.1. Sable</i>	44
<i>II.2.2. Granulites de caoutchouc (GC)</i>	50
<i>II.2.3. Poudre céramique</i>	51
<i>II.2.4. Ciment</i>	52

II.2.5. Eau de gâchage	54
II.2.6. Adjuvant (Superplastifiants SP)	54
II.3. Formulation	55
II.3.1. Formulations du béton de sable avec SD, GC et PC	55
II.3.2. Applications la méthode de Taguchi	55
II.3.3. Compositions de béton de sable	56
II.3.4. Procédure expérimentale	56
II.3.4.1. Fabrication du béton de sable	56
II.4. Les essais réalisés	59
II.4.1. Essais réalisés à l'état frais	59
II.4.1.1. L'étalement mini Cône	59
II.4.1.2. Ecoulement à l'entonnoir en V-FUNNEL	60
II.4.1.3. Détermination de la masse volumique	60
II.4.2. Essais réalisés à l'état durci	61
II.4.2.1. Essais de la masse Volumique	61
II.4.2.2. Essai de traction par flexion	61
II.4.2.3. Essai de compression	62
Chapitre III. Analyse des résultats expérimentaux par l'application de la méthode de Taguchi	64
III.1. Introduction	65
III.2. Facteurs	65
III.3. Niveaux des facteurs	65
III.4. Choix de la matrice de Taguchi pour notre étude	65
III.5. Les résultats des essais à l'état frais	66
III.5.1. Etalement au mini-cône	66
III.5.1.1. Détermination du résultat optimal pour chaque facteur	67
III.5.1.2. Détermination des coefficients du modèle	67
III.5.1.3. Interprétation des résultats	68
III.5.2. Essai d'écoulement au mini-entonnoir en V (V-Funnel)	68
III.5.2.1. Détermination du résultat optimal pour chaque facteur d'essai d'écoulement au mini-entonnoir en V	69
III.5.2.2. Détermination des coefficients du modèle (V-Funnel)	69
III.5.2.3. Interprétation des résultats	70

<i>III.5.3. La masse volumique à l'état frais du BSAP</i>	70
<i>III.5.3.1. Détermination du résultat optimal pour chaque facteur d'essai de la masse volumique à l'état frais Les résultats des essais à l'état durci</i>	71
<i>III.5.3.2. Détermination des coefficients du modèle (masse volumique à l'état frais)</i>	71
<i>III.5.3.3. Interprétation des résultats</i>	72
<i>III.6. Les résultats des essais à l'état durci</i>	73
<i>III.6.1. Résistance mécanique à la flexion à 07 jours</i>	73
<i>III.6.1.1. Détermination du résultat optimal pour chaque facteur (Rt7)</i>	73
<i>III.6.1.2. Détermination des coefficients du modèle (Rt7)</i>	74
<i>III.6.1.3. Interprétation des résultats (Rt7)</i>	74
<i>III.6.2. Résistance mécanique à la compression à 07 jours</i>	75
<i>III.6.2.1. Détermination du résultat optimal pour chaque facteur (Rc7)</i>	76
<i>III.6.2.2. Détermination des coefficients du modèle (Rc7)</i>	76
<i>III.6.2.3. Interprétation des résultats (Rc7)</i>	77
<i>III.6.3. Résistance mécanique à la flexion à 28 jours</i>	77
<i>III.6.3.1. Détermination du résultat optimal pour chaque facteur (Rt28)</i>	78
<i>III.6.3.2. Détermination des coefficients du modèle (Rt28)</i>	78
<i>III.6.3.3. Interprétation des résultats (Rt28)</i>	79
<i>III.6.4. Résistance mécanique à la compression à 28 jours</i>	79
<i>III.6.4.1. Détermination du résultat optimal pour chaque facteur (Rc28)</i>	80
<i>III.6.4.2. Détermination des coefficients du modèle (Rc28)</i>	80
<i>III.6.4.3. Interprétation des résultats (Rc28)</i>	81
<i>III.6.5. La masse volumique à l'état durci</i>	81
<i>III.6.5.1. Détermination du résultat optimal pour chaque facteur (la masse volumique à l'état durci)</i>	82
<i>III.6.5.2. Détermination des coefficients du modèle (la masse volumique à l'état durci)</i>	82
<i>III.6.5.3. Interprétation des résultats (la masse volumique à l'état durci)</i>	
Conclusion Générale	84-86
Références	87-90
Annexes	91-95

Liste de Figures

Figures	N°
Chapitre I. Synthèse bibliographique	01
<i>Figure I.1. Recyclage</i>	05
<i>Figure I.2. Décharge</i>	06
<i>Figure I.3. Le caoutchouc</i>	10
<i>Figure I.4. Le latex</i>	10
<i>Figure I.5. Les étapes de fabrication de céramique</i>	18
<i>Figure I. 6. Le pont Chernavsky</i>	19
<i>Figure I.7. Aspect général du sable alluvionnaire d'Oued M'zi de Laghouat</i>	22
<i>Figure I.8. Morphologie de la barkhane</i>	23
<i>Figure I.9. Influence du module de finesse du sable sur la maniabilité d'un BS</i>	24
<i>Figure I.10. Influence de la nature du sable sur la maniabilité (avec fines d'addition calcaire)</i>	24
<i>Figure I.11. Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance</i>	25
<i>Figure I.12. Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance</i>	25
<i>Figure I.13. Le béton de sable dans la Préfabrication</i>	26
<i>Figure I.14. Voirie en béton de sable</i>	27
<i>Figure I.15. Différence de mise en place entre le BAP et le BO</i>	28
<i>Figure I.16. Constituants de béton ordinaire (BO) et d'un BAP</i>	29
<i>Figure I.17. Pâte de ciment non adjuvantée</i>	31
<i>Figure I.18. Pâte de ciment additionnée d'un superplastifiant</i>	32
<i>Figure I.19. Essai d'étalement</i>	36
<i>Figure I.20. Essais des Entonnoirs (V-Funnel)</i>	37
Chapitre II. Matériaux et procédures expérimentales	43
<i>Figure II.1 sable de dune (SD)</i>	44
<i>Figure II.2 sable alluvionnaire (SA)</i>	44

<i>Figure II.3 Masse volumique absolue</i>	45
<i>Figure II.4. Masse volumique apparente</i>	46
<i>Figure II.5. Graphique montrant l'analyse granulaire des granulés de sable et de caoutchouc</i>	47
<i>Figure II.6. Étapes de calcul de l'équivalent en sable</i>	49
<i>Figure II.7. Granulates de caoutchouc (GC)</i>	50
<i>Figure II.8. Poudre céramique PC (<0.08)</i>	51
<i>Figure II.9. Ciment utilisé</i>	52
<i>Figure II.10. Le Superplastifiant TEMPO-12</i>	54
<i>Figure II.11. Granulates de caoutchouc (01), Sable de dune (SD) (02), Sable alluvionnaire (SA) (03)</i>	57
<i>Figure II.12. Ciment (01), Poudre de céramique (02), Eau de gâchage (03), Superplastifiant (04)</i>	57
<i>Figure II.13. Séquence de mélange pour béton de sable auto-plaçant</i>	58
<i>Figure II.14. Matériaux utilisés secs.</i>	58
<i>Figure II.15. Mélanger le mélange de béton avec un mélangeur à peinture</i>	59
<i>Figure II.16. Moule des éprouvettes utilisés</i>	59
<i>Figure II.17. Essai d'étalement au mini cône</i>	60
<i>Figure II.18. Test de l'entonnoir en V pour le béton de sable auto-plaçant.</i>	60
<i>Figure II.19. Détermination de la masse volumique</i>	61
<i>Figure II.20. Séchage des échantillons</i>	61
<i>Figure II.21. Essai de traction par flexion</i>	62
<i>Figure II.22. Essai de compression</i>	63
Chapitre III. Analyse des résultats expérimentaux par l'application de la méthode de Taguchi	64
<i>Figure III.1. Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios) des essais d'étalement au mini-cône</i>	67
<i>Figure III.2. Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios) des essais d'écoulement au mini-entonnoir en V</i>	69
<i>Figure III.3. Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios) d'essai de la masse volumique à l'état frais.</i>	71

<i>Figure III.4. Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios) d'essai de la résistance mécanique à la traction par flexion à 07 jours.</i>	73
<i>Figure III.5. Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios) d'essai de la résistance mécanique à la compression à 07 jours.</i>	76
<i>Figure III.6. Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios) d'essai de la résistance mécanique à la traction par flexion à 28 jours</i>	78
<i>Figure III.7. Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios) d'essai de la résistance mécanique à la compression à 28 jours.</i>	80
<i>Figure III.8. Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios) d'essai de la masse volumique à l'état durci à 28 jours.</i>	81

Liste de Tableau

Figures	N°
Chapitre I. Synthèse bibliographique	01
Tableau I.1 Composition de céramiques [28]	17
Tableau I.2 Tableau récapitulatif de poudre céramique PC [31]	18
Tableau I.3 Essai d'étalement (slump flow) [44]	35
Tableau I.4 Classification des BAP selon la norme NFP 12350-9 [44]	36
Chapitre II. Matériaux et procédures expérimentales	43
Tableau II.1 : Préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les bétons	49
Tableau II.2: Caractéristiques physiques du sable	50
Tableau II.3 : Caractéristiques physiques du Granulats de caoutchouc (0/4mm)	51
Tableau II.4 : Les propriétés physiques de la poudre de céramique	52
Tableau II.5 : Analyses chimiques	53
Tableau II.6 : Composition minéralogique	53
Tableau II.7: Propriétés physiques	53
Tableau II.8 : Résistance à la compression	53
Tableau II.9 : Quelques caractéristiques de TEMPO-12	54
Tableau II.10: La matrice des effets selon la méthode de Taguchi L9(3 ³)	55
Tableau II.11: Compositions des mélanges à base de liant binaire (en masse pour 1m ³)	56
Chapitre III. Analyse des résultats expérimentaux par l'application de la méthode de Taguchi	64
Tableau III.1. Les facteurs et les niveaux ciblés	65
Tableau III.2. La matrice expérimentale des effets selon la méthode Taguchi	66
Tableau III.3. Résultats des essais d'étalement du BSAP au mini-cône	66
Tableau III.4. Résultats des temps d'écoulement dans l'entonnoir du BSAP	68
Tableau III.5. Résultats des essais de la masse volumique à l'état frais du BSAP	70
Tableau III.6. Résultats des essais de la résistance mécanique à la traction par flexion à 07 jours	73
Tableau III.7. Résultats des essais de la résistance mécanique à la compression à 07	75

jours.

Tableau III.8. Résultats des essais de la résistance mécanique à la traction par flexion à 28 jours.

77

Tableau III.9. Résultats des essais de la résistance mécanique à la compression à 28 jours

79

Tableau III.10 : Résultats des essais de la masse volumique à l'état durci.

81

Liste des abréviations et des symboles

Symbole	Définition
<i>BAP</i>	<i>Béton auto-plaçant</i>
<i>SD</i>	<i>Sable de dunes</i>
<i>SA</i>	<i>Sable alluvionnaire</i>
<i>BSAP</i>	<i>Béton de sable auto-plaçant</i>
<i>PC</i>	<i>Poudre de céramique</i>
<i>E/C</i>	<i>Eau/ Ciment</i>
<i>E/L</i>	<i>Eau/liant</i>
<i>GC</i>	<i>Granulats de caoutchouc</i>
<i>SP</i>	<i>Superplastifiant</i>
<i>LCPC</i>	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
<i>SF</i>	<i>Slump flow</i>
<i>REF</i>	<i>Reference</i>
<i>BO</i>	<i>Béton ordinaire</i>
<i>BS</i>	<i>Béton de sable</i>
<i>BHP</i>	<i>Béton de Hautes Performances</i>
<i>PZ</i>	<i>Pouzzolane</i>
<i>VF</i>	<i>V-Funnel</i>
<i>Mf</i>	<i>Module de la finesse</i>

<i>ES</i>	<i>Equivalent de sable</i>
<i>ESV</i>	<i>équivalent de sable visuel</i>
<i>ESP</i>	<i>équivalent de sable au piston</i>
<i>MV</i>	<i>Masse volumique</i>
<i>SN ratios</i>	<i>Signal to Noise Ratios</i>
<i>SCC</i>	<i>Self-compacting concrete</i>
<i>RC</i>	<i>Résistance mécanique à la compression</i>
<i>RT</i>	<i>Résistance mécanique à la flexion</i>
<i>G/S</i>	<i>Gravier/Sable</i>
<i>Sp/C</i>	<i>Superplastifiant/Ciment</i>



Introduction

Generale

Introduction Générale

Face à la raréfaction croissante des ressources naturelles et aux exigences environnementales imposées par les principes du développement durable, le domaine du génie civil est aujourd'hui confronté à la nécessité de repenser les matériaux de construction classiques. Cette situation pousse les chercheurs à explorer des alternatives locales et durables, visant à réduire l'impact écologique tout en maintenant les performances mécaniques requises des structures modernes.

Le béton de sable auto-plaçant (BSAP), en tant que variante innovante du béton autoplaçant, se distingue par son excellente ouvrabilité sans recours à la vibration. Toutefois, l'absence de gros granulats dans sa formulation peut affecter négativement certaines de ses propriétés, notamment la résistance à la compression et la stabilité dimensionnelle. Pour pallier ces limites, l'intégration de matériaux alternatifs tels que le sable de dune, les granulats de caoutchouc recyclés et la poudre de céramique offre des perspectives prometteuses, tant du point de vue technique qu'environnemental.

Dans ce contexte, et devant les besoins croissants en matériaux de construction, il devient pertinent d'étudier toutes les possibilités de valorisation de ressources locales comme le sable de dune, ainsi que la réutilisation de déchets industriels tels que les pneus usés et la poudre de céramique dans le domaine du génie civil. Ces ajouts pourraient permettre non-seulement de préserver les ressources naturelles mais aussi d'améliorer certaines caractéristiques mécaniques du béton.

L'objectif principal de ce travail est d'utiliser les plans d'expériences basés sur la méthode de Taguchi afin d'identifier les combinaisons optimales de pourcentages d'ajout (sable de dune, granulats de caoutchouc, poudre de céramique) permettant d'améliorer les propriétés mécaniques du béton de sable. Cette méthode statistique permet d'analyser de manière efficace les relations entre plusieurs facteurs influents, tout en réduisant significativement le nombre d'expériences nécessaires.

La méthode de Taguchi, fondée sur le concept de "design robuste", se distingue par sa capacité à déterminer les facteurs les plus influents sur la qualité et la performance du matériau, avec un minimum de variabilité. Elle permet ainsi de maîtriser la régularité des résultats dans des conditions de production réelles, tout en minimisant les ressources expérimentales mobilisées.

Ce travail s'inscrit donc dans une démarche scientifique rigoureuse, à la croisée entre l'expérimentation concrète et l'analyse statistique avancée, visant à développer des formulations innovantes, performantes et respectueuses de l'environnement pour un béton de sable auto-plaçant optimiser.

Dans ce cadre, le premier chapitre présente une synthèse bibliographique des matériaux étudiés ainsi que des différentes approches de valorisation des déchets dans le domaine du génie civil. Le deuxième chapitre est consacré à la description des matériaux utilisés, à la méthodologie expérimentale et aux procédures d'essais. Enfin, le troisième chapitre expose et analyse les résultats expérimentaux obtenus à l'aide de la méthode de Taguchi afin d'identifier les



Chapitre I

Synthèse Bibliographique



I.1. Introduction

La gestion des déchets est l'une des principales préoccupations environnementales dans le monde. Les activités humaines ainsi que les changements dans les modes de vie et les habitudes de consommation ont entraîné une augmentation des taux de production de déchets solides.

La gestion des déchets vise également à récupérer des ressources à partir de ces déchets. Elle peut concerner des substances solides, liquides, gazeuses ou radioactives, chacune nécessitant des méthodes et des domaines d'expertise spécifiques.

Un système typique de gestion des déchets comprend la collecte, le transport, le prétraitement, le traitement et l'élimination finale des résidus. Divers types de déchets peuvent être collectés séparément.

Des chercheurs ont mentionné que la gestion des déchets fait partie des infrastructures publiques, reposant sur un type particulier d'infrastructure physique permettant de fournir des biens ou des services, et à ce titre, elle ressemble aux secteurs de l'électricité, du gaz naturel et de l'eau. [1]

Les pratiques de gestion des déchets varient entre les pays développés et les pays en développement, entre les zones urbaines et rurales, ainsi qu'entre les producteurs résidentiels et industriels.

La gestion des déchets non dangereux issus des ménages et des institutions dans les zones métropolitaines relève généralement des autorités locales, tandis que la gestion des déchets non dangereux commerciaux et industriels incombe généralement au producteur.

Lorsque le recyclage a commencé à être reconnu comme essentiel, tant pour des raisons environnementales que pour la gestion des ressources, les taux de recyclage des déchets ménagers dans la plupart des pays développés durant les années 1980 étaient très faibles (quelques pourcentages seulement).

Les systèmes modernes de gestion des déchets dans les pays occidentaux ont permis, au cours des vingt dernières années, de reconstruire ces taux de recyclage. [2]

Les systèmes modernes de gestion des déchets, que de nombreuses villes des pays en développement aspirent à mettre en place, se caractérisent tous par des taux élevés de recyclage de matériaux propres et triés à la source.

I.2. Types de déchets et leurs usages en construction du

I.2.1. Classification des déchets, leur composition chimique et leur rôle dans les applications du génie civil

I.2.1.1. Les déchets

Plusieurs définitions sont proposées : un déchet est un produit inutile pour son producteur, bien qu'il contienne souvent les mêmes substances que les produits utiles.

La perception du déchet est subjective : ce qui est inutile pour l'un peut être utile pour l'autre. Cependant, une définition claire est nécessaire pour encadrer sa gestion et assurer la protection de la santé publique et de l'environnement. [3]

I.2.1.2. La composition chimique des déchets

La composition chimique des déchets varie considérablement selon leur origine (ménagère, industrielle, agricole, etc.) et leur type (organique, plastique, métallique, etc.). En général, les déchets solides municipaux contiennent une proportion importante de matière organique (carbone, hydrogène, azote, oxygène), ainsi que des éléments inorganiques tels que le calcium, le sodium, le potassium, le chlore, le phosphore, le soufre, le fer et le silicium.

Les déchets plastiques sont majoritairement composés de polymères hydrocarburés, tandis que les déchets métalliques contiennent des éléments comme le fer, l'aluminium, le cuivre et le zinc.

Les déchets issus des matériaux de construction, tels que le béton ou la céramique, sont riches en silice (SiO_2), alumine (Al_2O_3) et chaux (CaO), éléments présentant un intérêt particulier en génie civil pour la fabrication de nouveaux matériaux. [4]

I.2.1.3. Applications des Déchets Recyclés dans le Génie Civil Durable

L'asphalte Recyclé (RAP) dans la Construction de Routes

L'asphalte recyclé (RAP) est le processus qui consiste à réutiliser l'asphalte retiré des anciennes routes pour la fabrication de nouvelles infrastructures ou la réparation des routes existantes. L'asphalte ancien est broyé et mélangé avec de nouveaux matériaux comme le gravier pour améliorer la qualité et la durabilité de la route. Cette méthode est écologiquement avantageuse, car elle réduit la nécessité d'extraire de nouvelles ressources et améliore la durabilité des infrastructures. [5]

Cendres Volantes dans le Béton

Les cendres volantes, sous-produit de la combustion du charbon dans les centrales électriques, sont utilisées comme substitut partiel du ciment dans le béton. Non seulement cela réduit les coûts, mais cela améliore également les propriétés physiques du béton, comme la résistance à l'usure et la durabilité. L'utilisation de cendres volantes contribue également à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, car elle réduit la production de ciment traditionnel, qui est une source majeure d'émissions de dioxyde de carbone. [6]

Caoutchouc Recyclé dans le Béton

Le caoutchouc recyclé, provenant des pneus usés, est utilisé dans le béton pour améliorer ses propriétés telles que la flexibilité et la résistance. Ce caoutchouc est broyé en petites particules et ajouté aux mélanges de béton, ce qui aide à réduire le bruit et à absorber les vibrations, rendant le béton utilisé pour les routes ou les fondations plus résistant et moins affecté par les variations de température. [7]

Verre Recyclé dans la Construction

Le verre recyclé est utilisé dans la fabrication de béton comme granulats pour améliorer ses propriétés. Le verre recyclé est broyé et transformé en petites particules qui sont ajoutées au béton pour améliorer ses caractéristiques comme la durabilité et la résistance à l'usure. Cette méthode contribue également à la réduction des déchets solides générés par les produits en verre usagés dans les industries domestiques et commerciales. Le verre peut également être un substitut écologique au sable et au gravier traditionnels. [8]

Cendres Volantes et Scories dans le Béton Durable

Les scories, sous-produit de la fonte dans les usines métallurgiques, sont mélangées avec des cendres volantes pour améliorer les propriétés du béton. L'utilisation combinée de cendres volantes et de scories comme substitut partiel du ciment contribue à améliorer la résistance du béton et à réduire les émissions de CO₂. Cette méthode améliore également la résistance du béton à l'usure et à la corrosion, ce qui en fait un choix idéal pour les infrastructures durables. [9]

I.2.1.4. Types de gestion des déchets

Dans sa forme la plus simple, la gestion des déchets consiste à collecter, manipuler, traiter et recycler les déchets (déchets humains et animaux, y compris les déchets industriels).

Parmi les tâches qui composent la gestion des déchets, on retrouve le stockage, le transport, le traitement et l'élimination des débris.

D'autres activités incluent la surveillance, la supervision et la gestion de la production, du traitement, du transport ainsi que du traitement et de l'élimination des déchets : [10]

Recyclage

Le recyclage améliore considérablement la protection de l'environnement. Il s'agit de l'une des méthodes de gestion des déchets qui permet d'éviter l'enfouissement des ordures dans les décharges ou leur déversement dans les cours d'eau, en les transformant en composants utiles.

De nombreuses municipalités et organisations ont facilité le recyclage en rendant obligatoire l'étiquetage indiquant si un objet est recyclable ou non.

Cette méthode d'élimination des déchets profite à la fois à l'écologie et à la santé humaine. Elle génère des revenus importants, crée des milliers d'emplois et permet au gouvernement d'économiser les ressources nécessaires à la gestion des déchets.

Pour gagner de l'argent, il suffit d'apporter les déchets recyclables au centre de recyclage le plus proche. [10]



Figure I.1. Recyclage [10]

Incinération

Cette méthode de gestion des déchets consiste également à brûler les produits résiduels pour les éliminer.

Cette technique d'élimination est également connue sous le nom de traitement thermique. Il est possible d'éliminer une large gamme de déchets en les incinérant, à grande ou à petite échelle.

L'incinération est souvent envisagée par les pays disposant de ressources foncières limitées.

La combustion des déchets peut produire de la vapeur, de l'énergie ou de la chaleur, qui peuvent être utilisées de différentes manières.

Cependant, cette méthode d'élimination présente certains inconvénients, notamment l'aggravation de la pollution de l'air. [10]

Décharge (Enfouissement)

Il s'agit de l'une des méthodes de gestion des déchets les plus répandues aujourd'hui. Elle consiste à collecter, transporter, éliminer et enfouir les déchets sur un terrain spécifique. Les autorités s'efforcent de s'assurer que chaque site d'enfouissement soit conçu de manière à garantir une bonne hygiène et une utilisation efficace du sol.

Cependant, les décharges constituent une source importante de problèmes sanitaires et environnementaux qui préoccupent de nombreuses communautés.

Ainsi, certaines collectivités prévoient d'utiliser des zones désertiques et stériles pour gérer les déchets.

Par exemple, le méthane émis par ces sites est souvent extrêmement dangereux. [10]



Figure I.2. Décharge [10]

- Le Concept des 3R : Réduire, Réutiliser, Recycler
 - Réduire (Réduction à la source) : Consommer de manière responsable, limiter le suremballage, privilégier les produits durables.
 - Réutiliser : Donner une seconde vie aux objets en les réutilisant dans leur fonction initiale ou modifiée.
 - Recycler : Transformer les déchets en nouveaux matériaux utilisables. [11]

I.2.1.5. Objectif et Processus du Recyclage des Déchets

L'objectif principal est de réduire la quantité de déchets envoyés en décharge ou incinérés, mais aussi de préserver les ressources naturelles. Le recyclage peut concerner divers types de matériaux et notamment le papier, le plastique, le verre, et les métaux. Ce processus de valorisation implique plusieurs étapes:

- **Collecte** : Les déchets recyclables sont d'abord collectés auprès des ménages, des entreprises, et des sites industriels.
- **Tri** : Les matériaux sont ensuite triés pour séparer les différents types de matériaux recyclables.
- **Traitement** : Les matériaux triés sont ensuite traités pour éliminer les contaminants et les préparer pour la transformation.
- **Transformation** : Les matériaux traités sont convertis en nouvelles matières premières ou produits.
- **Recyclage** : Les matières premières obtenues sont utilisées pour fabriquer de nouveaux produits.

Le recyclage des déchets permet ainsi de donner une seconde vie à des emballages et à des matériaux qui, autrement, seraient jetés, tout en économisant des ressources naturelles comme l'eau et le pétrole. [12]

I.2.1.6. Les Techniques Modernes de Recyclage des Déchets

Chaque année, des millions de tonnes de déchets sont générées dans le monde, mais grâce à des méthodes de recyclage des déchets efficaces, une partie importante de ces matériaux peut être réintroduite dans le cycle de production. [12]

Recyclage mécanique

Le recyclage mécanique est principalement utilisé pour les plastiques, les métaux et certains types de papier. Il consiste à broyer les matériaux en petits morceaux, puis à les purifier et à les reformer. Cette méthode est couramment utilisée pour les emballages tels que bouteilles en plastique, canettes en aluminium et papiers recyclés. Le recyclage des déchets plastiques permet non seulement de réduire la quantité de déchets envoyés en décharge, mais aussi de diminuer la consommation d'eau et de pétrole. [12]

Recyclage chimique

Le recyclage chimique est une méthode plus avancée qui permet de décomposer les matériaux en leurs composants chimiques de base. Cette méthode est surtout appliquée aux plastiques complexes et aux produits chimiques. Les matériaux décomposés peuvent ensuite être réutilisés pour produire de nouveaux plastiques ou autres produits chimiques. Les filières spécialisées dans ce type de recyclage contribuent à la création de nouvelles matières premières qui pourront être intégrées dans divers produits. [12]

Recyclage biologique

Le recyclage biologique, ou compostage, concerne principalement les déchets organiques comme les restes alimentaires et les déchets de jardin. Ces matériaux sont décomposés par des micro-organismes en compost, un engrais naturel qui peut être utilisé pour enrichir les sols. Les ménages peuvent contribuer à ce processus en mettant en place des systèmes de compostage domestique durable et réduire ainsi la quantité de biodéchets envoyés à la poubelle. [12]

Recyclage par pyrolyse

La pyrolyse est une technique thermique qui décompose les matériaux en l'absence d'oxygène. Cette méthode est souvent utilisée pour les déchets plastiques et les pneus usagés, produisant des huiles, des gaz et des résidus solides qui peuvent être utilisés comme matières premières ou sources d'énergie. Les entreprises spécialisées dans la gestion des déchets explorent de plus en plus cette méthode pour traiter les plastiques non recyclables par les techniques conventionnelles. [12]

I.2.2. Bienfaits du recyclage

Recycler signifie recueillir des matériaux usagés et les transformer en nouveaux produits plutôt que de les jeter. Ce processus est bénéfique pour l'environnement et nos communautés locales pour les raisons suivantes :

- Réduction de la quantité de déchets qui finissent dans les centres d'enfouissement et les usines d'incinération.
- Utilisation d'une quantité beaucoup plus faible d'énergie.
- Réduction des émissions de carbone.
- Diminution de la pollution de l'eau et de l'air.
- Préservation des ressources naturelles précieuses, dont les arbres et l'eau.
- Protection de la faune et des habitats naturels.

- Création d'emplois et soutien de l'économie. [13]

I.3. Caoutchouc et déchets caoutchouc

I.3.1. Caoutchouc

I.3.1.1. Définition

Le latex : est une substance naturelle d'aspect laiteux, généralement extraite de la sève de certains arbres tropicaux, en particulier l'hévéa *brasiliensis*. Cette sève, une émulsion de particules de caoutchouc en suspension dans l'eau, est récoltée par incision de l'écorce de l'arbre, une méthode appelée "saignée". Une fois recueilli, le latex peut être transformé en divers produits souples, élastiques et imperméables.

Outre sa source végétale, le latex peut également être produit de manière synthétique à partir de dérivés pétrochimiques, en particulier du styrène-butadiène ou d'autres polymères synthétiques. Ces variantes artificielles sont utilisées dans de nombreux domaines, notamment la fabrication de gants médicaux, de matelas, de peintures latex, ainsi que dans l'industrie automobile.

Sa grande élasticité, sa capacité à reprendre sa forme initiale après étirement, ainsi que sa résistance à l'eau et à de nombreuses substances chimiques, font du latex un matériau très recherché dans diverses applications industrielles et biomédicales. [14]

Le caoutchouc : est un matériau polymère élastique qui peut être d'origine naturelle ou synthétique. Le caoutchouc naturel est obtenu principalement à partir du latex recueilli sur des arbres comme l'hévéa. Il subit un processus de transformation appelé vulcanisation, introduit par Charles Goodyear, qui améliore sa résistance mécanique, sa durabilité et sa capacité à supporter des températures élevées.

Le caoutchouc synthétique, quant à lui, est fabriqué à partir de produits pétrochimiques tels que le butadiène, le styrène ou l'isoprène. Il a été développé pour pallier les limitations de la production naturelle et répondre aux besoins croissants de l'industrie, notamment durant les périodes de guerre.

Grâce à ses propriétés exceptionnelles comme la résistance à l'usure, la souplesse, l'étanchéité et la résilience, le caoutchouc est omniprésent dans notre quotidien. Il est utilisé dans la fabrication de pneus, de joints d'étanchéité, de semelles de chaussures, de tuyaux, et bien d'autres produits industriels et domestiques. [15]



Figure I.4. Le latex [17]



Figure I.3. Le caoutchouc [16]

I.3.1.2. Historique

A la suite des Grandes Découvertes, durant le XV^{ème} siècle, les Européens découvrent une matière que travaillent les Amérindiens, jusqu'ici inconnue pour l'Europe. Cette matière provient du latex issu de plantes comme l'hévéa et le guayule. Avec ces caoutchoucs, ils confectionnent des balles, des toiles, et même des torches en réalisant du moulage sur argile. Ils rendent ensuite étanches ces objets en caoutchouc en les passant à la fumée.

Cette matière est alors rapportée en Europe, mais est vite abandonnée car elle est trop collante dès qu'elle est exposée au soleil, qu'elle fond lorsque la température est trop élevée et qu'elle devient cassante à trop basse température.

C'est seulement au cours du XVIII^{ème} siècle que deux français redécouvrent le caoutchouc naturel au Pérou, en Equateur et en Guyane. Ils effectuent alors sa première description scientifique. A la suite, de nombreuses possibilités d'utilisation des caoutchoucs sont découvertes.

En 1842, soit près d'un demi-siècle plus tard, Charles Goodyear découvre le procédé de vulcanisation. Cette technique va permettre de stabiliser le caoutchouc pour qu'il résiste aux écarts de température. Elle est d'ailleurs toujours aujourd'hui, à la base de presque toutes les applications industrielles de caoutchouc.

En 1854, Hiram Hutchinson ouvre la première usine de caoutchouc en France à Châlette-sur-Loin. Et c'est en 1888 que le véritable pneu à valve entre dans l'histoire. Son invention et le succès des bicyclettes à cette époque, provoquent le boom de la production des caoutchoucs. [18]

I.3.1.3. Types de caoutchoucs

A. Caoutchouc Naturel (NR) et Caoutchouc Butyle (IIR)

Caoutchouc Naturel (NR)

Le caoutchouc naturel est extrait de la sève de l'arbre *Hevea brasiliensis*. Ce type de caoutchouc est reconnu pour sa grande élasticité et sa capacité exceptionnelle à absorber les chocs, ce qui le rend idéal pour la fabrication de pneus, de pièces automobiles en caoutchouc et de courroies. Il se distingue également par sa bonne résistance à l'usure et à la compression. Cependant, sa résistance à la chaleur, aux huiles et aux produits chimiques est relativement faible par rapport aux caoutchoucs synthétiques.

Applications:

- ✓ Pneus pour voitures et camions.
- ✓ Courroies industrielles.
- ✓ Gants médicaux.
- ✓ Amortisseurs mécaniques. [19]

Caoutchouc Butyle (IIR)

Le caoutchouc butyle est fabriqué à partir d'isobutylène avec un faible pourcentage d'isoprène. Il se caractérise par une très faible perméabilité à l'air et aux gaz, ce qui le rend idéal pour la fabrication de chambres à air, de joints d'étanchéité et d'isolants. Il offre également une bonne résistance aux produits chimiques et aux conditions climatiques, et il est utilisé dans des applications nécessitant une excellente étanchéité aux gaz.

Applications:

- ✓ Chambres à air pour pneus.
- ✓ Bouchons de bouteilles.
- ✓ Isolants pour systèmes CVC.
- ✓ Revêtements pour réservoirs chimiques. [19]

B. Caoutchouc Néoprène (CR) et Caoutchouc Nitrile (NBR)

Caoutchouc Néoprène (CR)

Également connu sous le nom de polychloroprène, le caoutchouc néoprène est largement utilisé en raison de son excellente résistance à l'ozone, aux intempéries, aux huiles et à la chaleur.

Il est couramment utilisé dans la fabrication de vêtements de protection, de joints, de gaines, et de tuyaux flexibles. Il offre un bon équilibre entre élasticité, durabilité à long terme, et stabilité dans des environnements difficiles.

Applications:

- ✓ Combinaisons de plongée.
- ✓ Joints et isolants.
- ✓ Tuyaux de carburant.
- ✓ Tapis isolants. [20]

Caoutchouc Nitrile (NBR)

Le caoutchouc nitrile est l'un des élastomères les plus utilisés pour les applications en contact avec les huiles et les carburants. On le retrouve dans la fabrication de gants industriels, de tuyaux pour essence, et de pièces de moteurs. Il se distingue par sa haute résistance chimique, bien qu'il perde de sa flexibilité à basse température.

Applications:

- ✓ Gants industriels et médicaux.
- ✓ Tuyaux pour essence et huile moteur.
- ✓ Joints toriques.
- ✓ Revêtements de cuves. [20]

C. Caoutchouc EPDM et Caoutchouc SBR

Caoutchouc EPDM (Éthylène-Propylène-Diène Monomère)

Le caoutchouc EPDM est un élastomère synthétique composé d'éthylène, de propylène et d'un monomère diène. Il est particulièrement apprécié pour sa résistance exceptionnelle aux conditions climatiques extrêmes, aux rayons UV et à l'ozone. Il est utilisé dans des applications telles que l'étanchéité des toitures, les membranes imperméables, les joints d'étanchéité des portes et fenêtres. Ce caoutchouc offre également une bonne flexibilité à basse température et une excellente résistance à l'usure et à la chaleur.

Applications:

- ✓ Joints de fenêtres et portes
- ✓ Membranes d'étanchéité
- ✓ Revêtements de toiture

- ✓ Tuyauterie et ventilation. [21]

Caoutchouc SBR (Styrène-Butadiène)

Le caoutchouc SBR est l'un des caoutchoucs synthétiques les plus couramment utilisés dans l'industrie. Grâce à sa bonne résistance à l'abrasion et à son coût de production relativement bas, il est largement utilisé dans la fabrication de pneus automobiles. On le retrouve aussi dans la production de semelles de chaussures, de tapis en caoutchouc et de matériaux isolants. Bien qu'il soit moins élastique que le caoutchouc naturel, il reste performant pour des usages standards et industriels.

Applications:

- ✓ Pneus automobiles.
- ✓ Semelles de chaussures.
- ✓ Tapis en caoutchouc.
- ✓ Matériaux d'isolation phonique et thermique. [21]

D. Caoutchouc Silicone (VMQ) et Caoutchouc Polyuréthane (PU)

Caoutchouc Silicone (Silicone Rubber – VMQ)

Le caoutchouc silicone est reconnu pour sa stabilité exceptionnelle face aux températures extrêmement élevées et basses. Il offre également une résistance remarquable aux rayons ultraviolets (UV), à l'ozone et aux intempéries. En raison de sa pureté chimique et de son absence de toxicité, il est largement utilisé dans des domaines sensibles comme les applications médicales, alimentaires et électroniques. Ce caoutchouc est idéal pour des applications telles que les joints d'étanchéité, les tuyaux, et les moules, grâce à sa flexibilité et sa durabilité.

Applications:

- ✓ Tubes alimentaires et médicaux.
- ✓ Équipements hospitaliers.
- ✓ Joints pour hautes températures.
- ✓ Ustensiles de cuisine résistants à la chaleur. [22]

Caoutchouc Polyuréthane (Polyurethane Rubber – PU)

Le caoutchouc polyuréthane est particulièrement apprécié pour sa résistance accrue à l'usure, aux huiles et à la déchirure. Ce matériau est couramment utilisé dans des applications nécessitant à la fois rigidité et élasticité, telles que les roues de chariots, les joints d'étanchéité, et les

revêtements de surface. Il se distingue par ses excellentes propriétés mécaniques et sa longue durée de vie, ce qui en fait un choix idéal pour les environnements industriels où les conditions sont difficiles.

Applications:

- ✓ Roues de chariots.
- ✓ Moules industriels.
- ✓ Revêtements de sol.
- ✓ Joints et protections. [22]

I.3.1.4. Les étapes de fabrication du caoutchouc

A. pour caoutchouc naturel

- **Récolte du latex** : Le latex est extrait de l'arbre *Hevea brasiliensis* par une incision dans l'écorce, permettant à la sève de s'écouler.
- **Prétraitement** : Pour éviter la coagulation prématurée, de l'ammoniac est ajouté au latex récolté.
- **Coagulation** : Des acides sont ajoutés pour provoquer la coagulation du latex, transformant le liquide en une masse solide.
- **Pressage et séchage** : Le caoutchouc coagulé est pressé pour éliminer l'excès d'eau, puis séché à l'air libre ou par d'autres méthodes.
- **Traitement final** : Le caoutchouc séché est ensuite prêt pour des traitements supplémentaires, tels que la vulcanisation, pour améliorer ses propriétés. [23]

B. pour caoutchouc Synthétique

- **Sélection du monomère** : Les monomères couramment utilisés sont le butadiène et le styrène. Le choix dépend du type de caoutchouc voulu (SBR, NBR, etc.).
- **Polymérisation** : Les monomères sont polymérisés dans des réacteurs chimiques à l'aide de chaleur et de catalyseurs. Cela produit un polymère brut.
- **Coagulation et lavage** : Le polymère est coagulé à l'aide d'un acide comme l'acide acétique, lavé puis congelé pour éliminer les résidus chimiques.
- **Séchage** : Le caoutchouc est séché dans des fours ou tunnels d'air chaud jusqu'à obtention d'un matériau prêt à l'usage.

- **Mélange** : Le caoutchouc séché est mélangé à des additifs (soufre, huiles, colorants...) selon les propriétés désirées.
- **Moulage et vulcanisation** : Le mélange est moulé puis vulcanisé (chauffé avec du soufre) pour améliorer sa résistance, son élasticité et sa durabilité. [24]

I.3.1.5. Déchets caoutchouc en chiffres

- Production mondiale de pneus usagés : Chaque année, environ 7 millions de tonnes de pneus usagés sont générées dans le monde.
- Utilisation en ingénierie civile : Aux États-Unis, environ 16 % des pneus usagés sont utilisés dans des applications d'ingénierie civile, telles que la construction de routes, les remblais, et les murs de soutènement.
- Répartition des déchets de pneus usagés :

Voici une estimation de la répartition des pneus usagés aux États-Unis :

- Utilisation en énergie (combustion) : 52 %.
- Applications en ingénierie civile : 16 %.
- Produits en caoutchouc broyé : 12 %.
- Mise en décharge : 14 %.[25]

I.4. Céramique et poudre de céramique

I.4.1. Céramique

I.4.1.1. Définition

Les céramiques désignent un ensemble de matériaux inorganiques, non métalliques, qui se caractérisent par une fabrication nécessitant des températures élevées. Selon le dictionnaire Larousse, les céramiques sont définies comme « l'art de fabriquer des poteries, fondé sur la capacité des argiles à se transformer en une pâte plastique, malléable, qui devient dure, solide et inaltérable après cuisson ». De manière plus technique, la société ASTM (American Society for Testing and Materials) définit une céramique comme « un objet ayant un corps vitrifié ou non, avec une structure cristalline ou partiellement cristalline, ou encore de verre, constitué principalement de substances inorganiques et non métalliques. Ce matériau est formé soit par une masse en fusion qui se solidifie en refroidissant, soit par un processus de maturation, obtenu par l'action de la chaleur ».

Les céramiques comprennent généralement des oxydes métalliques ou des métaux oxydés, mais pas exclusivement. Elles présentent souvent une structure cristalline, parfois combinée avec

une phase amorphe. Lorsque la majeure partie du matériau est amorphe, le terme "vitrocéramique" est utilisé, tandis que si la totalité du matériau est amorphe, il s'agit du verre. Ces matériaux sont essentiels dans de nombreuses applications, allant de la construction aux technologies de pointe, en raison de leurs propriétés uniques, telles que la résistance à la chaleur, la dureté, et la stabilité chimique. [26]

I.4.1.2. Historique

- Les premières traces d'objets en céramique remontent environ de 45 000 à 10 000 ans avant JC, au Paléolithique supérieur. À cette époque, les civilisations ont commencé à façonner la terre cuite pour créer des ustensiles de cuisine, des figurines de "déesses" et de "Vénus" à caractère culturel et des œuvres d'art. Ces premières pièces étaient simplement séchées au soleil. Le site de Dolni Vestonice, situé en Moldavie, occupe une place spéciale dans l'histoire de la céramique en tant que premier site ayant révélé des sculptures en terre cuite.

- La cuisson de la poterie s'est généralisée vers 10 000 av. J.-C. Cette innovation a permis de créer des objets plus durables et résistants. Les civilisations anciennes, telles que les Sumériens, les Égyptiens et les Grecs, ont perfectionné l'art de la poterie cuite, produisant des jarres, des amphores, des statues et des céramiques peintes qui étaient à la fois fonctionnelles et esthétiquement magnifiques.

- Un peu plus tard, en Chine, au cœur de la dynastie Han, la porcelaine a vu le jour entre 100 et 200 après JC, dans la province du Zhejiang. La porcelaine était alors réputée pour sa finesse, sa translucidité et sa résistance. Au fil des siècles, la porcelaine chinoise est devenue une marchandise précieuse échangée le long de la Route de la Soie, atteignant l'Europe et influençant grandement l'art céramique occidental.

- La période de la Renaissance en Europe, vers 1480, a marqué un renouveau artistique pour la céramique. Les ateliers de Limoges, en France, ont produit des émaux éblouissants sur des pièces de porcelaine et de faïence. Ces émaux étaient appréciés pour leur raffinement artistique et leur utilisation dans la décoration de bijoux et d'objets de luxe.

- Le XXe siècle a vu la céramique évoluer vers des formes plus modernes et abstraites. Des artistes tels que Pablo Picasso ont exploré la céramique comme une nouvelle expression de leur créativité, créant des œuvres uniques.

Aujourd'hui, un renouveau créatif

De nos jours, la céramique continue d'évoluer et d'inspirer de nouvelles générations d'artistes et d'artisans. Les céramistes contemporains explorent une variété de styles, de techniques et de

formes, repoussant les limites de l'art de la terre cuite. Tout cela continue d'inspirer les nouvelles générations, prouvant ainsi que cette aventure dans le temps est loin d'être terminée. [27]

I.4.1.3. Composition de céramiques

Le tableau 3 présente les compositions caractéristiques des différents types de céramiques:

Tableau I. 1 Composition de céramiques [28]

Composition	Argile (%)	Kaolin (%)	Feldspath (%)	Craie (%)	Talc (%)	Quartz (%)
Grès	80					20
Faïence	50		20	20	20	30
Porcelaine dure	3	42	25	5		25
Vitréous	50		25			25

I.4.1.4. Les différentes étapes de fabrication en céramique

Fabrication de céramique La fabrication des produits céramiques s'effectue dans différents types de fours, à partir d'un vaste éventail de matières premières et dans des formes, dimensions et couleurs extrêmement nombreuses. Le procédé global de fabrication d'un produit céramique est toutefois relativement uniforme, en dehors du fait que la fabrication des carreaux pour sols et murs, de la vaisselle et des objets décoratifs (céramiques domestiques), des appareils sanitaires et des céramiques techniques passe fréquemment par un procédé de cuisson en plusieurs étapes. [29]

Les étapes de fabrication de céramique

- Stockage et transport des matières premières.
- Préparation des matières premières.
- Façonnage/formage des produits.
- Séchage des produits céramiques.
- Traitement de surface et décoration des produits céramiques.
- Cuisson.
- Traitements ultérieurs (finition des produits).
- Ajout de matériaux auxiliaires.

- Triage, conditionnement et stockage. [29]

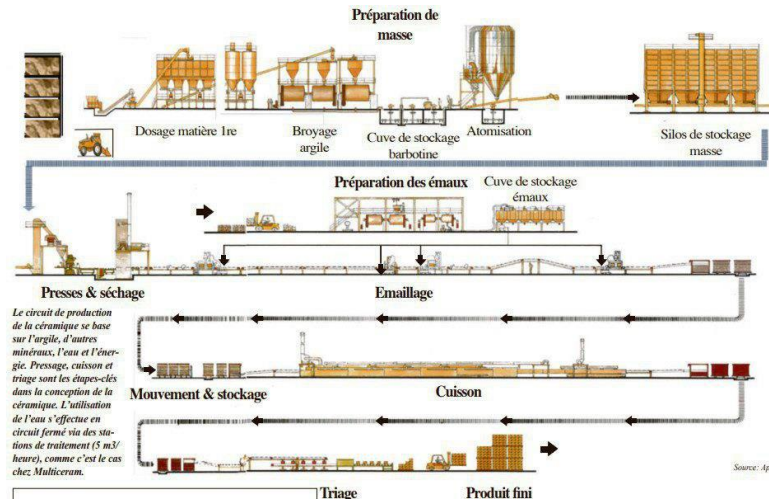


Figure I.5. Les étapes de fabrication de céramique [30]

I.4.1.5. Poudre de céramique PC

La poudre céramique est principalement composée de matériaux inorganiques non métalliques transformés en fines particules. Ces matériaux comprennent souvent de l'argile, de la silice, de l'alumine et d'autres minéraux, qui sont sélectionnés en fonction des propriétés souhaitées du produit céramique final. La composition peut varier considérablement en fonction de l'application, par exemple dans la poterie, les céramiques avancées ou les utilisations industrielles. Les matières premières sont généralement extraites, purifiées, puis broyées en poudres fines avant d'être façonnées et cuites à haute température pour former le produit céramique final. [31]

Tableau I.2 Tableau récapitulatif de poudre céramique PC [31]

Aspect	Détails
Composants Primaires	Argile, silice (SiO ₂), alumine (Al ₂ O ₃) et autres minéraux (par exemple, feldspath, zircone).
Étapes de traitement	Exploitation minière, purification, broyage, mélange, mise en forme et cuisson.
Types de céramiques	Traditionnelle, avancée, industrielle.
Applications	Construction, électronique, biomédical, aérospatial
	Taille des particules, additifs et composition adaptée à des besoins

Personnalisation	spécifiques.
-------------------------	--------------

I.5. Béton de sable auto-plaçant (BSAP)

I.5.1. Béton de sable (BS)

I.5.1.1. Historique

Le béton de sable est une technique connue de très longtemps en Union Soviétique. Il semble qu'elle soit parvenue dans ce pays par la Belgique et l'Allemagne. Notons les ouvrages suivants :

- le port de Kaliningrad en Prusse-Orientale réalisé au début du siècle ; le pont Chernavskif coulé sur place à Varone (500 km environ de Moscou) et édifié avant la révolution bolchevique. En 1918, le Comte Nicolas de Rochefort publie (en russe) à Petrograd (actuelle Leningrad), aux éditions Rickler, un ouvrage de génie civil où il décrit la technique du béton de sable. Quelques décennies plus tard, le béton de sable apparaît en France grâce au professeur académicien Rebinder. Il avait lu l'ouvrage du Comte de Rochefort et repris ces idées dans ses propres recherches. En 1971, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (L.C.P.C) est contacté pour la première fois pour des études sur cette technique. Vers 1920, la technique du béton de sable reste en "veilleuse" autant en URSS qu'en Europe Occidentale. Elle sera de nouveau d'actualité au cours de la deuxième guerre mondiale à la guerre éclair de juin 1941 suit une guerre de position (1942-1943} : l'armée allemande conforte ses positions et construit des pistes d'aviation, dont certaines en béton de sable. A la fin du conflit, les soviétiques examinent ces pistes : certaines sont très dégradées, d'autres le sont moins ; ils en tirent des conclusions et les mettent à profit en construisant des aérodromes en béton de sable : en particulier l'aérodrome militaire de Pevek (en Sibérie) et celui d'Arkhangelsk. On peut dire que la pratique de béton de sable s'est étendue à tous les domaines du génie civil et est en progression constante depuis la fin de la guerre. Il est difficile d'évaluer la production actuelle, mais elle dépasse vraisemblablement le million de mètres cubes par an dans les emplois identifiés des différents secteurs pris en compte dans le projet national français. [32]



Figure I.6. *Le pont Chernavsky [32]*

I.5.1.2. Définition

Le béton de sable est un béton formé par mélange de sable, de ciment, d'addition(s) et d'eau. Des ajouts (adjuvants, fibres ...) peuvent également être incorporés au mélange. Il est donc principalement constitué de sable. Son dosage en ciment est du même ordre que celui des bétons classiques soit entre 250 à 400 kg/m³. Cette similitude lui vaut, entre autres, le terme de "béton". Il se distingue du mortier par, notamment, son dosage en ciment, celui d'un mortier étant de 400 à 700 kg/m³, et par son domaine d'utilisation. [32]

I.5.1.3. Le composant du béton de sable

A. Le ciment

Le comblement des vides importants contenus dans le sable et l'obtention d'une compacité maximale nécessitent une forte proportion d'éléments fins : ciment et fillers d'ajout assurent ce rôle dans le béton de sable, et le rendement ainsi utilisable en pleine masse en limitant les inconvénients liés aux forts dosages en ciment : coût élevé, retrait, fissuration, etc. ... Le ciment est nécessaire à l'obtention d'une résistance suffisante pour l'usage envisagée alors que les fines (fillers) sont nécessaires à l'obtention d'une bonne compacité. [32]

B. L'addition

Par définition, le béton de sable contient une (ou plusieurs) additions. Il s'agit essentiellement de fillers- calcaires, siliceux, de laitier - de cendres volantes, mais aussi d'autres fines (argile calcinée, ultrafines...). Les additions proviennent directement du sable (cas des sables fillerisés) et/ou d'apport. Elles comblent en partie les vides du sable : elles augmentent donc sa compacité naturelle et créent une granulométrie aussi continue que possible. Mais elles participent également à l'amélioration de l'enchevêtrement cristallin et de la cohésion du mélange. Elles permettent ainsi

d'augmenter les performances sans augmenter le dosage en ciment évitant ainsi les risques de retrait et d'excès de rigidité provoqués par un surdosage en ciment. Leur efficacité est, en ce domaine. Fonction de leur nature minéralogique, de leur finesse et de leurs activités hydrauliques ou pouzzolaniques. Les associations de recherche visent à optimiser le rapport efficacité/coût. Or, en l'absence d'un marché constitué et structuré, on ne peut aujourd'hui se prononcer clairement sur les coûts futurs de cet "intrant". [32]

C. L'eau

Les bétons de sable nécessitent une qualité d'eau de mouillage importante en raison de la proportion élevée en éléments fins qui génèrent une surface spécifique importante : le rapport eau/ciment (E/C) est supérieur à celui des bétons de gravillons et pour le réduire on a recours à des adjuvants plastifiants et on sélectionne les fillers nécessitant la plus faible quantité d'eau de mouillage. Le rapport E/C est généralement compris entre 0.6 et 0.7. [32]

D. Les ajouts

Les adjuvants : il s'agit de produits chimiques utilisés à faible dose, de la même façon et dans le même but que pour les bétons classiques à savoir l'amélioration des performances. Dans la technique du béton de sable sont principalement utilisés des plastifiants permettant de réduire le dosage en eau et, de ce fait, d'augmenter la résistance et la compacité et de diminuer les risques de retrait excessif ; les adjuvants améliorent aussi la maniabilité c'est-à-dire la facilité de mise en œuvre du béton. [32]

Les fibres : (acier, fonte amorphe ...) : elles peuvent constituer un renfort de structure, en particulier au jeune âge du béton. Leur rôle dépend de leur nature, leur dosage et leur longueur. Elles confortent la tenue du matériau. Elles influent notamment sur la vitesse et l'importance du retrait libre. - les gravillons : il est possible de "raidir" (augmenter le module d'élasticité) la formulation d'un béton de sable en y ajoutant des gravillons. Dans un rapport gravillon/sable restant inférieur à 1 : il s'agit alors d'un béton de sable chargé. Le rapport gravillons/sable est situé entre 1.4 et 1.7 pour le béton classique. L'ajout de gravillons permet d'augmenter la compacité et à même dosage en ciment la nature de sable se trouve enrichie en ciment. Les ajouts peuvent être employés soit seuls soit en association ; la synergie ainsi créée permet d'augmenter

davantage les performances. Cependant, il faudra prendre en compte l'aspect économique et la plus-value que représentent ces ajouts excessifs. L'aspect économique n'est cependant pas limité au coût matière : dans la mesure où le béton de sable peut répondre à un problème mal résolu par le béton classique, un coût équivalent et même une plus-value sont envisageables. En d'autres termes, pour des utilisations plus adaptables au béton de sable. Même si le coût est plus élevé que celui du béton classique. Le béton de sable est préféré. [32]

E. Le sable: Les sables utilisables sont ceux conformes aux spécifications des bétons classiques, mais des sables considérés non performants peuvent également être employés. D'ailleurs, des programmes nationaux de recherche (SABLOCRETE en France, par exemple) s'efforcent de promouvoir l'utilisation de tous les types de sables. Les sables sont de quatre origines : - les sables alluvionnaires propres : ils s'épuiseront à terme ; - les sables marins : leur exploitation est peu développée ; - les sables géologiques anciens : généralement mal gradués et pollués, ils sont appelés à remplacer les sables alluvionnaires fluviaux. Le sable de dunes (sable éolien) pourrait être classé dans cette catégorie de sable ; - les sables de concassage et de broyage de roches massives : les fines de calcaire par exemple ; [32]

Définition Sable alluvionnaire

Dans la région Sud de l'Algérie, notamment dans les wilayas de Ghardaïa, Laghouat et Ouargla, le sable utilisé dans la majorité des constructions provient des dépôts alluviaux. Il s'agit d'un sable siliceux d'origine naturelle, principalement issu du lit de l'oued M'zi, qui traverse la ville de Laghouat. Ce sable est particulièrement riche en dioxyde de silicium (SiO_2), communément connu sous le nom de quartz. Les grains qui le composent se caractérisent par leur forme arrondie et leur surface polie, ce qui témoigne de leur transport prolongé par l'eau.

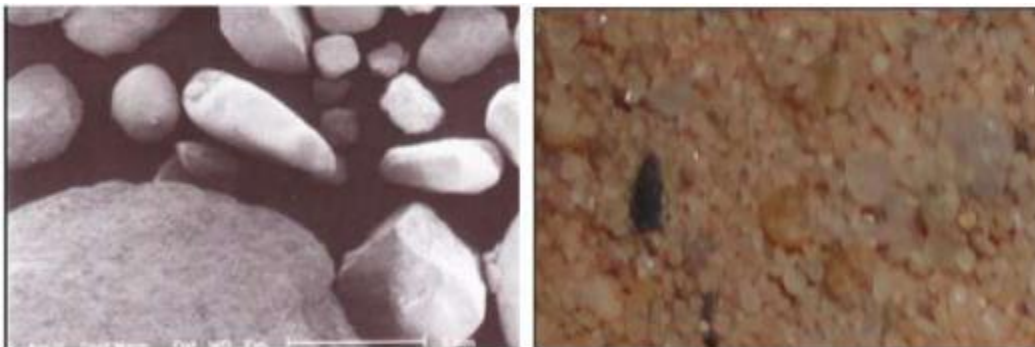


Figure I. 7. Aspect général du sable alluvionnaire d'Oued M'zi de Laghouat. [33]

Définition sable de dune

Le sable éolien, ou sable des dunes, provient d'un processus naturel combinant l'érosion des roches, leur sédimentation, puis leur transport, principalement par le vent et parfois par les cours d'eau. Ce type de sable est essentiellement composé de grains de quartz, ce qui lui confère une granulométrie fine et homogène. [34]

En raison de sa présence abondante dans les régions désertiques comme le Sahara, de son coût d'extraction relativement faible et de sa pureté apparente, le sable des dunes apparaît comme une alternative prometteuse face à la raréfaction des ressources naturelles telles que le sable alluvionnaire (SA). [35]

Les formations dunaires les plus communes sont appelées "barkhanes", terme d'origine arabe, et se présentent sous forme de croissants. Ces dunes se forment dans des environnements spécifiques, où le sable est peu abondant et où le vent souffle constamment dans une direction unique. Elles avancent lentement sur un sol stable. Leur structure typique comprend une crête séparant deux versants : l'un doux, incliné entre 5° et 20° , et l'autre abrupt, avec une pente de 32° à 35° , prolongée par deux extrémités pointant dans le sens du vent (voir figure I.8.). [35]

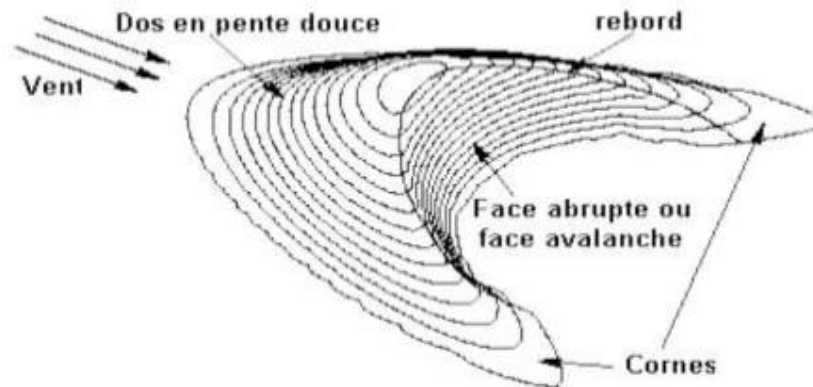


Figure I.8. Morphologie de la barkhane. [36]

I.5.1.4. Propriétés essentielles du béton de sable

A. Granulométrie et maniabilité :

Le béton de sable se distingue des bétons conventionnels par un besoin plus élevé en eau de gâchage, ce qui se manifeste par un rapport eau/ciment (E/C) dépassant fréquemment 0,5. En pratique, ce rapport se situe souvent entre 0,6 et 0,8, alors qu'il varie entre 0,5 et 0,6 dans le cas des bétons classiques offrant une maniabilité équivalente. Cette exigence en eau s'explique par la surface spécifique plus élevée du mélange, nécessitant une humidification plus importante.

La distribution granulométrique du sable a un effet direct sur la quantité d'eau requise : une teneur plus élevée en gros grains améliore la maniabilité. Cela est confirmé par la figure (I.9), qui illustre la corrélation entre le module de finesse du sable et la facilité de mise en œuvre du béton. L'augmentation du rapport E/C entraîne généralement une amélioration de la maniabilité. Toutefois, pour un rapport E/C donné, la nature des fines ajoutées joue également un rôle déterminant dans le comportement du mélange.

La granulométrie étroite du béton de sable, conjuguée à une bonne homogénéité et à une maniabilité satisfaisante, confère à ce matériau une meilleure résistance à la ségrégation comparativement aux bétons traditionnels. [37]

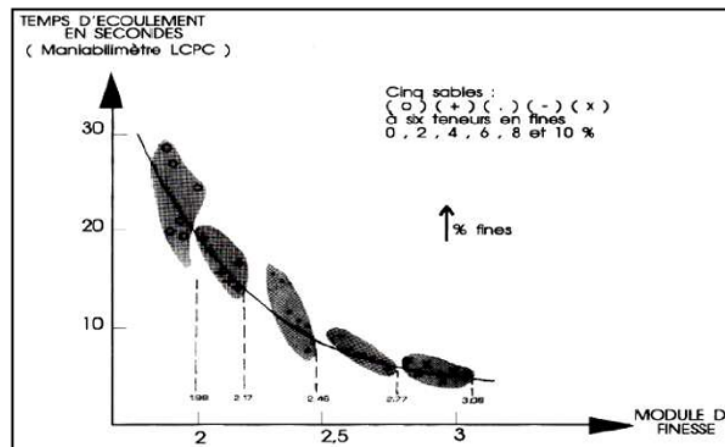


Figure I.9. Influence du module de finesse du sable sur la maniabilité d'un BS. [37]

Il apparaît que la corrélation entre la quantité de fines incorporées et la maniabilité du béton est fortement influencée par la nature du sable utilisé ainsi que par sa courbe granulométrique. Les courbes présentées dans la figure (I.10) illustrent la manière dont les fines calcaires interagissent différemment selon le type de sable.

Lorsqu'elles sont ajoutées à un sable de dune, une augmentation du dosage en fines jusqu'à 200 kg/m³ provoque une diminution notable de la maniabilité. En revanche, cette baisse n'est pas observée avec un sable alluvionnaire de fraction 0/4, plus dense et plus compact, qui semble mieux tolérer l'incorporation de fines sans compromettre la fluidité du mélange.

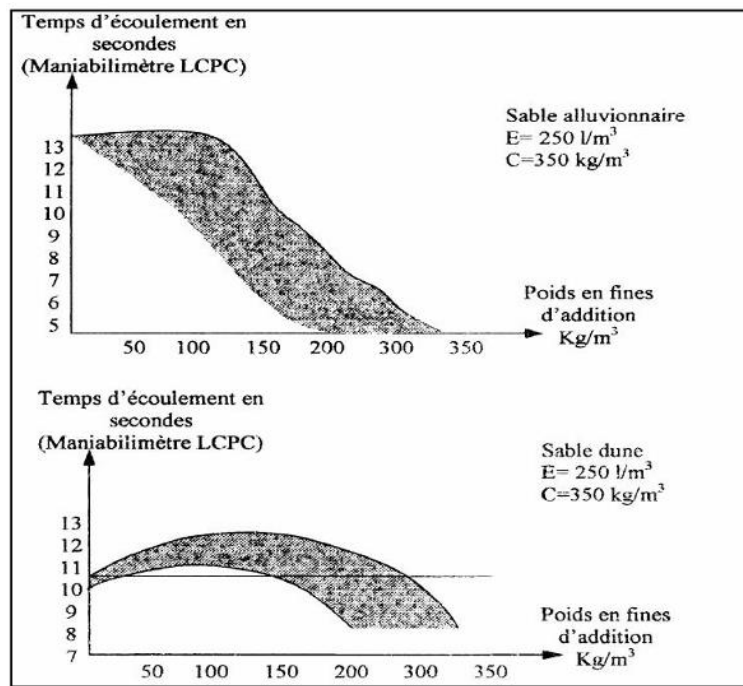


Figure I.10. Influence de la nature du sable sur la maniabilité (avec fines d'addition calcaire). [37]

B. Granulométrie et résistance

Lorsque le dosage en ciment reste inchangé, la résistance mécanique du béton peut varier en fonction de plusieurs facteurs, notamment : [37]

Le degré de finesse des ajouts minéraux

En effet, plus les particules ajoutées sont fines, plus elles contribuent à améliorer la compacité du mélange, ce qui se traduit par une augmentation de la résistance. Cet effet positif s'observe indépendamment de la granulométrie du sable utilisé, comme l'illustre la figure (I.11).

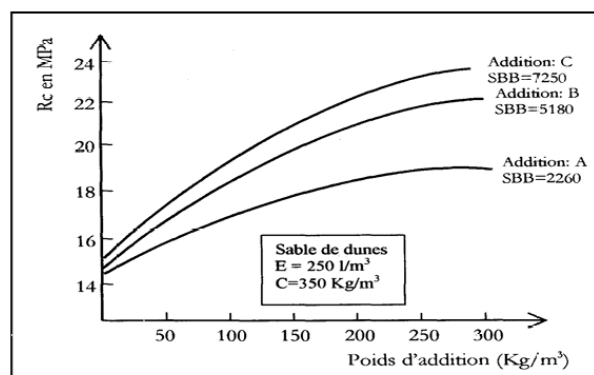


Figure I.11. Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance. [37]

La nature de l'addition

À dosage équivalent, les performances mécaniques obtenues peuvent varier considérablement en fonction du type de filler utilisé, comme le montre la figure (I.12). Bien que l'incorporation de fines contribue généralement à l'amélioration de la résistance du béton, l'ampleur de ce renforcement dépend fortement de la nature même du matériau ajouté.

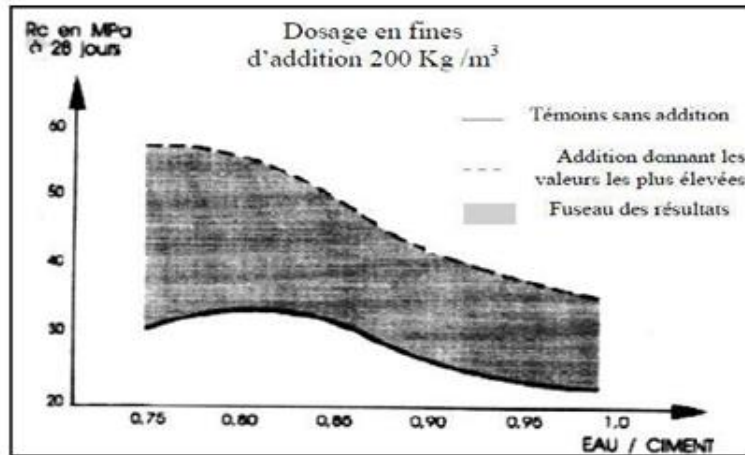


Figure I.12. Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance. [37]

I.5.1.5. Applications du béton de sable

Le béton de sable trouve sa place dans de nombreux secteurs, où il peut être mis en œuvre sous diverses formes. Ses caractéristiques particulières en font un matériau adapté à des usages spécifiques [38]. Les illustrations suivantes présentent un aperçu de ses principales utilisations.

Utilisation en préfabrication

Ce type de béton est couramment employé dans le domaine de la préfabrication, notamment pour la réalisation de parois décoratives, d'éléments de mobilier urbain, ainsi que dans les secteurs du bâtiment et des travaux publics, comme montré dans la figure (I.13).

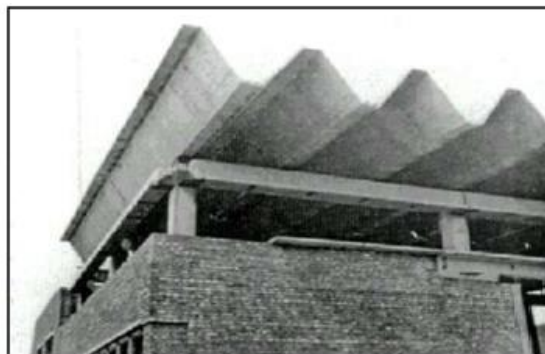


Figure I.13. Le béton de sable dans la Préfabrication. [38]

Application par projection

Le béton de sable est également adapté à la technique de projection, notamment dans les travaux de réhabilitation d'ouvrages tels que les ponts, les galeries d'égouts accessibles ou certains éléments de bâtiments. Grâce à sa granulométrie fine, le béton de sable se présente comme une solution efficace face aux limites des bétons classiques, surtout en présence d'armatures serrées.

Le béton projeté à base de sable (BS 20) se distingue par un faible taux de rebond, une bonne pompabilité et une mise en œuvre facilitée, ce qui en fait une alternative pertinente lorsque les méthodes traditionnelles montrent leurs limites. [38]

Utilisation en voirie, chaussées et dallages

Dans les secteurs routier et autoroutier (voir figure I.14), ainsi que dans les infrastructures aéroportuaires et les bâtiments, le béton de sable est employé pour la réalisation des couches de structure des chaussées, en vue d'augmenter leur résistance à l'usure. Il est aussi utilisé dans la fabrication d'éléments de voirie extrudés tels que les caniveaux, bordures ou dispositifs de séparation. [39]

Son adoption dans ces domaines s'explique principalement par sa rentabilité économique, sa mise en œuvre aisée, ainsi que l'aspect esthétique satisfaisant des produits obtenus. Toutefois, lorsqu'il est utilisé dans la construction de chaussées ou de dallages, il est indispensable de procéder à une étude de dimensionnement rigoureuse, en se conformant aux normes en vigueur, notamment celles relatives aux exigences mécaniques.



Figure I.14. Voirie en béton de sable. [40]

I.5.1.6. Méthodes de formulation du béton de sable

Dans la composition des bétons classiques, l'objectif principal est de garantir certaines performances clés telles que la maniabilité et la résistance mécanique, en jouant sur la combinaison des constituants (sable, gravier, ciment et eau). Plusieurs méthodes de formulation existent, et le choix de la taille maximale des granulats repose souvent sur des considérations techniques et pratiques.

Cependant, dans le cas du béton de sable, qui se distingue par une granulométrie particulièrement fine, l'application des méthodes classiques conduit fréquemment à des dosages excessifs en ciment. Pour pallier cela, la pâte du béton de sable inclut généralement, en plus du ciment et de l'eau, des ajouts minéraux ainsi que des adjuvants, dans le but de réduire la quantité de ciment tout en conservant les performances souhaitées.

Deux grandes approches sont utilisées pour élaborer la formulation du BS :

- Une méthode théorique, centrée sur l'optimisation de la compacité du mélange en s'appuyant notamment sur la relation de Caquot.
- Une approche expérimentale, fondée sur la réalisation de gâchées tests afin d'ajuster les proportions des composants. [37]

I.5.2. Béton auto-plaçant (BAP)

I.5.2.1. Historique

Okamura fut le premier à proposer le béton auto-plaçant (BAP) en 1986. Le premier mélange de BAP a été réalisé en 1988 à l'Université de Tokyo, en utilisant les mêmes matériaux constitutifs que ceux du béton ordinaire non vibré (Ouchi, 2001). Les motivations principales ayant conduit à l'adoption du BAP étaient de réduire la durée des travaux, d'éviter le compactage par vibration dans les zones confinées difficilement accessibles, et de supprimer les nuisances sonores liées à cette vibration (Okamura et Ouchi, 2003).

Au cours des deux dernières décennies, le BAP a connu un développement notable grâce à l'intégration de nouveaux constituants tels que les cendres volantes, la fumée de silice condensée et le laitier de haut fourneau granulé et moulu. En outre, le développement d'adjuvants superplastifiants très performants, associés à des teneurs élevées en fines, a fortement contribué à l'essor de ce type de béton.

Par conséquent, le BAP suscite aujourd'hui un grand intérêt, notamment pour les ouvrages aux formes complexes, aux procédés de mise en œuvre délicats, ou encore comportant des armatures fortement encombrées. [41]

I.5.2.2. Définition

Les bétons auto-plaçants se distinguent par leur grande fluidité, leur permettant de s'écouler et de remplir les moules, même les plus complexes, sans recours à une vibration mécanique. Leur haute capacité de déformation leur assure une parfaite adaptation à la géométrie du coffrage. Une fois mis en œuvre, ils offrent une homogénéité remarquable, ce qui contribue à la réalisation d'ouvrages solides et durables. [42]

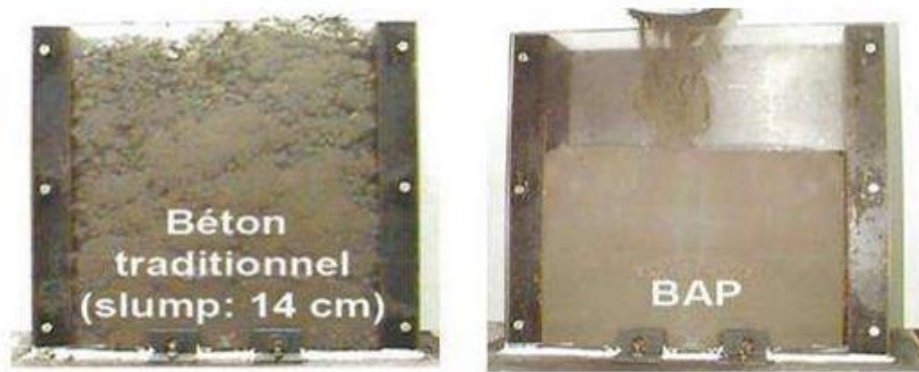


Figure I.15. Différence de mise en place entre le BAP et le BO. [43]

I.5.2.3. Les principaux constituants des BAP

Les bétons auto-plaçants se distinguent des bétons ordinaires non seulement par leurs caractéristiques de mise en œuvre, mais aussi par la nature et la proportion de leurs constituants. En effet, la formulation des BAP repose sur une sélection rigoureuse de composants, regroupés en trois grandes familles selon leur rôle dans le mélange:

- Les matériaux de base, comprenant le ciment, les granulats et l'eau de gâchage ;
- Les additions minérales, qui améliorent certaines propriétés spécifiques du béton ;
- Les adjuvants chimiques, indispensables pour assurer la fluidité, la stabilité et la résistance du mélange. [44]

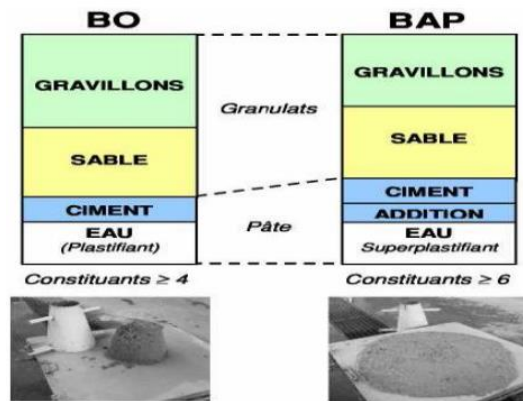


Figure I.16. Constituents de béton ordinaire (BO) et d'un BAP. [44]

A. Matériaux de base

Les constituants essentiels à la fabrication de tout béton, y compris le béton auto-plaçant (BAP), sont le ciment, les granulats et l'eau. Ces matériaux sont qualifiés de « fondamentaux » en raison de leur usage ancestral dans les bétons traditionnels et de leur présence majoritaire en termes de volume dans les formulations actuelles du BAP. [44]

Les granulats

On peut recourir aussi bien à des granulats roulés qu'à des granulats concassés. Toutefois, pour éviter que le béton ne se bloque entre les armatures lors de son coulage, il est courant de restreindre le diamètre maximal des particules à 16 mm.

La formulation du BAP privilégie une courbe granulométrique enrichie en sable et en fines particules. Idéalement, la proportion passant au tamis de 2 mm doit être située entre 38 % et 42 %, tandis que la fraction très fine (inférieure à 0,125 mm) devrait représenter entre 4 % et 8 %. Une granulométrie continue et bien choisie est essentielle, car elle influence directement la quantité de pâte nécessaire à combler les vides. Pour garantir la stabilité du mélange et éviter la ségrégation, on recommande l'usage d'un sable calibré, éventuellement recomposé à partir de plusieurs fractions granulaires. [44]

Le ciment

Tous les ciments répondant aux normes en vigueur peuvent être utilisés dans la composition d'un BAP. Néanmoins, l'emploi du ciment Portland, qui se compose exclusivement de clinker, permet une meilleure maîtrise des ajouts d'additions minérales, offrant ainsi plus de souplesse dans l'ajustement des performances du béton. [44]

L'eau de gâchage

L'eau potable provenant du réseau public est généralement appropriée pour la préparation du BAP. Étant donné que la quantité d'eau influe fortement sur la fluidité et la faculté du béton à se mettre en place sans vibration, il est crucial de respecter scrupuleusement le dosage prévu. Il convient donc de mesurer l'humidité des granulats – en particulier celle du sable – afin d'ajuster la quantité d'eau ajoutée. La teneur en eau contenue dans les adjuvants chimiques doit également être prise en compte pour garantir une formulation équilibrée. [44]

B. Les additions minérales

Les bétons auto-plaçants (BAP) se distinguent notamment par leur grande fluidité ainsi que par leur aptitude réduite à la ségrégation et au ressuage, contrairement aux bétons vibrés. Pour atteindre ces performances, et afin d'améliorer la compacité du squelette granulaire, on introduit dans la formulation du BAP des quantités importantes d'additions minérales. Ces ajouts, jouant un rôle à la fois physique et chimique, contribuent à la stabilité du mélange, à la réduction des vides, ainsi qu'à l'amélioration de la cohésion. Voici quelques exemples courants d'additions utilisées dans les BAP:

- Le filler calcaire : souvent utilisé pour optimiser la répartition granulométrique et améliorer la viscosité.
- Les pouzzolanes naturelles : matériaux siliceux ou alumino-siliceux qui réagissent avec la chaux pour former des composés cimentaires.
- Le laitier granulé de haut fourneau : sous-produit de l'industrie sidérurgique, il améliore la durabilité et la résistance à long terme du béton.
- La fumée de silice: très fine et très réactive, elle augmente fortement la densité de la pâte et la résistance mécanique.
- Les cendres volantes: issues de la combustion du charbon, elles améliorent la maniabilité et participent à la réaction pouzzolanique.

L'utilisation de ces matériaux permet non seulement d'adapter les propriétés rhéologiques du BAP, mais aussi d'en améliorer la durabilité et les performances globales. [44]

C. Les adjuvants chimiques

Les superplastifiants (SP)

Les superplastifiants sont des adjuvants de haute performance utilisés principalement pour réduire significativement la teneur en eau dans le béton tout en maintenant, voire en améliorant, sa maniabilité. Ils sont généralement sous forme liquide et composés de longues chaînes organiques ayant une masse moléculaire élevée.

Leur mécanisme d'action, bien que complexe, peut être résumé comme suit : En milieu aqueux, les particules de ciment ont tendance à s'agréger entre elles, formant des amas appelés flocs. Cette agglomération retient une portion d'eau dans les interstices, appelée "eau piégée", qui ne participe pas efficacement à la fluidité du béton.

L'ajout de superplastifiants permet de rompre cette structure floculée. En se fixant à la surface des grains de ciment, ces molécules modifient les charges électriques des particules en leur conférant toute la même polarité. Cette uniformité de charge génère des forces de répulsion électrostatiques entre les particules, favorisant ainsi leur dispersion. Cette dispersion libère l'eau précédemment emprisonnée, la rendant disponible pour améliorer la consistance et faciliter la mise en œuvre du béton. Le résultat est une pâte plus fluide, sans augmenter la quantité d'eau, ce qui permet de préserver les propriétés mécaniques à long terme.

[44]

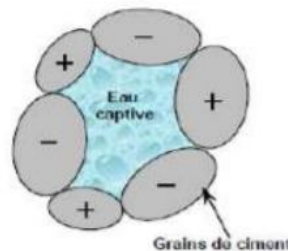


Figure I.17. Pâte de ciment non adjuvante. [44]

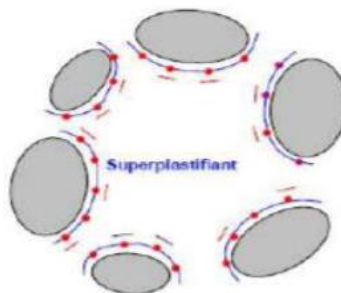


Figure I.18. Pâte de ciment additionnée d'un superplastifiant. [44]

Les agents colloïdaux (ou agents modificateurs de viscosité)

Alors que les superplastifiants ont pour effet de fluidifier le béton, ce qui peut parfois accroître le risque de ségrégation des constituants, les agents de viscosité viennent équilibrer cette tendance. Présentés généralement sous forme pulvérulente, ces additifs possèdent la capacité d'ajuster les propriétés rhéologiques des mélanges à base d'eau.

Leur fonction principale est d'augmenter la cohésion interne du béton en modifiant sa viscosité. Selon le type d'agent utilisé et sa concentration, l'effet peut varier d'un simple épaississement du mélange jusqu'à l'obtention d'une texture quasi-gélifiée.

Dans le cas des bétons autoplaçants, l'ajout de ces agents est particulièrement utile pour améliorer la stabilité du mélange, prévenir la séparation des granulats, et garantir une homogénéité optimale lors de la mise en œuvre, même dans les zones fortement armées. [44]

I.5.2.4. Les propriétés du béton auto-plaçant (BAP)

A. Les essais A l'état frais

Les normes européennes relatives au béton auto-plaçant (BAP) identifient quatre propriétés clés à évaluer lorsque le béton est encore à l'état frais. Chacune de ces caractéristiques peut être mesurée à l'aide d'essais spécifiques. [45]

Capacité de remplissage

Cette propriété, directement liée à la fluidité du mélange, reflète la capacité du béton à s'écouler et à occuper l'ensemble du volume disponible, y compris dans les zones à géométrie complexe ou fortement armées. Le BAP, sous l'effet de son propre poids, se déforme et s'étale sans nécessiter de vibration mécanique.

La capacité de remplissage se mesure à la fois par l'ampleur de l'étalement (par exemple via l'essai d'affaissement ou "Slump flow") et par la vitesse d'écoulement, évaluée notamment par le temps t50 ou par l'essai au V-funnel, indicateurs de sa viscosité. [45]

Capacité de passage

Cette propriété décrit l'aptitude du béton frais à s'écouler entre les armatures sans perte d'uniformité ni blocage des granulats. La performance du BAP dans ce contexte dépend fortement de la compacité du ferrailage, de la taille maximale des granulats et de sa capacité intrinsèque de remplissage.

Un bon passage sans ségrégation est essentiel pour garantir la continuité et la qualité du matériau dans des structures densément renforcées. [45]

Stabilité contre la ségrégation

La résistance à la ségrégation est cruciale pour maintenir l'homogénéité du béton durant sa mise en œuvre. Le risque de séparation des constituants peut survenir aussi bien pendant qu'après le coulage, avant la prise complète du matériau.

Une ségrégation tardive, en particulier dans les éléments de grande longueur ou dans les dalles minces, peut engendrer des défauts de surface, comme des fissurations, nuisant ainsi à la durabilité et à l'apparence finale du béton. [46]

Le comportement rhéologique

Au-delà de sa fluidité, la viscosité joue un rôle essentiel dans la description du comportement du béton auto-plaçant. Elle permet d'évaluer la manière dont le béton réagit lorsqu'il est soumis à des efforts mécaniques, notamment des contraintes de cisaillement.

La viscosité, notée généralement par la lettre grecque η , traduit la résistance interne du béton à l'écoulement. Plus cette résistance est faible, plus le matériau est apte à s'écouler facilement. En d'autres termes, un béton ayant une faible viscosité présentera un étalement plus rapide et plus uniforme.

La compréhension de cette propriété est essentielle pour maîtriser la mise en œuvre du BAP, car elle conditionne sa capacité à se déplacer sans ségrégation et à s'adapter aux formes complexes du coffrage. [46]

B. A l'état durci

Résistance mécanique

Comme tout béton, la performance mécanique du béton auto-plaçant (BAP) dépend fortement de la qualité de la granularité, du rapport eau/ciment efficace, ainsi que de la nature du liant utilisé. En ajustant soigneusement ces paramètres, il est possible de produire des BAP avec des résistances élevées, atteignant même des valeurs de 80 à 100 MPa après 28 jours de cure. [47]

➤ Résistance à la compression

Le BAP présente généralement une résistance à la compression légèrement supérieure à celle du béton traditionnel, lorsque les rapports eau/liant sont comparables. Cela s'explique

notamment par l'absence de vibration mécanique, qui favorise une meilleure liaison entre les granulats et la matrice cimentaire durcie. [48]

➤ **Résistance à la traction**

Concernant la traction, il a été constaté que, pour une même résistance en compression, la résistance à la traction du BAP est équivalente à celle des bétons classiques. En effet, la proportion de pâte (mélange de ciment, fines et eau) ne semble pas exercer d'influence marquée sur cette propriété. [49]

Retraits

Des études comparatives ont montré que le retrait plastique du BAP peut être significativement plus élevé que celui observé dans les bétons vibrés. Par exemple, Gram et Piiparinen [50]. ont noté que ce retrait peut être multiplié par deux voire trois dans le cas des BAP, ce qui nécessite une attention particulière lors de la conception et du durcissement initial.

Durabilité

La durabilité du béton, et donc de la structure qu'il compose, est fortement liée à sa perméabilité. En pratique, plusieurs facteurs influencent cette propriété, notamment la sélection des composants, la formulation du mélange, ainsi que le soin apporté à chaque étape de la mise en œuvre, du coulage jusqu'à la cure. Un contrôle rigoureux de ces éléments est crucial pour assurer la longévité des ouvrages en BAP. [47]

I.5.2.5. Caractérisations des BAP à l'état frais

Avant de valider une formulation en tant que béton auto-plaçant, il est essentiel de vérifier que le mélange obtenu répond bien aux exigences de performance attendues. Pour ce faire, une série d'essais normalisés permet d'analyser les comportements du BAP lorsqu'il est encore frais. Parmi ces méthodes, certaines sont particulièrement répandues pour évaluer les qualités spécifiques du béton auto-plaçant à l'état frais. [44]

A. Mesure de la consistance (essai d'étalement ou "slump flow SF")

Cet essai, adapté de l'épreuve classique d'affaissement, ne s'intéresse pas à la hauteur de perte comme pour les bétons ordinaires. Il consiste plutôt à mesurer le diamètre moyen de l'étalement circulaire que forme le béton lorsqu'il est libéré sur une surface plane. Cette mesure permet d'apprécier la fluidité et la capacité du BAP à s'étaler sous l'effet de son propre poids, critère fondamental pour garantir sa mise en œuvre sans vibration. [44]

- le résultat final est la moyenne des deux valeurs obtenues. On vise habituellement un étalement compris : $\text{Slump flow} = \frac{D_1 + D_2}{2}$ (I.1)

Tableau I.3 Essai d'étalement (slump flow). [44]

Classe	ETALEMENT en (mm)
SF1	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	760 à 850

- ✓ **La classe SF1** convient principalement aux bétons utilisés dans des ouvrages peu ou pas armés, où le coulage se fait par le haut et où le béton peut s'écouler librement depuis le point de déversement.
- ✓ **La classe SF2** est adaptée à une grande variété de situations standards et représente un bon compromis pour de nombreuses applications pratiques.
- ✓ **La classe SF3**, généralement formulée avec des granulats de petit diamètre (inférieur à 16 mm), est spécialement destinée aux structures présentant un ferrailage très serré ou des formes géométriques complexes, notamment pour les éléments coulés à la verticale. [44]



Figure I.19. Essai d'étalement. [44]

B. Évaluation de la vitesse d'écoulement par l'essai du V-Funnel

L'essai du V-Funnel permet d'apprécier la capacité d'un béton auto-plaçant à s'écouler dans un environnement libre de tout obstacle. Il fournit des indications précieuses sur la viscosité du mélange en mesurant le temps que met un volume de 12 litres de béton à traverser un entonnoir de forme carrée.

En règle générale, un temps d'écoulement plus court reflète un béton plus fluide, tandis qu'un écoulement plus lent indique une viscosité plus élevée. Sur la base de ces mesures, deux classes de viscosité sont couramment distinguées :

- ✓ **Classe VF1:** correspond à un béton très fluide, avec un temps d'écoulement inférieur ou égal à 8 secondes, généralement associé à un $T50 \leq 2$ s.
- ✓ **Classe VF2:** caractérise un béton plus visqueux, pour lequel le temps d'écoulement se situe entre 9 et 25 secondes, avec un $T50$ supérieur à 2 s.

Dans de nombreuses publications scientifiques, cette durée d'écoulement est utilisée comme indicateur principal pour évaluer la viscosité des bétons auto-plaçants. [44]

Tableau I.4 Classification des BAP selon la norme NFP 12350-9 [44]

Classe	Temps (sec) relatif à l'essai d'écoulement à l'entonnoir en V
SF1	< 9,0
SF2	9,0 à 25,0

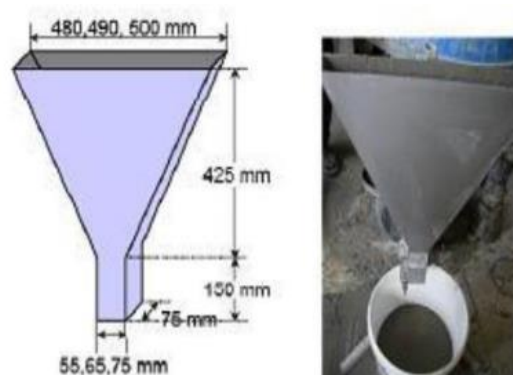


Figure I.20. Essais des Entonnoirs (V-Funnel). [44]

I.5.2.6. Fabrication des BAP

- Tous les modèles de malaxeurs utilisés dans l'industrie du béton peuvent être employés pour produire du BAP, sans nécessité d'équipements spécifiques.
- Les étapes d'introduction des matériaux dans la cuve de malaxage suivent globalement les mêmes protocoles que ceux utilisés pour le béton vibré traditionnel.

- Un temps de malaxage légèrement prolongé est généralement requis. Cela permet d'assurer une parfaite homogénéité du mélange, notamment en raison de la forte teneur en fines et en adjuvants chimiques.
- Un paramètre critique dans ce processus est la gestion rigoureuse de la quantité d'eau incorporée, car toute variation peut altérer les propriétés de fluidité et de stabilité du BAP.

[44]

I.5.2.7. Méthode de formulation

La conception des bétons autoplaçants s'avère être une tâche complexe en raison de la multiplicité de leurs propriétés à l'état frais. Bien que de nombreuses recherches aient permis de mieux comprendre leur comportement, notamment dans des environnements confinés, il n'existe pas encore de méthode standardisée et universellement reconnue permettant de formuler un BAP de manière systématique à partir des seules caractéristiques des matériaux disponibles localement et des exigences d'un projet donné. [51]

En pratique, la composition d'un béton auto-plaçant repose sur des approches empiriques et des méthodes développées au fil des dernières décennies. Parmi celles-ci, certaines approches sont couramment adoptées et utilisées comme références pour l'élaboration des dosages:

A. La méthode japonaise [52]

L'approche mise au point à l'Université de Kochi au Japon propose une formulation prudente des bétons auto-plaçants, reposant sur une augmentation du volume de pâte au détriment des granulats. Cette méthode favorise ainsi la performance au coulage plutôt que l'optimisation économique, ce qui se traduit par des compositions pauvres en granulats. Cependant, au Japon, ce choix est justifié par une réduction significative des coûts liés à la main-d'œuvre.

Les grandes lignes de cette méthode peuvent être résumées comme suit:

Proportionnement des gravillons : Afin de prévenir tout blocage lors de la mise en place, le volume de gravillons dans 1 m³ de béton est limité à environ 50 % de leur compacité. Cette compacité, qui exprime le rapport entre le volume de particules solides et le volume total occupé par ces particules et les vides, varie selon la méthode de compactage adoptée.

Dosage du sable : Le volume de sable est déterminé de manière conventionnelle et correspond à 40 % du volume total du mortier. Cette réduction des interactions entre les particules granulaires contribue directement à l'amélioration de la fluidité du mélange.

Proportionnement du liant : La méthode ne fournit pas de règle stricte pour la quantité de liant. Toutefois, une base de 350 kg/m³ de ciment peut être utilisée, conformément aux normes en vigueur. Les rapports eau/ciment et filler/ciment sont ajustés selon les propriétés mécaniques désirées.

Ajustement de l'eau et des superplastifiants : Le dosage optimal de l'eau et des adjuvants réducteurs d'eau à haut rendement est défini par des essais sur mortiers standards, contenant toujours 40 % de sable. Ces essais incluent des tests d'étalement au cône et d'écoulement à travers un entonnoir, afin de garantir une consistance et une maniabilité satisfaisantes.

B. L'approche française (LCPC) [53]

Développée par De Larrard et ses collaborateurs en 1994, la méthode française élaborée au LCPC repose sur un modèle mathématique fondé sur le concept de suspension solide, connu sous le nom de **RENE LCPC**. Ce modèle vise à simuler les interactions entre les particules granulaires afin d'anticiper, avec une marge d'erreur inférieure à 1 %, la compacité globale d'un mélange donné.

Ce modèle tient compte des paramètres suivants :

- La courbe granulométrique de chaque constituant,
- Les proportions relatives entre les composants,
- La compacité intrinsèque des matériaux,
- Et leur masse volumique apparente.

La démarche adoptée pour concevoir une composition conforme aux exigences du béton auto-plaçant se déroule selon les étapes ci-dessous :

Détermination préalable du liant : Le pourcentage de liant est défini au départ. Par exemple, une combinaison typique peut être constituée de 70 % de ciment et 30 % d'ajouts minéraux.

Évaluation du dosage optimal de superplastifiant : Une première estimation du dosage à saturation est réalisée. Toutefois, l'expérience du LCPC recommande généralement de réduire cette valeur de moitié pour éviter une viscosité excessive du mélange.

Mesure du besoin en eau : Cette étape consiste à établir la quantité d'eau nécessaire pour le mélange en présence de superplastifiant.

Modélisation numérique : Grâce au logiciel dédié, les calculs prennent en compte les effets de confinement, notamment ceux causés par les parois.

Ajustement de la viscosité cible : Une valeur arbitraire de viscosité (en général 5×10^4) est fixée, ce qui implique une réduction de l'eau, tout en maintenant constant le rapport liant/filler.

Optimisation du rapport entre granulats et liant : Une fois les paramètres précédents établis, l'équilibre entre la fraction granulaire et la phase liante est optimisé pour garantir les performances du béton.

En conclusion, la méthode LCPC propose une formulation prévisionnelle appuyée par des outils numériques. L'affinage final se fait à travers l'ajustement du taux d'eau pour atteindre la résistance souhaitée, ainsi que du dosage en superplastifiant afin d'obtenir les caractéristiques d'écoulement et de cisaillement conformes aux exigences du béton autoplaçant.

C. Méthode Suédoise [54]

La méthode suédoise, élaborée par Petersson et al. En 1996, repose sur les travaux de Tangtermsirikul et al. En 1995. Cette approche s'intéresse particulièrement au risque de blocage, qu'elle intègre dans la formulation du béton auto-plaçant. Selon cette méthode, le rapport granulats/sel (G/S) final est choisi de manière à garantir un volume de pâte optimal pour obtenir les propriétés recherchées du béton.

Une fois ce rapport déterminé, les fines, l'eau et le superplastifiant sont ajustés afin d'atteindre la viscosité souhaitée, un faible seuil de cisaillement, ainsi que la résistance à la compression cible. Cette méthode permet ainsi une optimisation plus fine du squelette granulaire, bien que le critère de blocage ne soit pas applicable à tous les types de granulats.

I.5.2.8. Les avantages des bétons autoplaçants

- Amélioration des conditions de travail grâce à l'absence de bruit perturbateur ;
- Mise en œuvre simplifiée et accélérée ;
- Réduction des besoins en main-d'œuvre et un remplissage optimal des coffrages ;
- Obtention d'un béton de haute qualité avec des surfaces planes et régulières ;
- Capacité à réaliser des structures aux formes complexes. [44]

I.6. Présentation de la méthode de Taguchi

I.6.1. La méthode de Taguchi

La méthode de Taguchi, qui est une approche statistique développée par le japonais Genichi Taguchi pour améliorer la qualité des produits et des procédés, a été largement adoptée dans l'analyse des systèmes d'ingénierie. Elle repose sur un plan d'expériences structuré dont le but est de collecter des données de manière méthodique afin de mieux comprendre le comportement d'un processus donné.

L'objectif principal de cette méthode est d'optimiser les paramètres de conception de manière à améliorer les performances du système tout en assurant une stabilité face aux variations environnementales ou autres facteurs perturbateurs (appelés facteurs de bruit). Cette approche permet ainsi d'atteindre une qualité élevée sans engendrer une hausse des coûts.

La méthode de Taguchi comprend trois phases essentielles dans le développement d'un produit ou d'un processus :

- La conception du système, où l'ingénieur établit la configuration de base à l'aide de principes scientifiques ;
- La conception des paramètres, visant à déterminer les valeurs optimales des facteurs influents ;
- La conception de la tolérance, destinée à définir les plages de variation acceptables pour ces facteurs.

Contrairement aux approches expérimentales classiques, souvent complexes et coûteuses, la méthode Taguchi propose l'utilisation de tableaux orthogonaux. Ceux-ci permettent d'explorer efficacement l'espace des paramètres à l'aide d'un nombre réduit d'expériences, tout en conservant la rigueur nécessaire pour tirer des conclusions fiables. Une fonction de perte est ensuite utilisée pour évaluer l'écart entre les résultats obtenus et la performance cible. [55]

I.6.2. But de la méthode de Taguchi

L'objectif principal de la méthode de Taguchi était de rendre les techniques statistiques accessibles à un large public, en les simplifiant de manière à ce que même ceux qui ne sont pas des experts en mathématiques puissent les utiliser efficacement. Cependant, cette simplification a fait l'objet de critiques, qui ont démontré que certains résultats obtenus par des plans d'expériences orthogonaux peuvent diverger de ceux générés par des méthodes d'expérimentation plus classiques, comme celles proposées par Sir Ronald Fisher. Ces critiques sont légitimes, notamment si l'on considère la méthode de Taguchi comme étant rigide et inflexible. Toutefois, il

est important de voir les travaux de Taguchi comme un point de départ qu'un expérimentateur doit ajuster en fonction du contexte spécifique et des objectifs de son étude, plutôt que de les considérer comme une solution prête à l'emploi. [55]

I.6.3. Optimisation par la méthode de Taguchi

Lorsqu'on applique la méthode Taguchi à l'analyse des résultats expérimentaux, l'objectif principal est de déterminer les paramètres influençant le plus la diminution des fluctuations dans les réponses mesurées. Ces fluctuations peuvent être étudiées soit à travers la moyenne des réponses, soit par l'analyse de leur dispersion.

Afin de quantifier ces variations, Taguchi a introduit une méthode de transformation des données connue sous le nom de rapport Signal sur Bruit (S/B). Ce ratio sert d'indicateur de la stabilité des résultats face aux sources d'instabilité.

Dans cette approche, le terme *signal* fait référence à la valeur cible que l'on souhaite atteindre, tandis que *bruit* désigne les perturbations ou écarts non souhaités. Le but de l'exploitation du ratio S/B est de permettre le développement de produits et procédés robustes, c'est-à-dire peu sensibles aux influences externes ou imprévues. Ce rapport constitue donc un outil clé pour évaluer la fiabilité et la constance des performances dans des conditions variables. [55]

I.6.4. Étapes de mise en œuvre de la méthode de Taguchi

Les différentes phases de mise en œuvre de la méthode de Taguchi peuvent être résumées comme suit :

- 1) Définir clairement la problématique, idéalement à l'aide d'une représentation graphique pour en faciliter la compréhension.
- 2) Identifier les facteurs à étudier, déterminer les niveaux de variation de chaque paramètre, puis préciser les éventuelles interactions à prendre en compte.
- 3) Élaborer le plan d'expériences en s'appuyant sur les matrices orthogonales proposées par Taguchi.
- 4) Effectuer les expérimentations conformément au plan établi.
- 5) Interpréter les données recueillies afin d'évaluer l'impact de chaque facteur sur la réponse mesurée.
- 6) Déterminer les conditions optimales, ajuster les paramètres maîtrisables, et effectuer un test de validation pour confirmer les résultats obtenus. [55]



Chapitre II

Matériaux et Procédures Expérimentales



II.1. Introduction

Dans ce chapitre, l'accent sera mis sur l'étude des matériaux utilisés pour le développement d'un béton de sable auto-plaçant (BSAP), à travers l'incorporation de sable de dunes, de granulats de caoutchouc et de poudre de céramique. Cette étude comprend une analyse approfondie des propriétés de ces matériaux, notamment le sable de dunes et la poudre de céramique, dans le but d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques.

Le processus de mélange est une étape cruciale, où les proportions d'ingrédients sont ajustées avec précision pour obtenir des performances optimales du béton, à la fois à l'état frais et après durcissement. Des méthodes standardisées sont également suivies pour évaluer le comportement de ce nouveau béton à travers une série de tests tels que : la diffusion, la résistance à la compression et la résistance à la flexion.

II.2. Matériaux utilisés

II.2.1. Sable

Deux types de sables ont été utilisés dans cette étude, à savoir le sable de dune (SD), largement disponible dans notre wilaya (El Oued), et le sable alluvionnaire (SA) provenant de la région de (Djamaa), située dans la wilaya d'El MEGHAIER. Les caractéristiques physiques des sables sont résumées dans **le tableau II.2**



Figure II.1. Sable de dune (SD)



Figure II.2. Sable alluvionnaire (SA)

Caractéristiques physiques

Masse volumique absolue

Ce test est réalisé selon la norme NF P18-301. Elle est définie comme le poids d'un matériau par unité de volume, sans tenir compte des vides qui peuvent exister entre les grains de la masse.

[56]

$$\gamma_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (\text{II.1})$$

Où :

γ_s : Masse volumique absolue

M_s : Masse du matériau.

V_s : Volume total du matériau solide.



Figure II.3. Masse volumique absolue.

Masse volumique apparente :

Ce test est réalisé selon la norme NF P18-554. On le définit comme le poids d'une unité de volume apparent d'un corps, c'est-à-dire le volume résultant de la matière composant le corps ainsi que des espaces qu'il contient. [56]

$$\gamma = \frac{M}{V} \quad (\text{II.2})$$

γ : Masse volumique apparente

M : Masse du matériau.

V : Volume total du matériau.



Figure II.4. Masse volumique apparente.

Analyse granulométrique

L'analyse a été réalisée selon la norme NF P18-560 [58] en utilisant des tamis nécessaires pour couvrir les dimensions de l'échantillon.

L'analyse granulaire vise à classer les particules qui composent un échantillon de sol en fonction de leurs diamètres et à déterminer leur poids. Les matériaux sont séparés à l'aide d'une série de tamis sélectionnés en fonction de la taille des mailles et de la finesse des matériaux requis. Les particules sont classées en différentes classes granulaires de taille décroissante.

Cette méthode fournit des informations précieuses sur la composition des agrégats qui composent l'échantillon, nous permettant de comprendre avec précision la composition de ce sol. Les proportions de matière retenues dans chaque tamis sont calculées et peuvent être affichées soit sous forme de valeurs numériques, soit graphiquement via une courbe granulométrique qui montre la distribution granulométrique dans l'échantillon [57].

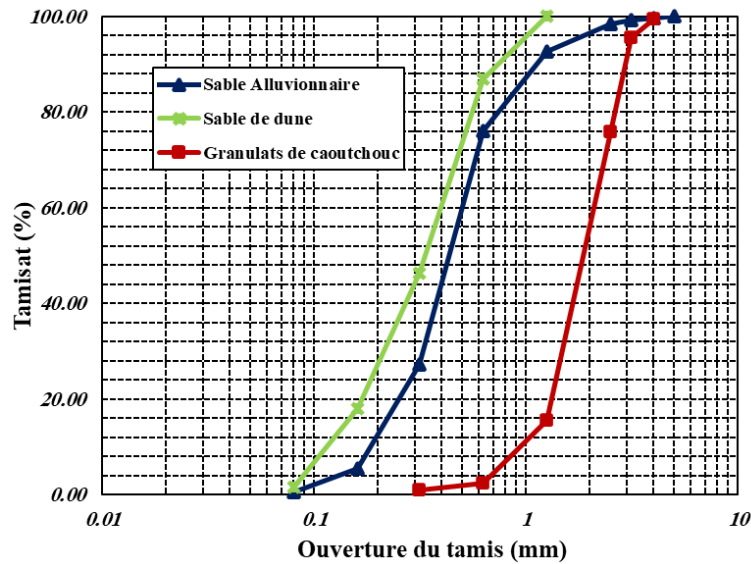


Figure II.5. Graphique montrant l'analyse granulaire des granulés de sable et de caoutchouc

Module de la finesse

Le coefficient de finesse est l'un des critères de base pour évaluer la finesse des matières premières utilisées dans la préparation du béton de sable auto-plaçant. Ce paramètre permet d'estimer la distribution des différentes tailles de particules au sein de l'agrégat, ce qui affecte directement les propriétés du mélange final, telles que la maniabilité et la facilité d'application.

Le facteur de lissage est calculé en suivant ces étapes :

1. Mesurer les pourcentages cumulatifs des matériaux retenus sur les tamis de dimensions 0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 et 5 mm.
2. Additionner ces pourcentages, puis diviser le total obtenu par 100 afin d'obtenir la valeur du module de finesse.

Une fois ces calculs terminés, l'interprétation des résultats peut être formulée comme suit :

- Une valeur élevée du facteur de finesse indique une proportion plus élevée de particules fines dans l'agrégat.
- À l'inverse, une valeur plus faible révèle une plus grande proportion de particules grossières.

$$Mf = \frac{\sum \text{des refus(en\%)} \text{ sur les tamis } 0.16; 0.315; 0.63; 1.25; 2.5; \text{ et } 5}{100} \quad (\text{II. 3})$$

Ces données sont particulièrement utiles pour ajuster la formulation du béton à base de sable en fonction des propriétés réelles des granulats disponibles, dans le but de :

1.8 et 2.2 : le sable est à majorité de grains fins.

2.2 et 2.8 : on est en présence d'un sable préférentiel.

2.8 et 3.3 : Le sable est légèrement grossier. Cela produira un béton de sable solide mais difficile à contrôler.

Equivalent de sable

Cet essai, selon la norme NF P18 598 [4], permet d'évaluer la propreté des matériaux utilisés dans la mise en œuvre du béton de sable auto-plaçant. L'échantillon est lavé selon un protocole standardisé puis laissé reposer 20 minutes. A l'issue de cette période, les mesures suivantes sont prises **Figure II.6** :

La hauteur h_1 : représentant l'ensemble des matériaux propres ainsi que les particules fines.

La hauteur h_2 : représentant uniquement les matériaux propres.

À partir de ces deux mesures, on déduit l'équivalent de sable, défini selon une convention normalisée.

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad (\text{II.4})$$

Le type d'équivalent de sable dépend de la méthode de mesure de la hauteur h_2 :

- Si la mesure est effectuée visuellement, on parle d'équivalent de sable visuel (ESV).
- Si la mesure est effectuée à l'aide d'un piston, il s'agit de l'équivalent de sable au piston (ESP).

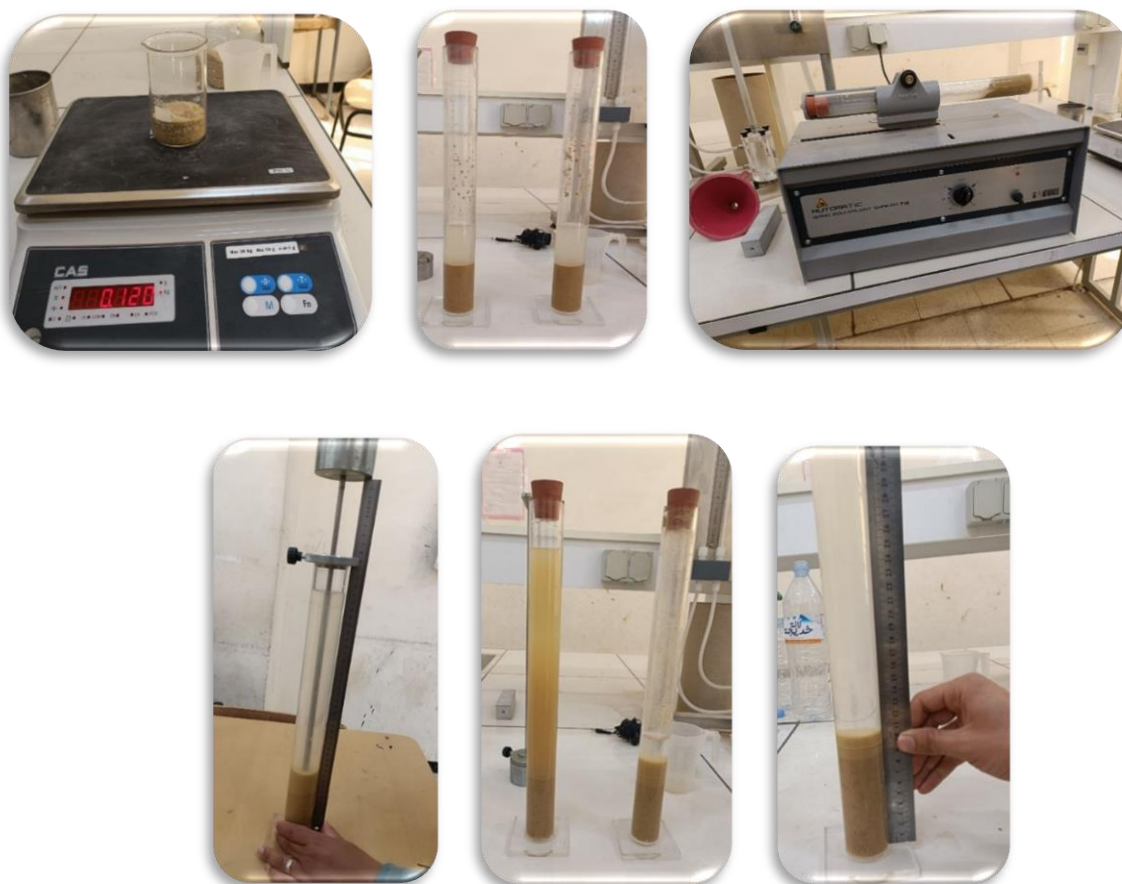


Figure II.6. Étapes de calcul de l'équivalent en sable.

Selon la norme NF P18 598 [59], les préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les mortiers sont indiquées sur **le Tableau II.1**:

Tableau II.1. Préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les bétons.

N°	Observations	Equivalent de sable (%)
1	$ESV < 65$; $ESP < 60$	Sable argileux ; risque de retrait ou de gonflement de béton.
2	$65 < ESV < 75$; $60 < ESP < 70$	Sable légèrement argileux; de propreté admissible.
3	$75 < ESV < 85$; $70 < ESP < 80$	sable propre, convenant au béton à haute qualité
4	$ESV > 85$; $ESP > 80$	sable très propre ; absence de plasticité de béton

Synthèse des résultats

Les caractéristiques physiques des sables sont résumées dans **le tableau II.2**:

Tableau II.2. Caractéristiques physiques du sable.

N°	Caractéristiques	Sable Alluvionnaire (SA)	Sable de Dune (SD)
1	Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.67	2.61
2	Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.60	1.62
3	Equivalent du sable (%)	76.85	95.65
4	Module de finesse	2.01	1.49

II.2.2. Granulites de caoutchouc (GC)

Les granulés de caoutchouc utilisés dans notre étude sont obtenus par broyage mécanique de déchets de pneus usagés. Après avoir retiré leurs parties métalliques et en tissu, les pneus sont coupés mécaniquement et broyés jusqu'à la finesse requise, comme le montre **la figure II.7**. La qualité des granulés de caoutchouc recyclé utilisés dans notre mélange varie de 0 à 4 mm. Les propriétés physiques de ces granulés sont résumées dans le **tableau II.3**. **La figure II.7** montre une analyse détaillée de ces grains.

**Figure II.7.** Granulats de caoutchouc (GC).**Tableau II.3.** Caractéristiques physiques du Granulats de caoutchouc (0/4mm).

Masse volumique absolue (g/cm^3)	1.025
Masse volumique apparente (g/cm^3)	0.540
Granulometric	0 – 4 mm
Module de finesse	4.09

II.2.3. Poudre céramique (PC)

La poudre céramique utilisée dans notre étude provient du broyage mécanique de déchets de céramique cassés provenant d'une usine de céramique située dans la ville d'El Oued. Cette poudre est obtenue après avoir éliminé les impuretés en la lavant avec de l'eau et un morceau de tissu, puis elle est broyée mécaniquement pour obtenir la finesse requise **Figure II.8**. Les granulés de poudre céramique recyclée utilisés dans notre mélange varient de 0 à 0,08 mm. Les propriétés physiques de ce matériau sont résumées dans le **tableau II.4**. L'analyse granulaire de ces produits est présentée dans la **figure II.8**.



Figure II.8. Poudre céramique (PC) (<0.08).

Tableau II.4. Les propriétés physiques de la poudre de céramique.

Caractéristiques	Valeur
Masse volumique apparente (g/cm^3)	0.93
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.58

II.2.4. Ciment

Le ciment utilisé dans ce travail est le ciment Portland de type CEM I 42,5 N-SR3, conforme aux spécifications algériennes NA 442, et commercialisé sous la dénomination MOKAOUEM Plus (**figure II.9**). Ce ciment est fabriqué par le Complexe Industriel Cimentier Algérien (Lafarge), dont le siège social est à M'Sila, en Algérie. Pour plus d'informations sur ce ciment, veuillez-vous référer au bulletin technique en (**Annexe 1**).

Les caractéristiques physico-chimiques du ciment inscrite sur la fiche technique sont données dans

Les Tableaux II.5.6.7.8.



Figure II.9. Ciment utilisé.

Tableau II.5. Analyses chimiques.

Paramètre	Valeur
Perte au feu (NA5042) (%)	à 30.3
Teneur en sulfates SO ₃ (%)	1.8 à 3
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.2 à 2
Teneur en Chlorures (NA5042) (%)	< 0.1

Tableau II.6. Composition minéralogique.

Minéraux	Valeur
Taux d'aluminate C3A	<3.0%

Tableau II.7. Propriétés physiques.

Caractéristiques	Valeur
Consistance Normale (%)	25 à 28
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	3200 à 3800
Retrait à 28 jours (µm/m)	<1000
Expansion (mm)	≤2.0
Chaleur d'hydratation	<270j/g

Tableau II.8. Résistance à la compression.

Age	Valeur
2 jours (MPa)	≥10
28 jours (MPa)	≥42.5

II.2.5. Eau de gâchage

L'eau utilisée pour le mélange est l'eau du robinet du laboratoire de génie civil de l'université d'El Oued. D'une part, il sert à conférer des propriétés de fluidité au béton sablé, et d'autre part, il participe au processus d'hydratation. Lorsque l'eau entre en contact avec du ciment anhydre, elle réagit pour former des composés hydratés appelés hydrates de ciment.

II.2.6. Adjuvant (Superplastifiants SP)

TEMPO-12, un matériau hautement adhésif et polyvalent, est disponible dans la gamme Sika® ViscoCrete® TEMPO-12. Ce matériau permet la réalisation de bétons et de mortiers de haute qualité en termes de résistance et de fluidité. En plus de son rôle premier d'adjuvant haute performance, il contribue significativement à réduire la teneur en eau du béton. Pour plus d'informations sur ce produit, veuillez-vous référer au bulletin technique en (**Annexe 2**).



Figure II.10. Le Superplastifiant TEMPO-12.

Tableau II.9. Quelques caractéristiques de TEMPO-12.

caractéristique	Aspect et Couleur	Densité	Valeur pH	Teneur en Ions Chlorure	Dosage
Résultats	Liquide brun clair à foncé	$1,06 \pm 0,01$	$4,5 \pm 1,0$	$\leq 0,1 \%$	0.3 % à 3 %

II.3. Formulation

II.3.1. Formulations du béton de sable auto-plaçant avec SD, GC et PC

- Nous allons incorporer des sables de dune (SD) en substitution volumique du sable alluvionnaire (SA) avec trois substitutions volumétriques 07%, 14% et 21%.
- Nous allons incorporer des granulats de caoutchouc (GC 0/4 mm) issus du recyclage de pneus usagés en substitution volumique du sable alluvionnaire (SA) avec trois substitutions volumétriques 06 %, 12 % et 18 %.
- Nous allons incorporer de poudre de céramique (< 0.08mm) issus du recyclage de murs de briques démolis en substitution massique du ciment avec trois substitutions massiques 05 %, 10 % et 15 %.

II.3.2. Applications la méthode de Taguchi

Tableau II.10. La matrice des effets selon la méthode de Taguchi $L9(3^3)$

N° de l'essai	Teneur en sable de dune (%)	Teneur en caoutchouc (%)	Teneur en Poudre de céramique (%)
01	7	6	5
02	7	12	10
03	7	18	15
04	14	6	10
05	14	12	15
06	14	18	5
07	21	6	15
08	21	12	5
09	21	18	10

II.3.3. Compositions de béton de sable auto-plaçant

Tableau II.11. Compositions des mélanges à base de liant binaire (en masse pour 1m³)

Mélanges	Constituants et paramètres de formulation								
	E/L	Ciment (Kg)	PC (Kg)	Sable SA (Kg)	Sable SD (Kg)	GC (Kg)	Eau (Kg)	SP/L (%)	SP (Kg)
07%SD,06%GC et 05%PC	0.40	657.40	34.60	1161.45	91.35	30.75	277	1	6.92
07%SD,12%GC et 10%PC		622.80	69.20	1081.34	91.35	61.50			
07%SD,18%GC et 15%PC		588.20	103.80	1001.24	91.35	92.25			
14%SD,06%GC et 10%PC		622.80	69.20	1068	182.70	30.75			
14%SD,12%GC et 15%PC		588.20	103.80	987.90	182.70	61.50			
14%SD,18%GC et 05%PC		657.40	34.60	907.80	182.70	92.25			
21%SD,06%GC et 15%PC		588.20	103.80	974.55	274.05	30.75			
21%SD,12%GC et 05%PC		657.40	34.60	948.45	274.05	61.50			
21%SD,18%GC et 10%PC		622.80	69.20	814.35	274.05	92.25			

II.3.4. Procédure expérimentale

II.3.4.1. Fabrication du béton de sable auto-plaçant

Pesage des composants du béton de sable auto-plaçant

Tout d'abord, nous avons pesé individuellement tous les composants du béton



Figure II.11. Sable de dune (SD) (01), Sable alluvionnaire (SA) (02), Granulats de caoutchouc (GC) (03)



Figure II.12. Ciment (01), Poudre de céramique (02), Eau de gâchage (03), Superplastifiant (04)

Malaxages composants du béton de sable auto-plaçant

Pour mélanger les ingrédients, le processus de mélange a été effectué manuellement puis à l'aide d'un mélangeur (**Figure II.15**). En termes de temps de malaxage, le béton de sable auto-plaçant a un temps de malaxage plus long que le béton de sable conventionnel, permettant une meilleure dispersion des particules de poudre grâce à la haute efficacité du superplastifiant. La méthode de mélange a été réalisée conformément au plan (**voir figure II.13**). Nous avons choisi un temps de mélange de 5 minutes car c'est ce que nous préférons. Après avoir pesé les quantités de matériaux utilisés dans le béton de sable auto-plaçant et les avoir placées dans le récipient de mélange (**Figure II.14**), le mélange est effectué selon la séquence indiquée dans la (**Figure II.13**), qui peut être résumée comme suit :

- Mélanger les ingrédients secs jusqu'à consistance lisse, environ 1 minute.
- Ajouter la première quantité d'eau ($w_1 = 70\%$ d'eau) pendant 1 minute.
- Ajouter l'eau restante ($w_2 = 30\%$ d'eau) mélangée au superplastifiant et mélanger avec un mélangeur pendant 3 minutes.

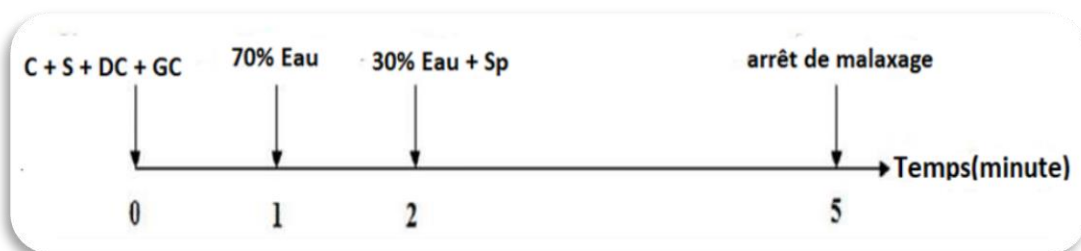


Figure II.13. Séquence de mélange pour béton de sable auto-plaçant.



Figure II.14. Matériaux utilisés secs.



Figure II.15. Mélanger le mélange de béton avec un mélangeur à peinture.

Coulage des éprouvettes

Dans ce travail nous avons confectionné 14 éprouvettes de dimensions (4 x 4 x 16) cm.

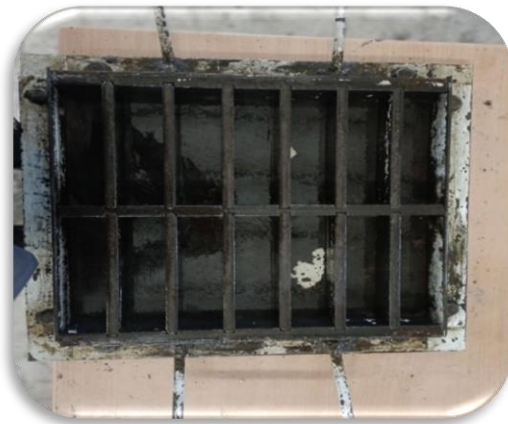


Figure II.16. Moule des éprouvettes utilisés.

II.4. Les essais réalisés

II.4.1. Essais réalisés à l'état frais

II.4.1.1. L'étalement mini Cône

Le test de diffusion au cône est utilisé pour mesurer la consistance (ou la fluidité) du béton autoplaçant. L'équipement utilisé dans ce test est composé des éléments suivants :

- Table d'étalement : Le plateau de la table doit être recouvert d'une plaque en acier inoxydable d'au moins 2 mm d'épaisseur pour garantir une surface plane et robuste.

- Mini cône : C'est un moule en métal de 4 cm d'épaisseur. La paroi intérieure du moule doit être lisse, sans rugosité ni déformation locale, pour garantir l'exactitude des résultats des tests.



Figure II.17. Essai d'étalement au mini cône.

II.4.1.2. Ecoulement à l'entonnoir en V-FUNNEL

Ce test permet d'estimer le temps nécessaire au béton à base de sable pour s'affaisser sous son propre poids. Le temps mesuré indique la fluidité et la capacité du béton de sable auto-plaçant à passer à travers les ouvertures.

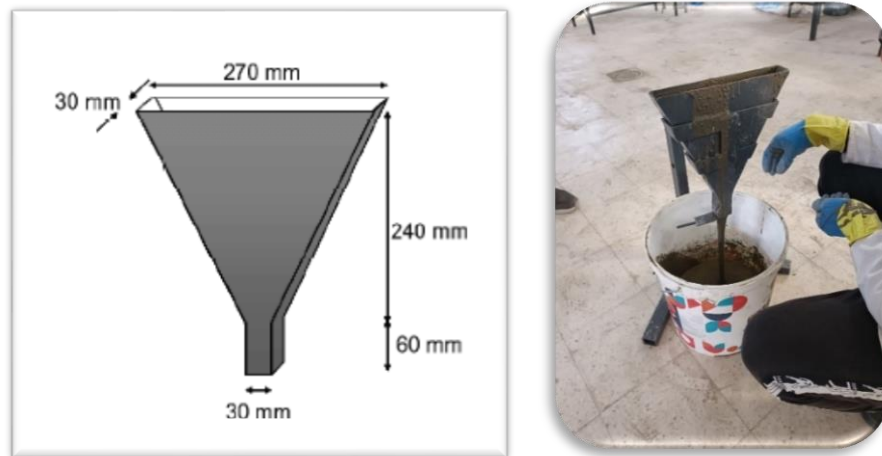


Figure II.18. Test de l'entonnoir en V pour le béton de sable auto-plaçant.

II.4.1.3. Détermination de la masse volumique

Cette méthode permet de déterminer la masse volumétrique du béton de sable frais, essentielle pour évaluer sa qualité et ses performances. En remplissant un récipient de volume connu, en le pesant, puis en mesurant la différence de masse du récipient plein et du récipient vide, nous pouvons calculer la masse du béton de sable auto-plaçant. En divisant cette masse par le volume du récipient, on obtient la masse volumétrique fraîche du béton de sable auto-plaçant, exprimée en kg/m^3 . Cela permet de comparer la masse volumétrique mesurée à la formule théorique pour évaluer la compatibilité du béton à base de sable.



Figure II.19. Détermination de la masse volumique.

II.4.2. Essais réalisés à l'état durci

II.4.2.1. Essais de la masse Volumique

Après le traitement de l'eau, les échantillons d'essai ont été saturés d'eau. Pour effectuer d'éventuels tests, les échantillons ont dû être séchés dans un four à la température optimale de 105 degrés. Il s'agit de déterminer la masse à l'état sec. Nous avons d'abord séché les éprouvettes au four jusqu'à ce qu'elles atteignent une masse constante, puis nous avons mesuré les dimensions des éprouvettes pour déterminer le volume. En utilisant la masse constante trouvée et le volume calculé, nous avons pu déterminer la masse volumétrique de chaque éprouvette à l'état sec, en divisant la masse par le volume.



Figure II.20. Séchage des échantillons.

II.4.2.2. Essai de traction par flexion

L'essai de flexion en trois points est une mesure indirecte de la résistance à la traction d'un matériau. Cet essai est réalisé sur des éprouvettes de béton de sable auto-plaçant placées sur deux points d'appui distants de 100 mm, avec une force appliquée au point central supérieur et augmentant jusqu'à la rupture. Cela est illustré dans le diagramme de la (**Fig. II.21**).

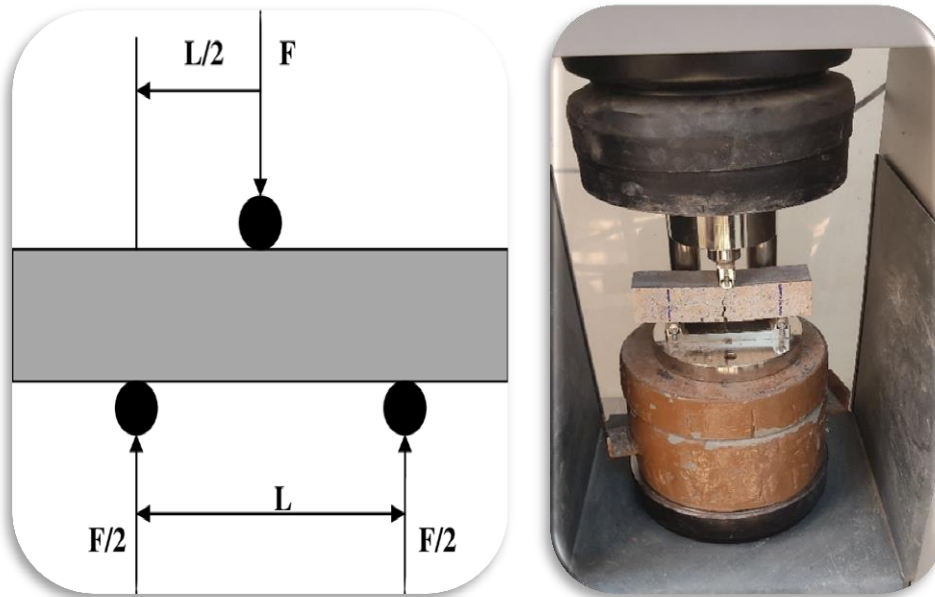


Figure II.21. Essai de traction par flexion.

II.4.2.3. Essai de compression

La résistance à la flexion du béton à base de sable est déterminée à l'aide d'un essai de chargement en trois points jusqu'aux éprouvettes coulées durcies.

Les sections d'essai de flexion résultantes sont utilisées pour déterminer la résistance à la compression, chaque échantillon étant soumis à une charge augmentant progressivement jusqu'à ce qu'une rupture se produise, et la charge maximale atteinte est enregistrée comme charge de rupture.

La résistance à la compression calculée représente la contrainte d'écrasement moyenne de trois éprouvettes.

La résistance à la compression a été évaluée après 7 et 28 jours à l'aide d'une machine d'essai de compression hydraulique capable d'appliquer des charges jusqu'à 1500 kN et équipée d'un dispositif spécial pour tester les blocs de BSAP. (**Fig. II.22**).

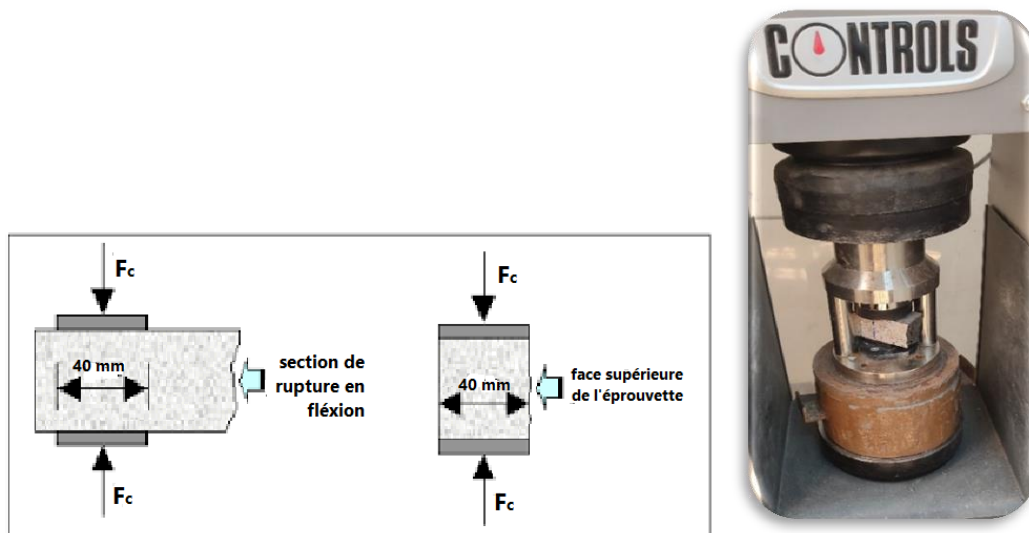


Figure II.22. Essai de compression.

Chapitre III

**Analyse des résultats expérimentaux
par l'application de la méthode de Taguchi**

III.1. Introduction

Ce chapitre vise à réaliser une analyse statistique en utilisant la méthode Taguchi et à interpréter les résultats obtenus à partir des différents tests réalisés. Nous nous intéresserons à l'étude des résultats des tests réalisés sur le béton de sable auto-plaçant afin de connaître les résultats optimaux pour chaque facteur afin de donner les meilleurs résultats sur le comportement du BSAP à l'état frais et à l'état durci.

III.2. Facteurs

Les facteurs ciblés par notre recherche sont : la teneur en sable de dune, la teneur en caoutchouc et la teneur en poudre de céramique le tout par unité de volume du mélange à l'état frais.

III.3. Niveaux des facteurs

Après une recherche bibliographique nous avons choisi les niveaux de chaque facteur comme représenté dans le **Tableau III.1**:

Tableau III.1. Les facteurs et les niveaux ciblés.

Facteurs	Niveaux		
Teneur en sable de dune (%)	7	14	21
Teneur en caoutchouc (%)	6	12	18
Teneur en poudre de céramique (%)	5	10	15

III.4. Choix de la matrice de Taguchi pour notre étude

Avec une matrice de trois facteurs à trois niveaux, nous aurons un nombre d'essai qui sera égal à **9**. Cependant, vu que ce nombre est acceptable pour un travail de laboratoire, un plan matriciel complet sera appliqué pour avoir de meilleures précisions.

La matrice des effets selon la méthode **Taguchi** est établie à l'aide du logiciel MINITAB 18. Donc, la matrice des effets selon la méthode **Taguchi** sera donc comme suit :

Tableau III.2. La matrice expérimentale des effets selon la méthode Taguchi.

N° de l'essai	Teneur en sable de dune (%)	Teneur en caoutchouc (%)	Teneur en poudre de céramique (%)
01	7	6	5
02	7	12	10
03	7	18	15
04	14	6	10
05	14	12	15
06	14	18	5
07	21	6	15
08	21	12	5
09	21	18	10

III.5. Les résultats des essais à l'état frais

III.5.1. Etalement au mini-cône

Tableau III.3. Résultats des essais d'étalement du BSAP au mini-cône.

N°	Formulations	Mini-cône (cm)
01	SD7 GC6 PC5	28.35
02	SD7 GC12 PC10	29.60
03	SD7 GC18 PC15	28.00
04	SD14 GC6 PC10	27.95
05	SD14 GC12 PC15	28.20
06	SD14 GC18 PC5	28.65
07	SD21 GC6 PC15	27.25
08	SD21 GC12 PC5	27.50
09	SD21 GC18 PC10	29.00

III.5.1.1. Détermination du résultat optimal pour chaque facteur

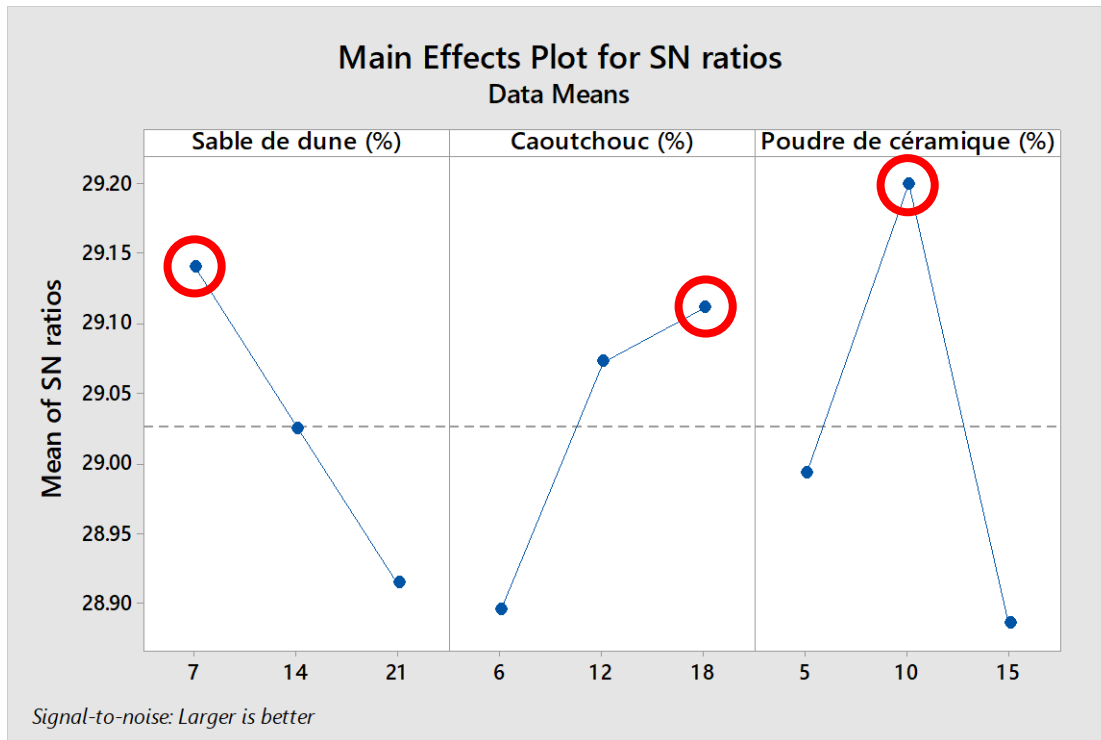


Figure III.1. Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios) des essais d'étalement au mini-cône

III.5.1.2. Détermination des coefficients du modèle

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	28.60	2.24	12.75	0.006	
Sable de dune (%)	-0.332	0.135	-2.45	0.134	16.00
Caoutchouc (%)	-0.054	0.158	-0.34	0.767	16.00
Poudre de céramique (%)	0.506	0.435	1.16	0.365	84.57
Sable de dune (%)*Caoutchouc (%)	0.0253	0.0128	1.98	0.186	44.57
Sable de dune (%)*Poudre de céramique (%)	-0.0082	0.0153	-0.53	0.648	44.57
Caoutchouc (%)*Poudre de céramique (%)	-0.0267	0.0179	-1.49	0.275	44.57

Model Summary

S	R-sq
0.579854	84.24%

Regression Equation

$$\begin{aligned} \text{Mini-cône (cm)} = & 28.60 - 0.332 \text{ SD} - 0.054 \text{ GC} + 0.506 \text{ PC} + 0.0253 \text{ SD*GC} \\ & - 0.0082 \text{ SD*PC} - 0.0267 \text{ GC*PC} \quad \textbf{(III.1)} \end{aligned}$$

III.5.1.3. Interprétation des résultats

Le signe moins (-) indique que les facteurs influent négativement sur l'étalement au mini-cône. Par contre, le signe plus (+) indique que les facteurs influent positivement sur la maniabilité du béton de sable auto-plaçant.

Par ailleurs, l'augmentant en pourcentage de sable de dune SD dans le BSAP entraîne une réduction d'étalement au mini-cône.

D'après aussi le modèle de Taguchi qui illustre les interactions existent entre les facteurs expérimentaux qui influent sur l'étalement au mini-cône dans le BSAP, nous constatons que toutes les interactions (SD×PC et GC×PC) influent négativement sur l'étalement.

En plus, nous constatons que l'interaction entre le sable de dune et les granulats de caoutchouc (SD×GC) a un effet positif sur l'étalement au mini-cône dans le BSAP.

III.5.2. Essai d'écoulement au mini-entonnoir en V (V-Funnel)

Le **Tableau III.4** montre le temps d'écoulement au mini-entonnoir en V. Ce test permet de mesurer la fluidité d'un mélange, ou en d'autres termes, sa viscosité. Plus ce temps est long, plus le mélange devient visqueux et donc plus il est résistant à la ségrégation. A l'inverse, si le temps est court, cela signifie que le mélange est devenu plus fluide et présente une faible résistance à la ségrégation.

Tableau III.4. Résultats des temps d'écoulement dans l'entonnoir du BSAP.

N°	Formulations	Temps D'écoulement (s)
01	SD7 GC6 PC5	4.20
02	SD7 GC12 PC10	3.69
03	SD7 GC18 PC15	5.33
04	SD14 GC6 PC10	4.93
05	SD14 GC12 PC15	5.25
06	SD14 GC18 PC5	4.61

07	SD21 GC6 PC15	3.52
08	SD21 GC12 PC5	5.19
09	SD21 GC18 PC10	4.02

III.5.2.1. Détermination du résultat optimal pour chaque facteur d'essai d'écoulement au mini-entonnoir en V

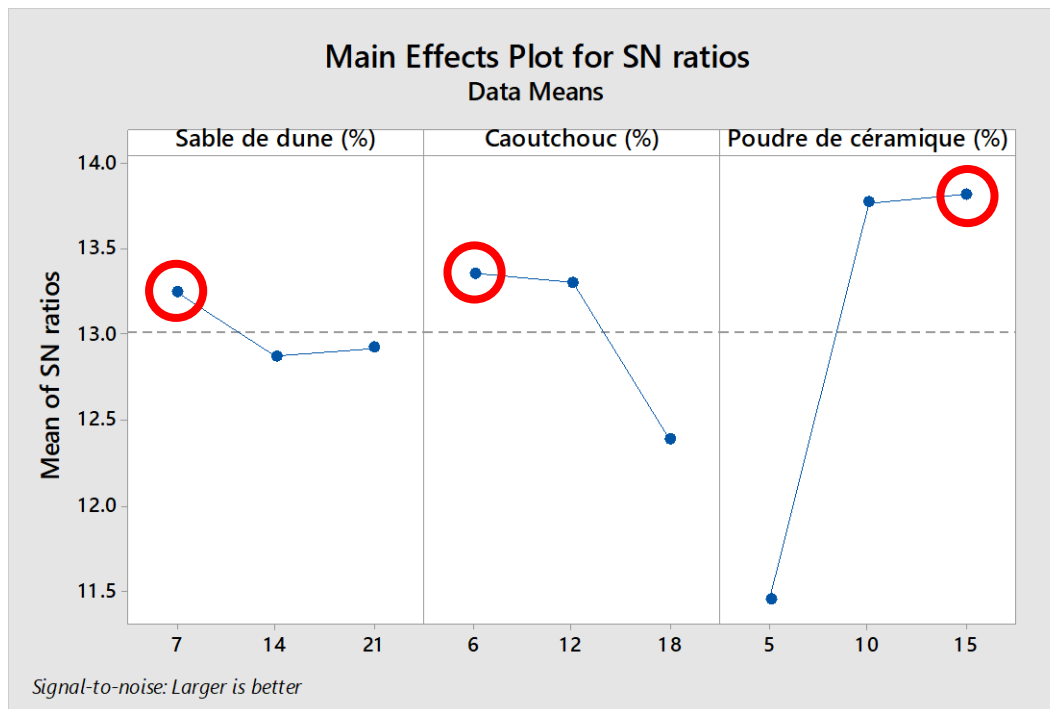


Figure III.2. Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios) des essais d'écoulement au mini-entonnoir en V

D'après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (Signal to Noise Ratios) représentés dans la figure 3.2, nous constatons que les résultats optimaux pour chaque facteur afin de donner les meilleurs résultats pour les essais d'écoulement au mini-entonnoir en V (V-Funnel) sont les suivants : la teneur en sable de dune (7%), la teneur en caoutchouc (6%) et la teneur en poudre de céramique (15%).

III.5.2.2. Détermination des coefficients du modèle (V-Funnel)

Les coefficients du modèle sont obtenus à l'aide d'une régression multiple en utilisant le logiciel d'analyse statistique MINITAB 18.

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	1.38	2.46	0.56	0.631	
Sable de dune (%)	0.061	0.148	0.41	0.719	16.00

Caoutchouc (%)	-0.008	0.173	-0.05	0.967	16.00
Poudre de céramique (%)	0.596	0.477	1.25	0.338	84.57
Sable de dune (%)*Caoutchouc (%)	0.0058	0.0140	0.41	0.720	44.57
Sable de dune (%)*Poudre de céramique (%)	-0.0181	0.0168	-1.08	0.394	44.57
Caoutchouc (%)*Poudre de céramique (%)	-0.0168	0.0196	-0.86	0.481	44.57

Model Summary

S	R-sq
0.634895	79.27%

Regression Equation

$$\text{Temps d'écoulement (s)} = 1.38 + 0.061 \text{ SD} - 0.008 \text{ GC} + 0.596 \text{ PC} + 0.0058 \text{ SD*GC} - 0.0181 \text{ SD*PC} - 0.0168 \text{ GC*PC} \quad (\text{III.2})$$

III.5.2.3. Interprétation des résultats

Le signe moins (-) indique que les facteurs influent négativement sur les résultats des temps d'écoulement dans l'entonnoir du BSAP. Par contre, le signe plus (+) indique que les facteurs influent positivement sur l'écoulement du béton de sable auto-plaçant.

Par ailleurs, l'augmentant en pourcentage de sable de dune SD dans le BSAP entraîne une augmentation des temps d'écoulement dans l'entonnoir du BSAP.

D'après aussi le modèle de Taguchi qui illustre les interactions existent entre les facteurs expérimentaux qui influent sur le temps d'écoulement dans le BSAP, nous constatons que toutes les interactions (SD×PC et GC×PC) influent négativement sur le temps d'écoulement.

En plus, nous constatons que l'interaction entre le sable de dune et les granulats de caoutchouc (SD×GC) a un effet positif sur le temps d'écoulement dans le BSAP.

III.5.3. La masse volumique à l'état frais du BSAP

Tableau III.5. Résultats des essais de la masse volumique à l'état frais du BSAP.

N°	Formulations	La masse volumique à l'état frais (kg/m ³)
01	SD7 GC6 PC5	2030
02	SD7 GC12 PC10	2015
03	SD7 GC18 PC15	1890
04	SD14 GC6 PC10	2005
05	SD14 GC12 PC15	2015
06	SD14 GC18 PC5	1745
07	SD21 GC6 PC15	2210

08	SD21 GC12 PC5	2105
09	SD21 GC18 PC10	2065

III.5.3.1. Détermination du résultat optimal pour chaque facteur d'essai de la masse volumique à l'état frais Les résultats des essais à l'état durci

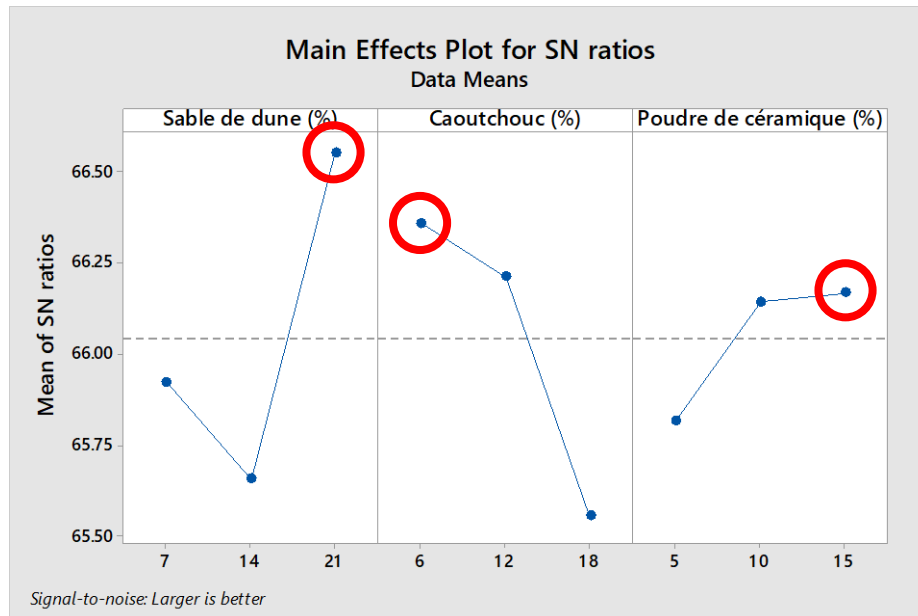


Figure III.3. Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios) d'essai de la masse volumique à l'état frais.

D'après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (Signal to Noise Ratios) représentés dans la figure 3.3, nous constatons que les résultats optimaux pour chaque facteur afin de donner les meilleurs résultats pour la masse volumique à l'état frais du BSAP sont les suivants : la teneur en sable de dune (21%), la teneur en caoutchouc (6%) et la teneur en poudre de céramique (15%).

III.5.3.2. Détermination des coefficients du modèle (masse volumique à l'état frais)

Les coefficients du modèle sont obtenus à l'aide d'une régression multiple en utilisant le logiciel d'analyse statistique MINITAB 18

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	2279	476	4.79	0.041	
Sable de dune (%)	9.4	28.7	0.33	0.774	16.00

Caoutchouc (%)	-42.1	33.5	-1.26	0.335	16.00
Poudre de céramique (%)	-31.7	92.4	-0.34	0.764	84.57
Sable de dune (%) *Caoutchouc (%)	0.12	2.71	0.04	0.969	44.57
Sable de dune (%) *Poudre de céramique (%)	0.55	3.25	0.17	0.881	44.57
Caoutchouc (%) *Poudre de céramique (%)	2.69	3.80	0.71	0.552	44.57

Model Summary

S	R-sq
123.005	77.93%

Regression Equation

$$\text{Masse volumique frais (kg/m}^3\text{)} = 2279 + 9.4 \text{ SD} - 42.1 \text{ GC} - 31.7 \text{ PC} + 0.12 \text{ SD*GC} + 0.55 \text{ SD*PC} + 2.69 \text{ GC*PC} \quad \text{(III.3)}$$

III.5.3.3. Interprétation des résultats

Le signe moins (-) indique que les facteurs influent négativement sur la masse volumique à l'état frais du BSAP. Par contre, le signe plus (+) indique que les facteurs influent positivement sur la masse volumique du béton de sable auto-plaçant.

Par ailleurs, l'augmentant en pourcentage de sable de dune SD, amène à réduire la demande en eau ce qui se traduit par une augmentation de la masse volumique à l'état frais du BSAP.

En plus, un pourcentage élevé de granulats de caoutchouc GC dans les bétons de sable entraîne une réduction de la masse volumique à l'état frais. Cette diminution peut s'expliquer par la faible masse volumique des granulats de caoutchouc utilisés ($M_v=1025 \text{ kg/m}^3$) par rapport à celle du sable remplacé ($M_v=2670 \text{ kg/m}^3$).

En effet, en augmentant de pourcentage poudre de céramique PC, amène à réduire les vides dans les mélanges des mortiers qui deviennent de plus en plus compacts ce qui se traduit par une augmentation de la masse volumique à l'état frais.

D'après aussi le modèle de Taguchi qui illustre les interactions existent entre les facteurs expérimentaux qui influent sur la masse volumique à l'état frais du BSAP, nous constatons que toutes les interactions (SD×GC, SD×PC et GC×PC) influent positivement sur la masse volumique à l'état frais du BSAP.

III.6. Les résultats des essais à l'état durci

III.6.1. Résistance mécanique à la flexion à 07 jours

Tableau III.6. Résultats des essais de la résistance mécanique à la traction par flexion à 07 jours.

N°	Formulations	Résistance à la flexion Rt7 (MPa)
01	SD7 GC6 PC5	3.47
02	SD7 GC12 PC10	2.18
03	SD7 GC18 PC15	3.76
04	SD14 GC6 PC10	2.86
05	SD14 GC12 PC15	2.33
06	SD14 GC18 PC5	3.54
07	SD21 GC6 PC15	3.01
08	SD21 GC12 PC5	2.75
09	SD21 GC18 PC10	2.26

III.6.1.1. Détermination du résultat optimal pour chaque facteur (Rt7)

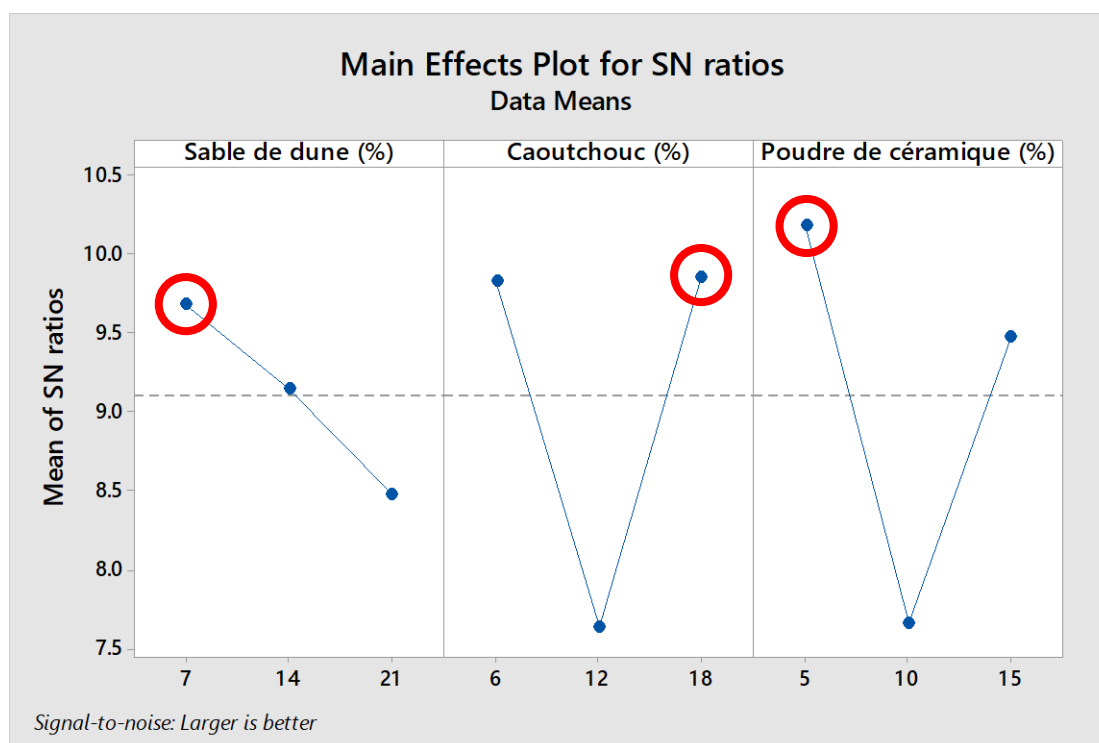


Figure III.4. Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios) d'essai de la résistance mécanique à la traction par flexion à 07 jours.

D'après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (Signal to Noise Ratios) représentés dans la figure 3.4, nous constatons que les résultats optimaux pour chaque facteur afin de donner les meilleurs résultats pour la résistance mécanique à la traction par flexion à 07 jours du BSAP sont les suivants : la teneur en sable de dune (7%), la teneur en caoutchouc (18%) et la teneur en poudre de céramique (5%).

III.6.1.2. Détermination des coefficients du modèle (Rt7)

Les coefficients du modèle sont obtenus à l'aide d'une régression multiple en utilisant le logiciel d'analyse statistique MINITAB 18.

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	4.84	2.20	2.20	0.158	
Sable de dune (%)	0.131	0.132	0.99	0.427	16.00
Caoutchouc (%)	0.209	0.155	1.35	0.309	16.00
Poudre de céramique (%)	-0.805	0.426	-1.89	0.200	84.57
Sable de dune (%)*Caoutchouc (%)	-0.0288	0.0125	-2.30	0.148	44.57
Sable de dune (%)*Poudre de céramique (%)	0.0240	0.0150	1.60	0.251	44.57
Caoutchouc (%)*Poudre de céramique (%)	0.0271	0.0175	1.55	0.262	44.57

Model Summary

S	R-sq
0.567856	76.61%

Regression Equation

$$\begin{aligned} \text{Résist. à la flexion}_7(\text{MPa}) = & 4.84 + 0.131 \text{ SD} + 0.209 \text{ GC} - 0.805 \text{ PC} - 0.0288 \text{ SD*GC} \\ & + 0.0240 \text{ SD*PC} + 0.0271 \text{ GC*PC} \quad \textbf{(III.4)} \end{aligned}$$

III.6.1.3. Interprétation des résultats (Rt7)

Le signe moins (-) indique que les facteurs influent négativement sur la résistance mécanique à la traction par flexion à 7 jours. Par contre, le signe plus (+) indique que les facteurs influent positivement sur la résistance mécanique à la traction par flexion du béton de sable auto-plaçant.

Par ailleurs, l'augmentant en pourcentage de poudre de céramique PC dans le BSAP entraîne une réduction à la résistance mécanique à la traction par flexion à 07 jours dans le BSAP.

D'après aussi le modèle de Taguchi qui illustre les interactions existent entre les facteurs expérimentaux qui influent sur la résistance mécanique à la traction par flexion à 7 jours dans le BSAP, nous constatons que toutes les interactions (SD×PC et GC×PC) influent positivement sur la résistance mécanique à la flexion.

En plus, nous constatons que l'interaction entre le sable de dune et les granulats de caoutchouc (SD×GC) a un effet négatif sur la résistance mécanique à la flexion à 07 jours dans le BSAP.

III.6.2. Résistance mécanique à la compression à 07 jours

Tableau III.7. Résultats des essais de la résistance mécanique à la compression à 07 jours.

N°	Formulations	Résistance à la compression Rc7 (MPa)
01	SD7 GC6 PC5	42.28
02	SD7 GC12 PC10	35.72

03	SD7 GC18 PC15	24.28
04	SD14 GC6 PC10	38.32
05	SD14 GC12 PC15	38.06
06	SD14 GC18 PC5	32.75
07	SD21 GC6 PC15	35.62
08	SD21 GC12 PC5	30.66
09	SD21 GC18 PC10	28.89

III.6.2.1. Détermination du résultat optimal pour chaque facteur (Rc7)

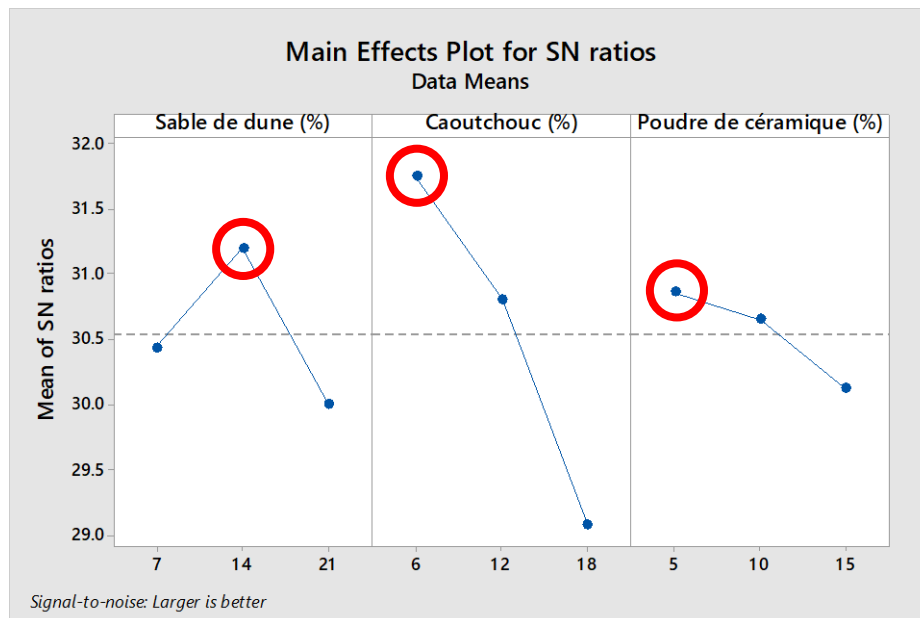


Figure III.5. Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios) d'essai de la résistance mécanique à la compression à 07 jours.

D'après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (Signal to Noise Ratios) représentés dans la figure 3.5, nous constatons que les résultats optimaux pour chaque facteur afin de donner les meilleurs résultats pour la résistance mécanique à la compression à 07 jours du BSAP sont les suivant : la teneur en sable de dune (14%), la teneur en caoutchouc (6%) et la teneur en poudre de céramique (5%).

III.6.2.2. Détermination des coefficients du modèle (Rc7)

Les coefficients du modèle sont obtenus à l'aide d'une régression multiple en utilisant le logiciel d'analyse statistique MINITAB 18.

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	49.1	10.9	4.51	0.046	
Sable de dune (%)	-1.722	0.655	-2.63	0.119	16.00
Caoutchouc (%)	-1.086	0.765	-1.42	0.291	16.00
Poudre de céramique (%)	2.22	2.11	1.05	0.403	84.57
Sable de dune (%)*Caoutchouc (%)	0.1177	0.0619	1.90	0.198	44.57
Sable de dune (%)*Poudre de céramique (%)	-0.0171	0.0743	-0.23	0.839	44.57
Caoutchouc (%)*Poudre de céramique (%)	-0.1454	0.0867	-1.68	0.236	44.57

Model Summary

S	R-sq
2.80968	93.49%

Regression Equation

$$\text{Résist. à la compression}_7(\text{MPa}) = 49.1 - 1.722 \text{ SD} - 1.086 \text{ GC} + 2.22 \text{ PC} + 0.1177 \text{ SD*GC} - 0.0171 \text{ SD*PC} - 0.1454 \text{ GC*PC} \quad (\text{III.5})$$

III.6.2.3. Interprétation des résultats (Rc7)

Le signe moins (-) indique que les facteurs influent négativement sur la résistance mécanique à la compression à 07 jours du BSAP. En plus, en augmentant le pourcentage de sable de dune SD et de granulats de caoutchouc GC, les vides dans les mélanges deviennent de moins en moins compacts, ce qui se traduit par une réduction de la résistance mécanique à la compression à 7 jours dans le BSAP. En plus, les interactions entre le sable de dune SD et de poudre de céramique (SD*PC) et entre le pourcentage de granulats de caoutchouc GC et de poudre de céramique

(GC*PC) influent négativement sur la résistance mécanique à la compression à 7 jours dans le BSAP.

III.6.3. Résistance mécanique à la flexion à 28 jours

Tableau III.8. Résultats des essais de la résistance mécanique à la traction par flexion à 28 jours.

N°	Formulations	Résistance à la flexion Rt28 (MPa)
01	SD7 GC6 PC5	4.98
02	SD7 GC12 PC10	4.56
03	SD7 GC18 PC15	5.38
04	SD14 GC6 PC10	6.17
05	SD14 GC12 PC15	6.26
06	SD14 GC18 PC5	6.49
07	SD21 GC6 PC15	4.74
08	SD21 GC12 PC5	3.89
09	SD21 GC18 PC10	5.60

III.6.3.1. Détermination du résultat optimal pour chaque facteur (Rt28)

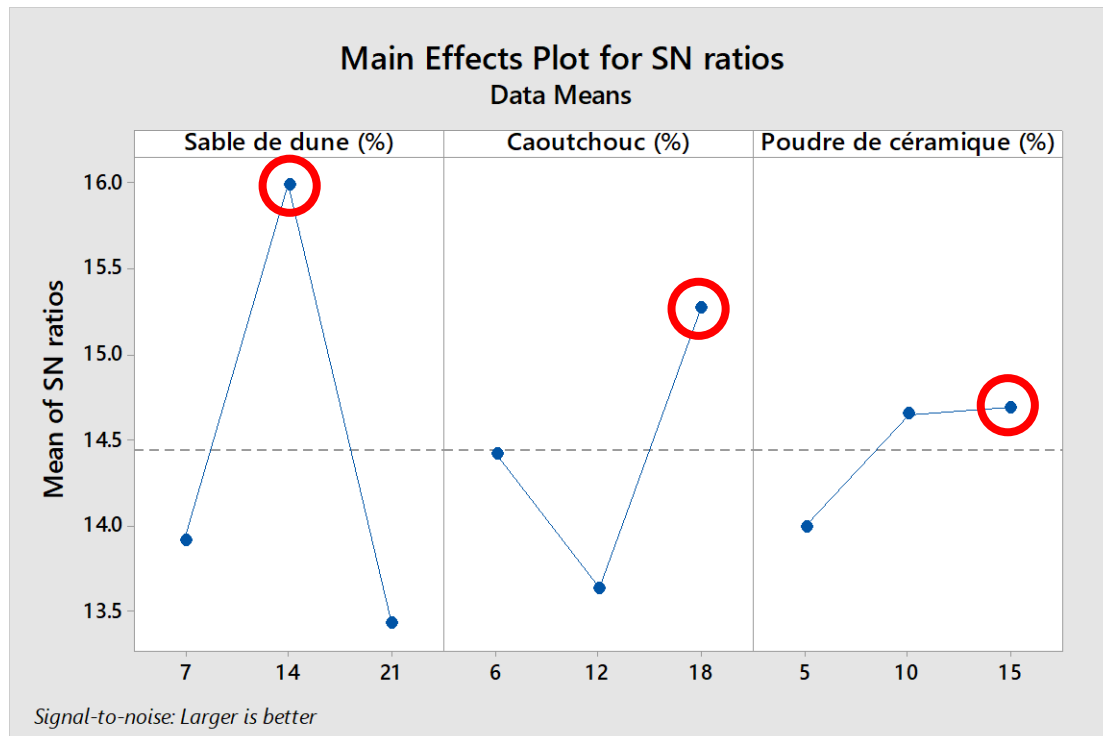


Figure III.6. Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios) d'essai de la résistance mécanique à la traction par flexion à 28 jours

D'après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (Signal to Noise Ratios) représentés dans la figure 3.4, nous constatons que les résultats optimaux pour chaque facteur afin de donner les meilleurs résultats pour la résistance mécanique à la traction par flexion à 28 jours du BSAP sont les suivants : la teneur en sable de dune (14%), la teneur en caoutchouc (18%) et la teneur en poudre de céramique (15%).

III.6.3.2. Détermination des coefficients du modèle (Rt28)

Les coefficients du modèle sont obtenus à l'aide d'une régression multiple en utilisant le logiciel d'analyse statistique MINITAB 18.

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	2.60	2.10	1.24	0.433	
Sable de dune (%)	0.852	0.340	2.51	0.241	118.96
Caoutchouc (%)	-0.032	0.147	-0.22	0.864	16.43
Poudre de céramique (%)	-0.560	0.509	-1.10	0.470	136.43
Sable de dune (%)*Sable de dune (%)	-0.0359	0.0102	-3.52	0.176	85.75
Term	-0.0045	0.0136	-0.33	0.798	59.43
Sable de dune (%)*Poudre de céramique (%)	0.0234	0.0163	1.44	0.387	59.43
Caoutchouc (%)*Poudre de céramique (%)	0.0207	0.0218	0.95	0.517	78.00

Model Summary

S	R-sq
0.533890	95.35%

Regression Equation

$$\text{Résist. à la flexion}_{28}(\text{MPa}) = 2.60 + 0.852 \text{ SD} - 0.032 \text{ GC} - 0.560 \text{ PC} - 0.0359 \text{ SD} * \text{SD} - 0.0045 \text{ SD} * \text{GC} + 0.0234 \text{ SD} * \text{PC} + 0.0207 \text{ GC} * \text{PC} \quad (\text{III.6})$$

III.6.3.3. Interprétation des résultats (Rt28)

Le signe moins (-) indique que les facteurs influent négativement sur la résistance mécanique à la traction par flexion à 28 jours. Par contre, le signe plus (+) indique que les facteurs influent positivement sur la résistance mécanique à la traction par flexion du béton de sable auto-plaçant.

D'après aussi le modèle de Taguchi qui illustre les interactions existent entre les facteurs expérimentaux qui influent sur la résistance mécanique à la traction par flexion à 28 jours dans le BSAP, nous constatons que toutes les interactions (SD×PC et GC×PC) influent positivement sur la résistance mécanique à la flexion.

En plus, nous constatons que l'interaction entre le sable de dune et les granulats de caoutchouc (SD×GC) a un effet négatif sur la résistance mécanique à la flexion à 07 jours dans le BSAP.

III.6.4. Résistance mécanique à la compression à 28 jours

Tableau III.9. Résultats des essais de la résistance mécanique à la compression à 28 jours.

N°	Formulations	Résistance à la compression Rc28 (MPa)
01	SD7 GC6 PC5	52.07
02	SD7 GC12 PC10	38.40
03	SD7 GC18 PC15	32.79
04	SD14 GC6 PC10	47.42
05	SD14 GC12 PC15	43.10
06	SD14 GC18 PC5	41.82
07	SD21 GC6 PC15	48.39
08	SD21 GC12 PC5	42.77
09	SD21 GC18 PC10	39.23

III.6.4.1. Détermination du résultat optimal pour chaque facteur (Rc28)

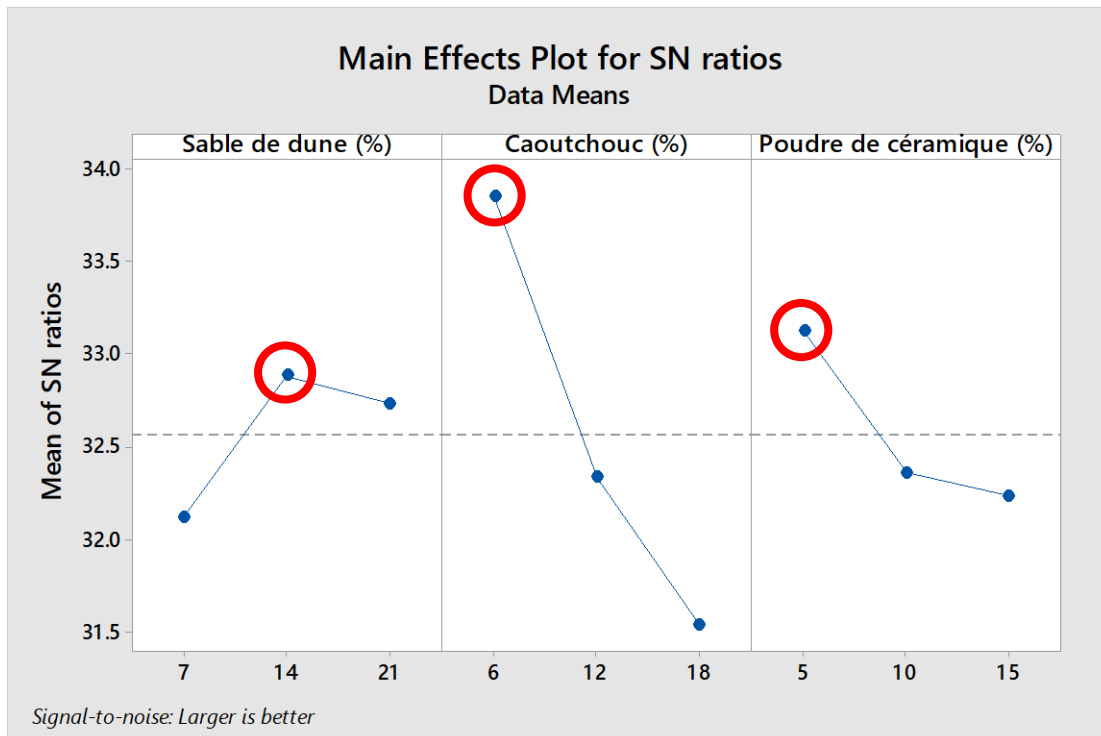


Figure III. 7. Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios) d'essai de la résistance mécanique à la compression à 28 jours.

D'après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (Signal to Noise Ratios) représentés dans la figure 3.4, nous constatons que les résultats optimaux pour chaque facteur afin de donner les meilleurs résultats pour la résistance mécanique à la compression à 07 jours du BSAP sont les suivant : la teneur en sable de dune (14%), la teneur en caoutchouc (6%) et la teneur en poudre de céramique (5%).

III.6.4.2. Détermination des coefficients du modèle (Rc28)

Les coefficients du modèle sont obtenus à l'aide d'une régression multiple en utilisant le logiciel d'analyse statistique MINITAB 18.

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	68.3	11.9	5.74	0.029	
Sable de dune (%)	-0.742	0.718	-1.03	0.410	16.00
Caoutchouc (%)	-0.860	0.837	-1.03	0.413	16.00
Poudre de céramique (%)	-2.11	2.31	-0.91	0.457	84.57
Sable de dune (%)*Caoutchouc (%)	-0.0027	0.0678	-0.04	0.972	44.57
Sable de dune (%)*Poudre de céramique (%)	0.0997	0.0814	1.23	0.345	44.57
Caoutchouc (%)*Poudre de céramique (%)	0.0243	0.0950	0.26	0.822	44.57

Model Summary

S	R-sq
3.07681	93.03%

Regression Equation

$$\text{Résist. à la compression}_{28}(\text{MPa}) = 68.3 - 0.742 \text{ SD} - 0.860 \text{ GC} - 2.11 \text{ PC} - 0.0027 \text{ SD*GC} + 0.0997 \text{ SD*PC} + 0.0243 \text{ GC*PC} \quad (\text{III.7})$$

III.6.4.3. Interprétation des résultats (Rc28)

Le signe moins (-) indique que les facteurs influent négativement sur la résistance mécanique à la compression à 28 jours du BSAP.

Par ailleurs, en augmentant le pourcentage de sable de dune SD, de granulats de caoutchouc GC et de poudre de céramique PC, les vides dans les mélanges deviennent de moins en moins compacts, ce qui se traduit par une réduction de la résistance mécanique à la compression à 28 jours dans le BSAP.

En plus, les interactions entre le sable de dune SD et de poudre de céramique (SD*PC) et entre le pourcentage de granulats de caoutchouc GC et de poudre de céramique (GC*PC) influent positivement sur la résistance mécanique à la compression à 28 jours dans le BSAP.

III.6.5. La masse volumique à l'état durci

Tableau III.10 : Résultats des essais de la masse volumique à l'état durci.

N°	Formulations	La masse volumique à l'état durci (kg/m ³)
01	SD7 GC6 PC5	2121.09
02	SD7 GC12 PC10	2069.74
03	SD7 GC18 PC15	1986.37
04	SD14 GC6 PC5	2122.15
05	SD14 GC12 PC15	1999.12
06	SD14 GC18 PC05	2006.95
07	SD21 GC6 PC15	2042.38
08	SD21 GC12 PC5	2005.86
09	SD21 GC18 PC10	2082.69

III.6.5.1. Détermination du résultat optimal pour chaque facteur (la masse volumique à l'état durci)

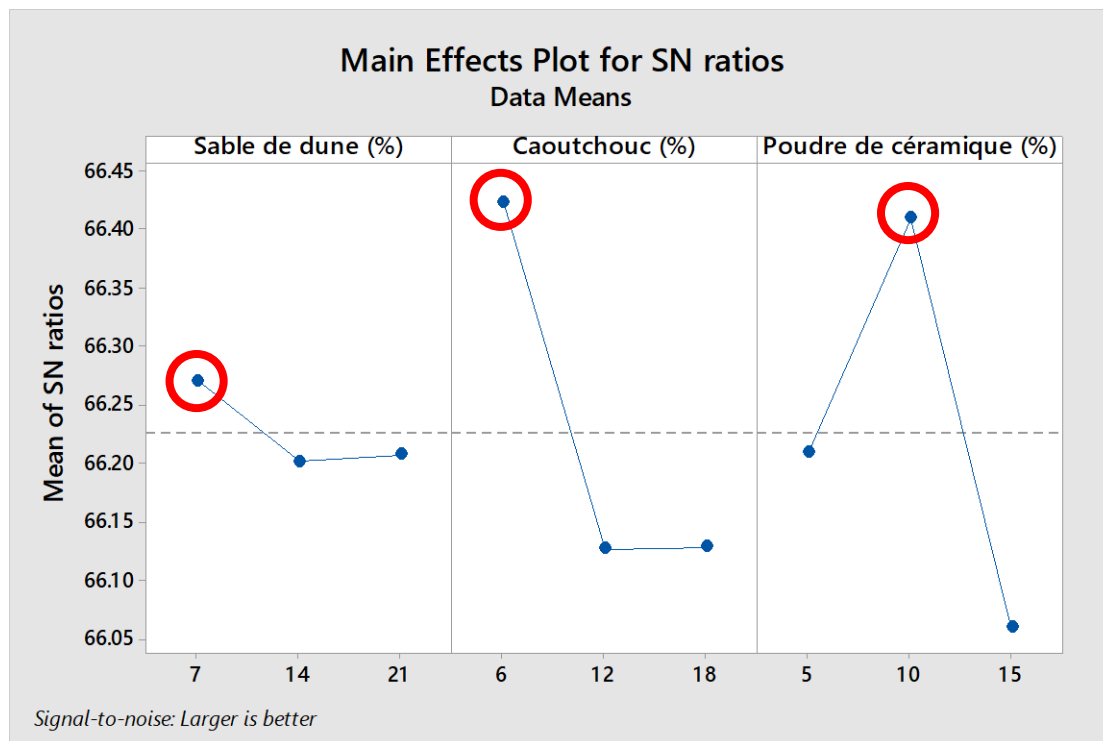


Figure III.8. Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios) d'essai de la masse volumique à l'état durci à 28 jours.

D'après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (Signal to Noise Ratios) représentés dans la figure 3.6, nous constatons que les résultats optimaux pour chaque facteur afin de donner les meilleurs résultats pour la masse volumique à l'état durci à 28 jours du BSAP sont les suivants : la teneur en sable de dune (7%), la teneur en caoutchouc (6%) et la teneur en poudre de céramique (10%).

III.6.5.2. Détermination des coefficients du modèle (la masse volumique à l'état durci)

Les coefficients du modèle sont obtenus à l'aide d'une régression multiple en utilisant le logiciel d'analyse statistique MINITAB 18.

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	2325	221	10.52	0.009	

Sable de dune (%)	-16.6	13.3	-1.25	0.339	16.00
Caoutchouc (%)	-20.2	15.6	-1.30	0.324	16.00
Poudre de céramique (%)	-1.1	42.9	-0.02	0.983	84.57
Sable de dune (%) *Caoutchouc (%)	1.11	1.26	0.88	0.471	44.57
Sable de dune (%) *Poudre de céramique (%)	0.21	1.51	0.14	0.904	44.57
Caoutchouc (%) *Poudre de céramique (%)	-0.06	1.76	-0.03	0.976	44.57

Model Summary

S	R-sq
57.1580	70.56%

Regression Equation

$$\begin{aligned} \text{Masse vol. à l'état durci (kg/m}^3\text{)} &= 2325 - 16.6 \text{ SD} - 20.2 \text{ GC} - 1.1 \text{ PC} + 1.11 \text{ SD*GC} \\ &+ 0.21 \text{ SD*PC} - 0.06 \text{ GC*PC} \quad \textbf{(III.8)} \end{aligned}$$

III.6.5.3. Interprétation des résultats (la masse volumique à l'état durci)

L'augmentant de pourcentage de sable de dune SD, de granulats de caoutchouc GC et de poudre de céramique PC dans le BSAP entraîne une réduction de la masse volumique à l'état durci.

D'après aussi le modèle de Taguchi qui illustre des interactions existent entre les facteurs expérimentaux qui influent sur la masse volumique à l'état durci, nous constatons que l'interaction entre le sable de dune et les granulats de caoutchouc (SD*GC) et entre le sable de dune et de poudre de céramique (SD*PC) influent positivement sur la masse volumique. Par contre, les interactions entre les granulats de caoutchouc et de poudre de céramique (SD*PC) a un effet négatif sur la masse volumique à l'état durci dans le BSAP.



Conclusion

Generale



Conclusion Générale

Cette étude, qui combine des méthodes expérimentales et numériques, s'inscrit dans le cadre de l'utilisation des techniques statistiques dans le domaine des matériaux de génie civil. Elle vise spécifiquement à utiliser les plans d'expériences de Taguchi pour analyser les interactions entre les facteurs étudiés : le pourcentage de sable de dune (SD), le pourcentage de granulats de caoutchouc (GC) et le pourcentage de poudre de céramique (PC), ainsi que leurs concentrations respectives.

La technique de Taguchi, fondée sur un concept expérimental solide, facilite l'identification des facteurs les plus importants pour la consistance et la qualité du béton de sable auto-plaçant, tout en réduisant le nombre d'essais et la durée des expérimentations.

Le développement de modèles mathématiques de prédiction des résultats expérimentaux a permis de mieux comprendre l'influence de différents facteurs sur les caractéristiques du béton de sable auto-plaçant, telles que l'ouvrabilité par les essais d'étalement au mini-cône et l'essai d'écoulement au mini-entonnoir en V (V-Funnel), la masse volumique à l'état frais et à l'état durci, la résistance à la flexion et à la compression à 7 jours et la résistance à la flexion et à la compression à 28 jours. Ces modèles visent à identifier les combinaisons de facteurs optimales offrant les meilleurs résultats pour chacune de ces réponses.

Les modèles mathématiques qui en résultent sont les suivants :

Mini-cône (cm)	=	28.60 - 0.332 SD- 0.054 GC+ 0.506 PC+ 0.0253 SD*GC - 0.0082 SD*PC - 0.0267 GC*PC
Temps d'écoulement (s)	=	1.38 + 0.061 SD- 0.008 GC + 0.596 PC + 0.0058 SD*GC - 0.0181 SD*PC - 0.0168 GC*PC
Masse volumique frais (kg/m ³)	=	2279 + 9.4 SD- 42.1 GC - 31.7 PC + 0.12 SD*GC + 0.55 SD*PC + 2.69 GC*PC
Masse vol. à l'état durci (kg/m ³)	=	2325 - 16.6 SD - 20.2 GC - 1.1 PC + 1.11 SD*GC + 0.21 SD*PC - 0.06 GC*PC
Résist. à la flexion à 7j(MPa)	=	4.84 + 0.131 SD + 0.209 GC - 0.805 PC - 0.0288 SD*GC + 0.0240 SD*PC+ 0.0271 GC*PC
Résist. à la compression à 7j(MPa)	=	49.1 - 1.722 SD - 1.086 GC+ 2.22 PC + 0.1177 SD*GC - 0.0171 SD*PC - 0.1454 GC*PC

$$\begin{aligned} \text{Résist. à la flexion à 28j(MPa)} &= 2.60 + 0.852 \text{ SD} - 0.032 \text{ GC} - 0.560 \text{ PC} - 0.0359 \text{ SD*SD} \\ &\quad - 0.0045 \text{ SD*GC} + 0.0234 \text{ SD *PC} + 0.0207 \text{ GC*PC} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Résist. à la compression à 28j(MPa)} &= 68.3 - 0.742 \text{ SD} - 0.860 \text{ GC} - 2.11 \text{ PC} - 0.0027 \text{ SD*GC} \\ &\quad + 0.0997 \text{ SD*PC} + 0.0243 \text{ GC*PC} \end{aligned}$$

Et les résultats optimaux sont les suivants :

- Les meilleurs résultats pour l'étalement au mini-cône sont les suivants : la teneur en sable de dune (7%), la teneur en caoutchouc (18%) et la teneur en poudre de céramique (10%).
- Les meilleurs résultats pour l'écoulement au mini-entonnoir en V (V-Funnel) sont les suivants : la teneur en sable de dune (7%), la teneur en caoutchouc (6%) et la teneur en poudre de céramique (15%).
- Les meilleurs résultats pour la masse volumique à l'état frais sont les suivants : la teneur en sable de dune (21%), la teneur en caoutchouc (6%) et la teneur en poudre de céramique (15%).
- Les meilleurs résultats pour la masse volumique à l'état durci à 28 jours sont les suivants : la teneur en sable de dune (7%), la teneur en caoutchouc (6%) et la teneur en poudre de céramique (10%).
- Les meilleurs résultats pour la résistance mécanique à la traction par flexion à 7 jours sont les suivants : la teneur en sable de dune (7%), la teneur en caoutchouc (18%) et la teneur en poudre de céramique (5%).
- Les meilleurs résultats pour la résistance mécanique à la compression à 7 jours sont les suivants : la teneur en sable de dune (14%), la teneur en caoutchouc (6%) et la teneur en poudre de céramique (5%).
- Les meilleurs résultats pour la résistance mécanique à la traction par flexion à 28 jours sont les suivants : la teneur en sable de dune (14%), la teneur en caoutchouc (18%) et la teneur en poudre de céramique (15%).
- Les meilleurs résultats pour la résistance mécanique à la compression à 28 jours sont les suivants : la teneur en sable de dune (14%), la teneur en caoutchouc (6%) et la teneur en poudre de céramique (5%).



Références



1. **Dijkema, G. P. J., Reuter, M. A., & Verhoef, E. V. (2000).** A new paradigm for waste management. *Waste Management*, 20(8), 633–638. « [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00052-0](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00052-0) »
2. **Wilson, D. C., Araba, A. O., Chinwah, K., & Cheeseman, C. R. (2009).** Building recycling rates through the informal sector. *Waste Management*, 29(2), 629–635. « <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.06.016> »
3. **Amasuomo, E., & Baird, J. (2016).** The concept of waste and waste management. *Journal of Management and Sustainability*, 6(4), 88–96. « <https://doi.org/10.5539/jms.v6n4p88> »
4. **Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1993).** *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*. McGraw-Hill.
5. **E.L. Robinson Engineering. (2018).** Four recycled materials civil engineers can reuse. Retrieved from « <https://www.elrobinsonengineering.com/insights/four-recycled-materials-civil-engineers-can-reuse> »
6. **MDPI. (2021).** Recycled materials in civil engineering application. Retrieved from « <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/22/7075> »
7. **Volpicelli, G. M. (2016, March 10).** Researchers are turning used tyres into concrete buildings. WIRED. Retrieved from « <https://www.wired.com/story/recycling-tyres-concrete-anagennisi/> »
8. **Hilaris Publisher. (2023).** *Using recycled materials in civil engineering applications*.
9. **Attaining material circularity in recycled construction waste to develop sustainable concrete blocks. (2024).** ScienceDirect. Retrieved from « <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710224020710> »
10. **sabelo B. Somontan Jr., MAX ANGELO DAPITILLA PERIN, 2022.** Developing an Effective Waste Management and Disposal Strategy (ACM:IA-I-RRL-PM-R-A). In Research Project Presentation for Bachelor of Science in Electrical Engineering 3 in CPE 03 – Microprocessor Systems S.Y. 2021-2022, 2nd Semester, Bohol Island State University-Main Campus, Tagbilaran City, Republic of the Philippines. ACM, New York, NY, USA.
11. **Wikipedia contributors. (2025, May 20).** *Recyclage des déchets*. Wikipedia. Retrieved May 20, 2025, from « https://fr.wikipedia.org/wiki/Recyclage_des_d%C3%A9chets »
12. **ESI Business School. (2024, mai 20).** *Les méthodes efficaces de recyclage des déchets*. ESI Business School. « <https://www.esi-business-school.com/ecole/developpementdurable/les-methodes-efficaces-de-recyclage-des-dechets/> »
13. **ESKA. (2020, octobre 27).** *L'importance du recyclage et comment le faire correctement*. ESKA. « <https://eaueska.ca/limportance-du-recyclage-et-comment-le-faire-correctement/> »
14. **ScienceDirect Topics. (2023).** *Natural latex - an overview*. Retrieved from « <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/natural-latex> »
15. **Museum of Fine Arts, Boston. (2022, août 27).** *Caoutchouc*. CAMEO. « <https://cameo.mfa.org/wiki/Caoutchouc> »
16. **WeDressFair. (2018, octobre 24).** *Qu'est-ce que le caoutchouc recyclé ?* WeDressFair. « <https://www.wedressfair.fr/matieres/caoutchouc-recycle> »
17. **CSMO Caoutchouc. (s.d.).** *Les caoutchoucs*. « <https://www.caoutchouc.qc.ca/fr/les-caoutchoucs> »
18. **Les Joints. (2022, février 25).** *L'histoire des caoutchoucs à travers les siècles et ses différentes utilisations*. « <https://les-joints.fr/caoutchoucs/> »
19. **Flextron. (2023, mai 20).** *Different types of rubber: Names, properties, and uses*. Flextron. « <https://flextron.org/blog/different-types-of-rubber-names-properties-uses> »
20. **AV Industrial Products. (2024, août 27).** *Different types of rubber: A complete guide*. AV Industrial Products. « <https://www.avindustrialproducts.co.uk/blog/different-types-of-rubber-a-complete-guide> »
21. **Aquaseal Rubber Ltd. (2024, février 14).** *The different types of synthetic rubber*. « <https://www.aquasealrubber.co.uk/articles/the-different-types-of-synthetic-rubber/> »
22. **Delta Rubber Ltd. (2024, août 1).** *What are the different types of rubber materials? Exploring 10 common rubber sheet materials*. « <https://www.deltarubber.co.uk/different-types-of-rubber-materials.html> »
23. **AirBoss Rubber Solutions. (s.d.).** *Le processus de fabrication du caoutchouc*. « <https://airbossrubbersolutions.com/fr/the-manufacturing-process-of-rubber/> »
24. **Encyclopædia Britannica, Inc. (s.d.).** *How synthetic rubber is made*. Encyclopædia Britannica. « <https://www.britannica.com/technology/synthetic-rubber> »
25. **Wikimedia Foundation. (2024, juillet).** *Tire recycling in the United States*. Wikipédia. « https://en.wikipedia.org/wiki/Tire_recycling_in_the_United_States »
26. **Larousse. (s.d.).** *Céramique*. Dans *Dictionnaire de français Larousse*. Consulté le 20 mai 2025, sur « <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/c%C3%A9ramique/14203> »
27. **Céramicafé Geneviève. (2023, 20 novembre).** *L'histoire de la céramique à travers les âges*. « <https://ceramicafe-genevieve.fr/blogs/blog/lhistoire-de-la-ceramique-a-travers-les-ages> »
28. **Pôle Européen de la Céramique. (s.d.).** *Page d'accueil*. « <https://cerameurop.com/> »

29. **Titre de l'organisme ou de l'auteur (si connu).** (2007, août). *Document de référence sur les meilleures techniques disponibles : Fabrication des céramiques.*
30. **Faquihi, F.** (2015, 30 octobre). *Mini-safari industriel chez les céramistes.* L'Economiste. «https://redac.leconomiste.com/sites/default/files/mini_safari_industriel_chez_les_ceramistes1.pdf»
31. **Kintek Solution.** (2023, 20 février). *De quoi est faite la poudre céramique ? Découvrez sa composition, son traitement et ses applications.* «<https://fr.kindle-tech.com/faqs/what-is-ceramic-powder-made-of>»
32. **DJIBO SOUMANA, S.** (s.d.). *Béton de sable.* UTI Niger. Consulté sur «<https://fr.scribd.com/document/715858186/Beton-de-Sable>»
33. **Bederina, M.** (2007). *Caractérisation mécanique et physique des bétons de sable à base de déchets de bois* (Thèse de doctorat, École Nationale Polytechnique, Algérie). 166 p.
34. **Chihaoui Ramdane.** (2008). *Durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis d'un environnement chimiquement agressif* (Mémoire de magister, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed-Boudiaf d'Oran – USTMB, Algérie).
35. **Boualleg Saida.** (2004). *Effet des milieux agressifs sur les caractéristiques de durabilité des bétons et des matrices cimentaires* (Mémoire de magister, Université Mohamed Boudiaf de M'sila, Algérie).
36. **Azzouz Hocine.** (2009). *Étude des bétons à base des sables de dune* (Mémoire de magister, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie).
37. **SABLOCRETE.** (1994). *Béton de sable.* Paris, France : Presse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
38. **Boukerrou MOHAMED.** (2012). *Étude des propriétés rhéologiques et physico-mécaniques du béton de sable avec référence particulière au sable de dune* (Mémoire, Faculté de Génie Civil, Université Houari Boumediene, Alger, Algérie).
39. **Ministère des Affaires étrangères du Japon.** (s.d.). *Loi n° 28-00 relative à la gestion des déchets et à leur élimination.* «<https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/files/000151394.pdf>»
40. **CIMBÉTON & SPECBEA.** (2009). *Chaussées composites en béton de ciment – Tome 1 : Structures neuves en BAC collé sur GB – Guide de dimensionnement.* «<https://www.infociments.fr/sites/default/files/article/fichier/CT-T65.pdf>»
41. **Alyhya, W. S.** (2016). *Self-compacting concrete: mix proportioning, properties and its flow simulation in the V-funnel* (Thèse de doctorat, Université de Cardiff). Disponible sur «<https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/98678/>»
42. **Thauvin, B., & Menguy, M.** (2008). *Guide d'utilisation du béton en site maritime.* Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales (CETMEF)
43. **Okamura, H., & Ozawa, K.** (1994). *Mix design method for self-compacting concrete.* *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(1), 5–15.
44. **Dr.Ziane Sami.** (2023). *Matériaux innovants* (Chapitre III : Nouveaux matériaux). Centre Universitaire Abd-Elhafid Boussof – Mila. Master 1 Structure, année universitaire 2022/2023.
45. **American Concrete Institute (ACI).** (2003). *Processes, Self-Compacting Concrete.* Dans *Advanced Concrete Technology III* (pp. 203.9/3). Butterworth-Heinemann.
46. **Dupain, R., Lanchon, R., & Saint-Arroman, J. C.** (2000). *Granulats, sols, ciments et bétons.* Éditions Eyrolles.
47. **Boukendakdji, O.** (2010). *Étude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton auto-plaçant : Optimisation des conditions opératoires* (Thèse de doctorat, Université Saad Dahleb de Blida, Algérie)
48. **T. Noguchi, S.G Oh, F. Tomosawa,** Rheological approach to passing ability between reinforcing bars of self-compacting concrete, *Proceedings of the first International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete.* Stockholm, suède, pp. 59-70, 1999.
49. **Klug, Y., & Holschemacher, K.** (2003). *Comparison of the hardened properties of self-compacting and normal vibrated concrete.* In *3rd International Symposium on Self Compacting Concrete* (pp. 596–605). Reykjavik, Iceland.
50. **Gram, H. E., & Piiparinen, P.** (1999). *Properties of SCC – Especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance.* In *Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete* (pp. 211–225). Stockholm, Sweden.
51. **Turcry, P.** (2004). *Retrait et fissuration des bétons autoplaçants - Influence de la formulation* (Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes, 213 pages).
52. **Khayat, K. H.** (1999). *Workability, testing, and performance of self-consolidating concrete.* *ACI Materials Journal*, 96(3), 346–353.
53. **Lootens Didier.** (année non précisée). *Ciments et suspensions concentrées modèles. Écoulement, encombrement et floculation* (Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie).
54. **Turcry Philippe.** (2004). *Retrait et fissuration des bétons autoplaçants : influence de la formulation* (Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes, France).

55. **Bouhbel, F., & Seghir, L.** (2020). *Calage du modèle de Mohr-Coulomb à partir de l'essai à la boîte de cisaillement, en utilisant la méthode d'optimisation de Taguchi* (Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 de Guelma, Algérie). [«https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/10121/1/BOUHBEL_FOUAD_G%C3%A9nie%20civil.._G%C3%A9notec_hnique.pdf»](https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/10121/1/BOUHBEL_FOUAD_G%C3%A9nie%20civil.._G%C3%A9notec_hnique.pdf)
56. **Khezazna, A., Houamdi, M., & Ahmedsalah, M.** (2024). *Valorisation et optimisation de sable de dune et de poudre de céramique dans le mortier de ciment par l'application de la méthode des plans d'expériences* (Mémoire de Master, Université Hamma Lakhdar d'El Oued, Algérie).
57. **Ouarglim Yaz, A.** (2019). *L'influence de déchet de gravier sur les caractéristiques physico-mécaniques d'une brique à base du sable de dunes et copeaux de bois* (Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie).
58. **AFNOR.** (1990). *NF P 18-560 : Analyse granulométrique* (Norme française). Association Française de Normalisation.
59. **AFNOR.** (1991). *NF P 18-598 : Équivalent de sable* (Norme française). Association Française de Normalisation.



Annexes



50kg

Mokaouem

مقاوم بلوس Plus

ALGÉRIE





Ciment Portland

Résistant aux sulfates

NA 442 - CEM I 42,5 N-SR 3

Mokaouem est un ciment gris résistant aux sulfates, résultat de la mouture d'un clinker contenant un faible taux d'aluminates de calcium avec une proportion de gypse inférieure à celle d'un ciment portland composé.

Mokaouem

NA 442 - CEM I 42,5 N-SR3

Mokaouem NA 442 -CEM I 42,5 N-SR3 selon la NA 442 v 2013 et la EN 197-1II est conforme à la norme nationale NA 442 v 2013 et à la norme Européenne EN 197-1 avec un taux en C3A < 3%.

AVANTAGES PRODUIT



- Tout en étant un ciment de haute performance, **Mokaouem** protège la structure contre les agressions chimiques de l'environnement externe.
- Une meilleure durabilité pour les structures en béton.
- Une faible chaleur d'hydratation.

MEMBRE DE
HOLCIM

APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Les fondations et les structures à réaliser dans un milieu agressif
- Les travaux maritimes
- Les stations de dessalement et d'épuration
- Les travaux hydrauliques
- Les barrages et les digues de soutènement collinaire



FORMULATION CONSEILLÉE

	Ciment 	Sable (sec) 	Gravillons (sec) 	Eau (litres) 
Dosage pour béton C25/30	X 1 	+ X7 	+ X5  + X4 	+ 25 L

Remarque: un bidon = 10 Litres

Formulation de béton à suivre dans le cas de l'absence d'une étude délivrée par un laboratoire"

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

• Analyses chimiques

	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	0,5 à 3 %
Teneur en sulfates (SO ₃) (%)	1,8 à 3
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1,2 à 3
Teneur en Chlorures (NA5042) (%)	< 0,1

• Temps de prise à 20° (NA 230)

	Valeur
Début de prise (min)	> 60
Fin de prise (min)	240 à 400

• Composition minéralogique

	Valeur
Taux d'aluminate C3A	<3.0%

• Résistance à la compression

	Valeur
2 jours (MPa)	≥10
28 jours (MPa)	≥42.5

• Propriétés physiques

	Valeur
Consistance Normale (%)	25 à 28
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	3200 à 3800
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1000
Expansion (mm)	≤2,0
Chaleur d'hydratation	<270j/g

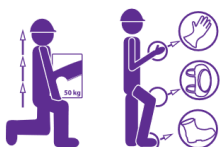
Ces valeurs sont données à titre indicatif et ne peuvent être considérées comme absolues

CONSIGNES DE SÉCURITÉ

1- **PROTÉGEZ VOTRE PEAU** : Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.

2- **MANUTENTION** : levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.

MEMBRE DE
HOLCIM



Conditionnement:  / 

LAFARGE ALGÉRIE

Bureau n°02, 16ème étage, tour Geneva,
les Pins maritimes, Mohammadia, Alger.
tél: + 213 (0) 21 98 54 54
Fax: + 213 (0) 23 92 42 94
www.lafargealgerie.com
dz.satisfaction-clients@lafargeholcim.com
Tél: 021 98 55 55





NOTICE PRODUIT

Sika® ViscoCrete® TEMPO-12

Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.

INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.

DOMAINES D'APPLICATION

- Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplacants transportés sur de longues distances et pompés.
- Dans les bétons autoplacants, Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.

CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- longue rhéologie (>2h),
- robustesse à la ségrégation,
- qualité de parement.

AGRÈMENTS / NORMES

Marquage CE et NF selon la norme NF EN 934-2 tab 3.1 et 3.2.

PV CNERIB : DTEM/108/2017

DESCRIPTION DU PRODUIT

Conditionnement	▪ Fût de 230 kg ▪ Cubi de 1100 kg ▪ Vrac
Aspect / Couleur	Liquide brun clair à foncé
Durée de Conservation	12 mois dans son emballage d'origine intact.
Conditions de Stockage	A l'abri du gel. En cas de gel accidentel, le produit retrouve ses qualités d'origine une fois dégelé lentement et réhomogénéisé.
Densité	1,06 ± 0,01
Valeur pH	4,5 ± 1,0
Teneur Totale en Ions Chlorure	≤ 0,1 %
Équivalent Oxyde de Sodium	≤ 1 %

Notice produit
Sika® ViscoCrete® TEMPO-12
Septembre 2021, Version 01.02
021301011000000110

RENSEIGNEMENTS SUR L'APPLICATION

Dosage

Plage de dosage : 0,2 à 3,0% du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.

Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1,5 % du poids du ciment ou du liant.

VALEURS DE BASE

Toutes les valeurs indiquées dans cette Notice Produit sont basées sur des essais effectués en laboratoire. Les valeurs effectives mesurées peuvent varier du fait de circonstances indépendantes de notre contrôle.

ÉCOLOGIE, SANTÉ ET SÉCURITÉ

Pour obtenir des informations et des conseils sur la manipulation, le stockage et l'élimination en toute sécurité des produits chimiques, les utilisateurs doivent consulter la fiche de données de sécurité (FDS) la plus récente contenant les données physiques, écologiques, toxicologiques et autres données relatives à la sécurité.

aucune garantie de conformité à un usage particulier, ni aucune responsabilité découlant de quelque relation juridique que ce soit. L'utilisateur du produit doit vérifier par un essai sur site l'adaptation du produit à l'application et à l'objectif envisagés. Sika se réserve le droit de modifier les propriétés de ses produits. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont soumises à nos conditions générales de vente et de livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la Notice Produit correspondant au produit concerné, accessible sur internet ou qui leur sera remise sur demande.

INSTRUCTIONS POUR L'APPLICATION

Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

RESTRICTIONS LOCALES

Veuillez noter que du fait de réglementations locales spécifiques, les données déclarées pour ce produit peuvent varier d'un pays à l'autre. Veuillez consulter la Notice Produit locale pour les données exactes sur le produit.

INFORMATIONS LÉGALES

Les informations, et en particulier les recommandations concernant les modalités d'application et d'utilisation finale des produits Sika sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que Sika a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales, conformément aux recommandations de Sika. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou recommandations écrites, ou autre conseil donné, n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés, ni

Sika El Djazair SPA
08 route de Larbaa
16111 Les Eucalyptus
ALGERIE
Tél.: 0 21 50 16 92 à 95
Fax: 0 21 50 22 08
dza.sika.com



Notice produit
Sika® ViscoCrete® TEMPO-12
Septembre 2021, Version 01.02
021301011000000110

SikaViscoCreteTEMPO-12-fr-DZ-(09-2021)-1-2.pdf