



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 Génie Civil



Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Filière
Génie Civil

Présenté par

Houideg Ahmed & Ramdani Adel

Optimisation de l'effet de l'ajout de sable de dune,
de déchets de céramique et de poudre de marbre sur
les propriétés mécaniques du mortier auto-plaçant

Soutenue le : 28/05/2025

Devant les membres de jury :

Khelaifa Hamed	Président	Dr.	University El Oued
Hachem Rafika	Examineur	Dr.	University El Oued
Kaab Mohamed Zohair	Encadreur	Dr.	University El Oued
Soulimane Ilyes	Co-encadreur	Dr.	University El Oued

Année universitaire : 2024-2025

Résumé

Le secteur de la construction s'efforce de trouver des solutions innovantes pour valoriser les déchets industriels et naturels dans les matériaux de construction, en raison des problèmes environnementaux et de la raréfaction des ressources naturelles. Cette étude consiste à mettre en œuvre les plans d'expériences de la technique de Taguchi afin de déterminer les résultats optimaux et d'examiner les différentes interactions entre les facteurs choisis (sable de dune à 8%, 16% et 24% ; déchets de céramique à 4%, 8% et 12% ; et poudre de marbre à 5%, 10% et 15%) ainsi que l'étude de leur impact sur les propriétés mécaniques du mortier auto-plaçant (MAP).

L'étude porte sur la substitution partielle du ciment et du sable alluvionnaire par ces éléments, en examinant leur impact sur l'ouvrabilité, ainsi que sur la résistance à la traction et à la compression après 7 et 28 jours. On peut aussi exploiter ces résultats à l'aide de la méthode Taguchi pour élaborer des modèles mathématiques prédictifs, afin de saisir les facteurs majeurs qui contrôlent le comportement mécanique du mortier auto-plaçant.

Mots clés : Mortier auto-plaçant, Sables de dune, Déchets de céramique, Poudre de marbre, Méthode de Taguchi, Optimisation.

Abstract

The construction industry is striving to find innovative solutions to recycle industrial and natural waste into building materials, due to environmental problems and the scarcity of natural resources. This study involves implementing the Taguchi technique's experimental designs to determine optimal results and examine the various interactions between the selected factors (8%, 16%, and 24% dune sand; 4%, 8%, and 12% ceramic waste; and 5%, 10%, and 15% marble powder), as well as studying their impact on the mechanical properties of self-compacting mortar (SCM). The study focuses on the partial substitution of cement and alluvial sand with these elements, examining their impact on workability, as well as tensile and compressive strength after 7 and 28 days. These results can also be used to develop predictive mathematical models using the Taguchi method to capture the major factors controlling the mechanical behavior of self-compacting mortar. Keywords : Self-compacting mortar, Dune sand, Ceramic waste, Marble powder, Taguchi method, Optimization.

ملخص

يسعى قطاع البناء إلى إيجاد حلول مبتكرة لإعادة تدوير النفايات الصناعية والطبيعية وتحويلها إلى مواد بناء، وذلك بسبب المشاكل البيئية وندرة الموارد الطبيعية. تتضمن هذه الدراسة تنفيذ التصاميم التجريبية لتقنية تاجوتشي من أجل تحديد النتائج المثلى وفحص التفاعلات المختلفة بين العوامل المختارة (رمل الكثبان بنسبة 8% و 16% و 24% ؛ النفايات الخزفية بنسبة 4% و 8% و 12% ؛ ومسحوق الرخام بنسبة 5% و 10% و 15%) وكذلك دراسة تأثيرها على الخصائص الميكانيكية للملاط الذاتي (MAP). تركز الدراسة على الاستبدال الجزئي للأسمنت والرمل الرسوبي بهذه العناصر، ودراسة تأثيرها على قابلية التشغيل، وكذلك على قوة الشد والضغط بعد 7 و 28 يوماً. يمكن أيضاً استخدام هذه النتائج باستخدام طريقة تاجوتشي لتطوير نماذج رياضية تنبؤية من أجل فهم العوامل الرئيسية التي تتحكم في السلوك الميكانيكي للملاط ذاتي الصب.

الكلمات المفتاحية: ملاط ذاتي الدمك ، رمال الكثبان ، النفايات الخزفية ، مسحوق الرخام، طريقة تاجوتشي ، أمثلة.

Dédicace

“

*First, thank God for his blessings, I dedicate this work to
the most precious people in my life, my MOTHER and
FATHER. Thank you for all the support you gave me. To
my dear brother, to my dear sisters, to all my family, to
my dear friends and all my closest friends*

”

Remerciement

“

Praise be to God, a lot of thanks and blessings on the occasion of completing my studies at the master's level at University of Echahid Hamma Lakhdar University El Oued Algeria.

We extend our sincere thanks and appreciation of the Head of Department of Department of Process Engineering & Petrochemistry Dissertation.

I would like thank supervisor Kaab Mohamed Zohair for her framing and accompanying us. We also thank the board of examiners : President Mr. Khelaifa Hamed, and Examiner Mr. Hachem Rafika for their acceptance to judge our work.

”

Table des matières

Résumé	i
Dédicace	iv
Remerciement	v
Table des figures	xi
Liste des tableaux	xiii
Liste des sigles et acronymes	xiv
Introduction générale	1
I Synthèse bibliographique	2
I.1 Introduction	2
I.2 Recyclage	2
I.2.1 L'Importance du recyclage	3
I.2.2 Types de recyclage	3
I.2.2.1 Recyclage mécanique	3
I.2.2.2 Recyclage chimique	3
I.2.2.3 Recyclage organique	3
I.3 Valorisation des déchets en Algérie	4
I.3.1 Source de déchets	4
I.4 Valorisation des déchets en génie civil	4
I.5 Céramique et les déchets de céramique (DC)	5
I.5.1 Céramique	5
I.5.1.1 Types de céramiques	5
I.5.1.2 Céramiques techniques avancées	6

I.5.1.3	Les déchets céramiques (DC)	6
I.5.1.4	Utilisation des déchets céramiques comme matières premières dans le mortier	7
I.6	Marbre et poudre de marbre (MP)	8
I.6.1	Définition	8
I.6.2	Types de marbre	9
I.6.3	Utilisations du marbre :	9
I.6.4	Poudre de marbre :	10
I.6.4.1	Les applications de la poudre de marbre dans le secteur de la construction comprennent :	10
I.7	Sable de Dune	11
I.7.1	Propriétés physiques et chimiques du sable de dune	11
I.7.2	Utilisations dans le secteur de la construction	12
I.7.3	Recherches antérieures sur ses utilisations	12
I.7.4	Avantages environnementaux	13
I.8	Sable Alluvionnaire	13
I.8.1	Propriétés techniques	13
I.8.2	Ses applications en génie civil :	14
I.8.3	Situation en Algérie :	14
I.9	Méthodes de préparation du 'BAP'	14
I.9.1	Méthode Japonaise	14
I.9.2	Méthode Suédoise	15
I.9.3	Méthode dite Française (LCPC)	15
I.9.4	Méthode basée sur l'optimisation du volume de la pâte	16
I.9.5	Méthode taguchi	16
I.10	Les mortiers et le mortier auto-plaçant	17
I.10.1	Définition du mortier de ciment	17
I.10.2	Étymologie des mortiers	17
I.10.3	Constituants des mortiers	18
I.10.3.1	Ciment	18
I.10.3.2	Sable	18
I.10.3.3	Eau	19
I.10.3.4	Additifs minéraux	19
I.10.3.5	Différents types de mortier :	20

I.11	Mortier Autoplaçant (MAP)	20
I.12	Utilisations et applications	21
I.13	Données techniques	21
I.14	Essais de caractérisation du mortier	21
I.15	Essais de resistance mécanique	21

II Matériaux et procédures expérimentales 23

II.1	Introduction	23
II.2	Matériaux utilisés	23
II.2.1	Sable	23
II.2.2	Caractéristiques physiques	24
II.2.2.1	Masse volumique absolue	24
II.2.2.2	Masse volumique apparente	25
II.2.2.3	Analyse granulométrique	26
II.2.2.4	Module de finesse	27
II.2.3	Équivalent sable	28
II.2.3.1	Synthèse des résultats :	29
II.3	Les déchets céramiques (DC)	30
II.4	Poudre de marbre (MP)	31
II.5	Eau de gâchage	33
II.6	Adjuvant (Superplastifiants)	33
II.7	Formulation	34
II.7.1	Formulation du mortier auto-plaçant avec SD , DC et PM	34
II.7.2	Applications la méthode de Taguchi	35
II.7.3	Composition de mortier auto-plaçant	36
II.7.4	Procédure expérimentale	36
II.7.4.1	Fabrication du mortier auto-plaçant	36
II.7.5	Malaxages composants du mortier auto-plaçant (MAP)	38
II.7.6	Préparation des éprouvettes	39
II.8	Les essais réalisés	40
II.8.1	Essais réalisés à l'état frais	40
II.8.1.1	L'étalement mini Cône	40
II.8.1.2	Ecoulement à l'entonnoir en V-FUNNEL	40
II.8.1.3	Détermination de la masse volumique	41

II.8.2	Essais réalisés à l'état durci	42
II.8.2.1	Essais de la masse volumique	42
II.8.2.2	Essai de traction par flexion	43
II.8.2.3	Essai de compression	44
III	Analyse et discussion des résultats	46
III.1	Introduction	46
III.2	Facteurs	46
III.3	Niveaux des facteurs	46
III.4	Choix de la matrice de Taguchi pour notre étude	47
III.5	Les résultats des essais à l'état frais	48
III.5.1	Etalement au mini-cône	48
III.5.1.1	Détermination de la résultat optimal pour chaque facteur	48
III.5.1.2	Détermination des coefficients du modèle	49
III.5.1.3	Interprétation des résultats	49
III.5.2	Essai d'écoulement au mini-entonnoir en V (V-Funnel)	50
III.5.2.1	Détermination du résultat optimal pour chaque facteur d'essai d'écoulement au mini-entonnoir en V	51
III.5.2.2	Détermination des coefficients du modèle (V-Funnel) : . .	51
III.5.2.3	Interprétation des résultats	52
III.5.3	La masse volumique à l'état frais du MAP :	53
III.5.3.1	Détermination du résultat optimal pour chaque facteur d'essai de la masse volumique à l'état frais	53
III.5.3.2	Détermination des coefficients du modèle (masse volu- mique à l'état frais) :	54
III.5.3.3	Interprétation des résultats	54
III.6	Les résultats des essais à l'état durci	55
III.6.1	Résistance mécanique à la flexion à 07 jours	55
III.6.1.1	Détermination du résultat optimal pour chaque facteur (Rt7)	56
III.6.1.2	Détermination des coefficients du modèle (Rt7) :	56
III.6.1.3	Interprétation des résultats (Rt7) :	57
III.6.2	Résistance mécanique à la compression à 07 jours	58

III.6.2.1	Détermination du résultat optimal pour chaque facteur (Rc7) :	58
III.6.2.2	Détermination des coefficients du modèle (Rc7) :	59
III.6.2.3	Interprétation des résultats (Rc7)	59
III.6.3	Résistance mécanique à la flexion à 28 jours	60
III.6.3.1	Détermination du résultat optimal pour chaque facteur (Rt28) :	61
III.6.3.2	Détermination des coefficients du modèle (Rt28) :	61
III.6.3.3	Interprétation des résultats (Rt28)	62
III.6.4	Résistance mécanique à la compression à 28 jours :	63
III.6.4.1	Détermination à du résultat optimal pour chaque facteur (Rc28) :	63
III.6.4.2	Détermination des coefficients du modèle (Rc28) :	64
III.6.4.3	Interprétation des résultats (Rc28) :	64
III.6.5	La masse volumique à l'état durci :	65
III.6.5.1	Détermination de la résultat optimal pour chaque facteur (la masse volumique à l'état durci)	66
III.6.5.2	Détermination des coefficients du modèle (la masse volumique à l'état durci) :	66
III.6.5.3	Interprétation des résultats (la masse volumique à l'état durci) :	67
Conclusion Générale		68
Bibliographie		71
Annexe 1		75
Annexe 2		78

Table des figures

I.1	Recyclage	3
I.2	Déchets céramique	7
I.3	Déchets marbre	8
I.4	Sable de dune	11
II.1	sable de dune (SD)	24
II.2	sable alluvionnaire (SA)	24
II.3	Masse volumique absolue	25
II.4	Masse volumique apparente	26
II.5	Graphique montrant l'analyse granulaire des granulés de sable et de caou- tchouc	27
II.6	Étapes de calcul de l'équivalent en sable.	29
II.7	déchets céramiques (DC)	30
II.8	Poudre de marbre	31
II.9	Ciment utilisé	32
II.10	Super plastifiant	34
II.11	Poudre de marbre	37
II.12	Sable alluvionnaire	37
II.13	Sable de dune	37
II.14	Ciment	37
II.15	Super plastifiant	37
II.16	Dechets ceramique	37
II.17	Séquence de mélange pour béton de mortier auto-plaçant	38
II.18	Matériaux utilisés secs	38
II.19	Mélanger le mélange de suspension auto-compactant avec un mélangeur automatique	39

II.20 Moule des éprouvettes utilisés	39
II.21 Essai d'étalement au mini cône	40
II.22 Test de l'entonnoir en V pour le béton de sable	40
II.23 Détermination de la masse volumique	42
II.24 Séchage des échantillons	43
II.25 ciment compression machine	44
II.26 Essai de traction par flexion	44
II.27 Essai de compression	45
III.1 Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios) des essais d'étalement au mini-cône	48
III.2 Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios) des essais d'écoulement au mini-entonnoir en V	51
III.3 Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios) d'essai de la masse volumique à l'état frais.	53
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.	56
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	58
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.	61
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	63
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.	66

Liste des tableaux

II.1	Préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les bétons	29
II.2	Caractéristiques physiques du sable	30
II.3	Caractéristiques physiques de déchets de céramique ($< 1\text{mm}$)	31
II.4	Caractéristiques physiques de poudre de marbre	32
II.5	Analyses chimiques	32
II.6	Composition minéralogique.	33
II.7	Propriétés physiques	33
II.8	Résistance à la compression	33
II.9	La matrice des effets selon la méthode de Taguchi $L9(3^3)$	35
II.10	Compositions des mélanges à base de liant binaire (en masse pour 1m^3) . .	36
III.1	Les facteurs et les niveaux ciblés	46
III.2	La matrice expérimentale des effets selon la méthode Taguchi.	47
III.3	Résultats des essais d'étalement du MAP au mini-cône.	48
III.4	Résultats des temps d'écoulement dans l'entonnoir du MAP.	50
III.5	Résultats des essais de la masse volumique à l'état frais du MAP	53
III.6	Résultats des essais de la résistance mécanique à la traction par flexion à 07 jours	55
III.7	Résultats des essais de la résistance mécanique à la compression à 07 jours	58
III.8		59
III.9	Résultats des essais de la résistance mécanique à la traction par flexion à 28 jours	60
III.10	Résultats des essais de la résistance mécanique à la compression à 28 jours.	63
III.11	Résultats des essais de la masse volumique à l'état durci	65

Liste des sigles et acronymes

MAP	Mortier Auto-plaçant
SA	Sable Alluvionnaire
SD	Sable de dune
DC	Déchets des céramiques
PM	Poudre de morbre

Introduction générale

Le secteur de la construction est un pilier essentiel du développement durable dans un contexte mondial caractérisé par une urbanisation croissante et une demande croissante en infrastructures. L'utilisation intensive de ressources naturelles, comme le sable de carrière, engendre d'importants problèmes environnementaux, notamment en termes de raréfaction des matières premières et de dégradation des écosystèmes. Trouver des solutions alternatives est devenu crucial pour relever ces défis. Le sable des dunes, abondant dans les régions désertiques, est un matériau facilement disponible et prometteur. De plus, l'industrie des matériaux de construction offre d'importantes opportunités pour la gestion des déchets industriels, notamment des déchets de fabrication tels que la poudre de marbre et les déchets de céramique.

L'ajout de ces composants aux formulations de mortier auto-plaçant représente donc une stratégie technique, financière et environnementale. Cependant, l'impact de ces matériaux alternatifs sur les propriétés mécaniques et physiques du mortier auto-plaçant (MAP) doit être soigneusement évalué avant leur ajout. Pour optimiser les proportions et comprendre les interactions entre les différents composants, une approche scientifique est essentielle. Dans ce contexte, l'application de la méthode Taguchi est cruciale. Il s'agit d'une technique statistique efficace pour améliorer la qualité, réduire les coûts expérimentaux, faciliter la planification des essais, analyser les résultats et identifier les facteurs d'influence. Pour produire un mortier auto-plaçant, cette étude vise à maximiser l'utilisation de sable de dune, de déchets céramiques et de sable concassé. Elle vise à répondre à plusieurs questions : l'efficacité du mortier auto-plaçant peut-elle être maintenue tout en remplaçant partiellement ces matériaux par des composants conventionnels ? Quels sont les effets combinés de leurs proportions sur les propriétés du mélange final ? Et comment déterminer avec précision la composition optimale pour garantir durabilité, longévité et coût raisonnable ? Notre étude s'est appuyée sur une méthodologie expérimentale combinant modélisation statistique et essais en laboratoire pour répondre à ces questions

Chapitre I

Synthèse bibliographique

I.1 Introduction

L'épuisement des ressources naturelles et les difficultés auxquelles nous sommes confrontés les nouveaux métiers nécessitent de trouver d'autres sources d'approvisionnement. Le recyclage et la valorisation des déchets constituent aujourd'hui une solution prometteuse pour combler le fossé entre la production et la consommation, tout en contribuant à protection de l'environnement [1]. L'objectif principal de cette étude est de mettre en évidence sur la possibilité d'utiliser les déchets dans fabrication de mortier auto-plaçant.

I.2 Recyclage

Le génie civil joue un rôle essentiel dans la mise en œuvre des techniques de recyclage, notamment dans le secteur de la construction. L'industrie de la construction et de la démolition produit d'énormes quantités de déchets, tels que le béton, les briques, le verre et les métaux, qui peuvent être recyclés et utilisés comme matières premières pour de nouveaux projets, tels que les routes et les infrastructures [1][2]. Ces pratiques contribuent à réduire l'épuisement des ressources naturelles, à diminuer les émissions de carbone et à soutenir l'économie circulaire. Elles contribuent également à atteindre les objectifs de durabilité environnementale et à répondre à la croissance démographique de manière plus respectueuse de l'environnement [1] [3]. Le génie civil moderne s'appuie de plus en plus sur le recyclage pour développer des matériaux de construction durables et réduire l'impact environnemental du secteur de la construction [1].



Figure I.1 – Recyclage

I.2.1 L'Importance du recyclage

Environnemental : Réduire la consommation de ressources naturelles (comme les minéraux, les arbres et l'eau) et réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Économique : Créer des emplois dans les secteurs du recyclage et de la fabrication, et réduire le coût des matières premières.

Social : Promouvoir une culture de sensibilisation à l'environnement et parvenir à une équité intergénérationnelle dans la consommation des ressources.

I.2.2 Types de recyclage [4]

I.2.2.1 Recyclage mécanique

Utilisé pour traiter les plastiques, le verre, les métaux, le papier et la céramique. Il utilise des techniques telles que le broyage, le concassage et la fusion pour produire de nouveaux matériaux.

I.2.2.2 Recyclage chimique

Utilisé pour décomposer les matériaux en leurs composants chimiques d'origine, notamment dans la fabrication de plastiques avancés.

I.2.2.3 Recyclage organique

Consiste à convertir les déchets organiques (restes alimentaires et déchets agricoles) en engrais organique ou en bioénergie par biodégradation.

I.3 Valorisation des déchets en Algérie

En Algérie, la gestion et la valorisation des déchets représentent une opportunité. Il présente un grand potentiel d'exploitation dans le cadre de la protection de l'environnement contre les déchets. Les déchets ménagers sont produits à un rythme d'environ 13,5 millions de tonnes par an. Kilogrammes par personne et par jour. Près de la moitié [5]

Définition du terme « déchet » Les déchets peuvent être définis comme « tout résidu d'un processus de production, Transfert ou utilisation de tout matériel ou de tout bien en général Les meubles abandonnés ou dont le propriétaire souhaite se débarrasser sont susceptibles d'être éliminés. Elle provoque des effets néfastes sur les sols, les plantes et les animaux, et conduit à la dégradation des sites et polluer le paysage, l'air ou l'eau, ou causer du bruit ou des troubles de l'odorat, « En général, cela peut nuire à la santé humaine et à l'environnement. » [6]

I.3.1 Source de déchets

Les sources de déchets sont très diverses et sont classées comme suit [7, 8] :

- Déchets et sous-produits résultant de la fabrication ;
- Lutte contre le gaspillage de l'eau et la pollution de l'air ;
- Déchets liés à la vie du produit

La récupération et le traitement de ces déchets permettraient d'améliorer la protection de l'environnement.

Cela nous permettra de participer à la politique de développement durable [9, 10].

I.4 Valorisation des déchets en génie civil

La valorisation des déchets en génie civil est un secteur important. Parce que les produits que nous désirons ne sont pas soumis à des normes de qualité excessives ferme. La valorisation et le recyclage des déchets ont deux impacts très importants, l'impact environnemental de l'élimination de ces déchets et l'impact économique qui en résulte ce dernier est utilisé dans l'industrie ou dans le domaine de la construction, ce qui perdu. Elle se caractérise par sa disponibilité en grandes quantités et sa faible valeur marchande [9].

Le béton est un matériau qui est souvent considéré comme un emplacement potentiel pour les déchets, en raison de leur nature complexe et de leur utilisation généralisée. Cela

signifie que si les déchets peuvent être utilisés dans le béton, alors c'est certainement possible de grandes quantités peuvent être recyclées.

I.5 Céramique et les déchets de céramique (DC)

La céramique est l'un des matériaux les plus anciens utilisés par l'humanité. Elle englobe une large gamme de produits allant de la poterie artisanale aux céramiques techniques utilisées dans les industries aérospatiales, électronique et biomédicale. Dans le secteur de la construction, les céramiques sont couramment employées sous forme de carreaux, briques, tuiles et autres éléments décoratifs ou structurels. Toutefois, ces activités génèrent des quantités importantes de déchets, qu'il s'agisse de rebuts de production, de matériau cassé pendant le transport ou d'éviction lors de travaux de démolition ou de rénovation.[11]

I.5.1 Céramique

Les céramiques sont des matériaux durs, cassants, inorganiques et non métalliques, obtenus par chauffage et refroidissement à haute température. Les oxydes, carbures, nitrures et silicates constituent la majorité des matériaux céramiques. Ces matériaux se caractérisent par leur grande dureté, leur grande résistance à la chaleur et à la corrosion, et leur légèreté. Cependant, ils sont cassants et susceptibles de se fracturer sous l'effet d'un choc mécanique brutal. Les céramiques sont utilisées dans de nombreux secteurs, tels que la construction, la dentisterie, les composants électroniques, la santé et l'électroménager.[12]

I.5.1.1 Types de céramiques

- Céramique traditionnelle (poterie) : Fabriquée à partir d'argile et cuite à des températures allant de 1 000 à 1 500 °C. Elle se caractérise par sa grossièreté due à ses gros grains et est utilisée dans la fabrication de poteries, de céramiques et de carreaux.[5]
- Grès : Cuite à des températures allant jusqu'à environ 1 200 °C. Elle se caractérise par sa durabilité et sa résistance à la chaleur et est utilisée dans la fabrication d'ustensiles de cuisine.[5]
- Porcelaine : Céramique blanc brillant fabriquée à partir de kaolin additionné d'aditifs tels que le feldspath. Cuite à des températures allant de 1 200 à 1 500 °C et

utilisée dans la fabrication d'assiettes et de vases.[5][6]

- Porcelaine tendre : Similaire à la porcelaine, mais contenant du verre et de la poudre de granit. Elle se caractérise par sa dureté et sa relative transparence lorsqu'elle est cuite à haute température.[5]

I.5.1.2 Céramiques techniques avancées

Fabriquées à partir d'oxydes tels que l'alumine et l'oxyde de zirconium, ou de matériaux non oxydants, elles sont utilisées dans des applications industrielles avancées comme l'aérospatiale et l'électronique. Les céramiques sont classées selon leur absorption d'eau :

- Faible absorption : Convient aux zones humides comme les salles de bains.
- Forte absorption : Utilisée dans les zones sèches.[5]

Propriétés des céramiques : Dureté élevée, résistance chimique, point de fusion élevé, isolation électrique et thermique, fragilité et faible ductilité.[11]

I.5.1.3 Les déchets céramiques (DC)

Les déchets Issus de la fabrication ou du broyage de produits céramiques, tels que les briques, les carrelages, les appareils sanitaires et autres, sont appelés déchets céramiques. En raison de leur faible biodégradabilité et de leur résistance aux éléments naturels, ils sont souvent enfouis dans des décharges, ce qui pose un problème environnemental croissant. La réutilisation des déchets céramiques a gagné en popularité ces dernières années, notamment dans les secteurs de la construction et du génie civil. Elle contribue à réduire la consommation de ressources naturelles et favorise la durabilité en les utilisant comme charges dans les mélanges de ciment ou comme substitut partiel dans la production de béton ou de mortier [13]



Figure I.2 – Déchets céramique

I.5.1.4 Utilisation des déchets céramiques comme matières premières dans le mortier

L'utilisation de déchets céramiques comme matériau de base dans les mortiers constitue une application de recyclage importante dans le secteur de la construction, offrant de nombreux avantages techniques et environnementaux. Les résultats de recherche et les sources disponibles nous permettent de résumer les points suivants [7][9]

- Granulométrie des déchets céramiques : Les déchets céramiques utilisés dans les mortiers se présentent souvent sous forme de poudre ou de fines particules de moins de 1 mm, ce qui facilite leur intégration au mélange et améliore la cohésion et la durabilité du mortier.
- Propriétés techniques : L'ajout de déchets céramiques fins améliore les propriétés du mortier, telles que la résistance à la compression, la réduction du retrait et la stabilité thermique. Il abaisse également la température de réaction hydraulique, limitant ainsi la fissuration thermique du béton autodurcissant.
- Ratio utilisé : Des études, telles que celles publiées dans l'Engineering Journey Network, indiquent que des ratios élevés (jusqu'à 85 %) de poudre céramique recyclée peuvent être utilisés avec du ciment blanc pour produire un mortier durable et performant [8].
- Applications pratiques : Ces déchets sont utilisés dans la production de mortiers absorbants, de mortiers hautes performances et de matériaux de construction res-

pectueux de l'environnement. Il peut également être utilisé dans la fabrication de mousses céramiques et de matériaux isolants [10].

- Avantages environnementaux et économiques : La réutilisation des déchets céramiques réduit la consommation de ressources naturelles, diminue les coûts de production et prévient l'accumulation de déchets dans les décharges.

I.6 Marbre et poudre de marbre (MP)

La quantité de déchets générés par les opérations de découpe et de polissage a augmenté avec l'utilisation du marbre dans divers projets industriels et de construction, ce qui pose d'importants défis économiques et environnementaux. Le recyclage des déchets de marbre s'est donc imposé comme un moyen efficace de réduire l'impact environnemental, de diminuer le prix des matières premières et d'améliorer la fonctionnalité de certains matériaux de construction, tels que le mortier et le béton. [14].



Figure I.3 – Déchets marbre

I.6.1 Définition

La calcite, ou carbonate de calcium, est le principal composant du marbre, une roche métamorphique formée par la chaleur et la pression de sa roche mère. Le marbre est un matériau de construction et de décoration populaire en raison de sa dureté et de sa beauté. Le marbre peut être blanc, gris, noir, rouge, vert ou brun, selon les minéraux qu'il contient. Sous des températures et des pressions élevées, le calcaire ou la dolomite subit un processus métamorphique qui produit le marbre. Le marbre se forme lorsque les minéraux de ces roches se réorganisent sous l'effet de la chaleur et de la pression exercées par les profondeurs de la Terre, les rendant plus durs et plus flexibles. [15].

I.6.2 Types de marbre

Certains types de marbre sont classés selon leurs nuances de couleur. Le marbre est un matériau naturel, et non synthétique, et ses couleurs sont variées et non artificielles. Les variations de couleur du marbre s'étendent au-delà de son aspect extérieur pour inclure ses propriétés intérieures et industrielles. [14].

—

- Marbre blanc (Blanco, signifiant « blanc » en arabe) : Le marbre blanc est le marbre le plus courant et le plus utilisé. Sa facilité de mise en forme et de gravure en fait un choix populaire pour les maisons et les entreprises. Le marbre blanc est disponible en quatre variétés
- Blanco Ibiza : Cette variété, extraite dans la ville turque de Muğla, est réputée pour sa pureté et sa brillance, ce qui en fait un excellent choix pour les sols et la décoration.
- Blanco Carrara : Cette variété populaire se distingue par sa haute qualité et provient d'Italie, premier producteur mondial de marbre.
- Blanco Tranco : Utilisé pour les plans de travail, les escaliers et les sols, il est extrait d'Espagne.
- Blanco Macael : Cette variété espagnole se distingue par son veinage unique et sa couleur blanche pure. Il peut être utilisé dans les chambres, les salles de bains et les cuisines.
- Marbre noir : Ce type de marbre se distingue par son élégance et son luxe, et certains le préfèrent au marbre blanc, notamment dans les designs modernes.
- Marbre gris : Le gris se marie bien avec de nombreuses autres couleurs, offrant à l'utilisateur un contrôle total sur la décoration environnante.
- Marbre crème : Le marbre crème est largement utilisé en décoration intérieure et est privilégié par beaucoup pour les chambres. Marbre brun : Le brun est une couleur populaire dans de nombreux intérieurs, complétant les bureaux et les meubles en bois

I.6.3 Utilisations du marbre :

Le marbre est utilisé dans la construction pour la décoration extérieure et intérieure. Il est utilisé pour les murs, les colonnes et les sols, notamment dans les couloirs et halls d'entrée luxueux. Il entre également dans la fabrication de nombreux meubles, notamment

des étagères et des canapés, ainsi que des plateaux de bureau et de table.

Fournitures d'art et de sculpture : Le marbre est un matériau idéal pour la sculpture et a été utilisé par de nombreux artistes pour créer des œuvres d'art célèbres, comme le « David » de Michel-Ange. Ascenseurs et entrées : Grâce à son aspect élégant et à sa durabilité, le marbre est utilisé dans les ascenseurs et les entrées des immeubles haut de gamme. Le marbre est également un matériau de carrelage populaire et peut être utilisé pour les sols intérieurs des résidences et hôtels haut de gamme, ainsi que pour les cuisines et les salles de bains. Œuvres architecturales : Le marbre est utilisé pour ajouter une esthétique et un caractère architectural uniques aux surfaces extérieures des mosquées et des bâtiments historiques.

Surfaces antibactériennes : Le marbre est parfois utilisé dans les cuisines et certains laboratoires, où sa nature non poreuse lui confère une résistance aux bactéries et aux virus. Très résistant à la chaleur et à la corrosion, il est également sensible aux substances acides comme le jus de citron ou le vinaigre. Il nécessite donc un entretien soigné et l'utilisation de produits de nettoyage non acides pour garantir sa longévité et sa beauté. [16].

I.6.4 Poudre de marbre :

Les déchets de marbre naturel sont broyés en particules extrêmement fines pour produire de la poudre de marbre. Cette poudre est généralement extraite de marbre inadapté aux grandes formes, comme les carreaux et les statues, ou de marbre résiduel après découpe. La poudre de marbre est un matériau industriel polyvalent utilisé dans de nombreux secteurs, notamment pour améliorer les performances de certains matériaux de construction, comme le béton et le mortier. [14].

I.6.4.1 Les applications de la poudre de marbre dans le secteur de la construction comprennent :

Mortier et béton : la poudre de marbre est ajoutée pour améliorer la qualité et la durabilité des mélanges de béton, augmentant ainsi leur résistance et leur dureté. Surfaces en béton : la poudre de marbre est utilisée dans la production de surfaces en béton lisses, telles que les murs, les sols et les trottoirs, pour leur donner une texture lisse et un aspect attrayant. La poudre de marbre est utilisée comme charge dans les industries de la peinture et des plastiques pour augmenter la durabilité du produit final en augmentant la densité du plastique. [14].

La poudre de marbre est également utilisée dans l'industrie de la peinture pour améliorer la texture et augmenter la couverture. Avantages de la poudre de marbre : Durabilité : Les chutes de marbre sont réutilisées, ce qui en fait un produit durable. Faible coût : Dans certaines industries, la poudre de marbre est moins chère que d'autres matériaux. Durabilité et résistance : Qu'elle soit ajoutée au béton ou à d'autres matériaux, elle confère aux produits une plus grande dureté et une plus grande durabilité. [17].

I.7 Sable de Dune

Les dunes de sable constituent une ressource naturelle abondante présente dans de nombreuses régions arides et semi-arides. Malgré leur statut historique de barrière géographique, elles suscitent aujourd'hui un intérêt croissant en raison de leurs utilisations potentielles dans divers secteurs, notamment la construction.[18].

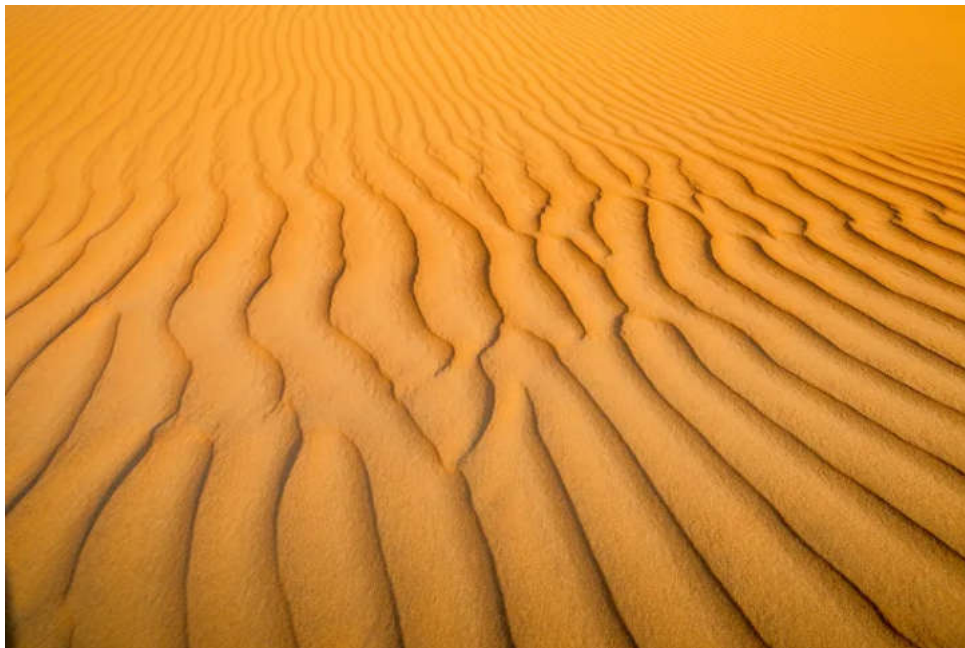


Figure I.4 – Sable de dune

I.7.1 Propriétés physiques et chimiques du sable de dune

Le quartz (SiO_2), minéral prédominant, est associé à de plus faibles quantités de feldspath, de mica et d'oxyde de fer. Le sable de dune se caractérise par une granulométrie uniforme, une faible teneur en micronutriments (argile et limon) et une forme arrondie. Cependant, sa surface lisse l'empêche d'adhérer au liant (ciment), ce qui rend son utilisation directe dans la production de béton difficile.[18]

I.7.2 Utilisations dans le secteur de la construction

Il est utilisé comme substitut partiel du sable de rivière. Après un traitement approprié (lavage, broyage ou ajout de granulats fins), le sable de dune peut être utilisé comme matériau alternatif. Selon les études, les propriétés mécaniques du béton ne sont pas significativement affectées par l'utilisation de solutions alternatives, s'améliorant jusqu'à 30 %. Production de blocs de terre stabilisés : Dans les zones désertiques où les matériaux de construction traditionnels sont limités, le sable de dune peut être utilisé pour produire des blocs de terre compacts stabilisés au ciment ou à la chaux.[19]

I.7.3 Recherches antérieures sur ses utilisations

Face à la raréfaction croissante des matières premières naturelles traditionnelles, telles que le sable de rivière et le sable concassé, de nombreuses recherches se sont concentrées sur l'exploration de matériaux alternatifs abondants et sous-utilisés, notamment le sable de dunes. Cette ressource, largement répandue dans les régions désertiques, notamment en Afrique du Nord et au Moyen-Orient, a attiré l'attention des chercheurs pour son potentiel dans la fabrication de mortiers et de bétons.

Parmi les travaux pionniers dans ce domaine, [20], ont mené une étude approfondie sur l'incorporation de sable de dunes dans le mortier de ciment. Leurs résultats ont démontré que, malgré la finesse et la rondeur excessives des grains, des performances mécaniques acceptables peuvent être obtenues en modifiant la formulation du mortier, notamment par l'utilisation d'additifs ou en mélangeant du sable de dunes avec d'autres types de granulats grossiers. Leur étude a démontré que la substitution du sable de dunes au sable ordinaire jusqu'à 50 % permet de maintenir une bonne résistance à la compression tout en réduisant les coûts de production.

[19], ont évalué l'effet du sable de dunes sur les propriétés physiques et mécaniques du mortier, en examinant des paramètres tels que la consistance, la porosité et le retrait au séchage. Ils ont souligné que la granulométrie très fine du sable de dunes nécessite un ajustement du rapport eau/ciment et que, sans compensation, elle peut entraîner une augmentation de la porosité. Cependant, les performances globales peuvent être considérablement améliorées en incorporant du sable de dunes à d'autres granulats ou en ajoutant des charges. Des études récentes, comme celle [21], se sont concentrées sur la granulométrie et les propriétés chimiques du sable de dunes du désert. L'étude a confirmé que ce matériau est principalement composé de silice (SiO_2) sous forme de quartz, avec une faible

teneur en argile et en matière organique dans certaines zones. Cela le rend théoriquement adapté à une utilisation dans le mortier, à condition de procéder à des contrôles qualité réguliers.

Cette recherche conclut de la même manière : le sable de dunes peut être utilisé avec succès dans le mortier, à condition de suivre une approche rigoureuse basée sur une caractérisation préalable, une modification de la composition et parfois une combinaison avec d'autres matériaux. Cette approche permet non seulement de réduire l'impact environnemental de la construction, mais aussi de promouvoir l'utilisation des ressources locales dans le cadre d'une économie circulaire et de manière durable.

I.7.4 Avantages environnementaux

L'utilisation du sable de dunes réduit le recours à l'extraction intensive de sable de rivière, source de dommages environnementaux importants (perturbation des écosystèmes aquatiques et dégradation des berges). Son utilisation locale réduit également les coûts de transport et les émissions de dioxyde de carbone associées.[19]

I.8 Sable Alluvionnaire

En bref, le sable est un matériau naturel formé par l'érosion et la désintégration des roches. Il s'écoule ensuite dans les cours d'eau (rivières et vallées) et se dépose le long des berges, lors des crues et dans les deltas. Ce matériau est largement utilisé dans la construction, à condition qu'il respecte les normes d'hygiène et de qualité. [22]. Dans nos recherches, nous avons utilisé du sable djamaa de la wilaya d'El-Meghaier.

I.8.1 Propriétés techniques

- Origine et composition : Le sable sédimentaire est principalement composé de quartz, avec des proportions variables de mica, de feldspath et d'argile selon la structure géologique locale [22].
- Forme des grains : Circulaire ou subangulaire due au transport hydraulique, ce qui améliore l'ouvrabilité des mélanges de béton[24].
- Propreté et classification : Évaluée à l'aide de l'équivalent sable (SE - NF P18-598), qui indique la proportion de particules fines influençant les propriétés du béton [23].

I.8.2 Ses applications en génie civil :

1. Il peut être utilisé dans le béton à condition de maintenir la quantité minimale de matières premières fines et qu'il n'y ait pas de matière organique susceptible d'affecter la réaction du ciment [22].
2. Dans le mortier : En raison de sa grande formabilité et de sa douceur, il est recommandé pour une utilisation dans les travaux de plâtrage et de stabilisation du mortier.
3. Dans les travaux de remblayage : Pour augmenter sa cohésion, il est parfois mélangé à des matières premières grossières dans une couche compactée [2].

I.8.3 Situation en Algérie :

De grandes quantités de sable argileux sont extraites des vallées du nord de l'Algérie, notamment dans les régions de Chlef, Soummam et Sebou, et sont utilisées dans les projets de construction et de routes. Des études de terrain, comme celle de [25], sur le sable de la région de Blida, ont souligné l'importance du pré-lavage pour éliminer les impuretés fines et améliorer sa propreté. Un suivi attentif de la teneur en limon et en argile est essentiel lors de l'utilisation dans le béton à haute résistance [26].

I.9 Méthodes de préparation du 'BAP'

La formulation des bétons auto-plaçants est généralement une tâche complexe réalisée de manière expérimentale, bien qu'il existe des méthodes plus rationnelles. Il est nécessaire de déterminer un mélange approprié de matériaux compatibles et le rapport adéquat pour chacun de ces éléments afin de formuler une composition respectant les caractéristiques du 'BAP' (fluidité et homogénéité) [27][28]. Voici, à titre d'exemple, quatre méthodes de préparation couramment citées dans la littérature.

I.9.1 Méthode Japonaise

La méthode japonaise élaborée à l'Université de Tokyo par Okamura H. et ses collaborateurs, [29], est mise en œuvre de façon sécurisée, mettant l'accent sur la quantité de pâte plutôt que sur celle des granulats. Les bétons produits présentent une carence en granulats, ce qui les rend loin d'être économiquement optimaux. Au Japon, l'augmentation

du coût liée au matériau est équilibrée par les économies réalisées sur les salaires. Voici les principes de formulation et leur mise en œuvre : Dosage des petits gravillons : Des scientifiques japonais ont démontré que le risque de congestion est réduit au minimum lorsque la quantité de gravier pour 1 m³ de béton est restreinte à la moitié de sa densité. En l'absence d'instructions spécifiques, il est recommandé de le quantifier en respectant la procédure du LCPC [30]. Le compactage de chaque gravier est d'environ 0,57. Dans le cas d'une formule granulométrique de 0/10 mm, le volume de gravier est d'environ 285 L/m³. Dosage du sable : Le volume de sable est ajouté à un taux constant de 40% du volume du mortier de béton. La fluidité du béton est assurée par la réduction du frottement intergranulaire. Dosage du liant : La méthode ne précise pas comment le liant doit être dosé. Cependant, la quantité de ciment peut être déterminée, par exemple, en respectant les normes (ici, la masse minimale de ciment est de 350 kg/m³). Dosage de l'eau et du superplastifiant : Les dosages de l'eau et du superplastifiant sont déterminés à l'aide d'essais au mortier, le volume de sable étant fixé à 40 %. Les mesures de diffusion doivent être effectuées à l'aide d'un cône à mortier et les mesures d'écoulement à l'aide d'un entonnoir.

I.9.2 Méthode Suédoise

Les Suédois ont adopté l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont incorporée dans leur processus de formulation. Le rapport G/S définitif est celui qui fournit le même volume de pâte pour obtenir les caractéristiques désirées. Par la suite, les fines, l'eau et le superplastifiant sont modifiés pour atteindre une viscosité adéquate, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression souhaitée. Cette approche offre une optimisation supérieure du squelette granulaire. [31].

I.9.3 Méthode dite Française (LCPC)

Cette proposition a été présentée par De Larrard et al. En 1994 au LCPC [32]. On a formé un modèle mathématique sur des données jusqu'à octobre 2023. Élaboré sur la base d'un modèle de suspension rigide. Ce modèle est fondé sur les interactions. Granulométriques entre les divers composants du mélange. Il permet d'anticiper la densité d'un Mélange granulaire avec une exactitude inférieure à 1% basée sur les composants suivants :

1. Les distributions basées sur des granulés ;

2. Les ratios du mélange ;
3. La compacité spécifique du mélange granulaire ;
4. La densité réelle des éléments en condition sèche ;

Voici la méthode à suivre pour établir les proportions des différents composants : Voici la méthode à suivre pour établir les proportions des différents composants

1. La proportion de liant est déterminée à l'avance (70% de ciment et 30% d'addition)
2. Le dosage du superplastifiant, jusqu'à saturation, est établi. D'après l'expérience du LCPC [32], cela pourrait donner au béton une grande viscosité, il serait donc plus pertinent d'envisager la moitié de ce dosage
3. le besoin en eau pour ce mélange (en présence du superplastifiant) est évalué
4. les calculs se font à l'aide du logiciel en prenant en compte le confinement (effet de paroi). On fixe arbitrairement la viscosité dynamique à 5.104 Pa.s. Par conséquent, le contenu en eau est diminué et le ratio liant/filler reste inchangé. Plus la viscosité du béton est faible, son ouvrabilité est bonne.

I.9.4 Méthode basée sur l'optimisation du volume de la pâte

Il s'agit d'une approche qui envisage le béton comme un mélange constitué de deux phases distinctes : une phase solide composée de granulats, et une phase fluide formée par la pâte. C'est Oh et ses collaborateurs [33] qui l'ont mise au point, suggérant à l'époque de déterminer la quantité optimale de pâte additionnelle pour produire un béton auto-plaçant fluide, tout en prévenant le phénomène de blocage. La viscosité du mortier pourrait prévenir l'obstruction aux granulats au niveau des armatures.

I.9.5 Méthode taguchi

Le chercheur japonais Genichi Taguchi a développé une méthode statistique innovante d'amélioration de la qualité, basée sur des expériences planifiées visant à optimiser les performances des procédés et des produits industriels. L'idée principale est d'améliorer la performance globale des produits à faible coût tout en réduisant la variabilité due à des facteurs incontrôlables. [34]

I.10 Les mortiers et le mortier auto-plaçant

I.10.1 Définition du mortier de ciment

Le mortier de ciment est un matériau de construction constitué d'un mélange homogène de ciment, de sable fin et d'eau. Il est principalement utilisé pour lier les éléments de maçonnerie entre eux (blocs, briques, pierres), pour réaliser des enduits ou pour effectuer des travaux de réparation et de finition. Contrairement au béton, qui contient des granulats grossiers (graviers), le mortier ne comprend que des agrégats fins, ce qui lui confère une texture plus lisse et une meilleure aptitude à l'application manuelle ou mécanique. Le rôle fondamental du mortier est d'assurer la cohésion entre les unités de maçonnerie et de répartir les charges de manière uniforme dans la structure. Il agit comme une couche d'interface qui non seulement permet l'adhésion, mais contribue également à l'étanchéité, à l'isolation thermique partielle et à la durabilité globale de l'ouvrage. Les proportions entre les constituants peuvent varier selon l'usage final visé (maçonnerie porteuse, enduit décoratif, scellement...), ce qui influe directement sur ses propriétés mécaniques, sa maniabilité et sa durabilité. D'un point de vue chimique, le fonctionnement du mortier repose sur la capacité du ciment à faire prise au contact de l'eau, grâce à des réactions d'hydratation. Ces réactions conduisent à la formation de produits hydratés tels que le silicate de calcium hydraté (C-S-H), principal responsable de la résistance mécanique, et l'hydroxyde de calcium, qui contribue à l'alcalinité du système. En raison de sa simplicité de composition, de sa disponibilité économique et de ses performances techniques satisfaisantes, le mortier de ciment reste aujourd'hui un matériau incontournable dans le domaine de la construction moderne et traditionnelle. Cependant, son impact environnemental — notamment lié à la production du ciment — a conduit la recherche scientifique à explorer de nouvelles pistes de formulation intégrant des matériaux alternatifs, plus durables et plus accessibles.[18].

I.10.2 Étymologie des mortiers

Le latin *mortarium*, désigne d'abord l'auge du maçon, puis son contenu. Cette distinction nous est restée puisque le terme mortier désigne le récipient et son contenu. Le Mortellier désigne le fabricant d'auges de pierre qu'on appelle mortiers et ensuite celui qui brise certaines pierres dures pour en faire du ciment. [35]

I.10.3 Constituants des mortiers

I.10.3.1 Ciment

Selon la norme EN NF 1-197, le ciment est appelé ciment CEM et est mélangé à des granulats. Mélangé à de l'eau, il produit un mortier ou un béton qui conserve son ouvrabilité pendant une durée suffisante. [36] [36] NF EN 197-1, « ciment, composition et critères », l'association française de normalisation, Février 2001. Le ciment est principalement composé de clinker Portland (K), un matériau hydraulique. Il est obtenu par cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile en quantités appropriées, allant de 80% à 20%, à des températures élevées, supérieures à 1 450 °C. [37] Des silicates et des liants hydrauliques se forment lors de la cuisson du clinker. [38]

- Silicate tricalcique $\text{SiO}_2 \cdot 3\text{CaO}$, symbolisé par C3S
- Silicate dicalcique $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$, symbolisé par C2S
- Aluminate tricalcique $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO}$, symbolisé par C3A
- Aluminoferrite tétracalcique ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{CaO}$) s'écrit C4AF. Parmi ses types

les plus courants : Généralement, tous les ciments homologués conviennent à la production de béton cellulaire. Cependant, l'utilisation de ciment composite (5.42 B/II CEM) contenant au moins 95 % de clinker permet de varier et de contrôler les quantités et d'introduire des additifs minéraux [39].

I.10.3.2 Sable

Le sable est défini comme un groupe de particules inertes dont la taille varie de 0 mm à 40 mm (sable et gravier), d'origine naturelle ou artificielle [40]. On distingue les granulats roulés extraits de graviers de ballast naturels ou fluviaux, et les granulats concassés, obtenus à partir de roches concassées extraites de carrières. Les granulats sont classés selon leur distribution granulométrique, et la courbe de distribution granulométrique représente la distribution relative du poids des matériaux passant à travers un tamis de taille standard. Un béton de haute qualité est utilisé pour faciliter l'écoulement du mélange. Comme le frottement entre les granulats limite l'étalement et le compactage du béton, la quantité de granulats est limitée. En général, le rapport granulats/sable, exprimé en masse, est de 1 dans le BAP. Le risque de colmatage augmente dans les environnements fortement saturés avec une valeur $D_{\max}$ plus élevée. Par conséquent, la valeur $D_{\max}$ maximale des granulats doit être comprise entre 10 et 20 mm [41]. La plupart des bétons autodurcissants ont une valeur $D_{\max}$ de 16.

En général, les granulats de rivière et l'ajout de matériaux fins (tels que les fillers calcaires) sont de la plus haute

I.10.3.3 Eau

L'eau de gâchage doit être propre et exempte de matières en suspension dépassant les limites réglementaires suivantes [40] :

- 2 g/L pour le béton à haute résistance
- 5 g/L pour le béton à faible résistance

L'eau de gâchage ne doit pas contenir de sels dissous dépassant

- 15 g/L pour le béton à haute résistance
- 30 g/L pour le béton à faible résistance

La pâte doit assurer une bonne fluidité, tout en évitant tout risque de décollement et de ressuage. Par conséquent, le BAP est composé d'une grande quantité de matériaux fins et d'une quantité relativement faible d'eau (le rapport eau/ciment dépasse rarement 55,0, voire 50,0). La fluidité requise peut être obtenue grâce à l'utilisation de superplastifiants [41].

I.10.3.4 Additifs minéraux

Selon la norme EN 197-1, les additifs minéraux sont définis comme des substances minérales précisément classées, utilisées dans le béton pour améliorer la norme européenne et lui conférer des propriétés spécifiques. Il existe deux types d'additifs minéraux [42] :

- Particules actives : Additifs de nature pouzzolanique ou hydraulique latente (cendres volantes, fumées de silice, laitier de haut fourneau, etc.).
- Particules inertes : Tels que les fillers calcaires, ces additifs visent à améliorer la cohésion du béton et donc à augmenter sa résistance.

1. Avantages économiques et environnementaux [43] : L'utilisation généralisée d'additifs minéraux dans le monde contribue également à réduire la production de ciment, qui nécessite une chaleur importante, réduisant ainsi la quantité de combustible utilisée dans la production de ciment et les émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.
2. Avantages techniques [43] :
 - Améliore les propriétés mécaniques et la durabilité du béton grâce à leur taille réduite.

- Réduit le ressuage du béton et augmente sa cohésion.
- Les additifs minéraux réduisent la chaleur dégagée par le béton lors de l'hydratation, réduisant ainsi la fissuration thermique.

I.10.3.5 Différents types de mortier :

- Mortier de ciment : Le mortier de ciment sèche rapidement et est extrêmement durable. Une quantité suffisante de ciment le rend également pratiquement imperméable. Les dosages actuels varient de 300 à 400 kg de ciment par mètre cube de sable.[44].
- Mortier de chaux : Un mortier souple et lisse. Il prend plus longtemps que le mortier de ciment, surtout lorsque la chaux est carbonisée.[44].
- Mortier chaux-ciment : Un mélange de chaux et de ciment permet d'obtenir les propriétés des deux liants. La chaux et le ciment sont généralement utilisés en quantités égales ; cependant, une quantité plus ou moins importante de l'un est utilisée selon l'application et la qualité requise.[44]
- Mortier résistant à la chaleur composé de ciment fondu, il résiste aux températures élevées. Il est utilisé dans la construction de cheminées et de barbecues. [44]
- Mortier à prise rapide : Il est fabriqué à partir de ciment à prise rapide et possède des propriétés d'isolation rapide.[44].
- Mortier industriel : Ce mortier est fabriqué avec des composants soigneusement sélectionnés, testés avec précision et conditionnés dans des sacs homogènes. Les fabricants de mortier industriel offrent une gamme complète de produits pour répondre à tous les besoins de ce type de mortier : une variété de couleurs et de formes est disponible pour ce plâtre. Mortier d'étanchéité, mortier d'isolation thermique et mortier d'injection. Du sable de nivellement, au mortier d'isolation, au sable de nivellement pour colle à carrelage, à base de plâtre ou de ciment, et au mortier de réparation.[44].

I.11 Mortier Autoplaçant (MAP)

Le mortier auto-plaçant est un type avancé de mortier qui possède une capacité élevée d'écoulement et de diffusion dans les espaces et les coffrages sans nécessiter de vibration

ou de pression mécanique. Ce type de mortier est considéré comme une innovation dans le domaine de la construction, principalement utilisé pour la réhabilitation et la réparation des structures en béton armé, notamment dans des espaces restreints où il est difficile d'accéder par des méthodes traditionnelles.[45]

I.12 Utilisations et applications

Le mortier auto-plaçant est généralement utilisé pour combler les canalisations, les tunnels, les fissures, les vides et les chambres abandonnées. Il assure des débits élevés dans les ouvertures ou les pentes. Le mortier auto-plaçant peut être injecté pendant deux heures maximum sur des distances allant jusqu'à 100 mètres (maximum 3 heures).[46]

I.13 Données techniques

Informations sur le mortier auto-plaçant : [47] Résistance à la compression à 28 jours : ≥ 35 MPa

- Résistance à la flexion à 28 jours : 4 MPa
- Résistance à la compression à 7 jours : > 2 MPa
- Fluidité élevée (extensibilité : environ 700 mm)
- Matériau pompable, stable et flexible

I.14 Essais de caractérisation du mortier

Les principales propriétés du mortier sont :

- Ouvrabilité
- Durcissement
- Résistance mécanique
- Résistance à la flexion

I.15 Essais de résistance mécanique

Les essais de résistance sont généralement réalisés sur des éprouvettes prismatiques de $4 \times 4 \times 16$ cm, conservées dans de l'eau à 20 °C. Les éprouvettes se fracturent lors des essais de traction et de flexion, suivis d'essais de compression.

Les résistances augmentent de manière quasi logarithmique entre 1 et 28 jours.[48]

Les principaux facteurs influençant la résistance :

- Type et teneur en ciment
- Rapport eau/ciment
- Granulométrie et type de sable
- Énergie de malaxage et d'application
- Protection pendant les premiers jours
- Type d'additifs

Chapitre II

Matériaux et procédures expérimentales

II.1 Introduction

Ce chapitre se concentre sur l'étude des matériaux utilisés dans le développement de mortiers auto-plaçants, notamment le sable de dune, les granulats céramiques et la poudre de marbre. Cette étude comprend une analyse approfondie des propriétés de ces matériaux, notamment le sable de dune et la poudre de marbre, afin d'améliorer leurs propriétés mécaniques. Le mélange est une étape cruciale, où les proportions des composants sont ajustées avec précision pour obtenir des performances optimales du béton, à l'état frais comme après durcissement. Des méthodes normalisées sont également utilisées pour évaluer le comportement de ce nouveau béton grâce à une série d'essais, 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 sable ont été utilisés dans cette étude : le sable de dunes (SD), abondant dans notre État (El oued), et le sable alluvionnaire (SA) de la région d'Djamaa, située dans Wilaya d'El Meghaier. Le tableau résume.



Figure II.1 – sable de dune (SD)



Figure II.2 – sable alluvionnaire (SA)

II.2.2 Caractéristiques physiques

II.2.2.1 Masse volumique absolue

La masse volumique absolue est déterminée conformément à la norme NF P18-301. Elle correspond à la masse d'un matériau rapportée à son volume total, sans prendre en compte les vides intergranulaires [48]. Elle se calcule à l'aide de la relation suivante :

$$\gamma_s = \frac{M_s}{V_s}$$

Où :

- γ_s : Masse volumique absolue
- M_s : Masse du matériau.
- V_s : Volume total du matériau solide

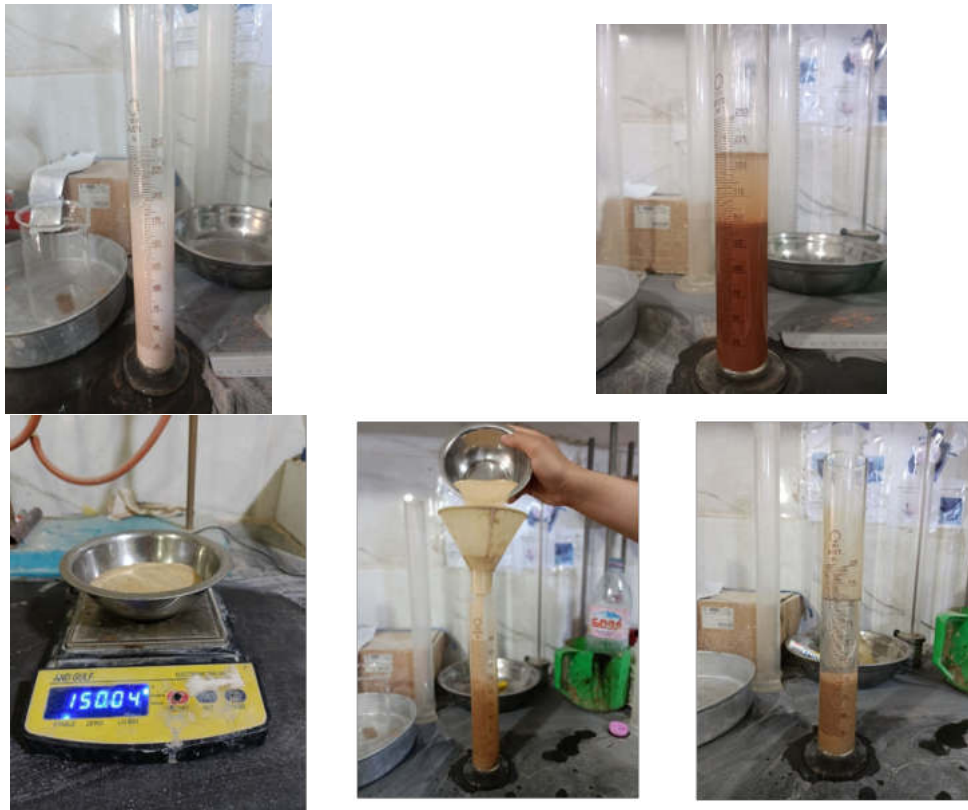


Figure II.3 – Masse volumique absolue

II.2.2.2 Masse volumique apparente

Cette propriété, déterminée conformément à la norme NF P18-554, correspond à la masse par unité de volume apparent d'un matériau. Ce volume inclut à la fois la matière solide et les vides qu'elle renferme. [48] Elle est exprimée par la formule suivante :

$$\gamma = \frac{M}{V}$$

Où :

- γ : Masse volumique apparente
- M : Masse du matériau.
- V : Volume apparent occupé par le matériau

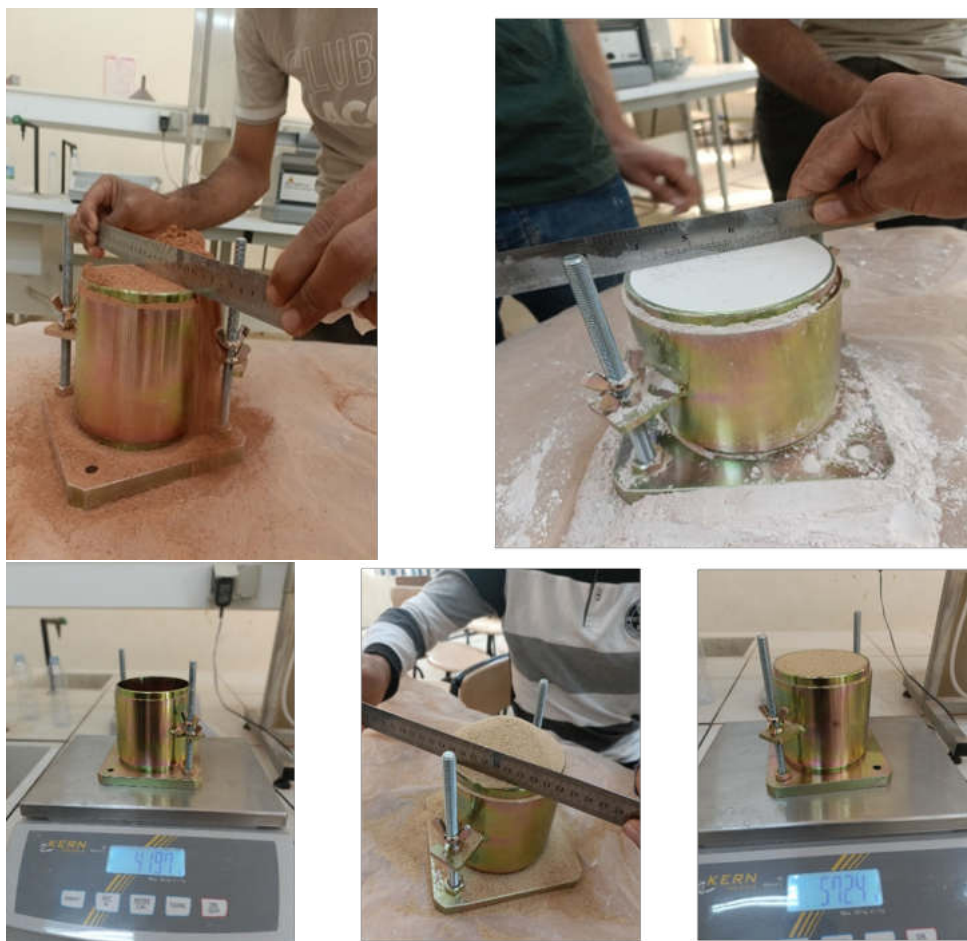


Figure II.4 – Masse volumique apparente

II.2.2.3 Analyse granulométrique

L'analyse a été réalisée conformément à la norme NF P18-560 [50] en utilisant un nombre suffisant de tamis pour couvrir les dimensions de l'échantillon.

L'analyse granulométrique vise à classer les particules composant un échantillon de sol selon leur diamètre et à déterminer leur poids. Les matériaux sont séparés à l'aide d'une série de tamis sélectionnés selon la taille de maille et la finesse requises. Les particules sont classées en différentes classes granulométriques, par ordre décroissant.

Cette méthode fournit des informations précieuses sur la composition des agrégats qui composent l'échantillon, permettant une compréhension précise de la composition du sol. Les proportions de matériaux retenues dans chaque tamis sont calculées et peuvent être affichées numériquement ou graphiquement via une courbe granulométrique illustrant la distribution granulométrique dans l'échantillon [49].

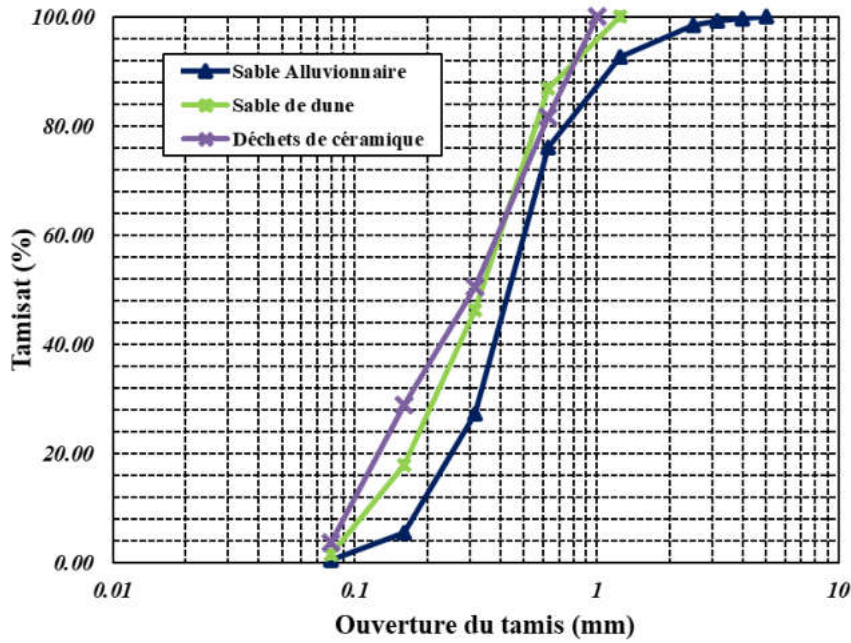


Figure II.5 – Graphique montrant l'analyse granulométrique des granulés de sable et de caoutchouc

II.2.2.4 Module de finesse

Le module de finesse est un paramètre clé pour évaluer la granulométrie des matières premières utilisées dans les mortiers auto-plaçants. Il évalue la distribution granulométrique des granulats, ce qui affecte directement les propriétés fondamentales du mélange, telles que l'ouvrabilité et l'efficacité.

Le module de finesse se calcule en suivant les étapes suivantes :

1. Déterminer les pourcentages cumulés de particules grossières sur des tamis de diamètres 0,16, 0,315, 0,63, 1,25, 2,5 et 5 mm.
2. Additionner ces pourcentages et diviser par 100 pour obtenir le module de finesse.

La formule utilisée est la suivante :

$$Mf = \frac{\sum \text{desrefus (en\%)} \text{ sur les tamis } 0.16; 0.315; 0.63; 1.25; 2.5; \text{ et } 5}{100}$$

Les résultats peuvent être interprétés comme suit :

Un module de finesse élevé indique une forte proportion de particules fines dans le granulat. À l'inverse, un module de finesse faible révèle une prédominance de particules grossières. Cette information est précieuse pour ajuster la formulation du mortier auto-plaçant en fonction des propriétés réelles du granulat disponible, afin d'atteindre les objectifs suivants :

- Entre 1,8 et 2,2 : Le sable est principalement composé de grains fins.
- Entre 2,2 et 2,8 : Ce sable est idéal ou privilégié.
- Entre 2,8 et 3,3 : Le sable est légèrement grossier, ce qui peut donner un mortier auto-plaçant durable, mais difficile à travailler.

II.2.3 Équivalent sable

Cet essai, conforme à la norme NF P18 598 [51], évalue la propreté des matériaux utilisés dans la fabrication des mortiers auto-plaçants. L'échantillon est lavé selon un protocole normalisé, puis laissé en place pendant 20 minutes. À l'Issue de cette période, les mesures suivantes sont effectuées (figure II.6) :

- Hauteur h_1 : représente la totalité du matériau propre, plus les particules fines.
- Hauteur h_2 : représente uniquement le matériau propre.

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

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

Le type d'équivalent sable dépend de la méthode utilisée pour mesurer la hauteur h_2 :

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

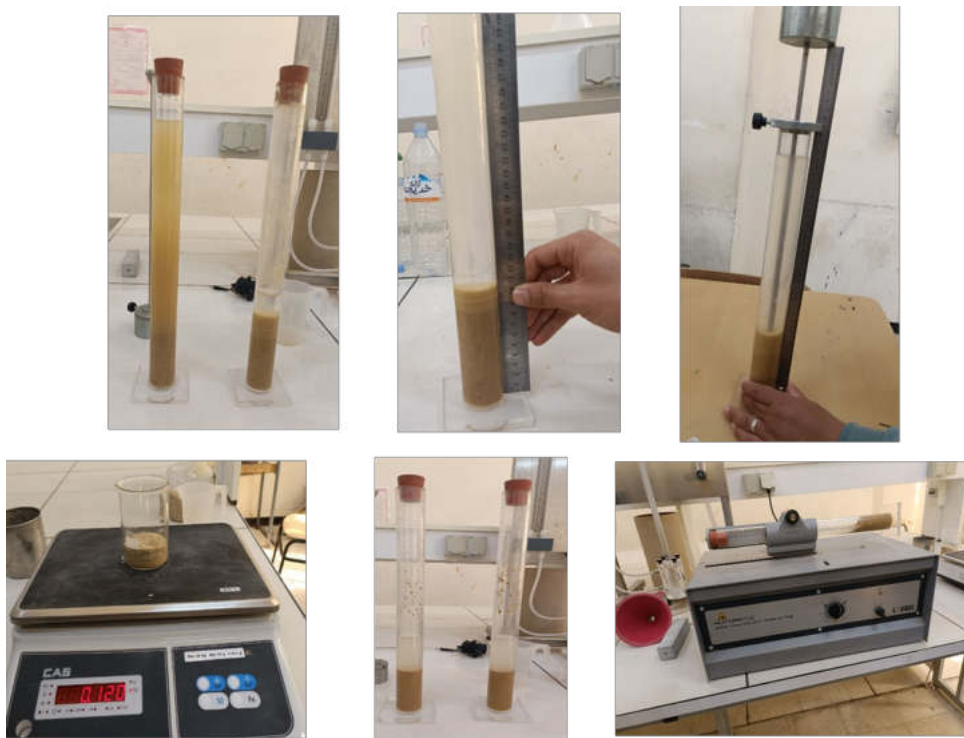


Figure II.6 – Étapes de calcul de l'équivalent en sable.

Selon la norme NF P18 598 [3], 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°	Equivalent de sable (%)	Observations
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 très propre ; absence de plasticité de béton.
4	$ESV > 85$; $ESP > 80$	Sable propre, convenant au béton à haute qualité.

II.2.3.1 Synthèse des résultats :

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

Tableau II.2 – Caractéristiques physiques du sable

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

II.3 Les déchets céramiques (DC)

Les déchets céramiques utilisés dans notre étude ont été obtenus par broyage mécanique de déchets céramiques éliminés par l'usine. Ils ont été broyés mécaniquement à la finesse requise, comme le montre la (figure II.7). La qualité des déchets céramiques utilisés dans notre mélange variait de 0 à 1 mm. Le (tableau II.3) résume les propriétés physiques de ces granulés. La figure II.7 fournit une analyse détaillée de ces granulés.



Figure II.7 – déchets céramiques (DC)

Tableau II.3 – Caractéristiques physiques de déchets de céramique ($< 1\text{mm}$)

Caractéristiques	Valeur
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.35
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1.14
Module de finesse	1.39

II.4 Poudre de marbre (MP)

La poudre de marbre utilisée dans notre étude a été obtenue par broyage mécanique de déchets de marbre concassés provenant d'un entrepôt de marbre situé à Wilaya d'El oued. Cette poudre est obtenue après élimination des impuretés par lavage à l'eau et au chiffon, puis broyée mécaniquement jusqu'à la finesse souhaitée (figure II.8). La granulométrie de la poudre de marbre recyclée utilisée dans notre mélange varie de 0 à 0,08 mm. Le (tableau II.4) résume les propriétés physiques de ce matériau. Une analyse granulométrique de ces produits est présentée dans



Figure II.8 – Poudre de marbre

Tableau II.4 – Caractéristiques physiques de poudre de marbre

Caractéristiques	Valeur
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.67
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1.11

2.5. 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.8). 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, II.6, II.7, II.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 ($\mu m/m$)	<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.5 Eau de gâchage

L'eau de gâchage a deux fonctions principales : contribuer chimiquement à la réaction d'hydratation et conférer au mortier ses propriétés liquides. Le réseau public d'eau potable fournit l'eau utilisée pour gâcher le mortier prêt à l'emploi.

II.6 Adjuvant (Superplastifiants)

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 – Super plastifiant

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

II.7 Formulation

II.7.1 Formulation du mortier auto-plaçant avec SD , DC et PM

Dans une formulation non remplaçable, nous utilisons du sable de dune (SD) à trois taux volumiques pour remplacer le sable alluvionnaire (SA) : 8%, 19 % et 24 %. Dans une formulation non remplaçable, nous remplaçons le (SA) par des granulats céramiques (DC) (0/4 mm) fabriqués à partir de déchets céramiques recyclés à trois taux volumiques : 4 %, 8 % et 12 %. Dans une formulation non remplaçable, nous remplaçons le ciment par de la poudre de marbre recyclé (PM) (< 0,08 mm) à trois taux volumiques : 5 %, 10 % et 15 %.

II.7.2 Applications la méthode de Taguchi

Tableau II.9 – La matrice des effets selon la méthode de Taguchi L9(3³)

N° de l'essai	Teneur en sable de dune (%)	Teneur en Déchets de céramique (%)	Teneur en Poudre de marbre (%)
01	8	4	5
02	8	8	10
03	8	12	15
04	16	4	10
05	16	8	15
06	16	12	5
07	24	4	15
08	24	8	5
09	24	12	10

II.7.3 Composition de mortier auto-plaçant

Tableau II.10 – Compositions des mélanges à base de liant binaire (en masse pour $1m^3$)

Mélanges	Constituants et paramètres de formulation								
	E/L	Ciment (Kg)	PM (Kg)	Sable SA (Kg)	Sable SD (Kg)	DC (Kg)	Eau (Kg)	SP/L (%)	SP (Kg)
(8%SD, 4% DC et 5% PM)	0.40	657.40	34.6	1174.80	104.40	47	277	1	6.92
(8%SD, 8% DC et 10% PM)		622.8	69.2	1121.40	104.4	94			
(8%SD, 12% DC et 15% PM)		588.20	103.80	1068	104.4	141			
(16%SD, 4% DC et 10% PM)		622.8	69.2	1068	208.8	47			
(16%SD, 8% DC et 15% PM)		588.20	103.8	1014.6	208.8	94			
(16%SD, 12% DC et 5% PM)		657.40	34.6	961.2	208.8	141			
(24%SD, 4% DC et 15% PM)		588.20	103.8	961.20	313.2	47			
(24%SD, 8% DC et 5% PM)		657.40	34.6	907.8	313.2	94			
(24%SD, 12% DC et 10% PM)		622.80	69.2	854.40	313.2	141			

II.7.4 Procédure expérimentale

II.7.4.1 Fabrication du mortier auto-plaçant

Pesage des composants du mortier auto-plaçant Dans un premier temps, nous avons pesé individuellement tous les composants du mortier auto-plaçant.



Figure II.11 – Poudre de marbre



Figure II.12 – Sable alluvionnaire



Figure II.13 – Sable de dune



Figure II.14 – Ciment



Figure II.15 – Super plastifiant



Figure II.16 – Dechets ceramique

II.7.5 Malaxages composants du mortier auto-plaçant (MAP)

Pour mélanger les ingrédients, les ingrédients secs ont d'abord été mélangés puis malaxés à l'aide d'un mixeur (figure II.1). En termes de temps de mélange, les mortiers auto-plaçants ont des temps de mélange plus longs que les mortiers conventionnels, permettant une meilleure dispersion des particules de poudre grâce à la haute efficacité du superplastifiant. Le processus de mélange a été réalisé selon le schéma (voir figure II.1). Le temps de mélange préféré est de 5 minutes.

Après avoir pesé les quantités de matériaux utilisés dans le mortier auto-plaçant et les avoir placées dans la cuve de mélange (figure II.1), le processus de mélange a été effectué selon la séquence indiquée dans (figure II.1), qui peut être résumée comme suit :

- Pétrir les ingrédients secs jusqu'à obtenir une consistance lisse, pendant 1 minute.
- Une quantité initiale d'eau ($w1 = 70\%$ d'eau) a été ajoutée pendant 1 minute. L'eau restante ($w2 = 30\%$ d'eau) mélangée au super-adoucissant a été ajoutée et mélangée dans le mélangeur pendant 3 minutes.

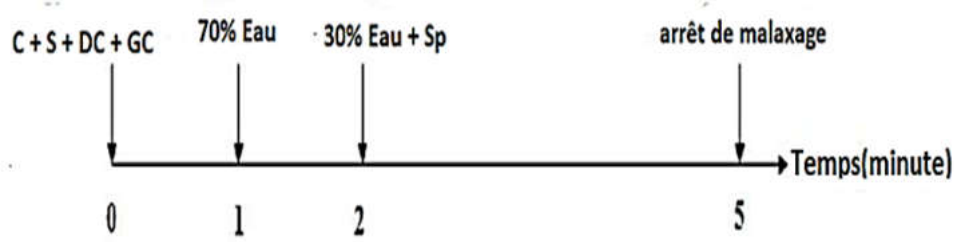


Figure II.17 – Séquence de mélange pour béton de mortier auto-plaçant



Figure II.18 – Matériaux utilisés secs



Figure II.19 – Mélanger le mélange de suspension auto-compactant avec un mélangeur automatique

II.7.6 Préparation des éprouvettes

Dans ce travail, nous avons réalisé 14 éprouvettes de dimensions (4×4×16) cm.



Figure II.20 – Moule des éprouvettes utilisés

II.8 Les essais réalisés

II.8.1 Essais réalisés à l'état frais

II.8.1.1 L'étalement mini Cône

La consistance (ou fluidité) du mortier auto-plaçant (MAP) est évaluée à l'aide du test du cône de diffusion. Le matériel suivant est utilisé pour cet essai : - Table d'étirement : Pour garantir une surface plane et solide, la surface de la table doit être recouverte d'une plaque en acier inoxydable d'au moins 2 mm d'épaisseur. Petit cône : moule métallique de 4 cm d'épaisseur. Pour garantir des résultats précis, la paroi intérieure du moule doit être lisse, c'est-à-dire exempte de déformations ou de rugosités locales.



Figure II.21 – Essai d'étalement au mini cône

II.8.1.2 Ecoulement à l'entonnoir en V-FUNNEL

Ce test mesure le temps nécessaire à un mortier auto-plaçant pour s'effondrer sous son propre poids. Cette mesure indique la fluidité du mortier et sa capacité à pénétrer les fissures.

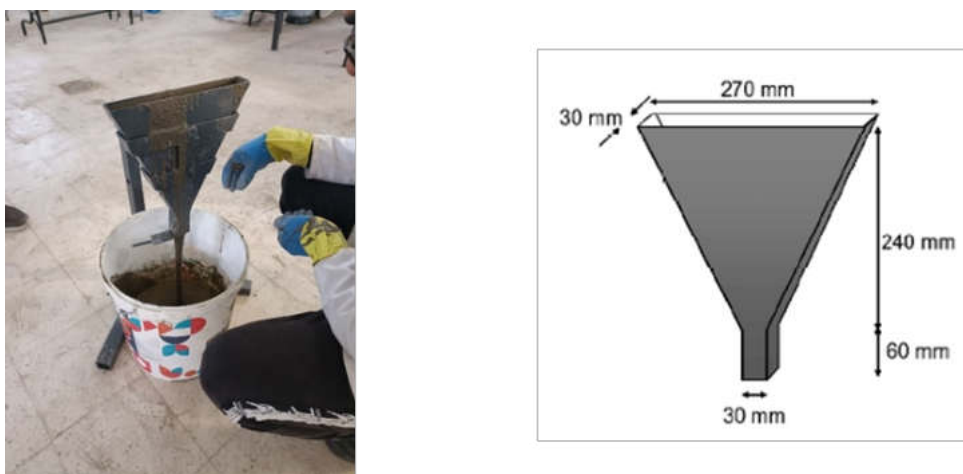


Figure II.22 – Test de l'entonnoir en V pour le béton de sable

II.8.1.3 Détermination de la masse volumique

Cette technologie permet de déterminer la densité du mortier frais auto-plaçant, essentielle pour évaluer ses performances et sa qualité. La masse du mortier est déterminée en remplissant un récipient de volume et de poids connus, puis en calculant la différence de masse entre le récipient plein et le récipient vide. La masse volumique fraîche du mortier auto-plaçant (MAP), mesurée en kg/m^3 , est calculée en divisant cette masse par le volume du récipient. Cela permet d'évaluer la compatibilité du mortier autodurcissant en comparant la densité mesurée avec l'équation théorique.



Figure II.23 – Détermination de la masse volumique

II.8.2 Essais réalisés à l'état durci

II.8.2.1 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.24 – Séchage des échantillons

II.8.2.2 Essai de traction par flexion

L'essai de flexion trois points est un indicateur indirect de la résistance à la traction d'une éprouvette. Lors de cet essai, des éprouvettes de mortier auto-plaçant sont fixées sur deux points



Figure II.25 – cement compression machine

d'appui distants de 100 mm. Le point central supérieur est soumis à une force croissante jusqu'à l'effondrement de l'éprouvette

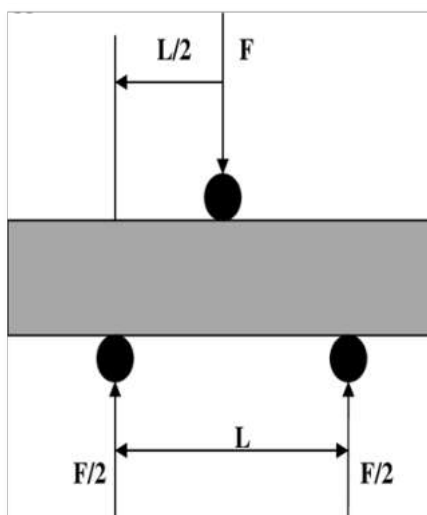


Figure II.26 – Essai de traction par flexion

II.8.2.3 Essai de compression

L'essai de charge en trois points est utilisé pour mesurer la résistance à la flexion du mortier auto-plaçant jusqu'à l'effondrement des échantillons coulés. La résistance à la com-

pression est déterminée à partir des sections d'essai de compression obtenues. Une charge progressivement croissante est appliquée à chaque échantillon jusqu'à ce qu'il atteigne le point de rupture. Ce point correspond à la charge maximale atteinte. La contrainte d'écrasement moyenne des trois échantillons représente la résistance à la compression calculée. Une machine d'essai de compression hydraulique capable d'appliquer des charges jusqu'à 1500 kN, équipée d'un dispositif spécialement conçu pour tester les blocs de mortier auto-plaçants, a été utilisée pour évaluer la résistance à la compression après 7 et 28 jours.

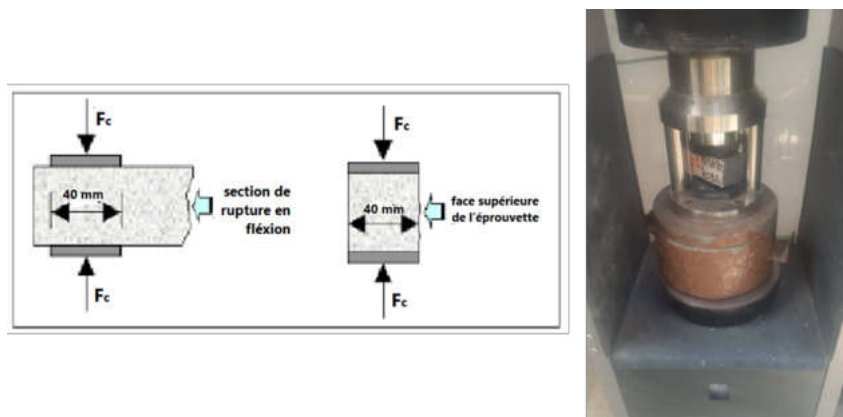


Figure II.27 – Essai de compression

Chapitre III

Analyse et discussion des résultats

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 mortier auto-plaçant afin de connaître les résultats optimaux pour chaque facteur afin de donner les meilleurs résultats sur le comportement du MAP 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 déchets de céramique et la teneur en poudre de marbre 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 facteurs comme représenté dans le tableau III.1 :

Tableau III.1 – Les facteurs et les niveaux ciblés

Facteurs	Niveaux		
Teneur en sable de dune (%)	8	16	24
Teneur en déchets de céramique (%)	4	8	12
Teneur en poudre de marbre (%)	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, 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, la matrice des effets selon la méthode Taguchi sera 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 déchets de céramique (%)	Teneur en poudre de marbre (%)
01	8	4	5
02	8	8	10
03	8	12	15
04	16	4	10
05	16	8	15
06	16	12	5
07	24	4	15
08	24	8	5
09	24	12	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 MAP au mini-cône.

N°	Formulations	Mini-cône (cm)
01	SD8 DC4 PM5	27.25
02	SD8 DC8 PM10	24.75
03	SD8 DC12 PM15	26.80
04	SD16 DC4 PM10	25.50
05	SD16 DC8 PM15	25.60
06	SD16 DC12 PM5	26.70
07	SD24 DC4 PM15	27.20
08	SD24 DC8 PM5	26.60
09	SD24 DC12 PM10	22.30

III.5.1.1 Détermination de la résultat optimal pour chaque facteur

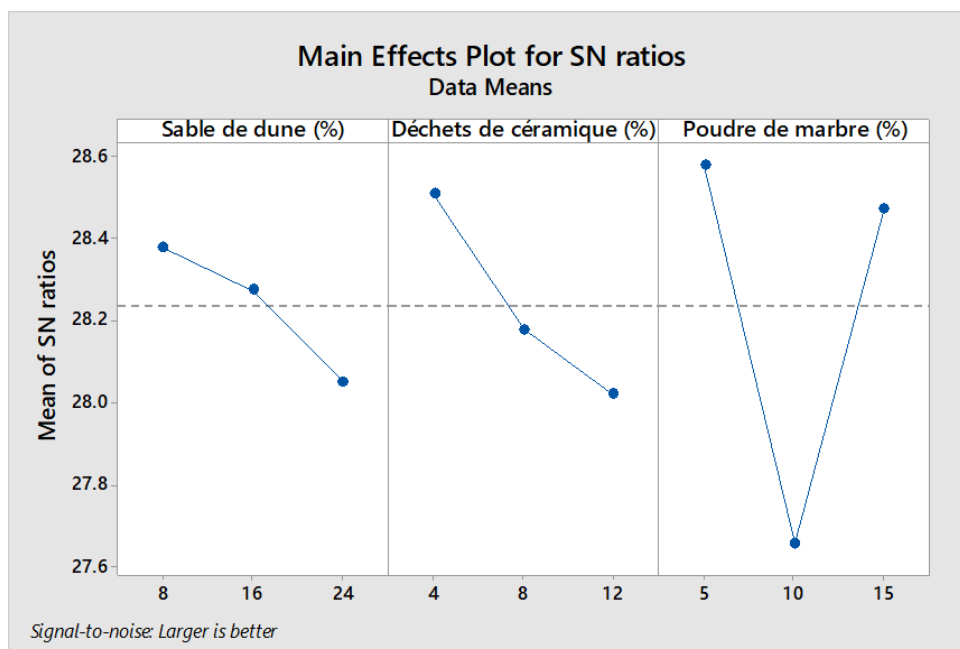


Figure III.1 – Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios) des essais d'étalement au mini-cône

D'après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (Signal to Noise Ratios) représentés dans la figure 3.1, nous constatons que les résultats optimaux

pour chaque facteur afin de donner les meilleurs résultats pour les essais d'étalement au mini-cône sont les suivants : la teneur en sable de dune (8%), la teneur en déchets de céramique (4 %) et la teneur en poudre de marbre (5 %).

III.5.1.2 Détermination des coefficients du modèle

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	26.96	5.42	4.97	0.038	
Sable de dune (%)	0.444	0.286	1.55	0.261	16.00
Déchets de céramique (%)	0.858	0.572	1.50	0.272	16.00
Poudre de marbre (%)	-1.31	1.05	-1.24	0.340	84.57
Sable de dune (%)*Déchets de céramique (%)	-0.0922	0.0405	-2.27	0.151	44.57
Sable de dune (%)*Poudre de marbre (%)	0.0313	0.0324	0.96	0.437	44.57
Déchets de céramique (%)*Poudre de marbre (%)	0.0600	0.0648	0.93	0.452	44.57

Model Summary

S	R-sq
1.40069	80.35%

Model Summary

$$\text{Mini-cône (cm)} = 26.96 + 0.444SD + 0.858DC - 1.31PM - 0.0922SD * DC + 0.0313SD * PM + 0.0600DC * PM$$

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 mortier auto-plaçant.

Par ailleurs, l'augmentation en pourcentage de poudre de marbre PM dans le MAP entraîne une réduction des temps d'écoulement. Au contraire, l'augmentation du pourcentage de sable de dune SD et de déchets de céramique DC conduit à une augmentation des temps d'écoulement au mini-entonnoir en V pour le MAP.

D'après le modèle de Taguchi, qui illustre les interactions existent entre les facteurs expérimentaux qui influent sur l'étalement au mini-cône dans le MAP, nous constatons que toutes les interactions (SD×PM et DC×PM) influent positivement sur l'étalement au mini-cône dans le MAP. En plus, nous constatons que l'interaction entre le sable de dune et les déchets de céramique (SD× DC) a un effet négatif sur le temps d'écoulement dans le MAP.

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 MAP.

N°	Formulations	Temps d'écoulement (s)
01	SD8 DC4 PM5	5.28
02	SD8 DC8 PM10	6.68
03	SD8 DC12 PM15	7.80
04	SD16 DC4 PM10	5.97
05	SD16 DC8 PM15	6.45
06	SD16 DC12 PM5	9.39
07	SD24 DC4 PM15	4.40
08	SD24 DC8 PM5	6.03
09	SD24 DC12 PM10	11.27

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

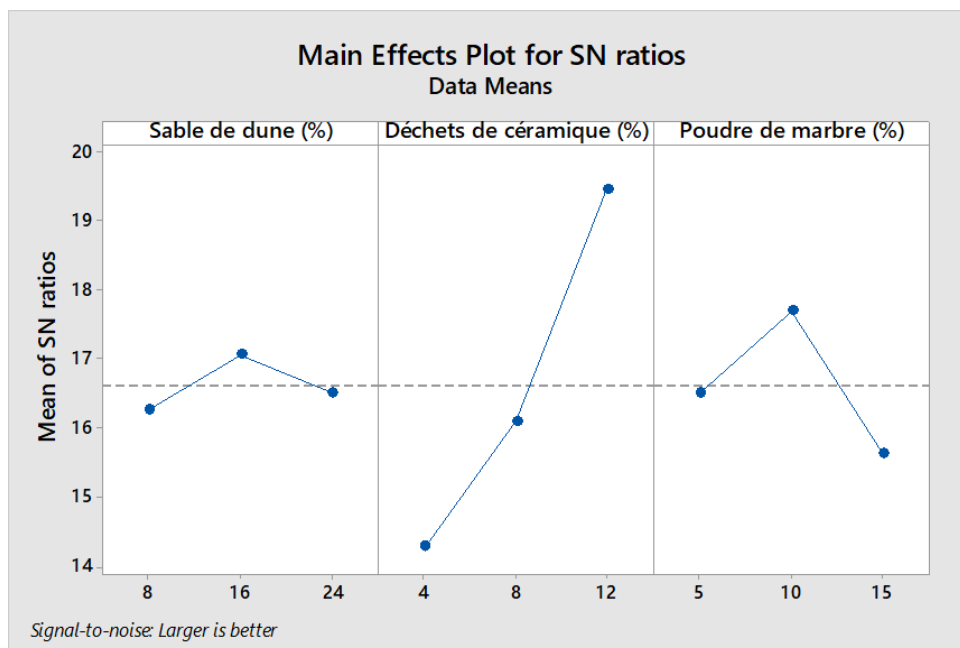


Figure III.2 – Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios) des essais d'écoulement au mini-entonnoir en V

D'après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (Signal to Noise Ratios) représentés dans la figure III.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 (16%) , la teneur en déchets de céramique (12%) et la teneur en poudre de marbre (10)

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	6.41	4.75	1.35	0.310	
Sable de dune (%)	-0.382	0.251	-1.52	0.267	16.00
Déchets de céramique (%)	0.044	0.502	0.09	0.938	16.00
Poudre de marbre (%)	0.156	0.923	0.17	0.881	84.57
Sable de dune (%)*Déchets de céramique (%)	0.0442	0.0355	1.24	0.340	44.57
Sable de dune (%)*Poudre de marbre (%)	0.0045	0.0284	0.16	0.888	44.57
Déchets de céramique (%)*Poudre de marbre (%)	-0.0194	0.0569	-0.34	0.765	44.57

Model Summary

S	R-sq
1.22864	91.77%

Model Summary

$$\begin{aligned} \text{Temps d'écoulement (s)} = & 6.41 - 0.382SD + 0.044DC + 0.156PM + 0.0442SD * DC \\ & + 0.0045SD * PM - 0.0194DC * PM \end{aligned}$$

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 MAP. Par contre, le signe plus (+) indique que les facteurs influent positivement sur l'écoulement du mortier auto-plaçant.

Par ailleurs, l'augmentation en pourcentage de sable de dune SD dans le MAP entraîne une réduction des temps d'écoulement. Au contraire, l'augmentation du pourcentage de déchets de céramique et de poudre de marbre conduit à une augmentation des temps d'écoulement au mini-entonnoir en V pour le MAP.

D'après le modèle de Taguchi, qui illustre les interactions existent entre les facteurs expérimentaux qui influent sur le temps d'écoulement dans le MAP, nous constatons que toutes les interactions (SD×DC et SD×PM) influent positivement sur le temps d'écoulement. En plus, nous constatons que l'interaction entre les déchets de céramique et la poudre de marbre (DC×PM) a un effet négatif sur le temps d'écoulement dans le MAP.

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

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

N°	Formulations	La masse volumique à l'état frais (kg/m^3)
01	SD8 DC4 PM5	2075
02	SD8 DC8 PM10	1970
03	SD8 DC12 PM15	1980
04	SD16 DC4 PM10	1965
05	SD16 DC8 PM15	1975
06	SD16 DC12 PM5	2025
07	SD24 DC4 PM15	2195
08	SD24 DC8 PM5	2225
09	SD24 DC12 PM10	2205

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

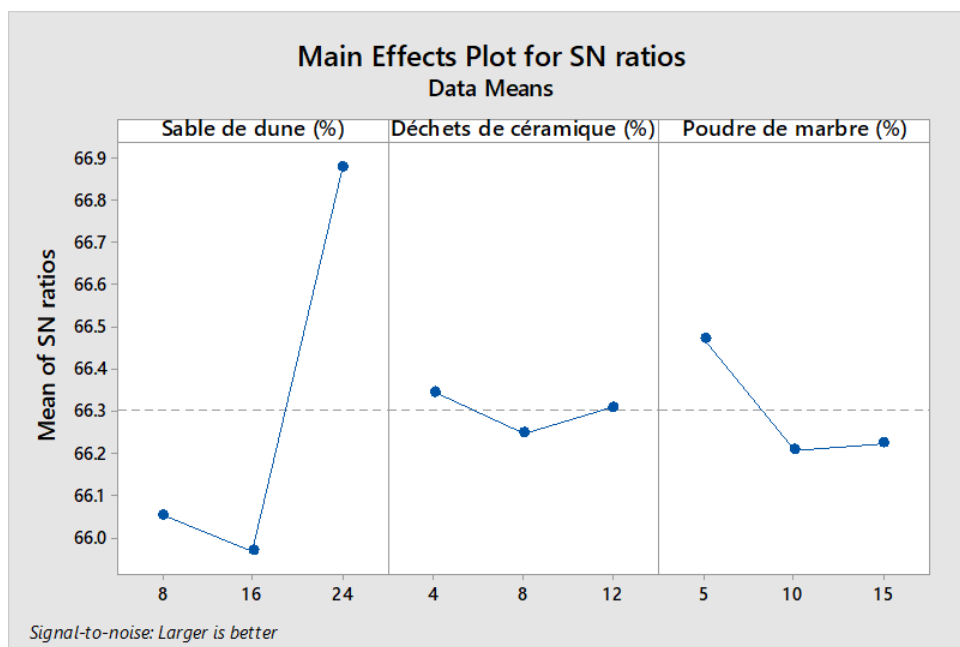


Figure III.3 – Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios) d'essai de la masse volumique à l'état frais.

D'après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (Signal to Noise Ratios) représentés dans la figure III.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 MAP sont les suivants : la teneur en sable de dune (24%), la teneur en déchets de céramique (4%) et la teneur en poudre de marbre (5%).

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	2402	277	8.67	0.013	
Sable de dune (%)	16.0	14.6	1.09	0.388	16.00
Déchets de céramique (%)	-8.8	29.2	-0.30	0.791	16.00
Poudre de marbre (%)	-114.2	53.7	-2.12	0.168	84.57
Sable de dune (%)*Déchets de céramique (%)	-2.88	2.07	-1.39	0.299	44.57
Sable de dune (%)*Poudre de marbre (%)	2.80	1.66	1.69	0.233	44.57
Déchets de céramique (%)*Poudre de marbre (%)	6.79	3.31	2.05	0.177	44.57

Model Summary

S	R-sq
71.5725	89.55%

Model Summary

$$\text{Masse volumique frais (kg/m}^3\text{)} = 2402 + 16.0SD - 8.8DC - 114.2PM - 2.88SD * DC + 2.80SD * PM + 6.79DC * PM$$

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 MAP. Par contre, le signe plus (+) indique que les facteurs influent positivement sur la masse volumique du mortier 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 MAP.

En plus, un pourcentage élevé de déchets de céramique DC et de poudre de marbre PM dans les mortiers entraîne une réduction 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 MAP, nous constatons que toutes les interactions (SD×PM et DC×PM) influent positivement sur la masse volumique. En plus, nous constatons que l'interaction entre le sable de dune et les déchets céramiques (SD×DC) a un effet négatif sur la masse volumique à l'état frais du MAP.

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	SD8 DC4 PM5	3.09
02	SD8 DC8 PM10	2.66
03	SD8 DC12 PM15	4.87
04	SD16 DC4 PM10	2.66
05	SD16 DC8 PM15	2.16
06	SD16 DC12 PM5	4.69
07	SD24 DC4 PM15	4.21
08	SD24 DC8 PM5	3.99
09	SD24 DC12 PM10	3.66

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

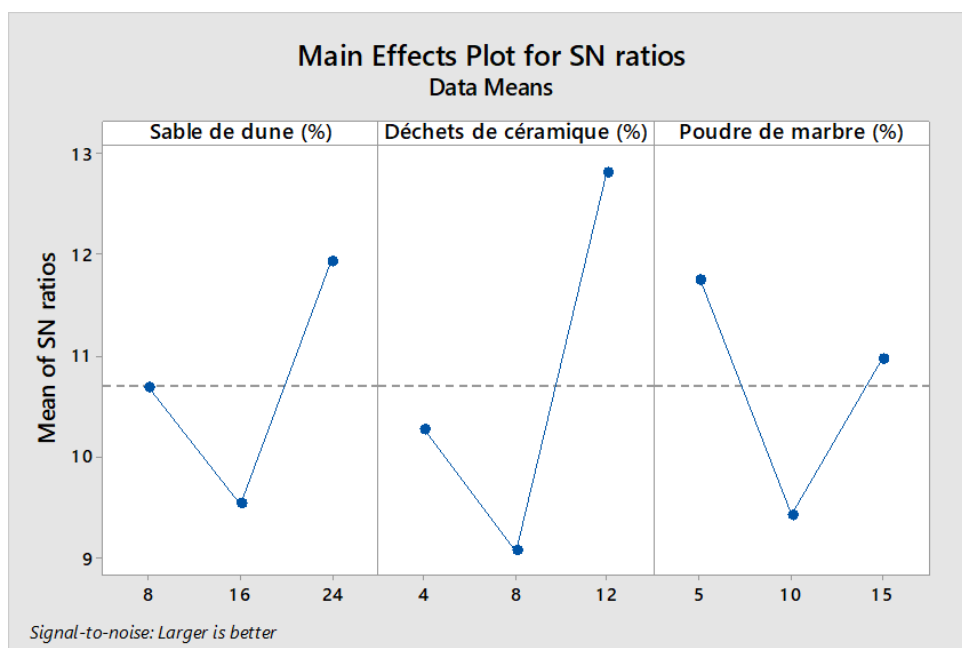


Figure III.4 – Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios) d’essai de la résistance mécanique à la traction par flexion à 07 jours.

D’après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (Signal to Noise Ratios) représentés dans la figure III.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 MAP sont les suivants : la teneur en sable de dune (24%) , la teneur en déchets de céramique (12%) et la teneur en poudre de marbre (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	3.81	1.35	2.83	0.106	
Sable de dune (%)	0.2842	0.0710	4.00	0.057	16.00
Déchets de céramique (%)	0.723	0.142	5.09	0.037	16.00
Poudre de marbre (%)	-1.269	0.261	-4.86	0.040	84.57
Sable de dune (%)*Déchets de céramique (%)	-0.0650	0.0101	-6.46	0.023	44.57
Sable de dune (%)*Poudre de marbre (%)	0.03402	0.00805	4.22	0.052	44.57
Déchets de céramique (%)*Poudre de marbre (%)	0.0624	0.0161	3.87	0.061	44.57

Model Summary

S	R-sq
0.347972	96.74%

Model Summary

$$\text{Résist. à la flexion}_7(\text{MPa}) = 3.81 + 0.2842SD + 0.723DC - 1.269PM - 0.0650SD * DC + 0.03402SD * PM + 0.0624DC * PM$$

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 mortier de sable auto-plaçant.

Par ailleurs, l'augmentant du pourcentage de poudre de marbre PM dans le MAP entraîne une réduction de la résistance mécanique à la traction par flexion à 07 jours dans le MAP.

D'après 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 MAP, nous constatons que toutes les interactions (SD×PM et DC×PM) influent positivement sur la résistance mécanique à la flexion.

Au contraire, nous constatons que l'interaction entre le sable de dune et les déchets céramiques (SD×DC) a un effet négatif sur la résistance mécanique à la flexion à 07 jours dans le MAP.

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
01	SD8 DC4 PM5	38.04
02	SD8 DC8 PM10	33.22
03	SD8 DC12 PM15	37.38
04	SD16 DC4 PM10	35.42
05	SD16 DC8 PM15	41.09
06	SD16 DC12 PM5	47.95
07	SD24 DC4 PM15	29.55
08	SD24 DC8 PM5	32.52
09	SD24 DC12 PM10	34.99

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

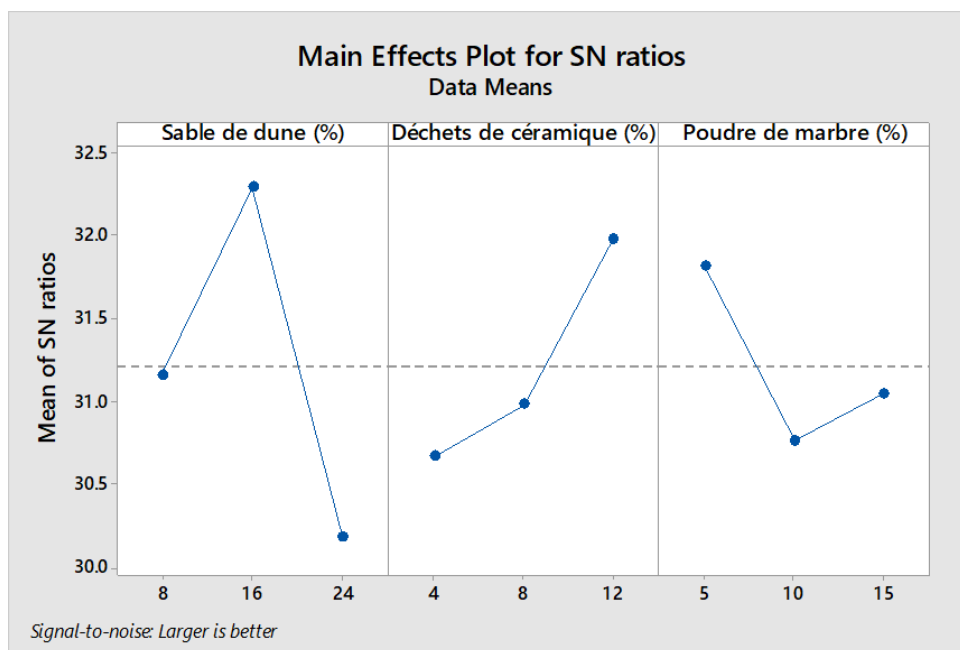


Figure III.5 – Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios) d’essai de la résistance mécanique à la compression à 07 jours

D’après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (Signal to Noise Ratios) représentés dans la figure 3.4, 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 MAP sont les suivants : la teneur en sable de dune (16%) , la teneur en déchets de céramique (12%) et la teneur en poudre de marbre (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	33.6	28.7	1.17	0.362	
Sable de dune (%)	-0.98	1.51	-0.65	0.584	16.00
Déchets de céramique (%)	1.78	3.03	0.59	0.616	16.00
Poudre de marbre (%)	1.07	5.57	0.19	0.865	84.57
Sable de dune (%)*Déchets de céramique (%)	0.050	0.215	0.23	0.837	44.57
Sable de dune (%)*Poudre de marbre (%)	0.011	0.172	0.07	0.954	44.57
Déchets de céramique (%)*Poudre de marbre (%)	-0.180	0.344	-0.53	0.652	44.57

Tableau III.8

Model Summary

S	R-sq
7.42193	52.83%

Model Summary

$$\text{Résist. à la compression}_7(\text{MPa}) = 33.6 - 0.98SD + 1.78DC + 1.07PM + 0.050SD * DC + 0.011SD * PM - 0.180DC * PM$$

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 MAP. L'augmentant de sable de dune SD entraîne une réduction de la résistance mécanique à la compression à 7 jours. En plus, en

augmentant le pourcentage de déchets de céramique DC et de poudre de marbre, les vides dans les mélanges des mortiers deviennent de plus en plus compacts, ce qui se traduit par une augmentation de la résistance mécanique à la compression à 7 jours. D'autre part, les interactions entre le sable de dune et les déchets de céramique (SD*DC) et entre le sable de dune et de poudre de marbre (SD* PM) influent positivement sur la résistance mécanique à la compression.

III.6.3 Résistance mécanique à la flexion à 28 jours

Tableau III.9 – Résultats des essais de la résistance mécanique à la traction par flexion à 28 jours

N°	Formulations	Résistance à la flexion Rt28 (MPa)
01	SD8 DC4 PM5	5.14
02	SD8 DC8 PM10	4.78
03	SD8 DC12 PM15	7.88
04	SD16 DC4 PM10	6.27
05	SD16 DC8 PM15	6.16
06	SD16 DC12 PM5	7.83
07	SD24 DC4 PM15	5.68
08	SD24 DC8 PM5	5.92
09	SD24 DC12 PM10	6.36

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

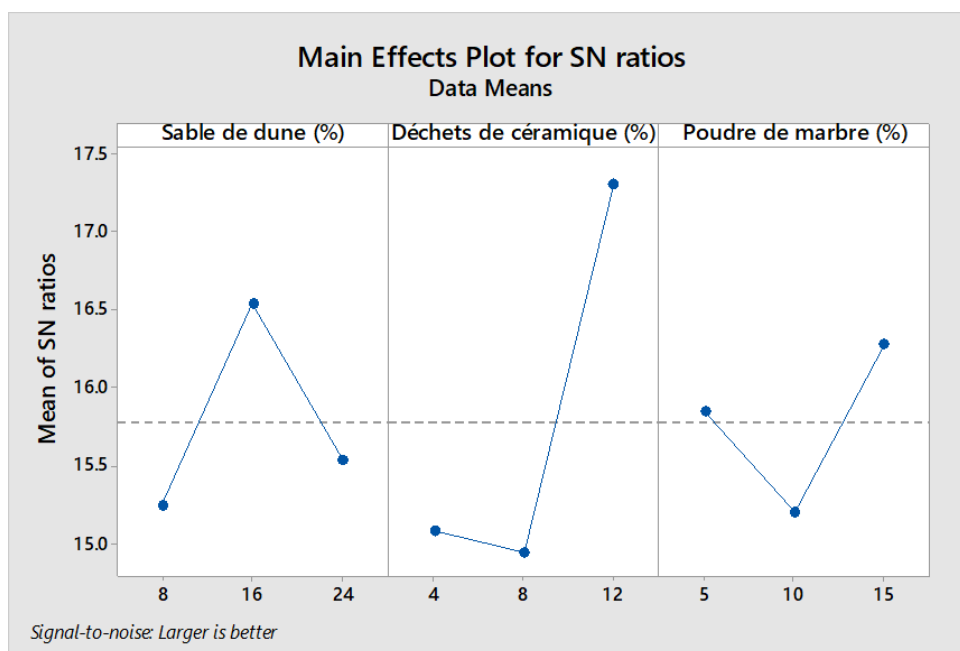


Figure III.6 – Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios) d’essai de la résistance mécanique à la traction par flexion à 28 jours.

D’après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (Signal to Noise Ratios) représentés dans la figure III.6, nous constatons que les résultats optimaux pour chaque facteur afin de donner les meilleurs résultats pour la résistance mécanique à la flexion à 28 jours du MAP sont les suivants : la teneur en sable de dune (16%) , la teneur en déchets de céramique (12%) et la teneur en poudre de marbre (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	2.07	2.46	0.84	0.554	
Sable de dune (%)	1.093	0.348	3.14	0.196	118.96
Déchets de céramique (%)	0.419	0.258	1.62	0.352	16.43
Poudre de marbre (%)	-1.343	0.595	-2.26	0.266	136.43
Sable de dune (%)*Sable de dune (%)	-0.02593	0.00913	-2.84	0.215	85.75
Sable de dune (%)*Déchets de céramique (%)	-0.0576	0.0209	-2.76	0.221	59.43
Sable de dune (%)*Poudre de marbre (%)	0.0309	0.0167	1.85	0.315	59.43
Déchets de céramique (%)*Poudre de marbre (%)	0.0865	0.0382	2.26	0.265	78.00

Model Summary

S	R-sq
0.624414	95.67%

Model Summary

$$\begin{aligned} \text{Résist. à la flexion}_{28}(\text{MPa}) = & 2.07 + 1.093SD + 0.419DC - 1.343PM - 0.02593SD * SD \\ & - 0.0576SD * DC + 0.0309SD * PM + 0.0865DC * PM \end{aligned}$$

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 mortier 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 MAP, nous constatons que toutes les interactions ($SD \times PM$ et $GC \times PM$) influent positivement sur la résistance mécanique à la flexion.

En plus, nous constatons que l'interaction entre le sable de dune et les déchets de céramique ($SD \times DC$) a un effet négatif sur la résistance mécanique à la flexion à 28 jours dans le MAP.

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

Tableau III.10 – Résultats des essais de la résistance mécanique à la compression à 28 jours.

N°	Formulations	Résistance à la compression Rc7 (MPa)
01	SD8 DC4 PM5	50.89
02	SD8 DC8 PM10	46.12
03	SD8 DC12 PM15	54.74
04	SD16 DC4 PM10	39.17
05	SD16 DC8 PM15	44.38
06	SD16 DC12 PM5	54.48
07	SD24 DC4 PM15	45.71
08	SD24 DC8 PM5	51.86
09	SD24 DC12 PM10	45.89

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

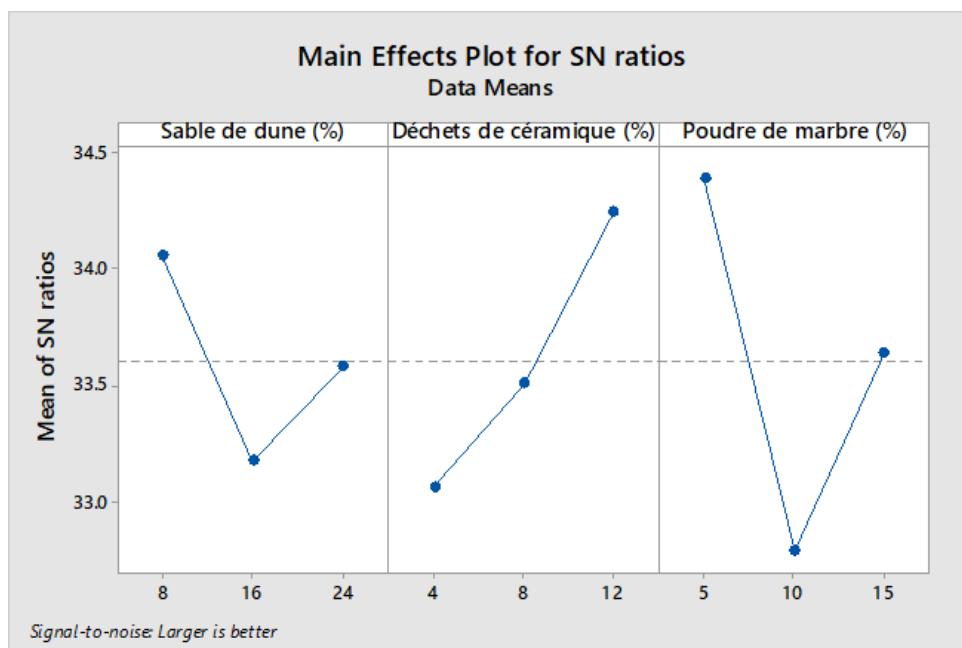


Figure III.7 – Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios) d’essai de la résistance mécanique à la compression à 28 jours

D’après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (Signal to Noise Ratios) représentés dans la figure III.7, nous constatons que les résultats optimaux pour chaque facteur afin de donner les meilleurs résultats pour la résistance mécanique à

la compression à 28 jours du MAP sont les suivants : la teneur en sable de dune (8%) , la teneur en déchets de céramique (12%) et la teneur en poudre de marbre (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	59.5	12.2	4.87	0.040	
Sable de dune (%)	0.966	0.645	1.50	0.273	16.00
Déchets de céramique (%)	2.79	1.29	2.17	0.163	16.00
Poudre de marbre (%)	-6.38	2.37	-2.69	0.115	84.57
Sable de dune (%)*Déchets de céramique (%)	-0.2817	0.0914	-3.08	0.091	44.57
Sable de dune (%)*Poudre de marbre (%)	0.1525	0.0732	2.08	0.172	44.57
Déchets de céramique (%)*Poudre de marbre (%)	0.328	0.146	2.24	0.154	44.57

Model Summary

S	R-sq
3.16056	90.70%

Model Summary

$$\text{Résist. à la compression}_{28}(\text{MPa}) = 59.5 + 0.966SD + 2.79DC - 6.38PM - 0.2817SD * DC + 0.1525SD * PM + 0.328DC * PM$$

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 MAP.

Par ailleurs, en augmentant le pourcentage de sable de dune SD et de déchets de céramique DC, les vides dans les mélanges des mortiers deviennent de plus en plus compacts, ce qui se traduit par une augmentation de la résistance mécanique à la compression à 28 jours dans le MAP.

En plus, les interactions entre le sable de dune SD et de poudre de marbre (SD*PM) et entre le pourcentage de déchets de céramique DC et de poudre de marbre (DC*PM) influent positivement sur la résistance mécanique à la compression à 28 jours dans le MAP.

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

Tableau III.11 – Résultats des essais de la masse volumique à l'état durci

N°	Formulations	La masse volumique à l'état durci (kg/m^3)
01	SD8 DC4 PM5	2108.64
02	SD8 DC8 PM10	2022.10
03	SD8 DC12 PM15	2093.32
04	SD16 DC4 PM10	2022.52
05	SD16 DC8 PM15	2032.89
06	SD16 DC12 PM5	2069.10
07	SD24 DC4 PM15	2088.10
08	SD24 DC8 PM5	2104.04
09	SD24 DC12 PM10	2066.41

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

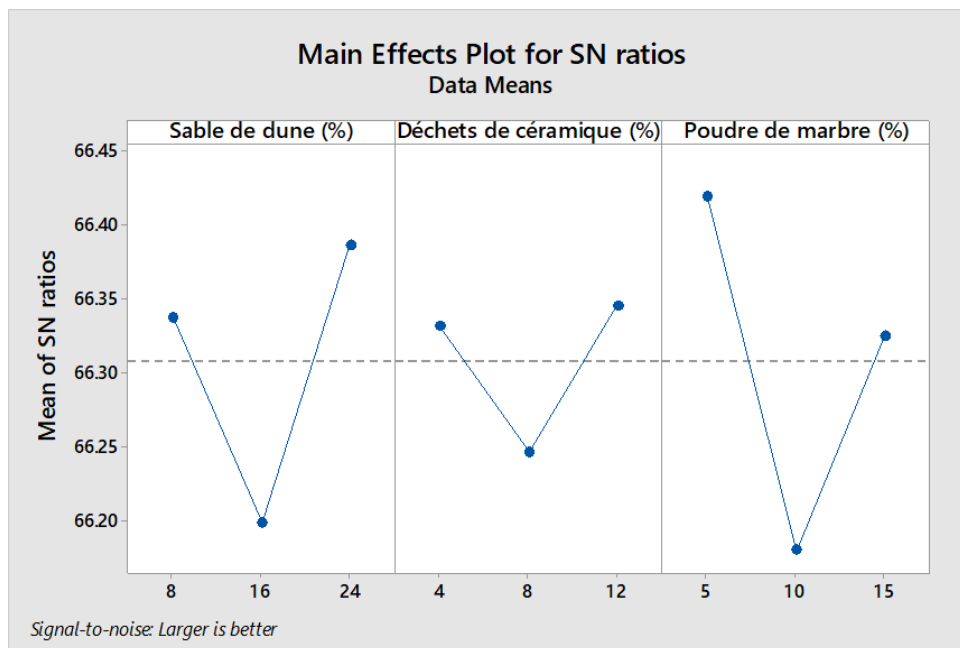


Figure III.8 – Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios) d’essai de la masse volumique à l’état durci à 28 jours.

D’après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (Signal to Noise Ratios) représentés dans la figure III.8, 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 MAP sont les suivants : la teneur en sable de dune (24%) , la teneur en déchets de céramique (12%) et la teneur en poudre de marbre (5%).

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	2279.8	55.8	40.88	0.001	
Sable de dune (%)	8.19	2.94	2.78	0.108	16.00
Déchets de céramique (%)	5.01	5.88	0.85	0.484	16.00
Poudre de marbre (%)	-65.6	10.8	-6.06	0.026	84.57
Sable de dune (%)*Déchets de céramique (%)	-2.256	0.417	-5.41	0.033	44.57
Sable de dune (%)*Poudre de marbre (%)	1.548	0.334	4.64	0.043	44.57
Déchets de céramique (%)*Poudre de marbre (%)	3.922	0.667	5.88	0.028	44.57

Model Summary

S	R-sq
14.4141	95.58%

Model Summary

$$\text{Masse vol. à l'état durci (kg/m}^3\text{)} = 2279.8 + 8.19SD + 5.01DC - 65.6PM - 2.256SD * DC + 1.548SD * PM + 3.922DC * PM$$

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

L'augmentant de pourcentage de sable de dune SD et de déchets de céramique DC dans les mortiers entraîne une demande en plus de l'eau de gâchage ce qui se traduit par une augmentation de la masse volumique à l'état durci.

Par contre, une augmentation de poudre de marbre dans les mortiers entraîne une réduction de la masse volumique à l'état durci dans le MAP.

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 de déchets de céramique (SD × DC) a un effet négatif sur la masse volumique. Par contre, les interactions entre le sable de dune et de poudre de marbre (SD*PM) et entre le déchets de céramique et de poudre de marbre (DC*PM) influent positivement sur la masse volumique à l'état durci dans le MAP.

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 déchets de céramique (DC) et le pourcentage de poudre de marbre (PM), 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 mortier 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 mortier 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, 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 :

$$\begin{aligned}\text{Mini-cône (cm)} = & 26.96 + 0.444SD + 0.858DC - 1.31PM - 0.0922SD * DC \\ & + 0.0313SD * PM + 0.0600DC * PM\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Temps d'écoulement (s)} = & 6.41 - 0.382SD + 0.044DC + 0.156PM + 0.0442SD * DC \\ & + 0.0045SD * PM - 0.0194DC * PM\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Masse volumique frais (kg/m}^3\text{)} = & 2402 + 16.0SD - 8.8DC - 114.2PM - 2.88SD * DC \\ & + 2.80SD * PM + 6.79DC * PM\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Masse volumique vol. à état durci (kg/m}^3\text{)} = & 2279.8 + 16.0SD - 5.01DC - 65.6PM - 2.256SD * DC \\ & + 1.548SD * PM + 3.922DC * PM\end{aligned}$$

Résist. à la flexion à 7j(MPa) $= 3.81 + 0.2842SD + 0.723DC - 1.269PM$

$$- 0.0650SD * DC + 0.03402SD * PM + 0.0624DC * PM$$

Résist. à la compression à 7j(MPa) $= 33.6 - 0.98SD + 1.78DC + 1.07PM + 0.050SD * DC$

$$+ 0.011SD * PM - 0.180DC * PM$$

Résist. à la flexion à 28j(MPa) $= 2.07 + 1.093SD + 0.419DC - 1.343PM - 0.02593SD * SD$

$$- 0.0576SD * DC + 0.0309SD * PM + 0.0865DC * PM$$

Résist. à la compression à 28j(MPa) $= 59.5 + 0.966SD + 2.79DC - 6.38PM - 0.2817SD * DC$

$$+ 0.1525SD * PM + 0.328DC * PM$$

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 (8 %), la teneur en déchets de céramique (4 %) et la teneur en poudre de marbre (5 %).
- Les meilleurs résultats pour l'écoulement au mini-entonnoir en V (V-Funnel) sont les suivants : la teneur en sable de dune (16%) , la teneur en déchets de céramique (12%) et la teneur en poudre de marbre (10%).
- Les meilleurs résultats pour la masse volumique à l'état frais sont les suivants : la teneur en sable de dune (24%) , la teneur en caoutchouc (4%) et la teneur en poudre de céramique (5%).
- Les meilleurs résultats pour la masse volumique à l'état durci à 28 jours sont les suivants : la teneur en sable de dune (24%) , la teneur en déchets de céramique (12%) et la teneur en poudre de marbre (5%).
- Les meilleurs résultats pour la résistance mécanique à la traction par flexion à 7 jours sont les suivants : la teneur en sable de dune (24%) , la teneur en déchets de céramique (12%) et la teneur en poudre de marbre (5%).
- Les meilleurs résultats pour la résistance mécanique à la compression à 7 jours sont les suivants : la teneur en sable de dune (16%) , la teneur en déchets de céramique (12%) et la teneur en poudre de marbre (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 (16%) , la teneur en déchets de céramique (12%) et la teneur en poudre de marbre (15%).
- Les meilleurs résultats pour la résistance mécanique à la compression à 28 jours sont les suivants : la teneur en sable de dune (8%) , la teneur en déchets de céramique

(12%) et la teneur en poudre de marbre (5%).

Bibliographie

- [1] <http://www.jaspss.com>
- [2] <https://uomus.edu.iq/NewDep.aspx?depid=5&newid=25941>
- [3] <https://www.ejaba.com>
- [4] <https://www.techno-science.net/definition/3551.html>
- [5] https://mawdoo3.com/%D9%85%D8%A7%D9%87%D9%88_%D8%A7%D9%84%D8%B3%D9%8A%D8%B1%D8%A7%D9%85%D9%8A%D9%83
- [6] <https://q8-ceramic.com>
- [7] <https://search.mandumah.com/Record/984733>
- [8] <https://www.rehla.academy/thenews/moisture-absorbing-mortar-from-construction-waste>
- [9] <https://www.alpapowder.com/ar/131418/>
- [10] <https://ar.sffoundrymaterial.com/info/what-are-foam-ceramics-used-for-75338008.html>
- [11] <https://simafgroup.com/ar/post/al-ceramic>
- [12] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). Science et Ingénierie des matériaux : Introduction (9e éd.). Wiley.
- [13] Jalali, S. (2010). Reusing ceramic wastes in concrete. Construction and Building Materials, 24(5), 832–838. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.023>
- [14] <https://simafgroup.com/ar/post/al-marmar>
- [15] Press, F., & Siever, R. (2001). "Understanding Earth". W.H. Freeman and Company
- [16] Tate, J. (2019). "Uses of Marble in Architecture, Sculpture, Design, and More". Geology.com
- [17] Hebhouh, H., Aoun, H., Belachia, M., Houari, H., & Ghorbel, E. (2011). Use of waste marble aggregates in concrete. Construction and Building Materials, 25(3), 1167–1171. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.037>

- [18] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). Concrete : Microstructure, Properties, and Materials . McGraw-Hill Education
- [19] Khalifi, M., & Bouziani, T., "Effect of dune sand on physical and mechanical properties of mortar," Construction and Building Materials, 2012
- [20] Pedrina, et al., "Incorporation of dune sand in cement mortar : mechanical performance and mix design adjustments," Journal of Materials in Civil Engineering, 2008
- [21] Ould Ahmedou, A., "Characterization of desert dune sand for mortar applications," Desert Engineering Journal, 2017
- [22] Neville, A. M. (2011). Properties of Concrete. Pearson Education.
- [23] AFNOR (1997). NF P18-598 – Granulats – Mesure de l'équivalent de sable. Paris.
- [24] Fédération Française du Bâtiment (2009). Guide pratique : utilisation des sables dans le béton.
- [25] Bourokba, N. (2015). Étude des caractéristiques des sables alluvionnaires de la région de Blida, Mémoire de Master, Université de Blida 1.
- [26] ENPI (2012). Règlement Technique Algérien de la Construction – Bâtiment.
- [27] Ph Turcry, Ahmed Loukili. Différentes approches pour la formulation des bétons auto-plaçants : Influence sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques. Revue Française de Génie Civil, Taylor & Francis, 2003, 7 (4), pp.425-450. [ff10.1080/12795119.2003.9692503](https://doi.org/10.1080/12795119.2003.9692503)[ff.ffhal-01006744](https://doi.org/10.1080/12795119.2003.9692503).
- [28] Ahmed Loukili, « Les bétons auto-plaçants». Livre- 23 décembre 2010. Collection Mécanique et ingénierie des matériaux. Editeur Hermes Science Publications. 262 pages.
- [29] Okamura H. et al., 'self-compacting high-performance concrete'. Proceeding of the fifth sec vol.3, pp.2381- 2388, 1995.
- [30] MM. Vincent Lédée, François de Larrard, Thierry Sedran, Frédérick Brochu., 'Essai de compacités des fractions granulaires à la table à secousses - Mode opératoire Méthode d'essai N°61'. LCPC. ISSN 1167- 489X. Juillet 2004.
- [31] Petersson Ö., Billberg P. and Van B.K., 'A model for Self-Compacting Concrete', International Rilem Conference on 'Production methods and workability of concrete', RILEM Proceedings 32, (1996).

- [32] DE Larrard F. et al, «Mix design of self-compacting concrete», RILEM International Conference on production methods and workability of concrete, pp.439-451, Glasgow, 3-5 juin (1996).
- [33] Oh S.G., Noguchi T., Tomosawa F. (1999), «Toward mix design for rheology of self compacting concrete», Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, pp. 361-37
- [34] Taguchi, G. and Wu, Y.I. (1980) Introduction to Off-Line Quality Control, Central Japan Quality Control Association, Nagoya, Japan.
- [35] KHELAIFA Hamad et TAGBA Maléki ,Etude expérimentale sur les mortiers à base de granulats de caoutchouc, de déchets de brique et d'adjuvant résineux, mémoire de master à l'Université de Guelma, 2015.
- [36] NF EN 197-1, « ciment, composition et critères », l'association française de normalisation, Février 2001.
- [37] Khélifa.R, « influence des ciments à base d'ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques des mortiers et des bétons », thèse de magister, université Mentouri de Constantine, 11 Juillet 2001.
- [38] CIM béton, « le ciment et ses applications », 10^{ème} édition, a principe Paris, Juillet 2001. [39] NF P 15-010, Guide d'utilisations des ciments, Octobre 1997.
- [39] Hanaa Fares. «Propriétés mécaniques et physicochimiques De bétons autoplaçants exposés à une température élevée», thèse de doctorat en Génie Civil, université de Cergy- Pontoise, le 07 Décembre 2009.
- [40] Collection Technique CIM béton, Fiches techniques, Tome 2, Les bétons : formulation, Fabrication et mise en œuvre, Édition octobre 2006.
- [41] Boudchicha Abdelaziz, « utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécanique des bétons», thèse doctorat, université Mentouri à Constantine, Décembre 2007.
- [42] Merniz Mohamed, « étude de l'influence de la nature et les dimensions des fibres sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons autoplaçants (BAP) », mémoire master, université Mohamed Boudiaf à M'sila, 2015.
- [43] GC1712 « Durabilité ET réparation du béton » département génie civil, université de Sherbrooke __ canada, avril 2009

- [44] Okamura, H. M. and Ouchi, M. (2003) "Self-Compacting Concrete," Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, No. 1, pp. 5-15
- [45] M. I. and G. S. M. Yurugi, N. Sakata, "Mix Proportion for Highly Workable Concrete," Proc. Int. Conf. Concr. Dundee, 1993.
- [46] <https://betonparszagros.ir/ar/%D9%85%D8%B9%D9%8A%D8%A7%D8%B1-%D8%A7%D9%84%D8%AE%D8%B1%D8%B3%D8%A7%D9%86%D8%A9-%D9%85%D8%A7-%D9%87%D9%88%D8%9F/>
- [47] Neville A., Geon M, Propriétés des bétons, traduit par CRIB Centre de Recherche Inter 49 Khezazna A. Houamdi M. Ahmed Salah M Mémoire de master Génie civilYYE " 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 ".Université Hamma Lakhdar d'El Oued
- [48] Ouarglim Yazı, 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).
- [49] AFNOR. (1990). NF P 18-560 : Analyse granulométrique (Norme française). Association Française de Normalisation.

Annexe 1



Mokaouem Plus

مقاوم بلوس



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.



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) 
		0/5	8/15mm 15/25mm	
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

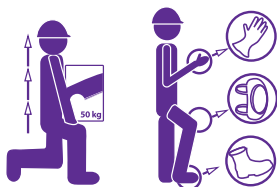
	Valeur
Consistance Normale (%)	25 à 28
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	3200 à 3800
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1000
Expansion (mm)	≤2,0
Chaleur d'hydratation	<270j/g

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

LAFARGE
لافارج

Annexe 2

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 %

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