



République algérienne démocratique et populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de
la Recherche Scientifique

Université d'El Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE ET DE GENIE CIVIL

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil:

Filière : Génie Civil

Spécialité: Matériaux en Génie Civil

THEME

**Valorisation et optimisation de sable de
dune et de poudre de céramique dans le
mortier de ciment par l'application de la
méthode des plans d'expériences**

Mémoire de fin d'étude

Présenté par:

- *Abdelhai Khezazna*
- *Mohammed Houamdi*
- *Moustafa Ahmedsalah*

Encadreur :

Dr. Mohamed Zohair kaab

Co-encadreur :

Dr. Hamad khelaifa

2023/2024

الملخص

يهدف عملنا إلى استخدام طريقة تاجوشي لتحديد مجموعة من النماذج التنبؤية المبنية على نسب مكونات الملاط المحضر.

دراستنا تتم على مرحلتين أساسيتين. في المرحلة الأولى، نقوم بتحديد الخصائص الفيزيائية والميكانيكية الرئيسية للمواد المستخدمة، واختيار طريقة الصياغة المناسبة، وإنتاج الملاط المختلفة كجزء من دراستنا، بينما في المرحلة الثانية، الهدف هو إنشاء نماذج رياضية قادرة على التنبؤ بقابلية تشغيل الملاط وكذلك مقاومته لمدة 28 يومًا. تسلط هذه المرحلة الضوء على الارتباطات بين المكونات المختلفة باستخدام برنامج MINITAB 18.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن نسب الماء إلى الأسمنت وكذلك معدلات دمج رمل الكثبان ومسحوق السيراميك هي العوامل الرئيسية المؤثرة على السلوك الميكانيكي لملاط الدراسة.

الكلمات المفتاحية : رمال الكثبان الرملية، مسحوق السيراميك، الملاط، القوة الميكانيكية، طريقة تاغوتشي.

ABSTRACT

Abstract

Our work aims to use the Taguchi method to determine a set of predictive models based on the proportions of the constituents of the formulated mortars. Our study takes place in two essential phases. In the first phase, we consist of determining the main physical and mechanical characteristics of the materials used, choosing the appropriate formulation method, and producing the different mortars as part of our study, while in the second phase, the objective is to establish mathematical models capable of predicting the workability of the mortar as well as its resistance to 28 days. This phase highlights the correlations between the different constituents using the MINITAB 18 software.

The results obtained showed that the water/cement (W/C) ratios as well as the incorporation rates of dune sand and ceramic powder are the main factors influencing the mechanical behavior of the study mortars.

Keywords : Dune sand, Ceramic powder, Mortar, Mechanical strength, Taguchi method.

RESUME

Resume

Notre travail vise à utiliser la méthode de Taguchi pour déterminer un ensemble de modèles prédictifs basés sur les proportions des constituants des mortiers formulés. Notre étude se déroule en deux phases essentielles. En première phase, on consiste à déterminer les principales caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux utilisés, à choisir la méthode de formulation appropriée, et à réaliser les différents mortiers dans le cadre de notre étude, alors qu'en deuxième phase, l'objectif est d'établir des modèles mathématiques capables de prédire la maniabilité du mortier ainsi que sa résistance à 28 jours. Cette phase met en évidence les corrélations entre les différents constituants à l'aide du logiciel MINITAB 18.

Les résultats obtenus ont montré que les rapports eau/ciment (E/C) ainsi que les taux d'incorporation de sable de dune et de poudre de céramique sont les principaux facteurs influençant le comportement mécanique des mortiers d'étude.

Mots clés : Sable de dune, Poudre de céramique, Mortier, Résistance mécanique, Méthode de Taguchi.

REMERCIEMENT

“ Thanks to the one God, Light of the heavens and the earth, who help and guide ”

Après avoir rendu grâce à Dieu le tout puissant et le miséricordieux Nous tenons à remercions vivement notre promoteur Dr. Mohamed Zohaïr kaab pour l'aide précieuse qu'il nous a offert dans l'élaboration de ce travail. Nous remercions tous les membres du jury d'avoir accepté d'être les rapporteurs de notre mémoire Nous tenons à remercier sincèrement tout ce qui, de près ou de loin ont participé à la rédaction de ce document il s'agit plus particulièrement les membres de laboratoire qui ont participé indirectement ou directement à ce flux de recherche et à son objectif et aussi un merci spécial à khaled labed pour sa contribution à ce travail Enfin, on n'o serait oublier de remercierons chers parents et nos amies.

Merci.

DÉDICACE

Nous souhaitons dédier notre mémoire de fin d'études aux parents, aux mères, aux pères et à tous ceux qui nous ont apporté leur soutien.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et reconnaissance envers vous tous pour le soutien exceptionnel que vous nous avez accordé tout au long de notre parcours éducatif. Vous avez été une source de force et d'inspiration pour nous, et cette mémoire reflète en partie le succès que nous avons atteint grâce à vous.

Deuxièmement, nous souhaitons exprimer notre gratitude envers la famille et les amis qui nous ont apporté leur soutien et leur encouragement tout au long de notre parcours académique. Vous avez été une source de motivation et d'inspiration, et vous avez contribué de différentes manières à développer nos capacités et à trouver les opportunités appropriées pour réussir. Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude pour vos paroles de soutien et votre confiance en nos capacités.

Enfin, nous tenons à remercier tous les enseignants et professeurs qui nous ont guidés et enseigné des connaissances précieuses. Vous avez été une source d'inspiration et de savoir, contribuant à construire nos bases académiques et à élargir nos horizons. Nous apprécions votre dévouement et votre attention pour nous guider vers le succès et l'excellence.

En résumé, cette mémoire est le fruit des efforts collectifs et du soutien remarquable offerts par les parents, les familles, les amis et les enseignants. Nous vous remercions tous de vous être tenus à nos côtés et de nous avoir soutenus tout au long du chemin. Notre réussite n'aurait pas été possible sans vous, et nous apprécions vos sacrifices et votre amour qui nous ont inspirés et poussés à exceller.

Table des matières

Abstract	i
REMERCIEMENT	iii
Dédicace	iv
Table des matières	v
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I Synthèse Bibliographique	4
I.1 Introduction	4
I.2 Les mortiers	4
I.2.1 Généralités sur les mortiers	4
I.2.2 Typologie des mortiers	5
I.2.3 Mortiers hydrauliques et ciments	5
I.2.4 Mortier de ciment	6
I.2.5 Les Mortier de granulats de céramique et de sable de dune	10
I.3 Recyclage de céramiques	13
I.4 Mortie de déchets de céramiques et sable de dune	14
I.5 Résumés des propriétés physiques et mécaniques du mortier céramique et du sable dunaire :	14
I.6 propriétés fraîches du mortier céramique et du sable dunaire :	15
I.7 L'ouvraabilitie du mortier de ciment avec de la céramique et du sable des dunes :	16
I.8 propriétés à l'état durci :	17

I.9	Méthode des plans d'expériences	17
I.10	Méthode de taguchi	22
I.10.1	Le plan de Taguchi (plan de Taguchi orthogonal)	22
I.11	Conclusion	23
 Chapitre II Matériaux et Procédures Expérimentales		24
II.1	Introduction	24
II.2	Matériaux utilisés	24
II.2.1	Sables	24
II.2.2	Ciment	28
II.2.3	Poudre céramique	29
II.2.4	Eau de Gâchage	30
II.3	Formulations	30
II.3.1	Formulations du Mortier de sable Témoin (0%PC, 0%SD)	30
II.3.2	Formulations du Mortier de sable avec PC et SD	30
II.3.3	Applications la méthode Taguchi	31
II.3.4	Compositions des mortiers	31
II.4	Procédure Expérimentale	31
II.4.1	Fabrication du mortie de sable	31
II.4.2	Malaxage des composants du mortier de sable	32
II.4.3	Coulage des éprouvettes	32
II.4.4	Etapas de coulage des éprouvettes	33
II.4.5	Démoulage et pesage des éprouvettes après 24h	34
II.5	Les essais réalisés	34
II.5.1	Essais réalisés à l'état frais	34
II.5.2	Essais réalisés à l'état durci	36
II.6	Conclusion	39
 Chapitre III Analyser et discussion des résultats		40
III.1	Introduction	40

III.2 Facteurs	40
III.3 Niveaux des facteurs	40
III.4 Choix de la matrice de Taguchi pour notre étude	41
III.5 Mortier à l'état frais	44
III.5.1 La maniabilité	44
III.5.2 La masse volumique à l'état frais	48
III.6 Mortier à l'état durci	51
III.6.1 La masse volumique à l'état durci	51
III.6.2 Résistance à la compression	55
III.6.3 Résistance mécanique à la flexion	58
III.6.4 Vitesse de propagation d'ultrasons	62
CONCLUSION GENERALE	66

Table des figures

I.1	Granulats	7
I.2	Céramique	10
I.3	Déchets de Céramique	11
I.4	Sable de dune	12
I.5	Sable de dune	12
I.6	Déchets de céramique	15
I.7	méthode traditionnelle d'expérimentation et courbe de réponse	18
I.8	maillage du domaine expérimental et surface de réponse	18
I.9	domaine expérimental d'un plan factoriel complet	20
I.10	points expérimentaux pour un plan de mélange à trois constituants	20
I.11	Organigramme général de traitement des plans d'expériences	21
II.1	Sable Djamaa	25
II.2	Sable de dune El oued	25
II.3	Courbes granulométriques des sables utilisés	25
II.4	Ciment utilisé	28
II.5	poudre de céramique (0-0.08mm)	30
II.6	Pesage des composants du Mortier	32
II.7	Moule (4 x 4 x 16) cm	32
II.8	Lubrification des moules	33
II.9	Remplissage à moitié et vibration	33
II.10	Remplissage à moitié et vibration	34
II.11	Dernière vibration et rasage	34
II.12	Dispositif de mesure d'affaissement au table de secous	35

II.13 Dispositif de mesure d'affaissement au table de secous	35
II.14 Détermination de la masse volumique	36
II.15 Mise à l'étuve des éprouvettes à une température de 105°	36
II.16 Essai de traction par flexion 3 points sur les éprouvettes (4x4x16) cm3 . . .	37
II.17 Essai de compression sur les éprouvettes (4x4x16) cm3	38
II.18 Mesure de la vitesse de propagation de sons sur des éprouvettes (4x4x16) cm3	38
III.1 conception des niveaux de chaque facture par la methode de taguchi	43
III.2 Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios)	45
III.3 La maniabilité des mortiers en fonction de pourcentage de sable de dune et du rapport E/C.	46
III.4 La maniabilité des mortiers en fonction de pourcentage de poudre de céramique et du rapport E/C.	47
III.5 La maniabilité des mortiers en fonction de pourcentage de poudre de céramique et de sable de dune.	47
III.6 Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios)	48
III.7 la masse volumique à l'état frais en fonction de pourcentage de sable de dune et du rapport E/C.	50
III.8 la masse volumique à l'état frais en fonction de pourcentage de poudre de céramique et du rapport E/C.	50
III.9 la masse volumique à l'état frais en fonction de pourcentage de poudre de céramique et de sable de dune.	51
III.10 Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios)	52
III.11 la masse volumique à l'état durci en fonction de pourcentage de sable de dune et du rapport E/C.	53
III.12 la masse volumique à l'état durci en fonction de pourcentage de poudre de céramique et du rapport E/C.	54
III.13 la masse volumique à l'état durci en fonction de pourcentage de poudre de céramique et de sable de dune.	54
III.14 Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios)	55

III.15	La résistance mécanique à la compression à 28 jours en fonction de pourcentage de sable de dune et du rapport E/C.	57
III.16	La résistance mécanique à la compression à 28 jours en fonction de pourcentage de sable de dune et du rapport E/C.	57
III.17	La résistance mécanique à la compression à 28 jours en fonction de pourcentage de poudre de céramique et du rapport E/C.	58
III.18	Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios).	59
III.19	La résistance à la flexion à 28 jours en fonction de pourcentage de sable de dune et du rapport E/C.	60
III.20	La résistance à la flexion à 28 jours en fonction de pourcentage de poudre de céramique et du rapport E/C.	61
III.21	La résistance à la flexion à 28 jours en fonction de pourcentage de poudre de céramique et de sable de dune.	61
III.22	Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios)	62
III.23	La vitesse de propagation d’ultrasons à 28 jours en fonction de pourcentage de sable de dune et du rapport E/C.	64
III.24	La vitesse de propagation d’ultrasons à 28 jours en fonction de pourcentage de poudre de céramique et du rapport E/C	64
III.25	La vitesse de propagation d’ultrasons à 28 jours en fonction de pourcentage de poudre de céramique et de sable de dune.	65

INTRODUCTION GENERAL

Le sable de dunes est disponible en grande quantité au Sahara, où est enregistrée une déficience accrue en matière de granulats destinés à la fabrication du béton ou mortier. A cela, s'ajoute le facteur de l'éloignement des régions sahariennes des endroits d'approvisionnement en matière de granulats, qui rend encore plus onéreux la valeur des granulats. De ces faits, la valorisation des toutes les matériaux locaux, comme le sable de dunes, et de réutilisation des déchets dans le domaine de la construction, tels que la poudre de céramique usée présenter un avantage économique sûr.

Le but de ce travail est d'appliquer les plans d'expériences qui est représenté par la méthode de Taguchi pour trouver les résultats optimaux ces qui améliore les performances physiques et mécaniques de ces matériaux dans les composites cimentaires. Pour cela nous allons varier des proportions de sable de dune en mélange avec du sable alluvionnaire (15%, 20% et 35%), nous allons également varier des proportions de poudre de céramique en mélange avec du sable alluvionnaire (3%, 6.5% et 10%) et varier le rapport eau/ciment (E/C) (0.55, 0.60 et 0.65).

Nous présentons tout d'abord dans le premier chapitre, une synthèse bibliographie regroupant d'une part des généralités sur les mortiers classiques puis, d'autre part, nous parlerons sur les sables de dunes, les déchets de céramique avec une brève sur l'utilisation de la méthode de conception expérimentale.

Dans le deuxième chapitre nous exposerons les composants de notre mortier avec leurs

caractéristiques : Sables, ciment, eau et poudre de céramique ainsi que les procédures expérimentales adoptées. Le troisième chapitre sera consacré à l'analyse statistique des tests réalisés sur cet mortier en utilisant la méthode de Taguchi assistée par le logiciel Minitab18.

A l'issue de ce travail, nous exposerons une conclusion générale sur la base des résultats obtenus.

CHAPITRE I

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction

Ce chapitre est une synthèse bibliographique des recherches menées sur le comportement du mortier. Il sera divisé en trois parties. La première portera sur la description du problème des déchets de céramiques usagées et leur valorisation dans le domaine des matériaux de construction. La deuxième partie est la matrice de ciment. Alors que la deuxième partie.

Parlant des composants du mortier, la troisième partie est consacrée à l'effet mortier. Céramique recyclée sur les propriétés fraîches et dures des matériaux cimentaires. Enfin, nous concluons avec les résultats de l'étude d'impact poudre de céramique et sable de dune sur le comportement du mortier.

I.2 Les mortiers

I.2.1 Généralités sur les mortiers

Le mortier est un matériau utilisé dans la construction pour lier des pierres, des tuiles ou des blocs entre eux. Le mortier est généralement fabriqué à partir d'un mélange de sable et de ciment ou de chaux et d'eau. Le mortier est utilisé pour stabiliser et renforcer la structure et peut avoir divers effets sur les propriétés du bâtiment telles que la résistance, la durabilité et l'aspect esthétique. Il existe différents types de mortier utilisés à différentes fins, tels que le mortier ordinaire, le mortier imperméable, le mortier de carrelage et autres.

I.2.2 Typologie des mortiers

Il existe plusieurs types de mortiers :

Mortier de terre

Mortier de chaux grasse

Mortier de chaux hydraulique

Mortier de plâtre

Mortier de ciment Portland

Le mélange d'un liant et d'eau sans agrégat s'appelle la barbotine ou eau de chaux. Le mortier de ciment et de chaux hydraulique (10 à 15 %) s'appelle un mortier bâtard. Si on ajoute du gravier à un mortier, on obtient du béton .[1]

I.2.3 Mortiers hydrauliques et ciments

Le mortier hydraulique est un type de mortier utilisé dans le bâtiment et la construction, et se caractérise par sa capacité à guérir et à durcir sous l'eau. Le mortier hydraulique se compose d'un mélange de ciment, de sable et d'eau, avec l'ajout de substances spéciales qui aident à activer les propriétés hydrauliques. Le ciment est un matériau cunéiforme utilisé dans la fabrication du béton et du mortier. Le ciment est produit en broyant des matières premières telles que le calcaire et l'argile, puis en les chauffant uniformément pour activer les éléments chimiques nécessaires à la formation du ciment. Le processus de fabrication du ciment implique généralement des étapes telles que le meulage, le mélange et le chauffage, et la composition du ciment varie en fonction de différentes applications telles que le ciment Portland, le ciment à durcissement plus rapide, le ciment de construction marine et autres. Le mortier hydraulique est une évolution du mortier traditionnel, car il est capable de durcir rapidement sous l'eau et dans des environnements humides, ce qui le rend idéal pour une utilisation dans des projets résistants à l'eau tels que la construction de sous-murs ou les travaux marins .

Le mortier de ciment est un type de mortier utilisé dans le bâtiment et la construction, et il repose principalement sur le ciment comme matériau de base pour relier les pieux, les carreaux ou les blocs. Le mortier de ciment est préparé en mélangeant du ciment avec du sable et de l'eau, et des substances supplémentaires telles que des produits chimiques peuvent être ajoutées pour améliorer ses propriétés mécaniques ou pour modifier ses propriétés hydrauliques.

I.2.4 Mortier de ciment

I.2.4.1 Définition

Le mortier de ciment est un type de mortier utilisé dans le bâtiment et la construction, et il repose principalement sur le ciment comme matériau de base pour relier les pieux, les carreaux ou les blocs. Le mortier de ciment est préparé en mélangeant du ciment avec du sable et de l'eau, et des substances supplémentaires telles que des produits chimiques peuvent être ajoutées pour améliorer ses propriétés mécaniques ou pour modifier ses propriétés hydrauliques.

I.2.4.2 Composition du mortier de ciment

Le mortier de ciment se compose généralement de composants de base qui comprennent le ciment, le sable et l'eau, ainsi que de certains matériaux supplémentaires qui peuvent être utilisés pour modifier ses propriétés ou améliorer ses performances. Voici une illustration pour chaque composant :

Ciment : C'est le composant principal du mortier de ciment, et divers types de ciment tels que le ciment Portland, le ciment blanc, le ciment à durcissement rapide et autres peuvent être utilisés, en fonction des exigences de l'application.

Sable : Le sable est utilisé comme remplissage dans le mortier pour augmenter sa résistance et améliorer sa souplesse. Il est préférable d'utiliser du sable propre et sans défaut pour de meilleurs résultats.

Eau : L'eau est utilisée dans le mélange des boues pour activer le ciment et obtenir une solidification chimique. Des quantités appropriées d'eau doivent être utilisées pour obtenir une composition de boue cohérente et facile à utiliser.

Matériaux supplémentaires : Certains matériaux supplémentaires peuvent être ajoutés tels que des plastifiants pour améliorer le processus de mélange et réduire la quantité d'eau nécessaire, des renforts tels que des fibres pour augmenter la résistance du mortier et sa résistance aux fissures, et des matériaux imperméables pour améliorer ses propriétés de résistance à l'humidité. Les proportions de composants et de matériaux supplémentaires varient en fonction des différentes applications et des exigences de l'entreprise. Il est toujours conseillé de suivre les instructions du fabricant ou de l'expert dans la préparation et l'utilisation du mortier de ciment pour assurer des résultats optimaux et une grande durabilité .

I.2.4.3 Le liant

Le matériau de liaison du mortier est le composant principal qui se transforme en solides après séchage pour lier les composants de la boue ensemble et leur donner résistance et rigidité. Le ciment est le matériau de liaison le plus couramment utilisé dans le mortier de

ciment, où le ciment réagit avec l'eau pour former des matériaux hydrauliques qui rendent le mortier solide et durable.

La résistance et les spécifications du matériau de liaison dépendent du type de ciment utilisé et de son rapport dans la composition, en plus d'autres facteurs tels que le rapport entre le sable et l'eau. Vous choisissez généralement les bons types de ciment en fonction de l'utilisation de la boue et des exigences de travail.

Il existe d'autres types de matériaux de liaison qui peuvent être utilisés dans le mortier, tels que la chaux (chaux) et le gypse (gypse), qui sont utilisés dans certaines applications ou à des fins spéciales. Les propriétés de ce liant diffèrent de celles du ciment et leurs effets sur les propriétés du mortier.

Il convient de noter que la composition du mortier et du matériau de liaison est un élément important pour déterminer les caractéristiques du bâtiment ou de la structure finale, de sorte que divers facteurs tels que le type de matériau, les proportions de la composition et les conditions ambiantes de travail doivent être pris en compte pour garantir des résultats optimaux.[2]

I.2.4.4 Granulats

L'agrégat est un terme qui fait référence à un groupe de matières premières solides utilisées dans la fabrication du béton, du mortier, de l'asphalte et d'autres matériaux de construction. Les granulats sont utilisés comme remplissage à l'intérieur des matériaux de construction pour améliorer leur résistance et leurs propriétés mécaniques. Les granulats peuvent être du gravier, du gravier, du sable ou de la pierre concassée de différentes tailles, et la qualité, la taille et les caractéristiques des agrégats dépendent de leur utilisation prévue.

Les granulats constituent une partie essentielle des composants en béton, car ils sont



FIGURE I.1 – Granulats

mélangés avec du ciment, de l'eau et du sable pour former un mélange connu sous le

nom de béton prêt à l'emploi. Les granulats sont également utilisés dans la formation des couches routières, des fondations et des bâtiments pour répartir la pression et renforcer les structures.

Le type, la taille et le pourcentage de granulats dans la composition sont choisis en fonction des exigences du projet de construction, et l'agrégat doit être exempt d'impuretés et de matières organiques indésirables pour garantir des résultats exceptionnels et une grande durabilité dans les structures et les structures.[1]

I.2.4.5 L'eau de gâchage

L'eau de mélange dans le mortier de ciment est de l'eau qui est ajoutée au mélange de ciment-sable pour former un mortier. L'eau de mélange joue un rôle crucial dans le processus de durcissement de la boue et ses spécifications finales. Voici quelques points importants sur le mélange de l'eau dans le mortier de ciment :

Activation du ciment : l'eau de mélange réagit avec le ciment pour former un système hydraulique qui contribue au durcissement de la boue. Cette réaction est connue sous le nom de réaction hydraulique.

Effet sur les propriétés du mortier : La quantité d'eau ajoutée affecte grandement les caractéristiques du lisier telles que sa résistance, sa plasticité et son élasticité. Une consommation excessive d'eau peut réduire la résistance de la boue et la faire craquer.

Répartition des granulats et du sable : L'eau de mélange aide à répartir uniformément les granulats et le sable dans le mélange, ce qui améliore la qualité du mélange final et augmente sa durabilité.

Facilité de mélange et d'utilisation : L'eau contribue à rendre le mortier facile à former et à utiliser, ce qui permet de le placer facilement aux endroits requis sans difficulté.

Contrôle de la quantité : Il est important de surveiller la quantité d'eau de mélange ajoutée, car elle doit être suffisante pour activer le ciment et former la boue de manière cohérente, et en même temps, vous devez éviter d'ajouter des quantités excessives qui affectent négativement la qualité de la boue.

En général, les étapes doivent suivre le processus correct d'ajout d'eau de mélange et ajuster sa quantité strictement en fonction des exigences de la formulation et des directives spécifiques pour garantir une boue de haute qualité et d'excellentes propriétés mécaniques.[3]

I.2.4.6 Les adjuvants ou additifs

Il existe de nombreux additifs et auxiliaires qui peuvent être ajoutés au mortier de ciment pour améliorer ses performances et améliorer ses propriétés. Parmi ces matériaux, on peut citer :

Matériaux en béton polymère : Ces matériaux sont utilisés pour augmenter la durabi-

lité du mortier et sa résistance à la corrosion et à la corrosion chimique, et ils comprennent des polymères tels que le polystyrène, l'époxy et le polyamide.

Plastifiants : Utilisés pour améliorer l'écoulement des boues et réduire la quantité d'eau nécessaire, ce qui facilite le mélange et le formage et accélère le processus de solidification.

Inhibiteurs de fissures : Utilisés pour empêcher la formation de fissures dans le mortier, y compris les fibres, la fibre de verre et le plastique.

Agents de renforcement : Utilisés pour augmenter la résistance du mortier et sa résistance à la fissuration, y compris les fibres ferreuses et les fibres métalliques

Matériaux renforcés de fibres : Utilisés pour améliorer la solidité du mortier et sa résistance aux fissures, il comprend de la fibre de verre et des fibres naturelles telles que les fibres de chanvre.

Agents antigel : Utilisés dans des environnements froids pour empêcher l'eau de geler à l'intérieur de la boue et améliorer le processus de durcissement.

Les utilisations et les avantages de ces adjuvants varient en fonction des différentes applications et des exigences commerciales, et des experts dans le domaine de la construction et de l'ingénierie peuvent être consultés pour déterminer la préférence et la combinaison optimale pour chaque cas.[4]

I.2.4.7 Les utilisations des mortiers de ciment

Le mortier de ciment a de nombreuses utilisations dans le domaine du bâtiment et de la construction, où il est utilisé à plusieurs fins et dans plusieurs applications. Parmi les utilisations les plus importantes du mortier de ciment :

Revêtement des surfaces et des murs : Le mortier de ciment est utilisé pour couvrir les surfaces extérieures et les murs intérieurs, leur donnant un aspect esthétique et les protégeant de la corrosion et des fuites.

Rembourrage du revêtement de sol : Le mortier de ciment est utilisé comme couche de base pour paver les sols avant de poser les sols finaux tels que le carrelage ou le marbre.

Réparer les fissures et les fissures : Le mortier de ciment est utilisé pour réparer les fissures et les fissures dans les murs et les surfaces, ce qui maintient la structure ensemble et empêche les fuites d'eau.

Fixation des carreaux et des murs : Le mortier de ciment est utilisé pour fixer les carreaux et les murs, car il contribue à l'unification des surfaces et assure la stabilité de la structure

Construction de structures en béton : Le mortier de ciment est utilisé dans la construction de structures en béton telles que les colonnes, les murs et les plafonds, car il leur donne la résistance et la rigidité nécessaires.

Travaux maritimes : Le mortier de ciment est utilisé dans les travaux maritimes tels que la construction de jetées, de passerelles et de clôtures marines, car il lui confère une grande résistance à l'eau et à la corrosion.

Aménagement paysager : Le mortier de ciment est utilisé dans l'aménagement paysager tel que la création de chemins, de terrasses et de petits ponts.

Ce sont quelques utilisations courantes du mortier de ciment, et il peut avoir d'autres utilisations en fonction des besoins et des différentes exigences structurelles.[5]

I.2.5 Les Mortier de granulats de céramique et de sable de dune

I.2.5.1 Céramique

La céramique est un terme qui fait référence aux solides inorganiques fabriqués par la formation et la combustion de matériaux métalliques ou non métalliques tels que l'argile, la silice et le kaolin. Les céramiques sont célèbres pour un large éventail d'utilisations et d'applications dans différents domaines, voici quelques informations générales à leur sujet :



FIGURE I.2 – Céramique

Histoire : Histoire de la céramique : L'histoire de la céramique remonte à l'Antiquité, où elle était utilisée pour fabriquer des ustensiles, des outils et des décorations. Il a été témoin d'énormes progrès dans les techniques de fabrication à travers les âges.

I.2.5.2 Types de céramique

Types de céramique : Les types de céramique comprennent la porcelaine, la poterie, la porcelaine, la vitrocéramique et la céramique industrielle. Ces espèces diffèrent par leur composition, leurs caractéristiques et leurs utilisations.

Utilisations : La céramique est utilisée dans la fabrication d'ustensiles ménagers tels que la vaisselle, les tasses et les ustensiles de cuisine, ainsi que dans la fabrication de carreaux, de sols, de murs, de décorations intérieures et extérieures.

Caractéristiques : Les céramiques présentent plusieurs caractéristiques, notamment la résistance

à la chaleur, à la corrosion et aux influences atmosphériques, la facilité de nettoyage et d'entretien, ainsi que la résistance aux taches et aux rayures.

Processus de fabrication : Les céramiques sont fabriquées en formant la matière première et en effectuant un processus de combustion dans des fours à des températures élevées, ce qui leur permet d'acquérir une rigidité et une résistance mécanique élevées.

Décoration et arts céramiques : La céramique est utilisée dans le domaine des beaux-arts et de la décoration pour créer des œuvres d'art distinctives et innovantes.

En bref, la céramique est un matériau polyvalent caractérisé par ses propriétés uniques et sa longue histoire dans le domaine de l'artisanat et des industries industrielles.



FIGURE I.3 – Déchets de Céramique

I.2.5.3 Sable de dune

Les sables du désert sont les sables que l'on trouve dans les zones désertiques et constituent une partie importante de l'environnement désertique. Voici quelques informations générales sur les sables du désert :

Composition : Les sables du désert sont généralement constitués de petites particules formées à partir de roches en décomposition, telles que le quartz, le feldspath, le gypse et le calcaire.

Propriétés physiques : Les sables du désert ont des propriétés physiques distinctives, telles qu'une petite taille de particules et une grande douceur, ce qui les rend adaptés à une utilisation dans plusieurs applications, y compris la construction et l'agriculture.

Utilisations : Les sables du désert sont utilisés dans de nombreuses industries et applications, telles que le verre et la céramique, dans l'industrie du béton et de la brique, ainsi



FIGURE I.4 – Sable de dune

que dans le développement agricole pour améliorer le sol terrestre.

Défis : Les sables du désert sont confrontés à certains défis tels que le manque d'humidité et les changements thermiques importants dans l'environnement désertique, ce qui peut affecter certaines utilisations potentielles pour eux.

Source : La source du sable de ville se trouve souvent dans les opérations de construction, où le sable est utilisé pour casser des pierres et produire des matériaux de construction tels que le béton et le ciment.

Caractéristiques : Le sable de ville peut avoir certaines caractéristiques qui le rendent adapté ou non à certaines utilisations. Par exemple, il peut avoir un degré élevé d'impuretés ou d'humidité dans certains cas.

Utilisations : Le sable de ville est couramment utilisé dans le bâtiment et la construction, tels que la fabrication de béton et de briques, ainsi que dans de nombreuses autres applications telles que le nivellement des sols, le remplissage de trous et le forage.

Défis : Vous pouvez rencontrer des difficultés dans l'utilisation du sable de ville en raison de problèmes de qualité tels que le confinement d'impuretés indésirables ou le non-respect des spécifications techniques requises.



FIGURE I.5 – Sable de dune

I.2.5.4 Les caractéristiques d'un mortier de ciment :

Le mortier de ciment est un mélange composé de ciment, de sable et d'eau, et est couramment utilisé dans la construction pour lier les carreaux, la céramique et les pierres. Voici quelques propriétés importantes du mortier de ciment lorsqu'il est utilisé avec de la céramique et du sable des dunes :

Résistance nécessaire : Le mortier de ciment utilisé avec la céramique et le sable des dunes doit être suffisamment solide pour résister aux charges et aux pressions, telles que le poids et l'utilisation quotidienne.

Adhérence : Le mortier de ciment doit pouvoir bien adhérer à la céramique et au sable des dunes, en veillant à ce que la surface soit stable et ne bouge pas ou ne se fissure pas facilement.

Résistance à la corrosion : Le mortier de ciment doit être capable de résister à la corrosion et aux influences extérieures potentielles telles que l'exposition à l'eau, afin d'assurer la continuité de sa qualité et de son aspect.

Flexibilité : Le mortier de ciment est de préférence suffisamment flexible pour résister aux changements thermiques naturels, au retrait et au gonflement qui peuvent se produire dans la céramique et le sable des dunes.

Résistant aux fissures : Le mortier de ciment doit être capable d'empêcher la fissuration de la surface et de maintenir son apparence et sa qualité à long terme.[6]

I.3 Recyclage de céramiques

Le recyclage de la céramique est un processus important pour préserver l'environnement et utiliser les ressources de manière durable. Voici quelques façons populaires de recycler la céramique :

Concassage de la céramique pour la réutilisation : Les vieilles céramiques peuvent être fissurées et utilisées comme matières premières dans diverses industries telles que la fabrication de carreaux, où elles sont broyées et mélangées à d'autres matériaux pour produire de nouveaux carreaux.

Utilisation dans des projets artistiques : Les céramiques anciennes peuvent être utilisées dans de grands projets d'art manuel ou artistique, tels que la réalisation de peintures ou de sculptures artistiques. Réutilisation dans la décoration : Les vieilles céramiques peuvent être utilisées dans des projets de décoration intérieure et extérieure, tels que la décoration de jardins ou la fabrication de sols décoratifs.

Recyclage industriel : Dans certains cas, les vieilles céramiques peuvent être recyclées

pour fabriquer de nouveaux produits tels que des ustensiles ménagers ou des décorations.

La transformer en matériau de construction : Les vieilles céramiques peuvent être utilisées comme remplissage dans le béton ou le mortier pour réduire l'utilisation de matériaux naturels et améliorer la durabilité.

Faites un don ou vendez-le à des projets caritatifs : Envisagez de faire don de vieilles céramiques à des projets caritatifs ou de les vendre à des personnes intéressées à les réutiliser.

I.4 Mortier de déchets de céramiques et sable de dune

Déchets de céramique : mortier et sable des dunes Le sable est un type de mortier fabriqué à partir de certains matériaux, notamment des déchets céramiques recyclés et du sable des dunes. Ce type de mortier est utilisé dans le domaine de la construction et du génie civil dans le but de réduire les déchets et d'améliorer la durabilité environnementale. Les déchets de céramique, le mortier et le sable des dunes contiennent des composants clés, notamment :

Déchets céramiques : comprennent les pièces en céramique endommagées ou anciennes qui sont collectées et recyclées pour être utilisées dans la fabrication du béton.

Sable des dunes : Ce type de sable est utilisé comme matière première dans la production de béton et se caractérise par la douceur des grains et l'absence d'impuretés. Les déchets de béton céramique et le sable des dunes sont fabriqués en mélangeant les composants mentionnés dans certaines proportions selon les exigences de conception, puis coulés, formés et laissés durcir. Ce béton possède des propriétés telles qu'une résistance mécanique appropriée, une durabilité environnementale grâce à l'utilisation de matériaux recyclés et une résistance à la corrosion et aux facteurs environnementaux. Les déchets de céramique, le béton et le sable des dunes sont utilisés dans une variété de projets de construction et d'ingénierie visant à atteindre la durabilité environnementale et à réduire les déchets.

I.5 Résumés des propriétés physiques et mécaniques du mortier céramique et du sable dunaire :

Le mortier céramique et le sable des dunes sont une option importante dans le domaine de la construction et du génie civil, voici donc un résumé des principales propriétés physiques et mécaniques de ce type de béton :

Propriétés physiques :



FIGURE I.6 – Déchets de céramique

Densité du mortier : Elle dépend du pourcentage de composants dans le mélange et est généralement similaire à la densité du béton conventionnel.

Absorption d'eau : La capacité du béton à absorber l'eau peut être affectée par le rapport des composants et le processus de mélange et de formage.

Résistance à la corrosion : L'utilisation de la céramique dans le béton est un facteur positif de sa résistance à la corrosion en raison de la dureté des matériaux céramiques.

Propriétés mécaniques :

Résistance à la compression : Elle dépend du rapport entre le ciment, le sable et d'autres composants, et peut atteindre des niveaux élevés de résistance.

Résistance à la traction : Le mortier peut résister à une résistance à la traction peut être moyenne à bonne et dépend de la conception et des facteurs de formage.

Flexibilité : Le mortier céramique et le sable des dunes sont généralement suffisamment flexibles pour résister aux changements thermiques naturels, au retrait et au gonflement. Ces propriétés peuvent varier en fonction de la composition du mélange, du procédé de fabrication et des conditions d'exposition, et doivent être prises en compte lors de l'application de béton céramique et de sable dunaire dans des projets de construction et d'ingénierie.

I.6 propriétés fraîches du mortier céramique et du sable dunaire :

Le béton armé de céramique et le sable des dunes ont plusieurs propriétés bonnes et importantes, et ce qui suit est un résumé de ces propriétés en plus des sources que vous pouvez voir pour plus d'informations :

Haute résistance mécanique : Le mortier céramique armé et le sable des dunes ont une résistance mécanique élevée, ce qui les rend résistants à la rupture et à la corrosion.

Résistance à la corrosion : L'utilisation de la céramique dans le mortier améliore sa résistance à la corrosion et aux facteurs environnementaux tels que l'érosion de l'air et l'humidité. Durabilité environnementale : L'utilisation de déchets céramiques dans le mortier est une option durable qui réduit la quantité de déchets et préserve les ressources naturelles.

Flexibilité et formabilité : Le mortier céramique a une flexibilité qui contribue à améliorer sa formabilité et sa conception.[7]

Capacité à améliorer les propriétés mécaniques : La céramique peut être utilisée dans le béton pour améliorer les propriétés mécaniques telles que la résistance à la pression et à la traction.[8]

I.7 L'ouvrabilité du mortier de ciment avec de la céramique et du sable des dunes :

La maniabilité du mortier de ciment avec de la céramique et du sable des dunes dépend de plusieurs facteurs tels que le rapport entre le ciment et la céramique et le sable des dunes, la quantité d'eau utilisée et les techniques de mélange et de formage. Voici quelques aspects qui affectent la maniabilité de ce mortier :

Le rapport entre le ciment et la céramique et le sable des dunes :

Si le pourcentage de ciment est excessivement élevé, la maniabilité peut augmenter au détriment de la résistance, et le mortier peut être plus facile à former et à distribuer.

D'autre part, si le pourcentage de céramique et de sable des dunes est excessivement élevé, cela peut affecter négativement la maniabilité et rendre plus difficile le travail avec du mortier.

Prise d'eau : L'ajout de quantités appropriées d'eau facilite la distribution du liant et améliore sa formabilité. Cependant, vous devez éviter d'ajouter des quantités excessives d'eau car cela peut réduire la résistance de la boue et augmenter la période de durcissement.

Techniques de mélange et de formage : L'utilisation de techniques de mélange appropriées, telles que l'utilisation d'équipements de mélange spéciaux et le contrôle des proportions, peut améliorer l'ouvrabilité.

Dans les processus de moulage, des outils tels que des peignes et des étalons peuvent être utilisés pour assurer une répartition uniforme de la boue.

I.8 propriétés à l'état durci :

Résistance en compression :

La résistance à la compression d'un mortier renforcé de céramique dépend de plusieurs facteurs, notamment du type et des propriétés de la céramique utilisée, du rapport de la céramique au reste des matériaux du mortier, ainsi que du processus de mélange et de durcissement. Généralement, l'ajout de céramique au mortier est l'une des méthodes utilisées pour augmenter sa solidité et sa résistance à la pression.

La résistance à la compression d'un mortier renforcé de céramique est généralement testée à l'aide d'un test de pression axiale, où un échantillon de la boue est placé sous une pression croissante jusqu'à ce qu'il soit cassé. La valeur résultant de cet essai exprime la résistance du mortier et sa résistance à la charge de compression.

Pour obtenir des résultats précis en matière de résistance à la compression, il faut tenir compte de facteurs tels que la composition du mortier, le type de céramique utilisé, le rapport entre la céramique et les autres matériaux et les conditions de durcissement et de séchage. [9]

I.9 Méthode des plans d'expériences

L'utilisation d'un plan d'expérience est intéressante dans le sens où elle fait réduire le nombre des mélanges tout en faisant varier plusieurs paramètres (facteurs) à la fois, ce qui va nous permettre d'évaluer leurs influences ainsi que leurs interactions sur les caractéristiques des bétons. Parmi ces facteurs, on peut citer : le dosage en ciment, le dosage en additions, le dosage en eau, le rapport EL, le rapport Additions/Ciment, le dosage en adjuvant, le rapport G/S.... L'analyse statistique peut être réalisée en utilisant certains logiciels tels que le Minitab, Statistica.... Ainsi, des modèles mathématiques obtenus par régression peuvent être développés en fonction des différents facteurs.

Les plans d'expériences sont un instrument bien adapté à la recherche-développement chaque fois qu'intervient un grand nombre de paramètres. Bien utilisés, ils permettent de réduire fortement le nombre d'essais, de gagner du temps et de l'argent, tout en parvenant à un résultat encore mieux assuré. Leur application au béton s'impose chaque fois que l'on veut concilier au mieux de nombreuses exigences différentes. En termes d'expériences, il suffit de fixer, à un niveau constant, toutes les variables d'un problème sauf celles dont on espère étudier l'influence (figure 7) [10] de manière intuitive, le formulateur étudie de façon séparée les deux facteurs (variables) X_1 et X_2 . Il fixe généralement X_2 à un niveau moyen et regarde l'évolution de la réponse quand X_1 varie de $X_{1\text{mini}}$ à $X_{1\text{maxi}}$ à l'aide des quatre essais présentés sur la figure 26. Il réalise ensuite le même type d'essais avec X_2 . Un bon exemple est présenté sur la figure 11 qui montre l'influence du rapport G/S sur l'affaissement pour un béton courant et un béton à haute performance. Le dosage en ciment ainsi

que le rapport E/C ont été fixés et pour une étendue granulaire d/D donnée, le rapport G/S a été varié. Dans ce cas le formulateur obtient une réponse. Est-elle satisfaisante? bien sur, elle apporte un enrichissement de la connaissance et nous donne la valeur G/S optimale pour chacun des deux bétons, en ce sens, l'expérience est bénéfique. Par ailleurs, elle peut laisser des points d'ombre que se passe t-il si l'un des paramètres initialement fixés varie? Retrouvera-t-on les mêmes lois de variation? Dans la pratique (figure I.8), le formulateur réalise une expérience aux noeuds d'un maillage établi de façon empirique pour tracer ensuite des surfaces de réponse. Si le maillage est très serré, le nombre d'essais devient rapidement très grand. Généralement, un maillage serré traduit un manque de connaissance du phénomène étudié ou une crainte envers une réponse inattendue.

Pour améliorer la connaissance du phénomène observé, le formulateur réalise un maillage

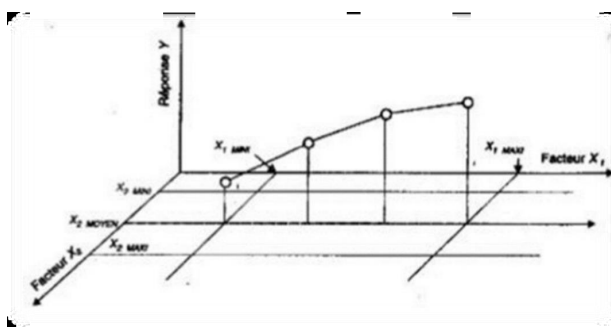


FIGURE I.7 – méthode traditionnelle d'expérimentation et courbe de réponse

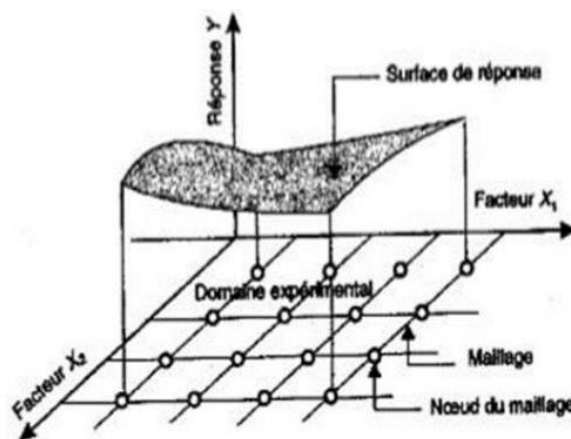


FIGURE I.8 – maillage du domaine expérimental et surface de réponse

du domaine expérimental et exécute des essais à chacun des noeuds du maillage. Dans l'exemple (figure I.8), il aura fallu seize essais pour tenter d'avoir une idée sur l'évolution de la réponse observée dans le domaine. Le principe de la méthode des plans d'expériences consiste à n'étudier sélectivement que quelques points du domaine, situés à sa frontière, aux points de variation maximale des facteurs. Dans ce cas, quatre essais suffisent à établir un modèle avec interactions. Faire un plan d'expériences, c'est planifier et structurer de

manière systématique et rigoureuse l'ensemble des expériences d'un problème multiparamétrique. L'objectif essentiel d'un plan d'expériences est de réduire au minimum le nombre de mesures expérimentales par rapport à une approche classique, tout en assurant une qualité de résultats, et en obtenant une certaine capacité prédictive grâce à une modélisation mathématique.[11]

Pour appliquer la méthode des plans d'expérience et, en particulier, les méthodes s'appuyant sur les régressions linéaires multiples, il faut que les deux conditions suivantes soient réalisées. Les valeurs des facteurs (variables explicatives) sont connues sans erreur. Cette condition semble très restrictive : en effet, peut-on prétendre, dans la préparation d'une gâchée de béton peser exactement la même quantité de ciment lorsqu'on répète un essai ? Bien évidemment, la réponse est négative. Mais, pour satisfaire cette condition N°1, on supposera que la variation du facteur autour d'un niveau fixé est très petite par rapport à la différence entre deux niveaux consécutifs et a. par conséquent, une incidence négligeable sur la réponse. Par exemple, une erreur de quelques dizaines de grammes (correspondant, généralement, à la précision des balances) sur la pesée du ciment pour une gâchée de laboratoire de quatre-vingt-dix litres, aura une influence négligeable sur les variations des résistances à la compression devant la variation du dosage en ciment lui-même, dont on cherche à analyser l'influence. La réponse (variable à expliquer) est homoscedastique. Cela signifie que l'aléa de mesure est constant sur l'ensemble du domaine étudié. Il est, en effet, difficile d'accorder une bonne confiance à un modèle établi sur des données dont la précision ne serait pas homogène. Pour résoudre ce problème, il existe (CETAMA (1986). Sanders et Allard, (1992)) cité dans la référence de [13] des tests de comparaison d'écart-types deux à deux (test de Fisher), ainsi que des tests de fusion de plusieurs écart-types (test de Bartlett). Dans tous les cas, si les écart-types ne sont pas significativement différents, on les fusionnera.

Il existe plusieurs types de plans d'expériences : les plans de mélange, les plans factoriels, les plans hybrides, les plans fractionnaires et les plans de Plackett et Burman. Nous nous contenterons dans ce qui suit, de donner quelques détails concernant les plans factoriels et les plans de mélange. Un plan factoriel est un plan d'expériences comprenant k facteurs, chacun de ces facteurs possédant deux niveaux (un niveau inférieure (-1) et un niveau supérieur (+1)), d'où le terme 2^k . Pour k représentant trois facteurs, et, huit expériences sont à réaliser afin d'établir le modèle (figure I.9) avec les interactions d'ordre 2 et l'interaction d'ordre 3. Le modèle recherché pour une réponse Y sera du type :

$$Y = \text{Aut} + A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_3 + A_{12}X_1X_2 + A_{13}X_1X_3 + A_{23}X_2X_3 + A_{123}X_1X_2X_3$$

Un plan de mélange est une forme particulière d'un plan factoriel complet. Les propriétés d'un mélange dépendent généralement de sa composition et il est fréquent que l'on veuille traduire les variations d'une propriété en fonction de la concentration des divers constituants. C'est le cas du triangle de Féret (figure I.9) dont on souhaite déterminer la compacité en tout point, caractérisée par les proportions du mélange qu'il représente.[12]

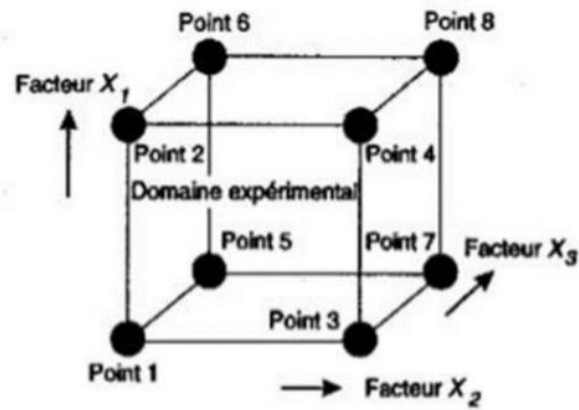


FIGURE I.9 – domaine expérimental d'un plan factoriel complet

Les sept points expérimentaux sont situés sur la frontière du domaine sauf un, situé au

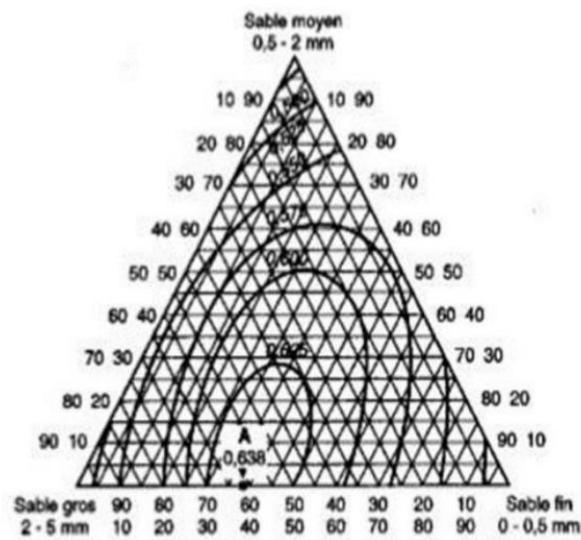


FIGURE I.10 – points expérimentaux pour un plan de mélange à trois constituants

centre de la section du triangle équilatéral. Il sert en particulier, à valider un modèle d'ordre 2 et à déterminer, dans un modèle d'ordre 3, l'interaction d'ordre 3 : B1231.

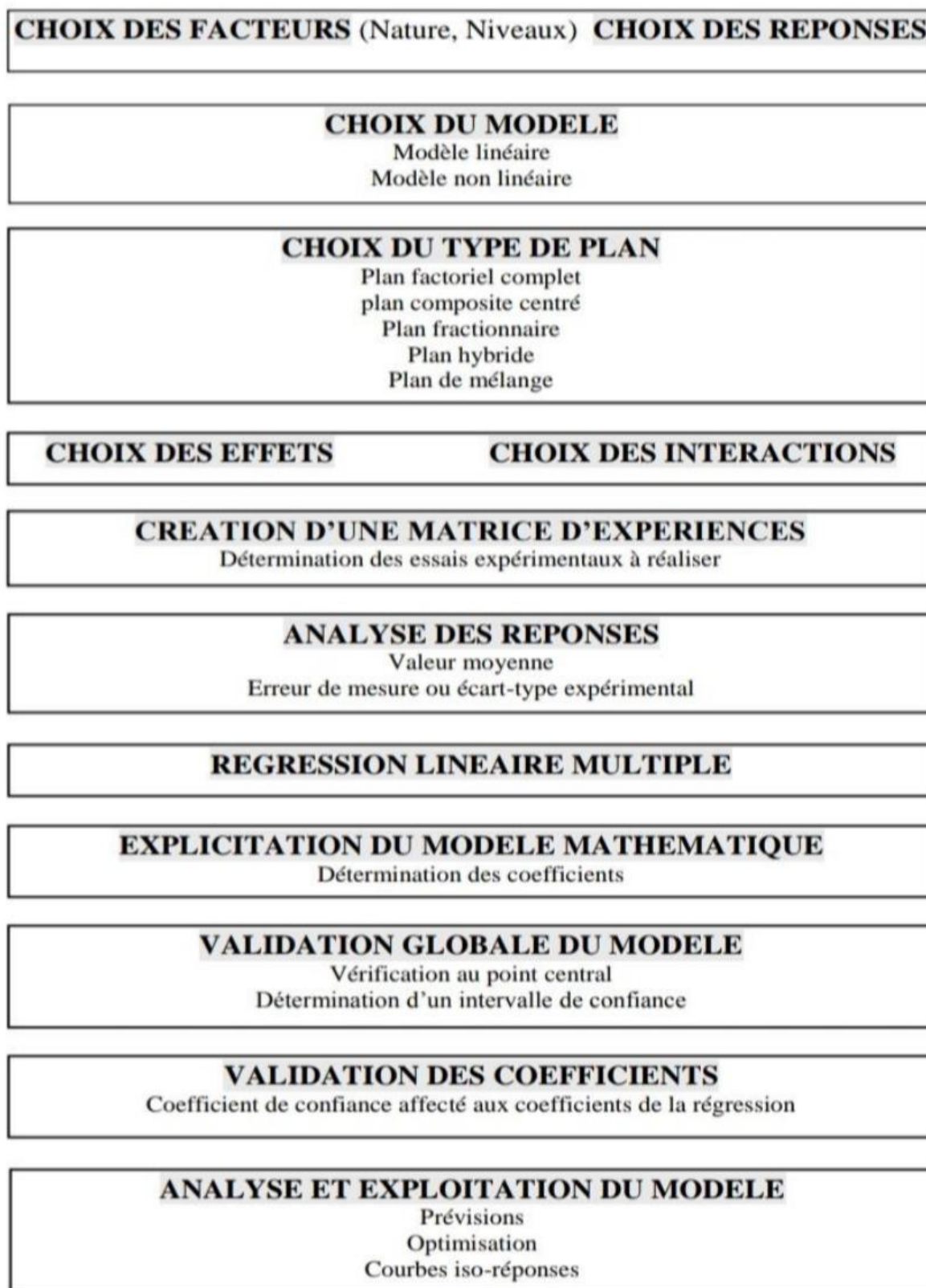


FIGURE I.11 – Organigramme général de traitement des plans d'expériences

I.10 Méthode de taguchi

La méthode Taguchi, inventée par Gen'ichi Taguchi : né le 1 janvier 1924 à Tōkamachi-mort le 2 juin 2012 à Tokyo est un ingénieur et statisticien japonais. Depuis les années 1950, il développe une méthode en vue d'utiliser la statistique comme outil pour améliorer la qualité des produits manufacturés. Gen'ichi Taguchi a su démocratiser et rendre les plans d'expériences utilisables pour des techniciens. Cette méthode se concentre avant tout à minimiser les variations autour de la valeur de consigne. L'objectif est d'obtenir des produits, processus et systèmes aussi robustes et insensibles aux perturbations externes que possible. La méthode Taguchi est appliquée dans le cadre de l'amélioration de la qualité.

I.10.1 Le plan de Taguchi (plan de Taguchi orthogonal)

Un plan de Taguchi est un plan d'expériences qui nous permet de choisir un produit ou un procédé qui fonctionne de manière plus cohérente dans un environnement d'exploitation. Les plans de Taguchi partent du principe que les facteurs à l'origine de la variabilité ne peuvent pas tous être contrôlés. Ces facteurs incontrôlables sont appelés facteurs de bruit. Les plans de Taguchi essaient d'identifier les facteurs contrôlables (facteurs de contrôle) qui minimisent l'effet des facteurs de bruit.

Pendant l'expérimentation, Il faut manipuler les facteurs de bruit de manière à imposer une variabilité, puis il faut déterminer les paramètres de facteurs de contrôle optimaux qui rendent le procédé ou le produit plus robuste ou plus résistant face à la variation provoquée par les facteurs de bruit. Un procédé conçu dans cette optique produira des résultats plus cohérents. Un produit conçu dans cette optique aura des performances plus cohérentes, quel que soit l'environnement dans lequel il sera utilisé.

Les plans de Taguchi utilisent des répertoires orthogonaux, qui évaluent les effets des facteurs sur la moyenne et sur la variation de la réponse. Avec un répertoire orthogonal, le plan est équilibré de telle sorte que les niveaux de facteurs sont également pondérés. Ainsi, chaque facteur peut être évalué indépendamment de tous les autres et l'effet d'un facteur n'influence pas l'estimation d'un autre facteur. Cela peut réduire la durée et le coût de l'expérience en cas d'utilisation de plans fractionnés.

Les plans de Taguchi orthogonaux se concentrent sur les effets principaux. Certains des applications sont intégrées dans le logiciel Minitab pour permettre d'étudier les interactions. Minitab calcule les tableaux de réponses et les résultats du modèle linéaire, et génère des graphiques des effets principaux et des diagrammes des interactions.

I.11 Conclusion

Le déchet est par définition « matière » et à ce titre il est en premier lieu sollicité pour le traiter, il est nécessaire de trouver les moyens pour en extraire les fractions valorisables ou pour diminuer les capacités de nuisances. Plusieurs types de déchets peuvent être utilisés comme granulats.

Dans ce chapitre nous avons passé en revue la problématique des déchets usagés non réutilisables, ainsi que leurs recyclage et valorisations. Puis on a donné une généralité sur les déchets de la céramique (définition, composition, propriétés, utilisation), et le mortier du sable (définition, composition, utilisation, formulation), ainsi qu'un aperçu sur l'effet de valorisation et recyclage des déchets céramiques sur les performances des matériaux à base cimentaire à l'état frais et durci.

CHAPITRE II

MATÉRIAUX ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

II.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter les différents matériaux et les techniques expérimentales utilisées dans notre étude. On présente en première partie les caractéristiques et les propriétés des matériaux de base utilisés dans la composition des mortiers . Dans une seconde partie, on exposera la méthode de formulation adoptée dans les différentes compositions des mortier du sable. Ensuite, on présente les essais réalisés au cours de notre investigation sur les mortiers et les composites obtenus à l'état frais et à l'état durci. Le béton du sable est caractérisé à l'état frais par les essais spécifiques suivants : Essai d'étalement au Mini-cône ; La densité à l'état durci, la résistance à la compression et la traction ; Essai d'auscultation dynamique.

II.2 Matériaux utilisés

II.2.1 Sables

Deux types de sables ont été utilisés dans cette étude, dunaire et alluvionnaire. Le sable dunaire (SD) provient de la région d'El oued (Voir figure II.1). Le sable alluvionnaire (SA) provient de la sablière Djamaa (Voir figure II.2). Les caractéristiques physiques des sables sont groupées dans le Tableau II.1.



FIGURE II.1 – Sable Djamaa



FIGURE II.2 – Sable de dune El oued

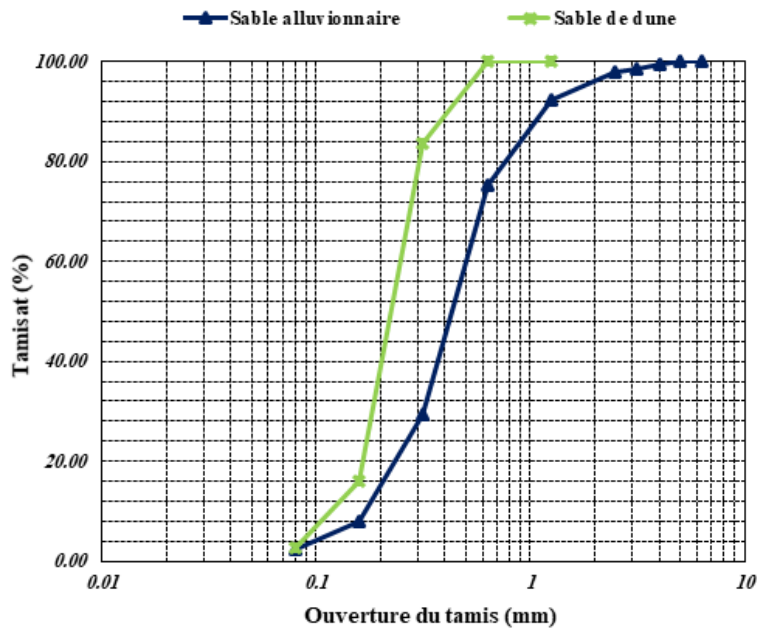


FIGURE II.3 – Courbes granulométriques des sables utilisés

Caractéristiques	Sable Alluvionnaire Djamaa (SA)	Sable de Dune (SD)
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.63	2.61
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.69	1.57
Module de finesse	1.98	1.01
Equivalent du sable (%)	70.50	83

TABLE II.1 – Caractéristiques physiques du Sable

II.2.1.1 Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques sont comme suivies :

1. Les masses volumiques

- **La masse volumique apparente** : Cet essai est régi par la norme NFP 18-554 [13], elle est définie comme étant la masse de l'unité de volume apparente du corps, c'est-à-dire celle du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.

$$\gamma = \frac{M}{V} \quad (\text{II.1})$$

Où :

γ : Masse volumique apparente ;

M : Masse du matériau ;

V : Volume total du matériau

- **La masse volumique absolue** :

Cet essai est régi par la norme NFP 18-301, elle est définie comme étant la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains.

$$\gamma_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (\text{II.2})$$

Où :

γ_s : Masse volumique absolue ;

M_s : Masse du matériau ;

V_s : Volume total du matériau solide

II.2.1.2 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentage pondéral respectifs des différentes familles de grain constituant l'échantillon. Cet essai est défini par la norme NF P18 560 [14].

II.2.1.3 Module de finesse

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton de sable tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF).

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

Celui-ci correspond à la somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis de modules 0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 et 5.

Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables à béton.

- 1.8 et 2.2 : le sable est à majorité de grains fins ;
- 2.2 et 2.8 : on est en présence d'un sable préférentiel ;
- 2.8 et 3.3 : le sable est un peu grossier. Il donnera des bétons résistants mais moins maniables

II.2.1.4 Equivalent de sable

Cet essai, référencé par la norme NF P18 598 [15], est utilisé pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des mortiers. On lave l'échantillon selon un processus normalisé et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 min, on mesure les éléments suivants (Figure II.3) :

- La hauteur h1 : sable propre + éléments fins.
- La hauteur h2 : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention, est :

$$\mathbf{ES} = \left(\frac{\mathbf{h2}}{\mathbf{h1}} \right) \times \mathbf{100} \quad \mathbf{(II.4.)}$$

Selon que la hauteur h2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine : équivalent de sable visuel ESV et équivalent de sable au piston ESP.

Selon la norme NFP18 598, les préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les bétons sont indiquées sur le Tableau II.1.

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 propre, convenant au béton à haute qualité.
4	ESV >85 ; ESP >80	Sable très propre ; absence de plasticité de béton.

TABLE II.2 – Préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les bétons

II.2.1.5 Compacité

La compacité (C_p) est le rapport du volume de la matière solide au volume total. Elle est définie par :

$$C_p = \frac{V_s}{V} = 1 - p = \frac{\gamma}{\gamma_s} \quad (\text{II.5.})$$

Où : p est la porosité.

II.2.2 Ciment

Le ciment utilisé dans l'ensemble des essais expérimentales est un ciment portland composé CEM II / BL 42.5N selon la norme NA 442 [13], le ciment a été fourni par le Groupe Industriel des Ciments d'Algérie (LAFARGE), Biskra, Algérie (FigureII.4).



FIGURE II.4 – Ciment utilisé

Les caractéristiques physico-chimiques du ciment inscrite sur la fiche technique sont données dans les Tableaux II.3.4.5.6.

Age	2 jours	28 jours
Résistance à la compression (MPa)	Différent 10	42.5

TABLE II.3 – Résistance à la compression (NA 234)

Paramètre	Valeur
Pert au feu (%)	10.0 ± 2
Résidus insoluble (%)	1.35 ± 0.65
Teneur en sulfates SO ₃ (%)	2.5 ± 0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.7 ± 0.5
Teneur en chlorures (%)	0.02 – 0.05
Teneur équivalent en alcalis (%)	0.3 – 0.75

TABLE II.4 – Analyses chimiques (NA 5042)

Minéraux	Pourcentage
C3S	60 ± 3.0
C2S	15 ± 3.0
C3A	7.5 ± 1.0
C4AF	11 ± 1.0

TABLE II.5 – Composition minéralogique du ciment (CLINKER).

Caractéristique	Valeurs	Unité
S.S. Blaine (NA 231)	3700 – 5200	Cm ² /g
Consistance normale	26.5 ± 2.0	%
Début de prise (NA 230)	150 ± 30	Min
Fin de prise (NA 230)	230 ± 50	Min
Retrait à 28 jours	< 1000	m/m
Expansion	0.3	Mm
Masse volumique apparente	975	kg/m ³
Densité spécifique	3080	kg/m ³

TABLE II.6 – Caractéristiques physiques du ciment MATINE

II.2.3 Poudre céramique

La poudre de céramique utilisée dans notre étude est dérivée de la meule mécanique des déchets céramiques utilisés dans l'usine de céramique utilisée dans notre étude est la poudre de céramique qui provient des déchets d'usine cassés situés dans la ville de la vallée. Après avoir éliminé les impuretés par lavage à l'eau et au tissu, ils sont broyés et fraisés mécaniquement pour obtenir la précision requise Figure II.5. La classe granulaire de poudre céramique recyclée utilisée dans nos véhicules est de 0 à 0,08 mm.

Les propriétés physiques de ces propriétés sont résumées dans le tableau II.6. L'analyse granulométrique de ces produits est présentée à la figure II.5



FIGURE II.5 – poudre de céramique (0-0.08mm)

Caractéristiques	Valeur
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.50
Masse volumique apparente (g/cm ³)	0.80

TABLE II.7 – Propriétés physiques des granulats de céramique utilisés

II.2.4 Eau de Gâchage

L'eau de gâchage remplit deux fonctions principales, d'une part, une fonction physique qui permet de conférer au mortier les propriétés de fluidification et d'autre part une fonction chimique qui contribue à la réaction d'hydratation. L'eau de gâchage des mélanges de mortiers confectionnés est issue directement du robinet du réseau publique d'eau potable.

II.3 Formulations

II.3.1 Formulations du Mortier de sable Témoin (0%PC, 0%SD)

Pour la composition du mortier de sable témoin, nous avons utilisé un dosage ciment-sable qui correspond au dosage standard du mortier selon la norme EN 196-1 [16], soit une partie de ciment et trois parties de sable. En ce qui concerne la dose d'eau, nous avons utilisé le test de la table à secousses pour déterminer la quantité d'eau correspondant au mortier de sable « plastique ».

II.3.2 Formulations du Mortier de sable avec PC et SD

Nous avons combiné des poudres céramiques (GC 0/4 mm) de recyclage céramique utilisées comme alternative volumétrique au sable alluvial (SA) avec deux alternatives volumétriques 08,16% et une formule sans substitut (mélange témoin). Nous avons combiné le sable dunaire (SD) comme alternative volumétrique au sable alluvial (SA) avec deux substitutions volumétriques de 10 et 20% et une formule sans remplacement (mélange témoin).

Nous avons fixé la dose de ciment ($C = 400 \text{ kg/m}^3$) et diversifié les proportions de E/C (0,55-0,60-0,65)

II.3.3 Applications la méthode Taguchi

N° de l'essai	Eau/ciment (E/C)	Teneur en sable de dune (%)	Teneur en poudre de céramique (%)
01	0.55	15	3.0
02	0.55	25	6.5
03	0.60	35	10.0
04	0.60	15	6.5
05	0.60	25	10.0
06	0.60	35	3.0
07	0.65	15	10.0
08	0.65	25	3.0
09	0.65	35	6.5

TABLE II.8 – La matrice des effets selon la méthode Taguchi

II.3.4 Compositions des mortiers

N°	FORMILATION	Ciment (g)	Sable alluvionnaire (g)	Poudre de céramique (g)	Sable de dune (g)	Eau (L)	E/C
00	PC0 SD0	400	1200	/	/	220	0.55
01	PC3 SD15	400	984	34.25	178.52	220	0.55
02	PC6.5 SD25	400	822	74.25	297.80	220	0.55
03	PC10 SD35	400	660	114	416.82	220	0.55
04	PC6.5 SD15	400	942	74.25	178.52	240	0.60
05	PC10 SD25	400	780	114	297.8	240	0.60
06	PC3 SD35	400	744	34.25	416.82	240	0.60
07	PC10 SD15	400	900	114	178.52	260	0.65
08	PC3 SD25	400	864	34.25	297.80	260	0.65
09	PC6.5 SD35	400	702	74.25	416.82	260	0.65

TABLE II.9 – La composition du mortier de sable utilisé

II.4 Procédure Expérimentale

II.4.1 Fabrication du mortier de sable

II.4.1.1 Pesage des composants du mortier

Dans un premier temps nous avons pesés individuellement tous les composants des bétons de sable pour chaque formulation du tableau II-6.



FIGURE II.6 – Pesage des composants du Mortier

II.4.2 Malaxage des composants du mortier de sable

Pour mélanger les ingrédients, un bol mélangeur de lisier d'une capacité de 20 litres avec la séquence suivante a été utilisé :

Tout d'abord, tous les composants durs et secs sont insérés dans le bol (ciment, sable, poudre céramique) puis bien mélangés pour homogénéiser les composants et assurer une bonne dispersion du courant alternatif entre les éléments conventionnels du mortier.

Le mélange contenant 80% d'eau est ensuite introduit et pétri pendant deux (2) minutes à vitesse lente.

Dans la troisième étape, peut-être les 20% restants de l'eau, puis pétrissez soigneusement.

II.4.3 Coulage des éprouvettes

Dans ce travail nous avons confectionnés 1 éprouvettes de dimensions (4 x 4 x 16) cm Voir Figure II.7.



FIGURE II.7 – Moule (4 x 4 x 16) cm

II.4.4 Etapes de coulage des éprouvettes

Le coulage des éprouvettes s'est fait en quatre (4) tapes ci-dessous :

Première étape :

Dans un premier temps nous avons mis en place les moules puis les avons lubrifiés avec de l'huile à moteur 40 afin que le mortier ne se colle pas aux parois des celles-ci. (Voir figure II.8).



FIGURE II.8 – Lubrification des moules

Deuxième étape : Dans un deuxième temps nous avons rempli l'éprouvette à moitié puis vibrer le tout pendant trente (30) secondes afin d'éliminer les vides. (Voir Figure II.9)



FIGURE II.9 – Remplissage à moitié et vibration

Troisième étape : Dans un troisième temps nous avons rempli totalement l'éprouvette puis vibrer le tout une deuxième fois pendant trente (30) secondes. (Voir Figure II.10)



FIGURE II.10 – Remplissage à moitié et vibration

Quatrième étape : Dans un quatrième temps nous avons vibré une troisième fois l'éprouvette et tout son contenu pendant vingt (20) secondes puis rendu uniforme sa face supérieure en la rasant avec la truelle (Voir Figure II.11).

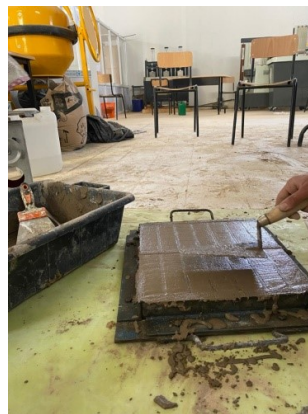


FIGURE II.11 – Dernière vibration et rasage

II.4.5 Démoulage et pesage des éprouvettes après 24h

En effet pour chaque formulation, le démoulage des éprouvettes s'est fait après 24h

II.5 Les essais réalisés

II.5.1 Essais réalisés à l'état frais

II.5.1.1 Essai de maniabilité

Cet essai consiste à : - Remplissez le moule en deux couches, emballées avec une tige d'acier d'un diamètre de 30 mm à raison de 10 coups par couche.



FIGURE II.12 – Dispositif de mesure d'affaissement au table de secus

- Soulevez délicatement le moule et secouez-le 15 fois, puis mesurez l'affaissement en centimètres (voir Figures II.12.13).



FIGURE II.13 – Dispositif de mesure d'affaissement au table de secus

II.5.1.2 Détermination de la masse volumique

Cette mesure détermine le volume de rendement à partir de la composition du lisier frais et permet de vérifier l'exactitude de la formule théorique.

Pour effectuer cette mesure, un récipient de taille et de masse connues est utilisé. Un tel récipient est complètement rempli de mortier de sable, puis sa surface libre est nivelée. Le Conteneur plein. Le rapport entre la masse du lisier (la masse du récipient entier moins la masse du récipient vide) et le volume du récipient correspond à la densité du lisier frais exprimée en kilogrammes / m³.

Les essais sur le béton de sable à l'état sec ont tous débuté lorsque les éprouvettes ont subi une cure de 28 jours dans l'eau. En effet les éprouvettes ont subi une cure de 28 jours dans l'eau pour les permettre de bien sécher dans un milieu naturel dont le ph est sensiblement égal à 7 sans être influer par des facteurs externes.



FIGURE II.14 – Détermination de la masse volumique

II.5.1.3 Détermination de la masse Volumique

Après la cure à l'eau, les éprouvettes ont été saturées d'eau. Afin de pouvoir réaliser d'éventuelle essais il a fallu sécher les éprouvettes dans l'étuve à la température optimum de 105 degré.

Ainsi pour déterminer la masse volumique à l'état sec. Nous avons dans un premier temps séché les éprouvettes dans l'étuve jusqu'à la masse constante.

Une fois la masse constante obtenue, nous avons mesuré les dimensions des éprouvettes pour déterminer le volume. La masse constante trouvée et le volume calculé, nous avons pu déterminer la masse volumique de chaque éprouvette à l'état sec.



FIGURE II.15 – Mise à l'étuve des éprouvettes à une température de 105°

II.5.2 Essais réalisés à l'état durci

II.5.2.1 Essai de traction par flexion

Des éprouvettes de dimensions (4 x 4 x 16) cm ont été utilisées pour la détermination de la résistance à la traction. Les mesures sont faites sur une presse qui répond aux normes en vigueur, munie d'un banc de flexion à 3 points. Cet essai permet de déterminer la résistance à la traction par flexion du mortier étudié. C'est l'essai le plus couramment

utilisé. Il consiste à rompre en flexion une éprouvette.

La valeur de la résistance considérée constitue la moyenne de la contrainte d'écrasement de trois éprouvettes.

Les résistances à la traction du béton de sable durci ont été évaluées à 28 jours en utilisant une machine de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 20 KN, pour vue d'un dispositif de flexion à 3 points (Figure II.16). La valeur de la résistance considérée constitue la moyenne de la contrainte d'écrasement de trois éprouvettes.

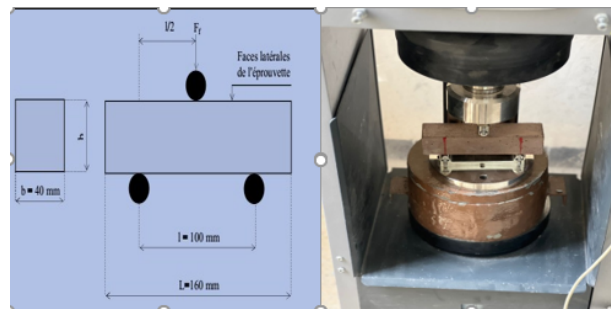


FIGURE II.16 – Essai de traction par flexion 3 points sur les éprouvettes (4x4x16) cm³

II.5.2.2 Essai de compression

La résistance à la flexion d'un mortier est déterminée par chargement en trois points jusqu'à la rupture d'éprouvettes moulées en béton durci.

La résistance à la compression du mortier est déterminée sur les deux parties résultant de l'essai de résistance à la flexion.

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression. L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture. La charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai.

La valeur de la résistance considérée constitue la moyenne de la contrainte d'écrasement de trois éprouvettes.

Les résistances en compression ont été évaluées à 28 jours en utilisant une machine d'essai en compression hydraulique permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 KN, pourvue d'un dispositif de compression pour les moules de bétons (figure II.17). La valeur de la résistance considérée constitue la moyenne de la contrainte d'écrasement de trois éprouvettes.

II.5.2.3 Essai d'auscultation dynamique

La vitesse sonique est un paramètre qui permet d'obtenir une information qualitative sur le matériau et sur la structure. La vitesse des ondes ultrasoniques à travers le béton résulte du temps mis par les ondes pour traverser la pâte de ciment durci et les granulats. Elle dépend énormément du module d'élasticité des granulats et de leur quantité dans le béton et le mortier. Le principe de la méthode des ultrasons consiste à mesurer le temps de propagation

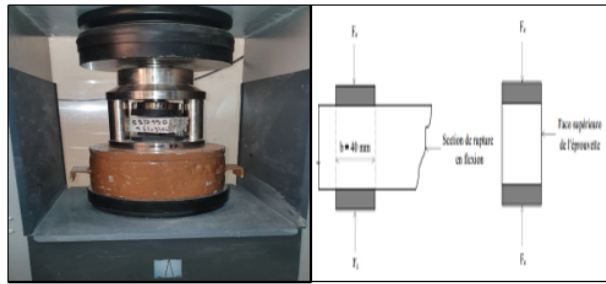


FIGURE II.17 – Essai de compression sur les éprouvettes (4x4x16) cm³

des impulsions ultrasoniques traversant le béton. Les principales caractéristiques de tous les appareils disponibles sur le marché comprennent un générateur d'impulsion et un récepteur d'impulsion, comme le montre la Figure II.18.



FIGURE II.18 – Mesure de la vitesse de propagation de sons sur des éprouvettes (4x4x16) cm³

II.6 Conclusion

Le recyclage et la valorisation des déchets céramiques rouge dans la masse du mortier du sable fluide constituent une alternative économique et technologique importante dans certains pays en voie de développement. Cette étude présente une contribution à l'étude de l'effet des déchets céramiques rouge sur les propriétés frais et durci des mortier du sables fluide. Cette partie de l'étude a successivement traité les points suivants :

Caractérisation des matériaux utilisés

La méthode de formulation utilisée.

Les procédures expérimentales et les essais réalisés sur les différents mortier du sable à base des déchets céramiques à l'état frais et à l'état durci au cours de cette étude.

CHAPITRE III

ANALYSER ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

III.1 Introduction

Dans ce chapitre conclusif, nous mettons en lumière les résultats découlant d'une série d'essais minutieusement menés sur le mortier de sable fluide, tant dans son état frais que durci. Ces essais, conduits avec précision, ont abouti à des données consolidées présentant les moyennes arithmétiques de trois résultats d'essais distincts. Ces résultats revêtent une importance capitale pour appréhender les propriétés intrinsèques ainsi que les performances du mortier de sable fluide, fournissant ainsi une vision approfondie de son comportement, à la fois lors de son état initial et à sa solidification.

III.2 Facteurs

Les facteurs ciblés par notre recherche sont : le rapport eau/ciment (E/C), la teneur en sable de dune et la teneur en poudre de céramique le tout par unité de volume du mélange à l'état frais.

III.3 Niveaux des facteurs

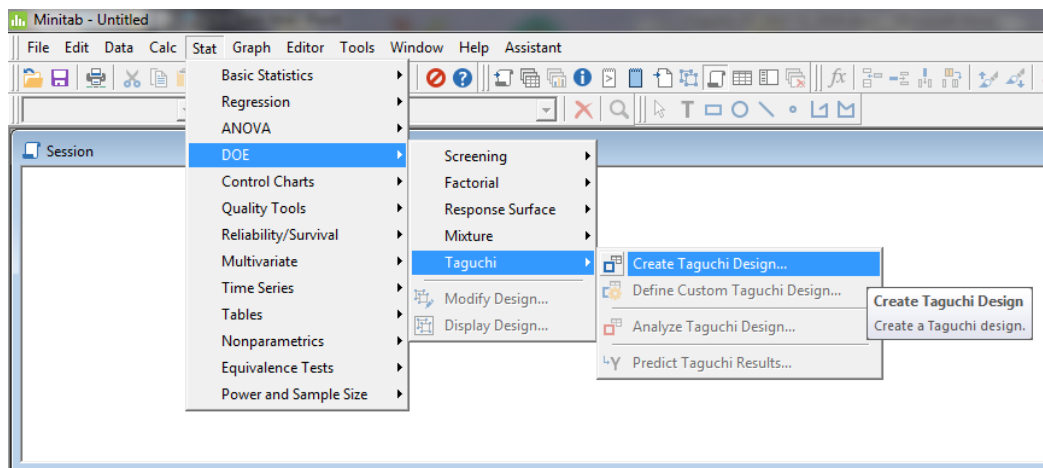
Après une recherche bibliographique nous avons choisi les niveaux de chaque facteurs comme représenté dans le tableau 3.1 :

facteurs	Niveaux		
	Eau/ciment(E/C)	0.55	0.60
Teneur en sable de dune (\%)	15	25	35
Teneur en poudre de céramique (\%)	3	6.5	10

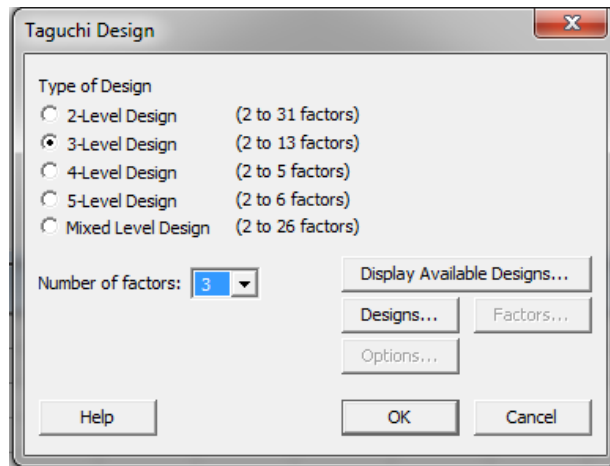
TABLE III.1 – Les facteurs et les niveaux ciblés

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

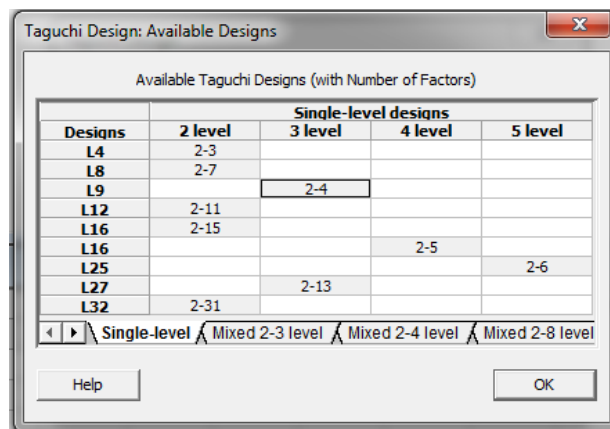
Avec une matrice de trois facteurs à trois niveaux, nous aurons un nombre d'essai qui sera égal à 9. Cependant, vu que ce nombre est acceptable pour un travail de laboratoire, un plan matriciel complet sera appliqué pour avoir de meilleures précisions. La matrice des effets selon la méthode **Taguchi** est établie à l'aide du logiciel MINITAB 18, selon les étapes suivantes :



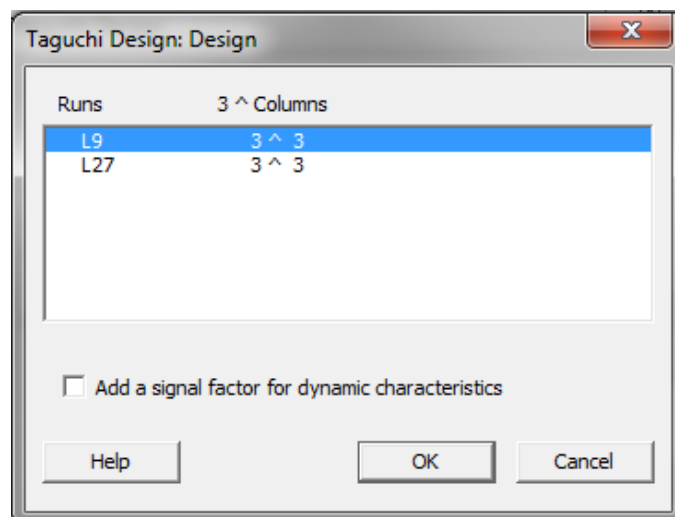
(a)



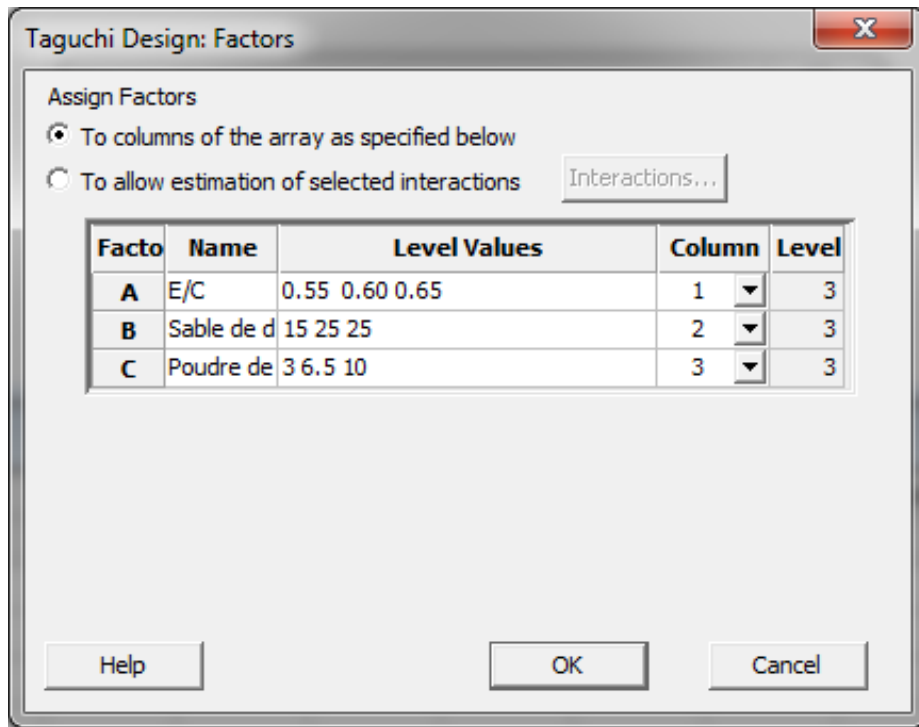
(b)



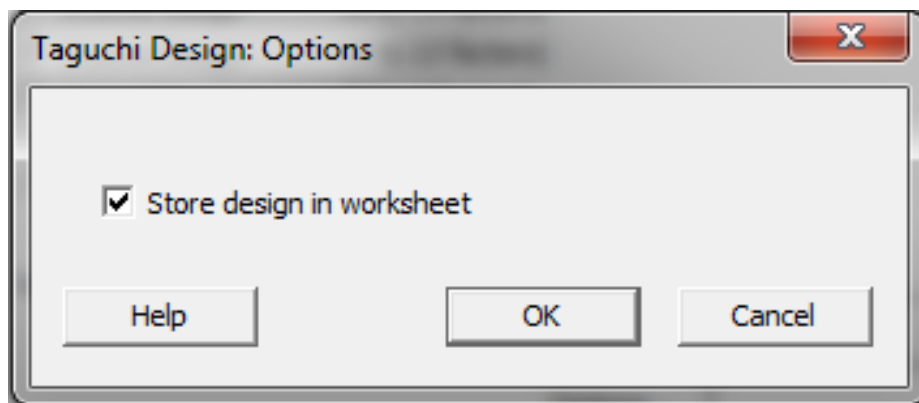
(c)



(d)



(e)



(f)

FIGURE III.1 – conception des niveaux de chaque facture par la methode de taguchi

Donc, la matrice des effets selon la méthode Taguchi sera donc comme suit :

N° de l'essai	Eau/ciment (E/C)	Teneur en sable de dune (%)	Teneur en poudre de céramique (%)
01	0.55	15	3.0
02	0.55	25	6.5
03	0.55	35	10.0
04	0.60	15	6.5
05	0.60	25	10.0
06	0.60	35	3.0
07	0.65	15	10.0
08	0.65	25	3.0
09	0.65	35	6.5

TABLE III.2 – La matrice expérimentale des effets selon la méthode Taguchi L9(33)

III.5 Mortier à l'état frais

III.5.1 La maniabilité

Dans cette partie, nous avons étudié la maniabilité des mortiers d'étude à l'aide de la table à secousses conformément à la norme EN 1015-3. Le tableau 3.3 résume les valeurs de la mesure de l'étalement.

N°	Désignation du mélange	Etalement (cm)	Intervalle de l'étalement (cm)
1	SD15 PC3	16.50	16.85 ± 2.75
2	SD25 PC6.5	14.80	
3	SD35 PC10	14.10	
4	SD15 PC6.5	17.40	
5	SD25 PC10	15.70	
6	SD35 PC3	17.30	
7	SD15 PC10	17.90	
8	SD25 PC3	19.60	
9	SD35 PC6.5	17.70	

TABLE III.3 – Résultats des essais de la maniabilité

Intervalle de l'étalement est 16.85 ± 2.75 cm correspond à des mortiers plastiques. Tous les mortiers d'étude ont une consistance plastique.

III.5.1.1 Détermination de la résultat optimal pour chaque facteur

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 la maniabilité sont les suivant : E/C (0.65) , la teneur en sable de dune (15%) et la teneur en poudre de céramique (3%).

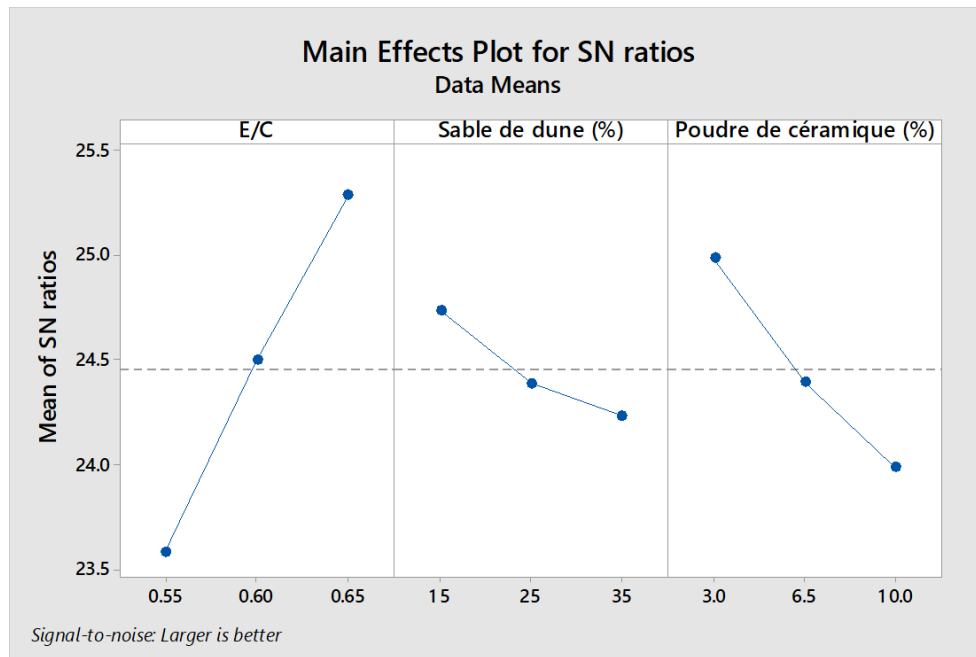


FIGURE III.2 – Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios)

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	0.07	1.47	0.05	0.965	
E/C	32.67	2.36	13.82	0.000	1.00
Sable de dune (%)	-0.0450	0.0118	-3.81	0.013	1.00
Poudre de céramique (%)	-0.2714	0.0338	-8.04	0.000	1.00

Model Summary

Regression Equation

$$\text{Etalement (cm)} = 0.07 + 32.67 \text{ E/C} - 0.0450 \text{ SD} - 0.2714 \text{ PC}$$

III.5.1.3 Interprétation des résultats

Le signe moins (-) indique que les facteurs influent négativement sur la masse volumique à l'état durci. Par contre, le signe plus (+) indique que les facteurs influent positivement sur la maniabilité des mortiers.

La remarque notée par les résultats de comparaison entre les coefficients du modèle qui

S R-sq
0.289444 98.18%

sont représentées au-dessus montre que le coefficient de E/C est très élevé, ce qui montre l'influence très significative du pourcentage de E/C sur les résultats de la maniabilité des mortiers.

Par conséquent, l'augmentant de pourcentage de E/C, amène une augmentation de la maniabilité des mortiers. Par contre, l'augmentant des pourcentages de sable de dune SD et de poudre de céramique, amène à réduire la maniabilité des mortiers à l'état frais.

Les courbes obtenues et qui peuvent prédire la maniabilité à partir les facteurs étudiés sont illustrées par les figures 3.2, 3.3 et 3.4.

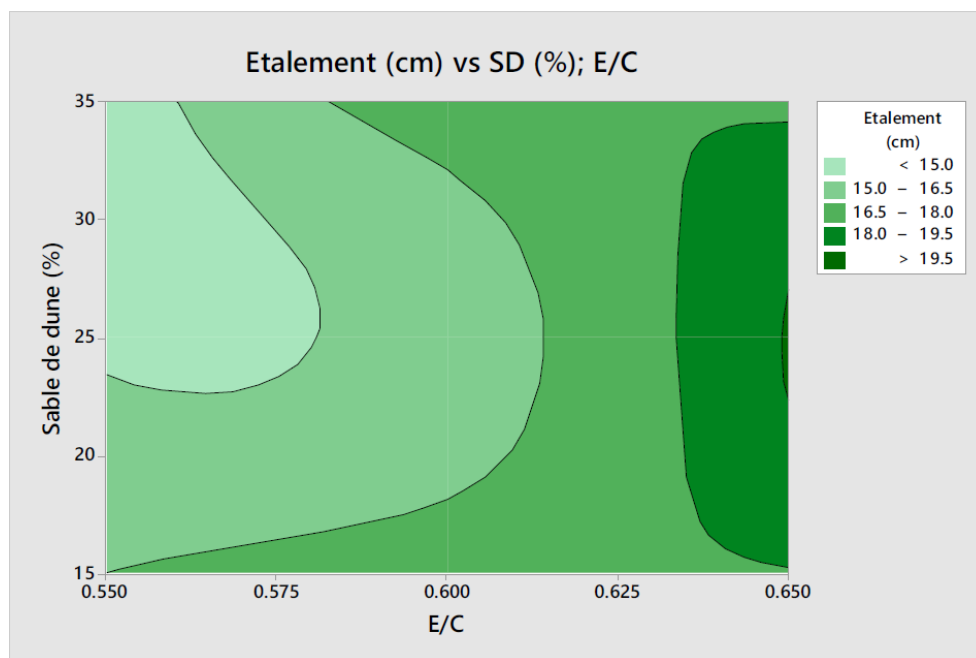


FIGURE III.3 – La maniabilité des mortiers en fonction de pourcentage de sable de dune et du rapport E/C.

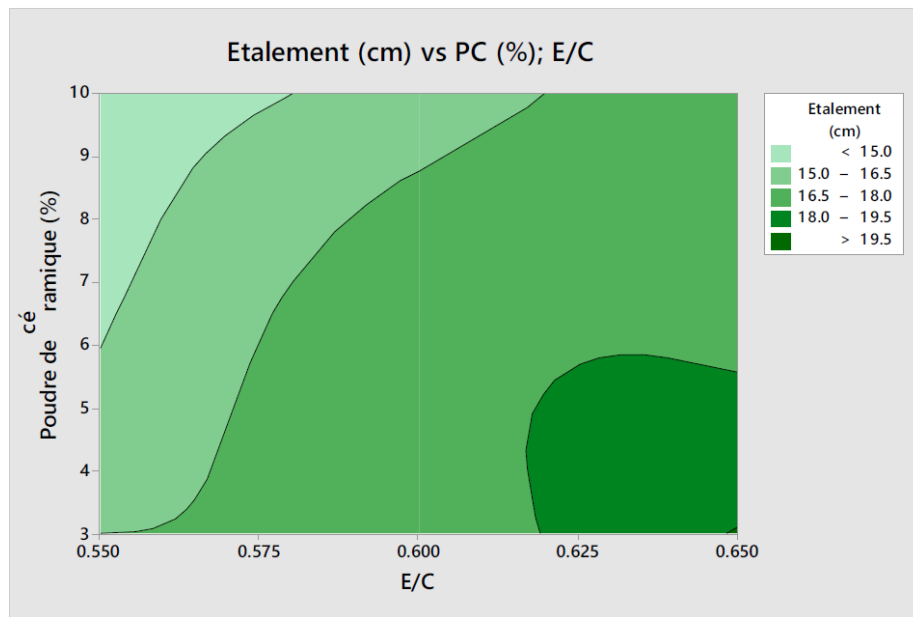


FIGURE III.4 – La maniabilité des mortiers en fonction de pourcentage de poudre de céramique et du rapport E/C.

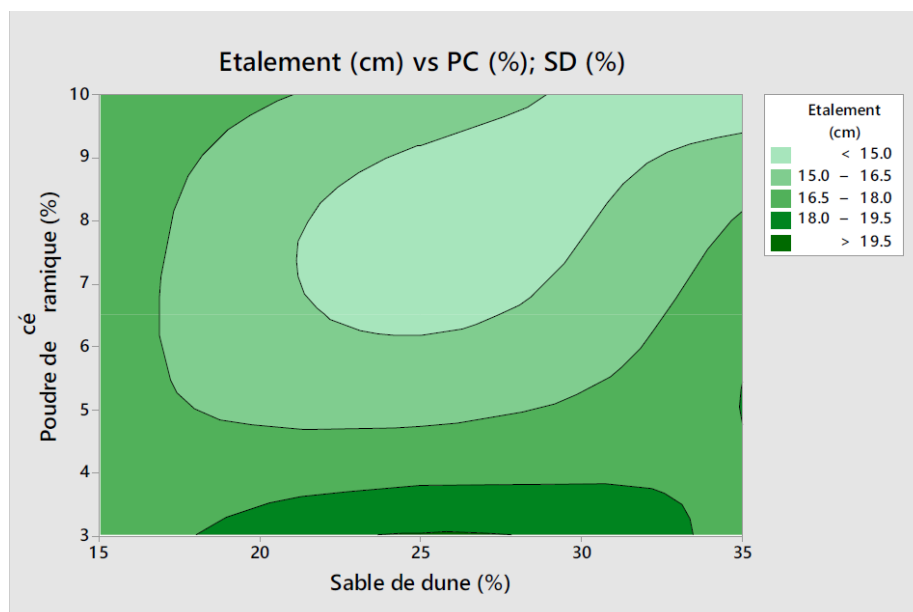


FIGURE III.5 – La maniabilité des mortiers en fonction de pourcentage de poudre de céramique et de sable de dune.

Ces figures montrent clairement que la maniabilité des mortiers à l'état frais peut atteindre 19.5 cm si le rapport E/C varie entre 0.62 et 0.65 avec un pourcentage de sable de dune SD 23 et 32% et un pourcentage de poudre de céramique PC entre 3 et 5.5%.

III.5.2 La masse volumique à l'état frais

N°	Désignation du mélange	La masse volumique à l'état frais (kg/m ³)
1	SD15 PC3	2130
2	SD25 PC6.5	2025
3	SD35 PC10	2065
4	SD15 PC6.5	2030
5	SD25 PC10	2045
6	SD35 PC3	2050
7	SD15 PC10	1990
8	SD25 PC3	1960
9	SD35 PC6.5	1995

TABLE III.4 – Résultats des essais de la masse volumique à l'état frais.

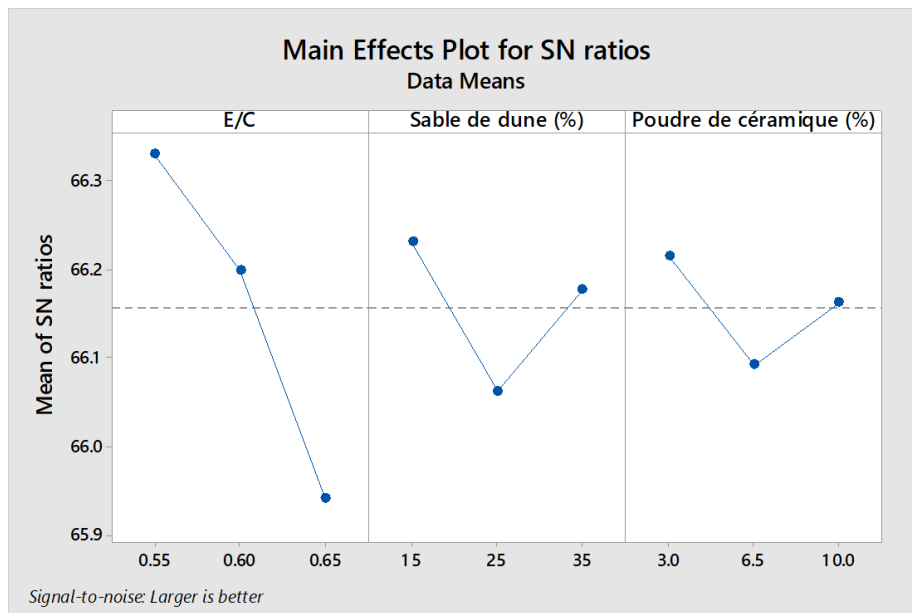


FIGURE III.6 – Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios)

D'après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (Signal to Noise Ratios) représentés dans la figure 3.5, nous constatons que les résultats optimaux pour chaque facteur afin de donner les meilleurs résultats pour la masse volumique à l'état frais sont les suivants : le rapport E/C (0.65), la teneur en sable de dune (25%) et la teneur en poudre de céramique (6.5%).

III.5.2.1 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	3242	813	3.99	0.058	
E/C	-1822	1495	-1.22	0.347	22.53
Sable de dune (%)	8.2	39.9	0.20	0.857	642.55
Poudre de céramique (%)	-181	144	-1.25	0.337	1030.43
E/C*Sable de dune (%)	-20.0	71.4	-0.28	0.806	776.14
E/C*Poudre de céramique (%)	261	204	1.28	0.329	761.74
Sable de dune (%)*Poudre de céramique (%)	0.84	1.02	0.82	0.498	53.31

Model Summary

S R-sq
38.5810 84.78%

Regression Equation

Masse volumique (kg/m³) = 3242 - 1822 E/C + 8.2 SD - 181 PC - 20.0 E/C*SD + 261 E/C*PC + 0.84 SD*PC

III.5.2.2 Interprétation des résultats

Le signe moins (-) indique que les facteurs influent négativement sur la masse volumique à l'état durci. Par contre, le signe plus (+) indique que les facteurs influent positivement sur la masse volumique.

En plus, un rapport E/C élevé et l'augmentant de pourcentage de poudre de céramique PC dans les mortiers entraîne une réduction de la masse volumique à l'état frais. Cette diminution peut s'expliquer par le coefficient très élevé de rapport E/C et le coefficient élevé de pourcentage de poudre de céramique par rapport au reste coefficients du modèle qui sont représentées au-dessus.

Par ailleurs, une augmentation de pourcentage de sable de dune SD augmente la masse volumique à l'état frais.

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 frais, nous constatons que l'interaction entre le rapport E/C et le pourcentage de sable de dune SD (E/C×DS) a un effet négatif sur la masse volumique. Par contre, les interactions entre le rapport E/C et le pourcentage poudre de céramique (E/C*PC) et entre le sable de dune et poudre de céramique (SD*PC) influent positivement sur la masse volumique à l'état frais.

Les courbes obtenues et qui peuvent prédire la masse volumique l'état frais à partir les facteurs étudiés sont illustrées par les figures 3.6, 3.7 et 3.8.

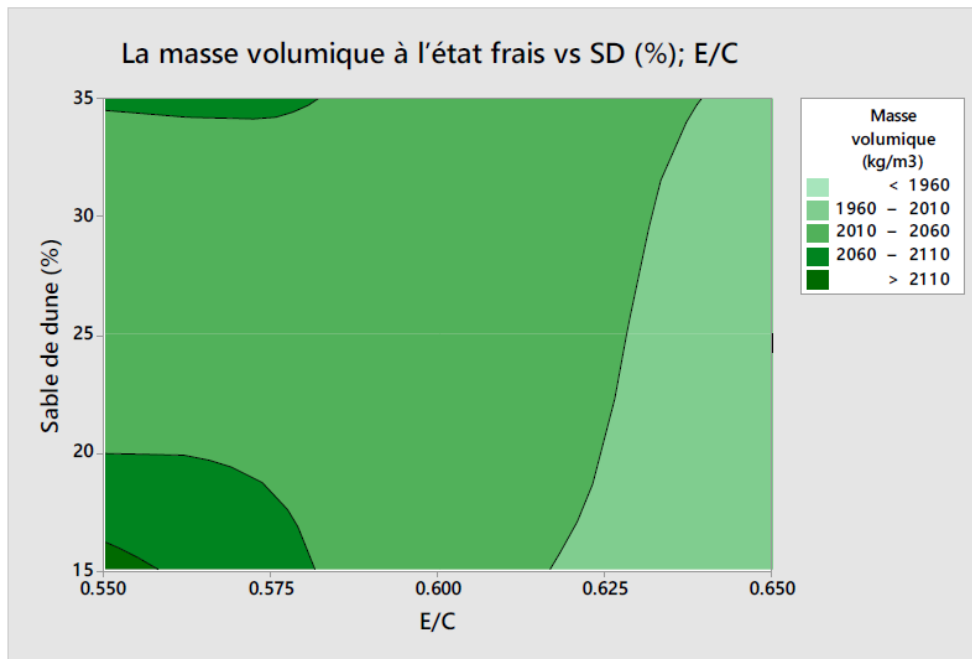


FIGURE III.7 – la masse volumique à l'état frais en fonction de pourcentage de sable de dune et du rapport E/C.

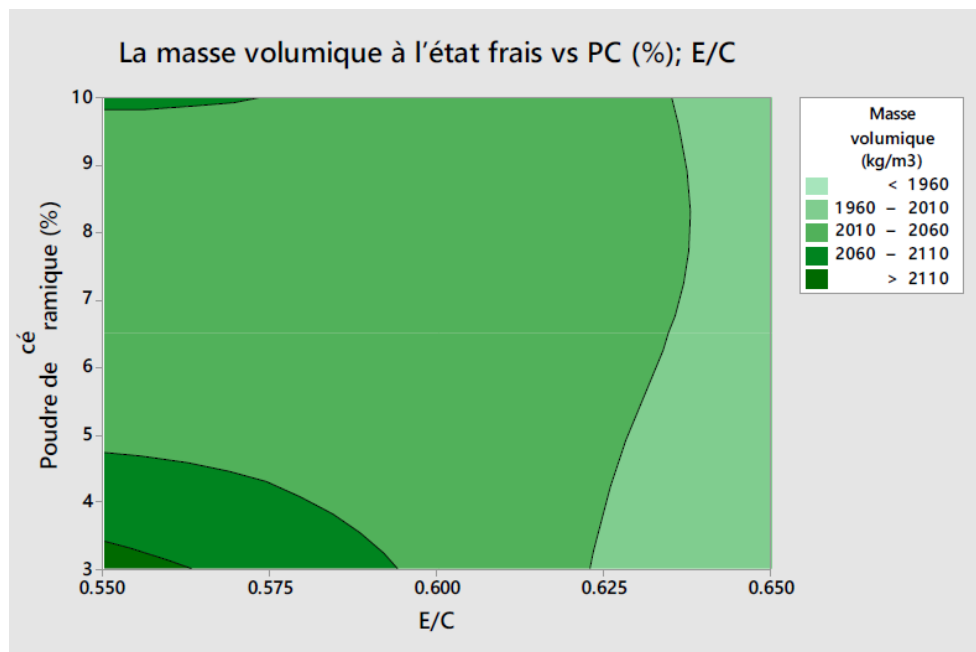


FIGURE III.8 – la masse volumique à l'état frais en fonction de pourcentage de poudre de céramique et du rapport E/C.

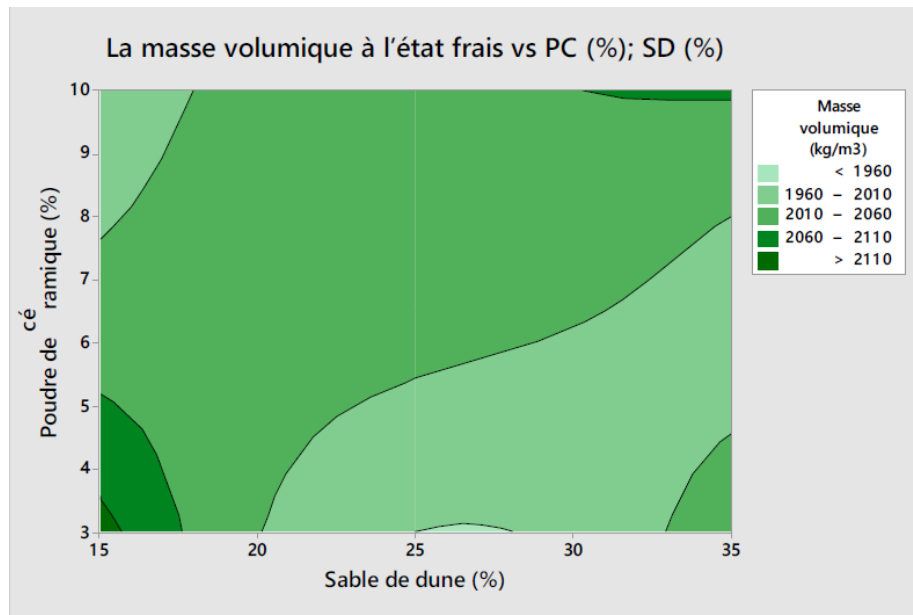


FIGURE III.9 – la masse volumique à l'état frais en fonction de pourcentage de poudre de céramique et de sable de dune.

Ces figures montrent clairement que la masse volumique à l'état frais peut atteindre 2110 kg/m³ si le rapport E/C varie entre 0.55 et 0.57 avec un pourcentage de sable de dune SD 15 et 17% et un pourcentage de poudre de céramique PC entre 3 et 4%.

III.6 Mortier à l'état durci

III.6.1 La masse volumique à l'état durci

N°	Désignation du mélange	La masse volumique à l'état durci (kg/m ³)
1	SD15 PC3	2035.32
2	SD25 PC6.5	2011.72
3	SD35 PC10	1977.68
4	SD15 PC6.5	1958.36
5	SD25 PC10	1991.92
6	SD35 PC3	1996.20
7	SD15 PC10	1985.36
8	SD25 PC3	1980.94
9	SD35 PC6.5	2002.55

TABLE III.5 – Résultats des essais de la masse volumique à l'état durci.

III.6.1.1 Détermination de la résultat optimal pour chaque facteur

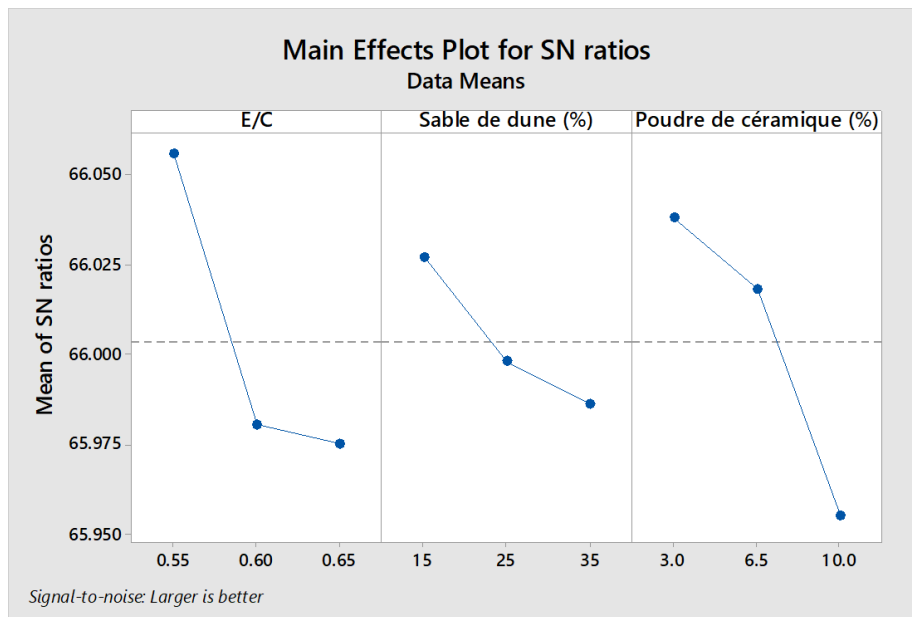


FIGURE III.10 – Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios)

D'après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (Signal to Noise Ratios) représentés dans la figure 3.9, nous constatons que les résultats optimaux pour chaque facteur afin de donner les meilleurs résultats pour la masse volumique de à l'état durci sont les suivant : le rapport E/C (0.55) , la teneur en sable de dune (15%) et la teneur en poudre de céramique (3%).

III.6.1.2 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	2778	200	13.87	0.005	
E/C	-1273	368	-3.46	0.0747	22.53
Sable de dune (%)	-12.59	9.83	-1.28	0.329	642.55
Poudre de céramique (%)	-61.2	35.6	-1.72	0.227	1030.43
E/C*Sable de dune (%)	20.3	17.6	1.16	0.367	776.14
E/C*Poudre de céramique (%)	95.2	50.3	1.89	0.199	761.74
Sable de dune (%)*Poudre de céramique (%)	0.114	0.251	0.45	0.694	53.31

Model Summary

S	R-sq
9.50335	93.23%

Regression Equation

Masse vol. à l'état durci (kg/m³) = 2778 - 1273 E/C - 12.59 SD - 61.2 PC + 20.3 E/C*SD + 95.2 E/C*PC + 0.114 SD*PC

III.6.1.3 Interprétation des résultats

L'augmentant de rapport E/C avec le pourcentage de sable de dune SD et poudre de céramique PC dans les mortiers entraîne une réduction de la masse volumique à l'état durci.

En plus, nous constatons que l'interaction entre le rapport E/C et de sable de dune (E/C×SD) avec les interactions entre rapport E/C et de poudre de céramique (E/C*PC) et entre le sable de dune et de poudre de céramique (SD*PC) influent positivement sur la masse volumique à l'état durci.

Les courbes obtenues et qui peuvent prédire la masse volumique à l'état durci à partir les facteurs étudiés sont illustrées par les figures 3.10, 3.11 et 3.12.

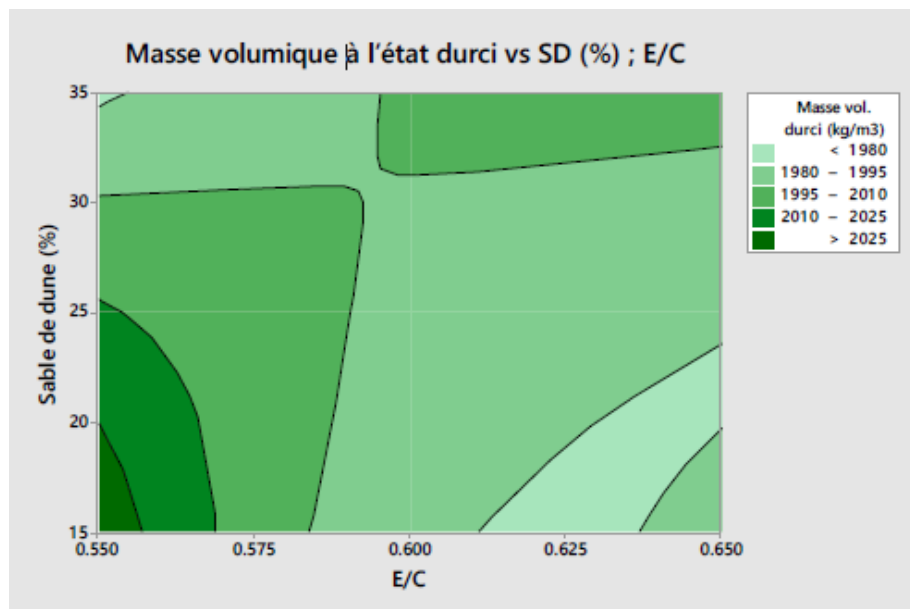


FIGURE III.11 – la masse volumique à l'état durci en fonction de pourcentage de sable de dune et du rapport E/C.

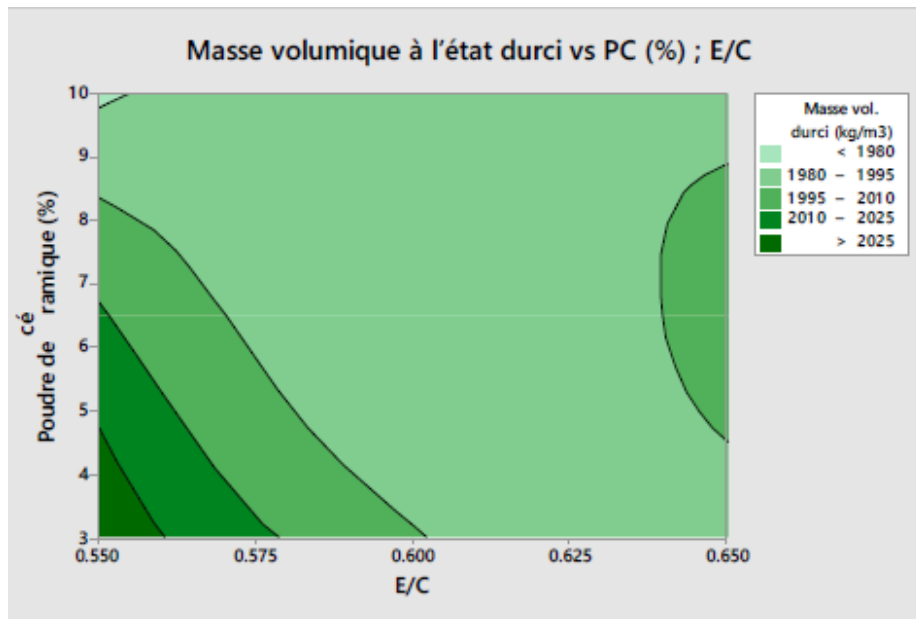


FIGURE III.12 – la masse volumique à l'état durci en fonction de pourcentage de poudre de céramique et du rapport E/C.

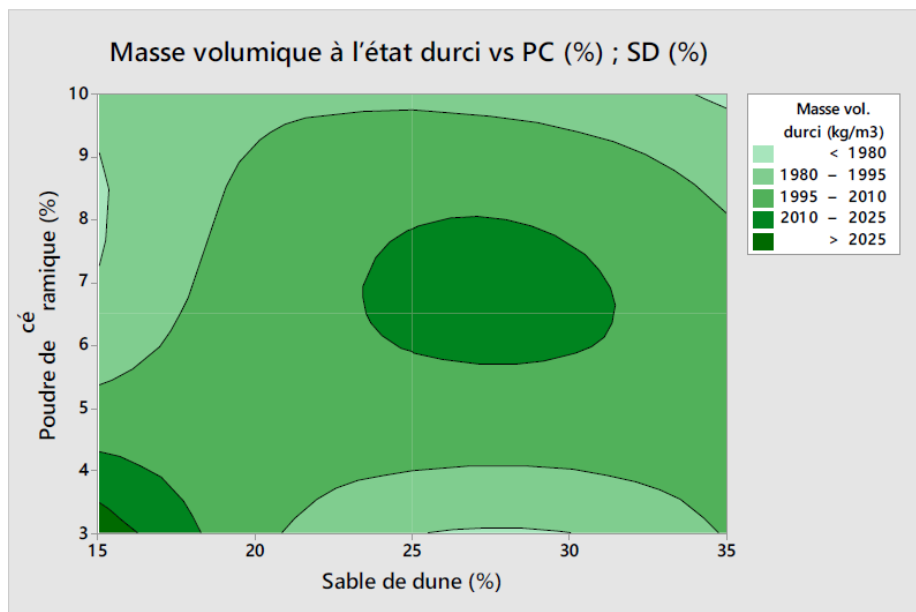


FIGURE III.13 – la masse volumique à l'état durci en fonction de pourcentage de poudre de céramique et de sable de dune.

Ces figures montrent clairement que la masse volumique à l'état durci peut atteindre 2025 kg/m³ si le rapport E/C varie entre 0.55 et 0.57 avec un pourcentage de sable de dune SD 25 et 30% et un pourcentage de poudre de céramique PC entre 6 et 7.6%.

III.6.2 Résistance à la compression

N°	Désignation du mélange	La Résistance à la compression Rc28 (MPa)
1	SD15 PC3	31.32
2	SD25 PC6.5	35.32
3	SD35 PC10	37.27
4	SD15 PC6.5	31.37
5	SD25 PC10	36.61
6	SD35 PC3	28.09
7	SD15 PC10	30.84
8	SD25 PC3	30.46
9	SD35 PC6.5	25.17

TABLE III.6 – Résultats des essais de la résistance mécanique à la compression à 28 jours.

III.6.2.1 Détermination de la résultat optimal pour chaque facteur (Rc28)

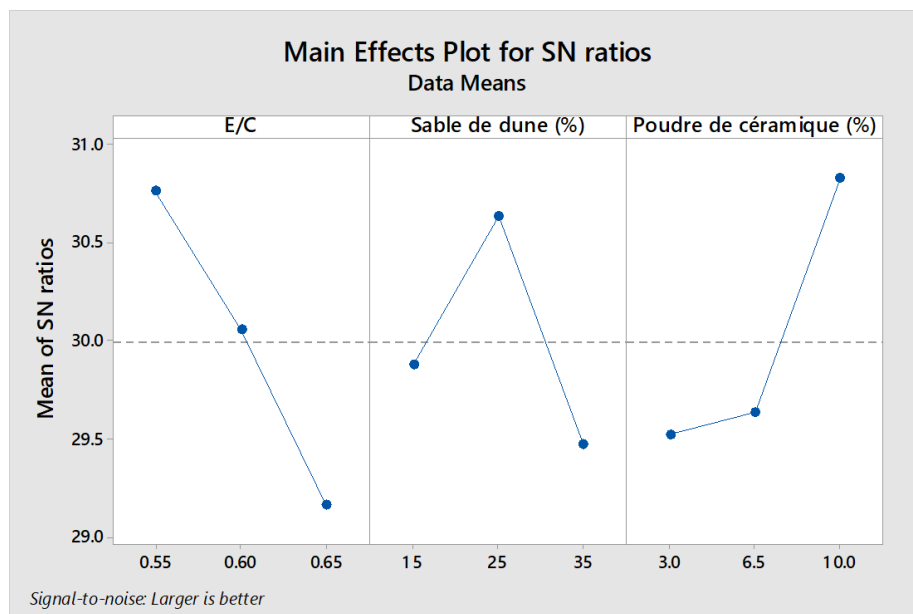


FIGURE III.14 – Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios)

D'après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (Signal to Noise Ratios) représentés dans la figure 3.13, 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 sont les suivant : le rapport E/C (0.55) , la teneur en sable de dune (25%) et la teneur en poudre de céramique (10%).

III.6.2.2 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	-4.0	59.0	-0.07	0.953	
E/C	54	108	0.50	0.666	22.53
Sable de dune (%)	0.06	2.89	0.02	0.985	642.55
Poudre de céramique (%)	12.0	10.5	1.15	0.370	1030.43
E/C*Sable de dune (%)	-0.19	5.18	-0.04	0.975	776.14
E/C*Poudre de céramique (%)	-17.9	14.8	-1.21	0.351	761.74
Sable de dune (%)*Poudre de céramique (%)	-0.0239	-0.32	0.777	0.694	53.31

Model Summary

S	R-sq
2.79701	87.61%

Regression Equation

Résistance à la comp. (MPa) = -4.0 + 54 E/C + 0.06 SD + 12.0 PC - 0.19 E/C*SD - 17.9 E/C*PC - 0.0239 SD*PC

III.6.2.3 Interprétation des résultats

L'augmentant de sable de dune SD entraîne une réduction de la résistance mécanique à la compression à 28 jours, mais l'ajout de granulats de caoutchouc GC dans de petites proportions entraîne une augmentant de la résistance mécanique à la compression des mortiers cimentaires.

En plus, En augmentant le pourcentage de sable de dune SD et de poudre de céramique PC, 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. En plus, les interactions entre le rapport E/C et le sable de dune (E/C*SD) et entre le rapport E/C et le pourcentage de poudre de céramique (E/C*PC) avec l'interaction entre le sable de dune et de poudre de céramique (SD*PC) influent négativement sur la résistance mécanique à la compression.

Les courbes obtenues et qui peuvent prédire la résistance mécanique à la compression à 28 jours à partir des paramètres étudiés sont illustrées par les figures 3.14, 3.15 et 3.16.

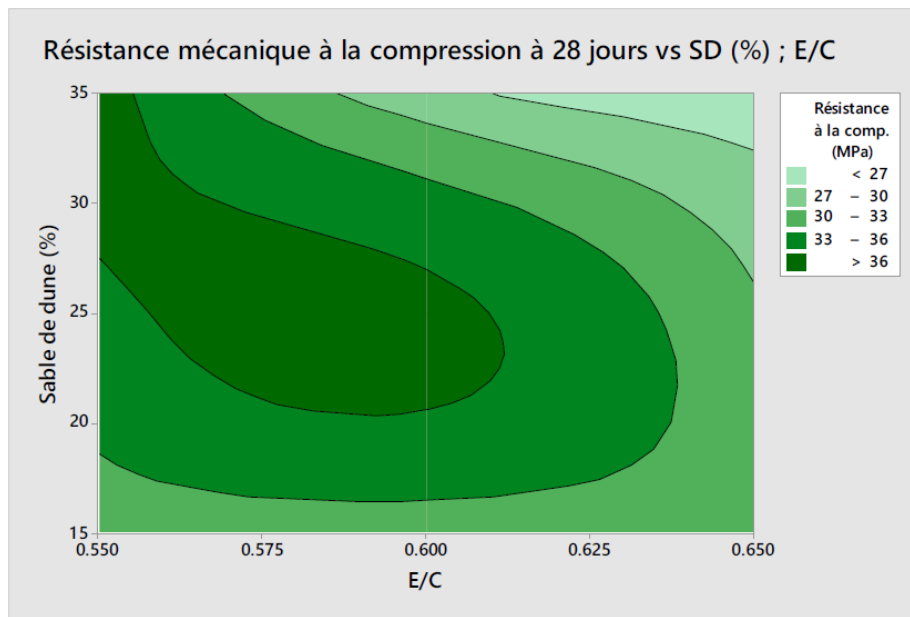


FIGURE III.15 – La résistance mécanique à la compression à 28 jours en fonction de pourcentage de sable de dune et du rapport E/C.

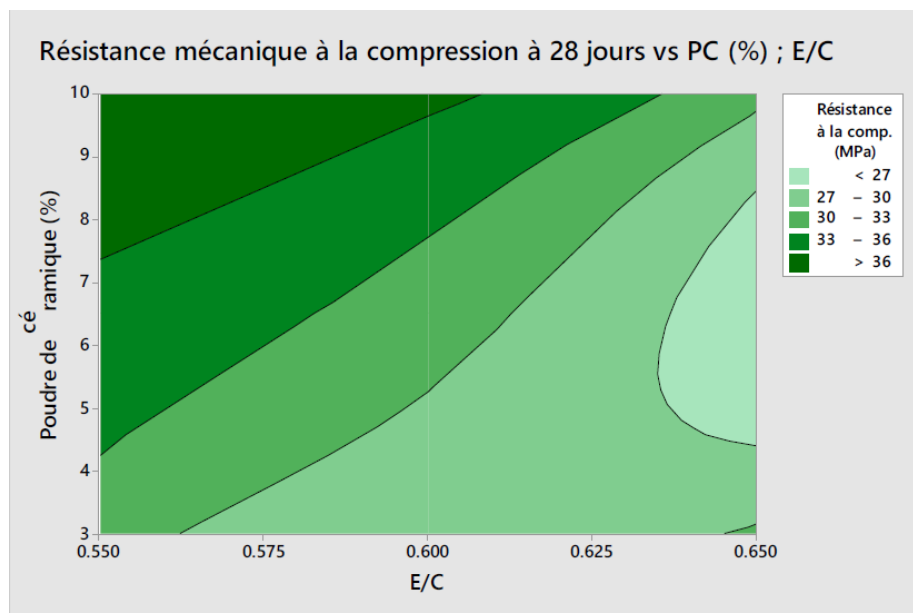


FIGURE III.16 – La résistance mécanique à la compression à 28 jours en fonction de pourcentage de sable de dune et du rapport E/C.

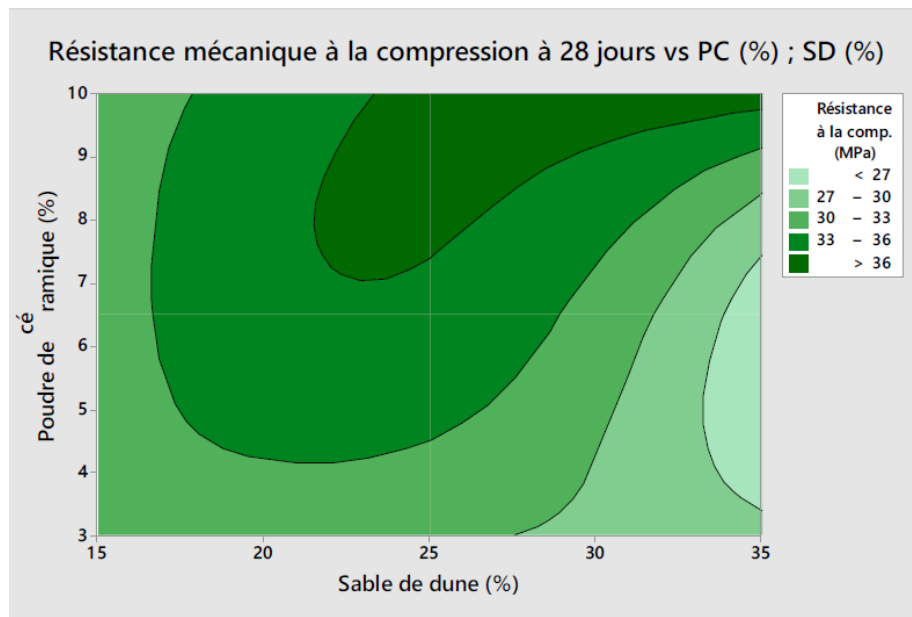


FIGURE III.17 – La résistance mécanique à la compression à 28 jours en fonction de pourcentage de poudre de céramique et du rapport E/C.

Ces figures montrent clairement que la résistance mécanique à la compression à 28 jours peut dépasser 36MPa si le rapport E/C varie entre 0.55 et 0.57 avec un pourcentage de sable de dune SD 23.25 et 27% et un pourcentage de poudre de céramique PC entre 8.5 et 10%.

III.6.3 Résistance mécanique à la flexion

N°	Désignation du mélange	Résistance à la flexion Rt28 (MPa)
1	SD15 PC3	3.24
2	SD25 PC6.5	3.54
3	SD35 PC10	2.52
4	SD15 PC6.5	3.31
5	SD25 PC10	3.16
6	SD35 PC3	2.79
7	SD15 PC10	3.61
8	SD25 PC3	3.01
9	SD35 PC6.5	3.95

TABLE III.7 – Résultats des essais de la résistance mécanique à la traction par flexion à 28 jours

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

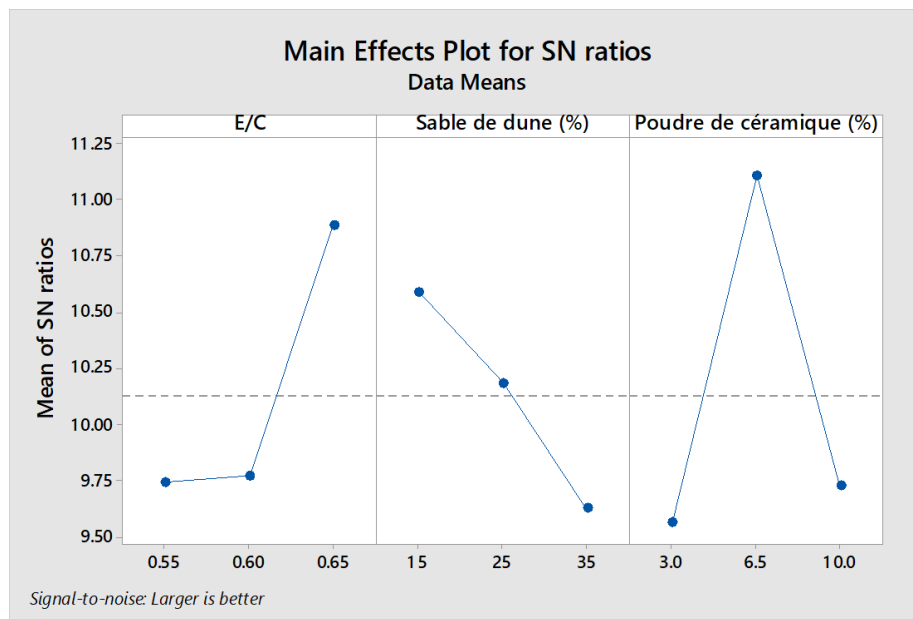


FIGURE III.18 – Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios).

D'après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (Signal to Noise Ratios) représentés dans la figure 3.17, nous constatons que les résultats optimaux pour chaque facteur afin de donner les meilleurs résultats pour la résistance mécanique à la traction par flexion à 28 jours sont les suivant : le rapport E/C (0.65) , la teneur en sable de dune (15%) et la teneur en poudre de céramique (6.5%).

III.6.3.2 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	17.79	9.73	1.83	0.209	
E/C	-26.1	17.9	-1.46	0.282	22.53
Sable de dune (%)	-0.603	0.477	-1.26	0.334	642.55
Poudre de céramique (%)	-0.01	1.37	-0.00	0.997	1030.43
E/C*Sable de dune (%)	1.043	0.854	1.22	0.347	776.14
E/C*Poudre de céramique (%)	0.38	2.44	0.15	0.892	761.74
Sable de dune (%)*Poudre de céramique (%)	-0.0053	0.0122	-0.43	0.708	53.31

Model Summary

S	R-sq
0.461401	71.91%

Regression Equation

Résistance à la flexion (MPa) = 17.79 - 26.1 E/C - 0.603 SD - 0.01 PC + 1.043 E/C*SD + 0.38 E/C*PC - 0.0053 SD*PC

III.6.3.3 Interprétation des résultats

Le signe plus (+) indique que les facteurs influent positivement sur la résistance mécanique à la traction par flexion à 28 jours.

Il est clair que l'augmentation du rapport E/C et le pourcentage de sable de dune SD avec le pourcentage de poudre de céramique PC se traduit par une réduction de la résistance à la flexion.

En plus, les interactions entre le rapport E/C et le sable de dune (E/C*SD) et entre le rapport E/C et de poudre de céramique (E/C*PC) influent positivement sur la résistance mécanique à la flexion à 28 jours.

Les courbes obtenues et qui peuvent prédire la résistance mécanique à la traction à 28 jours à partir des paramètres étudiés sont illustrées par les figures 3.18, 3.19 et 3.20.

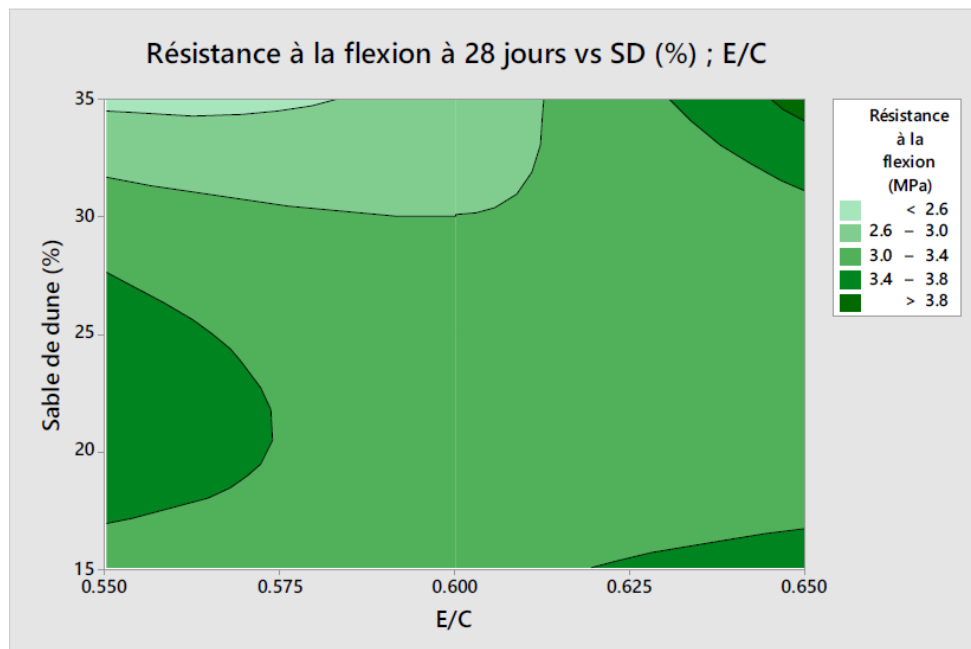


FIGURE III.19 – La résistance à la flexion à 28 jours en fonction de pourcentage de sable de dune et du rapport E/C.

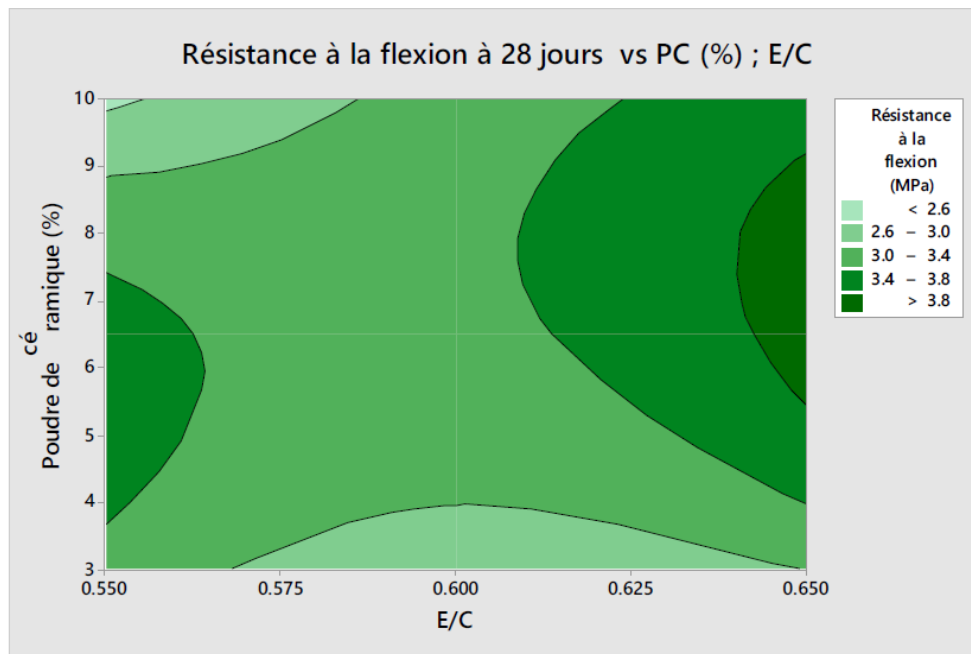


FIGURE III.20 – La résistance à la flexion à 28 jours en fonction de pourcentage de poudre de céramique et du rapport E/C.

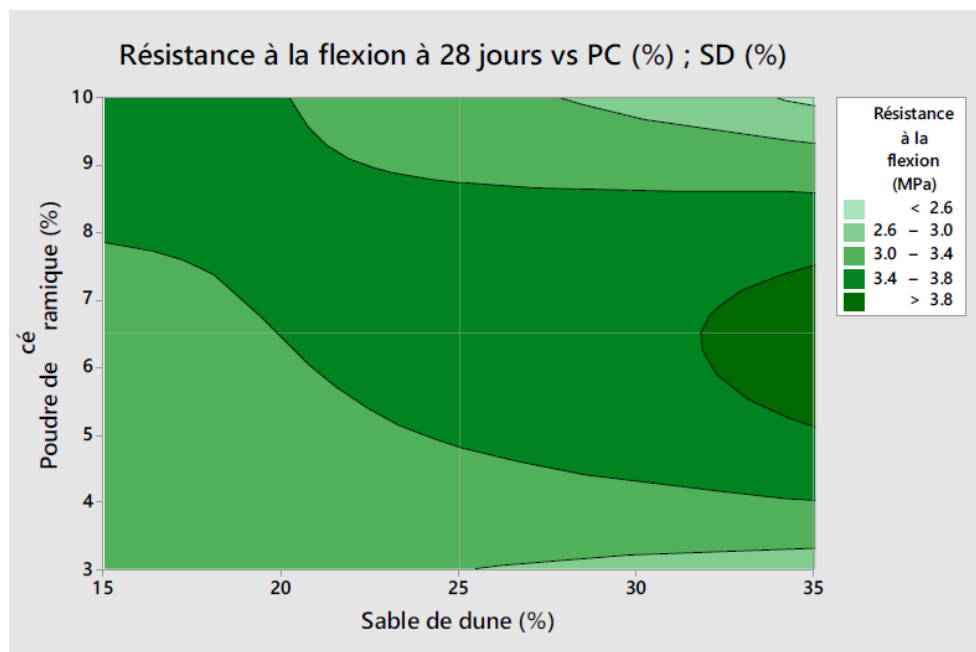


FIGURE III.21 – La résistance à la flexion à 28 jours en fonction de pourcentage de poudre de céramique et de sable de dune.

Ces figures montrent clairement que la résistance mécanique à la traction à 28 jours peut dépasser 3.8 MPa si le rapport E/C varie entre 0.625 et 0.65 avec un pourcentage de sable de dune SD 25 et 35% et un pourcentage de poudre de céramique PC entre 5.5 et 8.6%.

III.6.4 Vitesse de propagation d'ultrasons

N°	Désignation du mélange	Résistance à la flexion Rt28 (MPa)
1	SD15 PC3	3663.26
2	SD25 PC6.5	3772.12
3	SD35 PC10	3841.60
4	SD15 PC6.5	3678.82
5	SD25 PC10	3770.58
6	SD35 PC3	3625.46
7	SD15 PC10	3601.96
8	SD25 PC3	3574.61
9	SD35 PC6.5	3550.21

TABLE III.8 – Résultats des essais de la vitesse de propagation d'ultrasons à 28 jours.

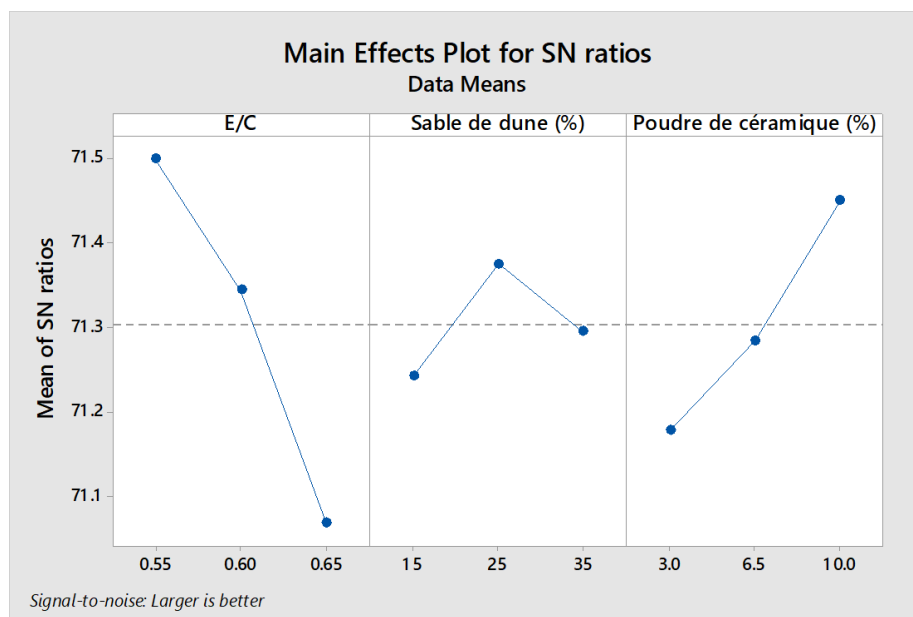


FIGURE III.22 – Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios)

D'après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (Signal to Noise Ratios) représentés dans la figure 3.21, nous constatons que les résultats optimaux pour chaque facteur afin de donner les meilleurs résultats pour la vitesse de propagation d'ultrasons à 28 jours, sont les suivant : le rapport E/C (0.55) , la teneur en sable de dune (25%) et la teneur en poudre de céramique (10%).

III.6.4.1 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	3802	593	6.41	0.023	
E/C	-581	1090	-0.53	0.647	22.53
Sable de dune (%)	-16.7	29.1	-0.57	0.625	642.55
Poudre de céramique (%)	266	105	2.53	0.127	1030.43
E/C*Sable de dune (%)	34.3	52.1	0.66	0.578	776.14
E/C*Poudre de céramique (%)	-374	149	-2.51	0.129	761.74
Sable de dune (%)*Poudre de céramique (%)	-0.917	0.744	-1.23	0.343	53.31

Model Summary

S	R-sq
28.1308	98.02%

Regression Equation

Vitesse de propagation (m/s) = 3802 - 581 E/C - 16.7 SD + 266 PC + 34.3 E/C*SD - 374 E/C*PC - 0.917 SD*PC

III.6.4.2 Interprétation des résultats

La remarque notée par les résultats de comparaison entre les coefficients du modèle qui sont représentées au-dessus montre que les coefficients du rapport E/C et de poudre de céramique sont élevés, ce qui montre l'influence significative du rapport E/C et de pourcentage de poudre de céramique PC sur les résultats de la vitesse de propagation d'ultrasons. Les courbes obtenues et qui peuvent prédire la vitesse de propagation d'ultrasons à 28 jours à partir les facteurs étudiés sont illustrées par les figures 3.22, 3.23 et 3.24.

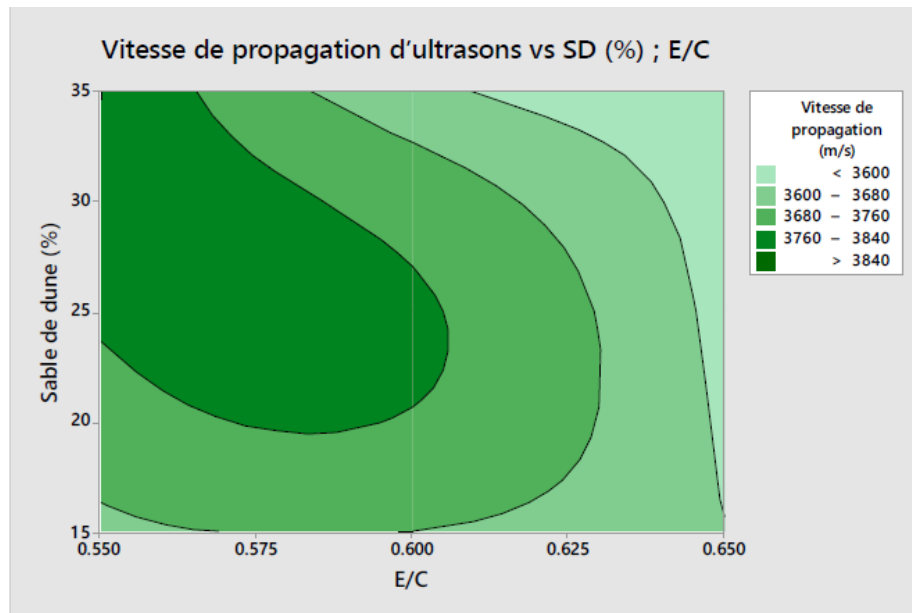


FIGURE III.23 – La vitesse de propagation d’ultrasons à 28 jours en fonction de pourcentage de sable de dune et du rapport E/C.

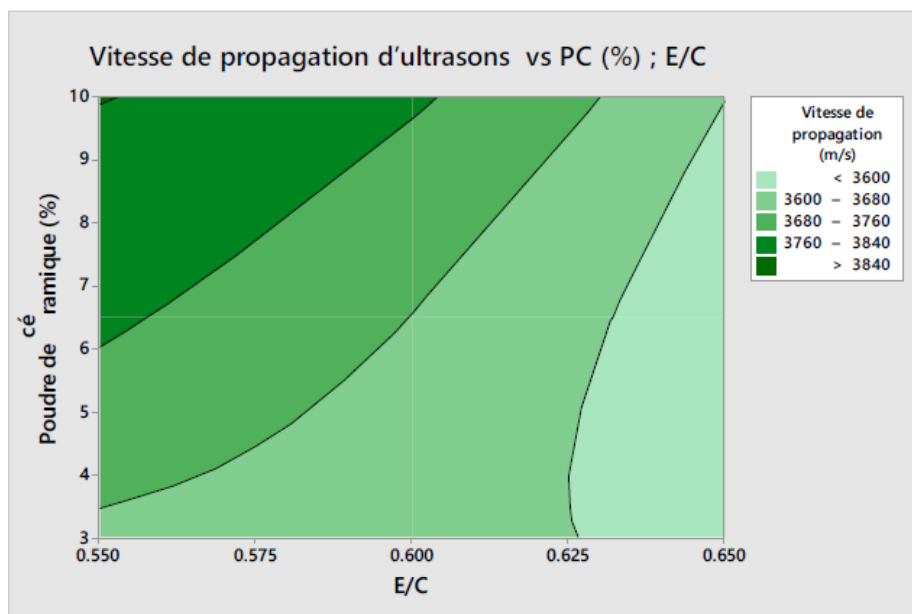


FIGURE III.24 – La vitesse de propagation d’ultrasons à 28 jours en fonction de pourcentage de poudre de céramique et du rapport E/C

Ces figures montrent clairement que La vitesse de propagation d’ultrasons à 28 jours peut dépasser 3840 m/s si le rapport E/C varie entre 0.55 et 0.58 avec un pourcentage de sable de dune SD 23 et 30% et un pourcentage de poudre de céramique PC entre 8.1 et 10%.

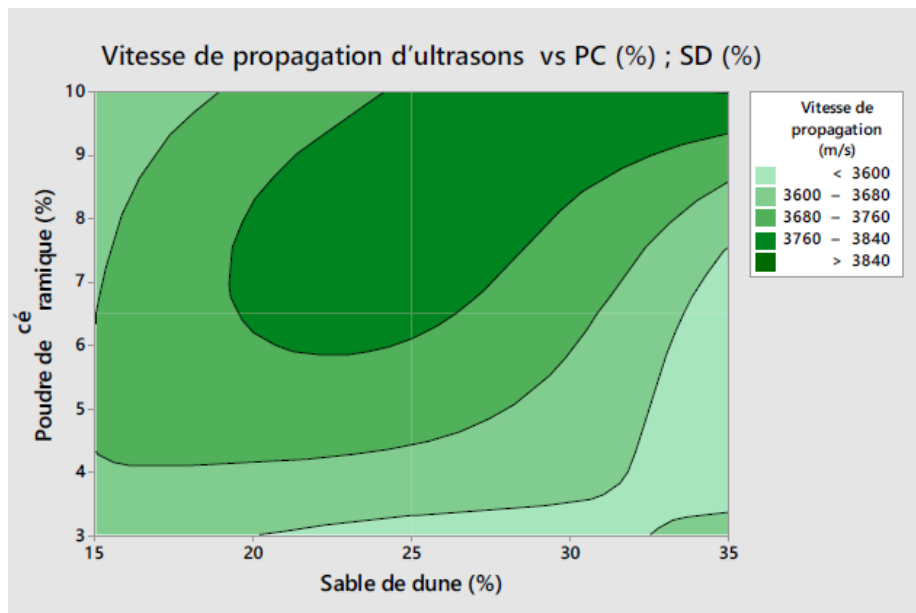


FIGURE III.25 – La vitesse de propagation d’ultrasons à 28 jours en fonction de pourcentage de poudre de céramique et de sable de dune.

CONCLUSION GENERALE

Le travail expérimental et numérique présenté s'inscrit dans l'application des méthodes statistiques au domaine des matériaux en génie civil. Plus précisément, ce travail vise à utiliser les plans d'expériences de Taguchi pour explorer les relations entre les facteurs ciblés par notre recherche : le rapport E/C, le pourcentage de sable de dune (SD) et le pourcentage poudre de céramique (PC), ainsi que les niveaux de chaque facteur. La méthode de Taguchi repose sur un design robuste qui permet d'identifier les facteurs les plus significatifs pour maîtriser la régularité et la qualité du mortier, tout en réduisant le temps d'expérimentation et le nombre d'essais nécessaires. Des modèles mathématiques prédictifs sont développés selon les essais réalisés nous ont permis de comprendre l'effet des facteurs utilisés dans notre travail sur la maniabilité des mortiers, la masse volumique à l'état frais et durci, la résistance à la compression, la résistance à la flexion et la vitesse de propagation d'ultrasons à 28 jours. Afin de déterminer les résultats optimaux pour chaque facteur pour donner les meilleurs résultats pour chaque réponse. Avec les modèles mathématiques sont les suivants :

- Etalement (cm) = $0.07 + 32.67 E/C - 0.0450 SD - 0.2714 PC$
- Masse vol. à l'état frais (kg/m³) = $3242 - 1822 E/C + 8.2 SD - 181 PC - 20.0 E/C*SD + 261 E/C*PC + 0.84 SD*PC$
- Masse vol. à l'état durci (kg/m³) = $2778 - 1273 E/C - 12.59 SD - 61.2 PC + 20.3 E/C*SD + 95.2 E/C*PC + 0.114 SD*PC$
- Rc 28 (MPa) = $-4.0 + 54 E/C + 0.06 SD + 12.0 PC - 0.19 E/C*SD - 17.9 E/C*PC - 0.0239 SD*PC$
- Rt28 (MPa) = $17.79 - 26.1 E/C - 0.603 SD - 0.01 PC + 1.043 E/C*SD + 0.38 E/C*PC - 0.0053 SD*PC$
- Vitesse de propagation (m/s) = $3802 - 581 E/C - 16.7 SD + 266 PC + 34.3 E/C*SD - 374 E/C*PC - 0.917 SD*PC$

Et les résultats optimaux sont les suivants :

- Les meilleurs résultats pour la maniabilité des mortiers sont les suivants :

le rapport E/C (0.65) , la teneur en sable de dune (15%) et la teneur en poudre de céramique (3%).

- Les meilleurs résultats pour la masse volumique à l'état frais sont les suivants :

le rapport E/C (0.65), la teneur en sable de dune (25%) et la teneur en poudre de céramique (6.5%).

- les meilleurs résultats pour la masse volumique de à l'état durci sont les suivants :

le rapport E/C (0.55), la teneur en sable de dune (15%) et la teneur en poudre de céramique (3%).

- les meilleurs résultats pour la résistance mécanique à la compression à 28 jours sont les suivants :

le rapport E/C (0.55), la teneur en sable de dune (25%) et la teneur en poudre de céramique (10%).

- les meilleurs résultats pour la résistance mécanique à la traction par flexion à 28 jours sont les suivants :

le rapport E/C (0.65) , la teneur en sable de dune (15%) et la teneur en poudre de céramique (6.5%).

- les meilleurs résultats pour la vitesse de propagation d'ultrasons à 28 jours sont les suivants :

le rapport E/C (0.55) , la teneur en sable de dune (25%) et la teneur en poudre de céramique (10%).

REFERENCES

- [1] M. (masonry), “Mortar (masonry) wikipedia,” 2024. [Online]. Available : [https://en.wikipedia.org/wiki/Mortar_\(masonry\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Mortar_(masonry))
- [2] N. Sathiparan, M. N. Rupasinghe, and B. H. Pavithra, “Performance of coconut coir reinforced hydraulic cement mortar for surface plastering application,” *Construction and Building Materials*, vol. 142, pp. 23–30, 2017.
- [3] I. Hassan, O. Abdul-Kareem, and A. Shihab, “Effect of using well water as mixing water in concrete,” *Al-Rafidain Engineering journal*, vol. 22, no. 5, pp. 17–28, 2014.
- [4] F. Massazza, “Admixtures in concrete,” *Advances in cement technology*, pp. 569–648, 1983.
- [5] N. Saikia and J. De Brito, “Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation : A review,” *Construction and Building Materials*, vol. 34, pp. 385–401, 2012.
- [6] H. Tsoar, “Sand dunes mobility and stability in relation to climate,” *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 357, no. 1, pp. 50–56, 2005.
- [7] M. Guendouz and D. Boukhelkhal, “Properties of flowable sand concrete containing ceramic wastes,” *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 33, no. 24, pp. 2661–2683, 2019.
- [8] A. Singh and V. Srivastava, “Ceramic waste in concrete—a review,” *Recent advances on engineering, technology and computational sciences (RAETCS)*, pp. 1–6, 2018.
- [9] A. Nayana and P. Rakesh, “Strength and durability study on cement mortar with ceramic waste and micro-silica,” *Materials Today : Proceedings*, vol. 5, no. 11, pp. 24 780–24 791, 2018.
- [10] M. Pillet, *Introduction aux plans d’expériences par la méthode Taguchi*. Les éditions d’organisation, 1994.

- [11] G. Sado and M.-C. Sado, *Les plans d'expériences : de l'expérimentation à l'assurance qualité*. Afnor Paris, 2000.
- [12] T. Taguchi, "Questions about nishioka's theory on 700 years climatic change in japan," *Journal of the Japanese Society of Snow and Ice*, vol. 12, no. 2, pp. 37–45, 1950.
- [13] A. SAYOUD, "Caractérisation physico-mécanique d'un liant hydraulique à base de poudre de verre," 2021.