

République Algérienne Démocratique Et Populaire



***Ministère De L'enseignement Supérieur
Et De La Recherche Scientifique***



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

Departement d'Hydraulique et de Génie Civil

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

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

THÈME :

**Optimisation de l'effet de sable de dune, de déchets de céramique
et de granulats de caoutchouc sur la résistance mécanique
de mortier de ciment**

Mémoire de fin d'étude

Présenté par:

- KHAIFA DHAHBI
- TAYED HEDOUD
- FELIOUNE ABD ELFATTAH

Encadreur :

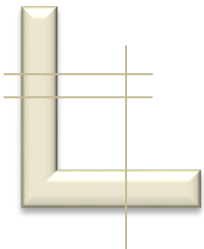
Dr. Mohamed Zohaïr kaab

Co-encadreur :

Dr. Hamad khelaifa

Université d'El Oued

Année Universitaire: 2024/2025





Remerciements

Tout d'abord, je remercie dieu -ALLAH- de tout puissant de m'avoir donné le courage et

.la patience durant toutes ces années d'études

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et mes sincères remerciements à Monsieur

Dr : Mohamed Zohaïr kaab, Docteur à L'Université Echahid Hamma Lakhdar

d'El Oued , pour avoir dirigé ce travail

Dr : Hamad khelaifa. Docteur à L'Université Echahid Hamma Lakhdar

d'El Oued , pour avoir dirigé ce travail

Mes sincères remerciements aux messieurs les membres du jury pour

l'honneur qu'ils me font en participant au jugement de ce travail.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé

à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

En fin je remercie tout particulièrement mes parents, pour leur

soutien inconditionnel tout au long de ces longues années d'études.





Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents qui m'ont soutenu durant toute la durée de mes études.

A mes très chères sœurs et à ma grande famille.

A tous mes amis.

A tous ceux qui m'aiment et que j'aime

A vous.



RÉSUMÉ

L'objectif de cette étude est d'appliquer les conceptions expérimentales de la technique de Taguchi pour découvrir les résultats optimaux et d'examiner les relations entre les facteurs ciblés (sable des dunes, agrégats de caoutchouc et déchets de céramique) à différents niveaux.

Pour y parvenir, nous avons intégré différentes pourcentages de chaque facteur dans le mortier en fonction de substitution volumiques de sable alluvionnaire et avec de quantité distinctes : 5%, 10%, 15% et 20% pour le sable de dune ; 4%, 9%, 14% et 19% pour les granulats de caoutchouc ; et 2%, 5%, 8% et 11% pour les déchets de céramique.

Nous avons également avancé des modèles mathématiques prédictifs grâce au logiciel MINITAB 18, ce qui nous a aidé à reconnaître les facteurs clés influençant le comportement mécanique du mortier. Les résultats obtenus ont montré que les taux de l'incorporation de sable de dune, des granulats de caoutchouc et des déchets de céramique sont les principaux facteurs affectant le comportement mécanique des mortiers d'étude.

Mots clés : Sable de dune, Granulats de caoutchouc, déchets de céramique, Méthode de Taguchi.

ABSTRACT

The objective of this study is to apply the experimental designs of the Taguchi technique to discover the optimal results and to examine the relationships between the targeted factors (dune sand, rubber aggregates and ceramic waste) at different levels.

To achieve this, we integrated different percentages of each factor into the mortar based on volume substitution of alluvial sand and with distinct quantities: 5%, 10%, 15% and 20% for dune sand; 4%, 9%, 14% and 19% for rubber aggregates; and 2%, 5%, 8% and 11% for ceramic waste.

We also advanced predictive mathematical models using the MINITAB 18 software, which helped us recognize the key factors influencing the mechanical behavior of the mortar. The results obtained showed that the rates of incorporation of dune sand, rubber aggregates and ceramic waste are the main factors affecting the mechanical behavior of the study mortars.

Keywords: Dune sand, Rubber aggregates, ceramic waste, Taguchi method.

الملخص

لهدف من هذه الدراسة هو تطبيق التصاميم التجريبية لتقنية تاجوتشي لاكتشاف النتائج المثلى وفحص العلاقات بين العوامل المستهدفة (الكتبان الرملية والركام المطاطي ونفايات السيراميك) على مستويات مختلفة.

ولتحقيق ذلك، قمنا بدمج نسب مختلفة من كل عامل في الملاط بناءً على استبدال حجم الرمال الغرينية وبكميات مختلفة: 5%، 10%، 15% و 20% لرمال الكتبان الرملية؛ 4%، 9%، 14%، 19% للركام المطاطي؛ و 2% و 5% و 8% و 11% لمخلفات السيراميك.

كما قمنا بتطوير نماذج رياضية تنبؤية باستخدام برنامج MINITAB 18، مما ساعدنا في التعرف على العوامل الرئيسية التي تؤثر على السلوك الميكانيكي للملاط. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن معدلات دمج رمل الكتبان والركام المطاطي والمخلفات الخزفية هي العوامل الرئيسية المؤثرة على السلوك الميكانيكي لملاطات الدراسة.

الكلمات المفتاحية: الكتبان الرملية، الركام المطاطي، النفايات الخزفية، طريقة تاجوتشي.

Table des matières

Dédicace

Résumé

Abstract

ملخص

Table des matières

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale.....1

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I. Introduction..... 3

I.2. Les mortiers:..... 3

I.3 déchets de céramique. 18

I.4.Déchets..... 22

I.5.Recyclage 22

I.6.Sable de dunes 24

I.7.Méthode de taguchi..... 29

I.8.Méthode des plans d'expériences..... 30

I.9. Conclusion 37

Chapitre II : Matériaux et procédures expérimentales

II.1. Introduction 39

II.2.Matériaux utilisés 39

II.3.Formulations..... 47

chapitre III : Analyse des résultats expérimentaux par l'application de la méthode de Taguchi

III- 1 Facteurs 61

III- 2 Niveaux des facteurs 61

III-3 Choix de la matrice de Taguchi pour notre étude..... 61

III-4 Mortier à l'état frais 64

III-5 Mortier à l'état durci 72

Conclusion Générale..... 94

Références bibliographique

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Page

Chapitre I :		
Figure 1	Effet des granulats de caoutchouc sur l' affaissement.	6
Figure 2	L'influence des GCR sur la masse volumique de béton.	7
Figure 3	Effet du taux de substitution de GCR sur la résistance en compression de mortiers de ciment renforcé par des fibres.	8
Figure 4	Les risques de feu dans les décharges des pneus usages .	10
Figure 5	La progression des activités de valorisation des pneus usagés en Europe.	11
Figure 6	La production mondiale de caoutchouc naturel en 2017.	12
Figure 7	La production mondiale de caoutchouc naturel en 2017.	13
Figure 8	Piste d'athlétisme en granulats de pneus usagés recyclés.	14
Figure 9	La technique de pneu sol : le channes-Mandelieu en 1988.	15
Figure 10	Ouvrage de mostaghanem RN11 (algérie) stabilité dun talus.	17
Figure 11	Ouvrage végétalisé Projet de Bousmail.	17
Figure 12	Bétonnage de la 1ière file de pneus.	18
Figure 13	Diché ceramique de en oued souf- algérie.	19
Figure 14	conductibilite thermique des materiaux en fonction de la temperature	21
Figure 15	Sable de dune.	24
Figure 16	Méthode traditionnelle d'expérimentation et courbe de réponse.	31
Figure 17	maillage du domaine expérimental et surface de réponse.	32
Figure 18	. Triangle de féret , 1892.	34
Figure 19	Points expérimentaux pour un plan de mélange à trois constituants.	35
Figure 20	Organigramme général de traitement des plans d'expériences.	36
Chapitre II : Matériaux et procédures		
Figure 1	Sable Alluvionnaire Djamaa (SA).	39
Figure 2	sable de dune (SD).	39
Figure 3	Tamis d'analyse granulométrique.	41
Figure 4	Schémas de mesure d'équivalent de sable	42
Figure 5	Courbes granulométriques des sables utilisés et des granulats de caoutchouc.	44
Figure 6	Ciment utilisé.	44
Figure 7	Granulats de caoutchouc (0-4mm).	46

Figure 8	Déchets de céramiques (< 0.63mm).	47
Figure 9	Pesage des composants du mortier.	49
Figure 10	Matériaux utilisés secs.	50
Figure 11	Mélanger les matières sèches.	50
Figure 12	Ajouter de l'eau en mélangeant.	50
Figure 13	Moule des éprouvettes utilisés	51
Figure 14	Lubrifié de moule	51
Figure 15	Verser la moitié de la quantité dans le moule.	51
Figure 16	Décanner l'échantillon en secouant	52
Figure 17	Remplissage du modèle terminé	52
Figure 18	Ouvrir le éprouvettes.	52
Figure 19	Nettoyage des échantillons.	52
Figure 20	Étalement du mortier à la table à secousses.	53
Figure 21	Mise en place de la première couche	54
Figure 22	Mise en place de la deuxième couche	54
Figure 23	Rasage et pesage	55
Figure 24	Séchage des échantillons.	56
Figure 25	Essai de de traction par flexion.	57
Figure 26	Essai de compression.	58
Figure 27	Essai d'auscultation dynamique.	58
Figure 28	de l'essai d'absorption d'eau par.	59
Chapitre III Analyse des résultats expérimentaux par l'application de la méthode de Taguchi		
Figure 1	Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios)	65
Figure 2	La maniabilité en fonction de pourcentage de sable de dune et de granulats de caoutchouc.	67
Figure 3	La maniabilité en fonction de pourcentage de sable de dune et de déchets de céramique.	67
Figure 4	La maniabilité en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de déchets de céramique.	68
Figure 5	Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios)	69
Figure 6	la masse volumique à l'état frais en fonction de pourcentage de sable de dune et de granulats de caoutchouc.	71

Figure 7	la masse volumique à l'état frais en fonction de pourcentage de sable de dune et de déchets de céramique.	71
Figure 8	la masse volumique à l'état durci en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de déchets de céramique.	72
Figure 9	Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios)	73
Figure 10	la masse volumique à l'état durci en fonction de pourcentage de sable de dune et de granulats de caoutchouc.	75
Figure 11	: la masse volumique à l'état durci en fonction de pourcentage de sable de dune et de déchets de céramique	75
Figure 12	la masse volumique à l'état durci en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de déchets de céramique.	76
Figure 13	Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios)	77
Figure 14	La résistance mécanique à la compression à 28 jours en fonction de pourcentage de sable de dune et de granulats de caoutchouc	79
Figure 15	La résistance mécanique à la compression à 28 jours en fonction de pourcentage de sable de dune et déchets de céramique.	79
Figure 16	La résistance mécanique à la compression à 28 jours en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de déchets de céramique.	80
Figure 17	Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios).	81
Figure 18	La résistance à la flexion à 28 jours en fonction de pourcentage de sable de dune et de granulats de caoutchouc.	83
Figure 19	La résistance à la flexion à 28 jours en fonction de pourcentage de sable de dune et de déchets de céramique.	83
Figure 20	La résistance à la flexion à 28 jours en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de déchets de céramique.	84
Figure 21	Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios).	85
Figure 22	La vitesse de propagation d'ultrasons en fonction de pourcentage de sable de dune et de granulats de caoutchouc.	87
Figure 23	La vitesse de propagation d'ultrasons en fonction de pourcentage de sable de dune et de déchets de céramique	87
Figure 24	La vitesse de propagation d'ultrasons en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de déchets de céramique.	88
Figure 25	Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios).	89

Figure 26	L'absorption d'eau par immersion totale en fonction de pourcentage de sable de dune et de granulats de caoutchouc.	91
Figure 27	L'absorption d'eau par immersion totale en fonction de pourcentage de sable de dune et de déchets de céramique.	91
Figure 28	L'absorption d'eau par immersion totale en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de déchets de céramique.	92

LISTE DES TABLEAUS

Chapitre II : Matériaux et procédures		
Tableau 1	<i>Préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les mortiers.</i>	43
Tableau 2	<i>Regroupe l'ensemble des résultats relatifs aux essais physiques effectués sur utilisé.</i>	43
Tableau 3	<i>Résistance à la compression (NA 234</i>	45
Tableau 4	<i>Analyses chimiques (NA 5042)</i>	45
Tableau 5	<i>Composition minéralogique du ciment (CLINKER).</i>	45
Tableau 6	<i>Caractéristiques physiques du ciment MATINE</i>	45
Tableau 7	<i>. Caractéristiques physiques du Granulats de caoutchouc (0/4mm).</i>	46
Tableau 8	<i>Caractéristiques physiques du Déchets de céramiques (< 0.63mm).</i>	47
Tableau 9	<i>Composition des mortiers utilisés.</i>	49
Tableau 10	<i>Classes des consistances du mortier selon la valeur d'étalement.</i>	54
Chapitre III Analyse des résultats expérimentaux par l'application de la méthode de Taguchi		
Tableau 1	<i>Les facteurs et les niveaux ciblés</i>	61
Tableau 2	<i>La matrice expérimentale des effets selon la méthode Taguchi.</i>	63
Tableau 3	<i>Résultats des essais de la masse volumique à l'état frais.</i>	68
Tableau 4	<i>Résultats des essais de la masse volumique à l'état durci.</i>	72
Tableau 5	<i>Résultats des essais de la résistance mécanique à la compression à 28 jours.</i>	76
Tableau 6	<i>Résultats des essais de la résistance mécanique à la traction par flexion à 28 jours.</i>	80
Tableau 7	<i>Résultats des essais de la vitesse de propagation d'ultrasons.</i>	84
Tableau 8	<i>Résultats des essais de l'absorption d'eau par immersion totale.</i>	88

LISTE DES ABRÉVIATIONS :

SA	Sable alluvionnaire
SD	Sable de dunes
GC	Granulats de caoutchouc
DC	Déchets de céramiques
E/C	Eau/Ciment
ES	Equivalent de sable
Mf	Module de finesse
λ	Elancement

Introduction générale

Face à la demande croissante de matériaux de construction et à la nécessité de protéger l'environnement dans

une perspective de développement durable, il est essentiel d'explorer et de valoriser toutes les matériaux locaux, comme le sable de dunes, et de réutilisation des déchets dans le domaine de la construction, tels que les pneus usés et les déchets de céramique.

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 (5%, 10%, 15% et 20%), nous allons également varier des proportions de caoutchouc en mélange avec du sable alluvionnaire (4%, 9%, 14% et 19%) et varier des proportions de déchets de céramique avec du sable alluvionnaire (2%, 5%, 8% et 11%).

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 granulats de caoutchouc de pneus et 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, granulats de caoutchouc, déchets de céramique ainsi que les procédures expérimentales adoptées.

Le troisième chapitre sera consacré au 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. Introduction

Ce chapitre représente une synthèse bibliographique des recherches et des expériences menées sur le comportement du mortier et peut être divisé en trois parties : La première traite de la description du problème des déchets générés par les pneus usagés, les déchets de céramique et le sable et de son évaluation dans le secteur de la construction. Quant à la deuxième partie, nous avons étudié les matériaux ajoutés au mortier, tandis que la troisième partie a été consacrée à l'effet des matériaux utilisés dans le mortier à l'état frais et durci. Nous concluons ensuite le chapitre avec des résultats qui illustrent l'impact. De granulats selon la nature du liant.

I.2. Les mortiers:

I.2.1. Généralités sur les mortiers :

Le mortier est le mélange à consistance de pâte ou de boue, d'un liant et d'agréats avec de l'eau. Il est utilisé en maçonnerie pour rôle de protecteur et solidariser les éléments entre eux, d'assurer la stabilité de l'ouvrage, de combler les interstices entre les blocs de construction.

De multiples formulations de coulis peuvent être obtenues en ajustant différents paramètres : liant (type et dosage), auxiliaires et additifs, dosage en eau. Concernant le liant, tous types de ciment et de chaux peuvent être utilisés ; Leur choix et leur dosage dépendent du travail à réaliser et de son environnement.

Les chaux apportent leur plasticité, les ciments apportent la résistance mécanique et un durcissement plus rapide. Les mortiers peuvent être:

Préparés sur le chantier en dosant et mélangeant les différents constituants, adjuvants compris
Préparés sur le chantier à partir de mortiers industriels secs pré-dosés (il suffit d'ajouter la quantité d'eau nécessaire).

Livrés par une centrale : ce sont des mortiers prêts à l'emploi, dont les derniers nés, les mortiers retardés stabilisés, ont un temps d'emploi supérieur à 24h. Les mortiers industriels se sont beaucoup développés ces dernières années, permettant d'éviter le stockage et le mélange des constituants sur des chantiers parfois exigus et difficiles d'accès rénovation, travaux souterrains. Le marché du bricolage a profité du développement des mortiers pré mélangés.

Dans une première partie nous parlerons des mortiers classiques qui existent puis nous nous intéresserons principalement aux mortiers dont le liant est le ciment puis dans une seconde partie nous parlerons d'un type de mortier artificiel ou expérimental en occurrence le mortier à base de granulats de caoutchouc.

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 batard. Si on ajoute du gravier à un mortier, on obtient du béton.

I.2.3. Les Mortier de granulats de caoutchoucs:

I.2.3.1. Généralités sur les caoutchoucs :

En effet, le caoutchouc est un matériau polyvalent largement utilisé dans de nombreux secteurs, y compris l'automobile, l'industrie, la construction, le médical et bien d'autres. Voici quelques points supplémentaires sur les deux grandes familles de caoutchouc et leurs déchets :

1. Caoutchoucs naturels : Issus de l'hévéaculture, les caoutchoucs naturels sont obtenus à partir du latex de l'hévéa, un arbre principalement cultivé dans les régions tropicales. Ces caoutchoucs sont appréciés pour leur élasticité et leur résilience naturelles.

2. Caoutchoucs synthétiques : Fabriqués à partir de dérivés du pétrole, les caoutchoucs synthétiques sont produits par des procédés chimiques. Ils offrent une grande variété de propriétés et peuvent être formulés pour répondre à des besoins spécifiques dans diverses applications industrielles.

3. Utilisations du caoutchouc : Le caoutchouc est utilisé dans une grande diversité de produits et d'applications, notamment dans l'industrie automobile pour la fabrication de pneumatiques, les systèmes de freinage, les airbags, etc. Il est également utilisé dans le domaine médical pour la fabrication de gants, de tubes et de divers dispositifs. Dans le secteur de la construction, il est utilisé pour des applications d'étanchéité, de revêtements et même dans la fabrication de mortiers, comme vous l'avez mentionné précédemment.

4. Déchets de caoutchouc : Les déchets de caoutchouc proviennent de diverses sources, notamment les déchets industriels, les déchets de fabrication de pneumatiques et de chambres à air, les pneumatiques usagés et les déchets du processus de recyclage. Ces déchets peuvent

être traités et recyclés pour une utilisation ultérieure, contribuant ainsi à réduire l'impact environnemental et à promouvoir la durabilité dans divers secteurs.

En résumé, le caoutchouc est un matériau essentiel avec une large gamme d'applications, et la gestion efficace de ses déchets est importante pour minimiser son impact environnemental tout en maximisant son potentiel de réutilisation et de recyclage.

Les caractéristiques d'un mortier de ciment avec caoutchouc:

D'après leurs propriétés, les mortiers se subdivisent en deux catégories:

Les mortiers plastiques.

Les mortiers durcis.

I.2.3.3. Les mortiers caoutchouc plastiques:

I.2.3.3.1. Les mortiers plastiques :

a) L'ouvrabilité :

L'ouvrabilité est en effet une propriété essentielle des matériaux cimentaires à l'état frais, tels que le béton, le mortier ou les mélanges contenant des granulats de caoutchouc. Cette propriété se réfère à la facilité avec laquelle le matériau peut être mis en place et travaillé lors de la construction.

Pour évaluer l'ouvrabilité, plusieurs méthodes peuvent être utilisées, notamment l'essai d'affaissement ou d'étalement. Ces essais mesurent la capacité du matériau à conserver sa forme ou à s'étaler sous l'effet de son propre poids, ce qui reflète sa fluidité et sa maniabilité.

Dans le cas des matériaux contenant des granulats de caoutchouc, il est important de noter que la forme rigide de ces granulats peut influencer leur comportement dans le matériau. Par exemple, si les granulats de caoutchouc ont une forme irrégulière ou des bords tranchants, cela peut affecter la fluidité et la maniabilité du matériau, ce qui peut à son tour influencer son ouvrabilité.

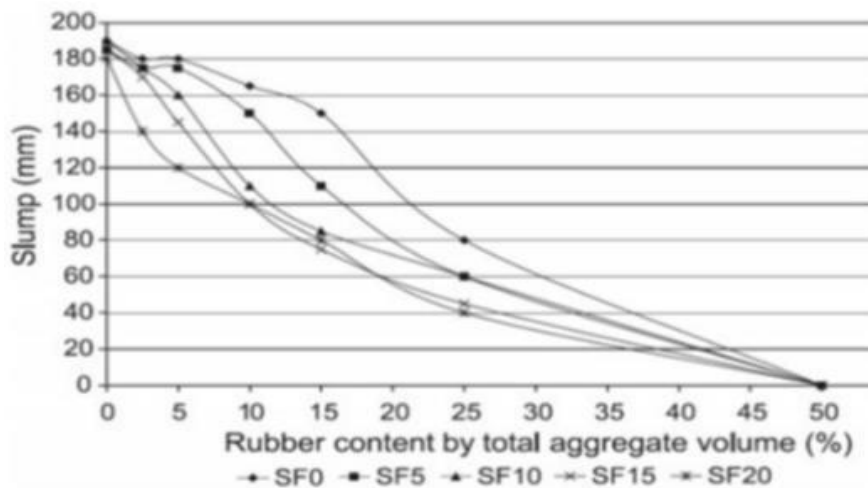


Figure I.1. Effet des granulats de caoutchouc sur l' affaissement

b) La masse volumique fraîche :

Les travaux de recherche menés par Bravo et ses collègues en 2012 sur l'évolution de la masse volumique des bétons de caoutchouc sont très intéressants. En substituant partiellement les granulats classiques silico-calcaires de densités relativement élevées par des granulats de caoutchouc de densité plus faible, ils ont observé une diminution de la densité fraîche des bétons avec l'augmentation du taux de granulats de caoutchouc dans le mélange.

Cette tendance peut être expliquée par la légèreté intrinsèque des granulats de caoutchouc. En effet, les granulats de caoutchouc ont une densité plus faible que les granulats traditionnels, ce qui contribue à réduire la densité globale du mélange lorsqu'ils sont incorporés. Par conséquent, plus le pourcentage de granulats de caoutchouc dans le mélange augmente, plus la densité globale du béton diminue.

Cette réduction de la densité fraîche des bétons de caoutchouc peut avoir des implications importantes dans la conception et l'utilisation de ces matériaux. Par exemple, elle peut influencer les propriétés mécaniques, l'isolation thermique, et même la durabilité du béton. Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte la nature et les caractéristiques des granulats utilisés dans la formulation des bétons de caoutchouc pour obtenir les performances souhaitées dans diverses applications de construction.

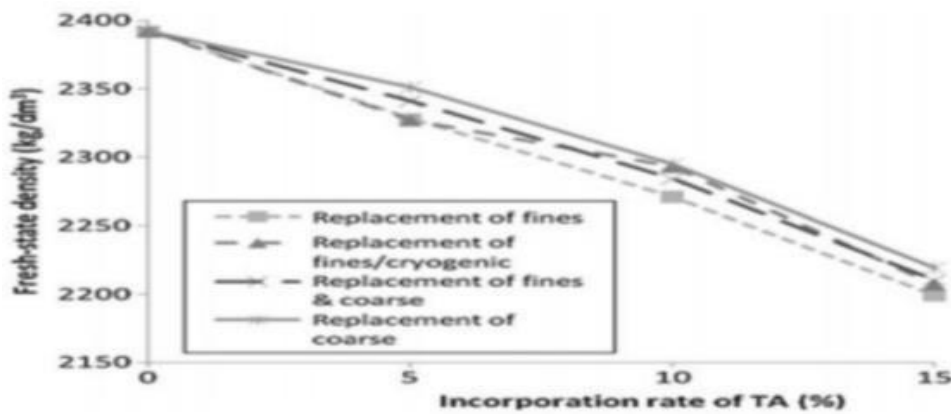


Figure I.2. L'influence des GCR sur la masse volumique de béton

I.2.3.3.2. Mortier durci

a) Masse volumique :

Les résultats de l'étude menée par Pedro et ses collègues en 2013 ont démontré une diminution de la masse volumique apparente des mortiers à l'état durci lorsque les granulats naturels (sable) ont été remplacés par des granulats de caoutchouc de même taille (0-6 mm). Cette réduction de la masse volumique a été observée à différents taux de remplacement, allant de 5% à 15%. Plus précisément, l'allègement obtenu après 28 jours de cure variait de 4.3% à 9.9% pour ces différents taux de remplacement.

b) Résistance en compression :

L'incorporation de déchets de caoutchouc sous forme d'agrégats dans les matériaux cimentaires entraîne effectivement une diminution de la résistance en compression. Cette réduction dépend de plusieurs facteurs, dont le pourcentage de granulats de caoutchouc recyclé (GCR), la taille et la surface des particules de caoutchouc. Les travaux de Turatsinze et ses collaborateurs en 2004 ont illustré cette tendance en remplaçant le sable naturel par des GCR de même taille (avec une taille maximale de 4 mm) dans des mortiers, à des taux de substitution variant de 10% à 30%.

Les résultats de leur étude ont mis en évidence une réduction significative de la résistance en compression, comme indiqué dans la Figure 1.3. La perte de performance était particulièrement notable, avec des diminutions de 58% et 79% correspondant aux taux de substitution de 20% et 30% de caoutchouc, respectivement. Cette chute importante de la résistance en compression des matériaux cimentaires est attribuée à la faible adhérence entre les particules de caoutchouc et la matrice cimentaire.

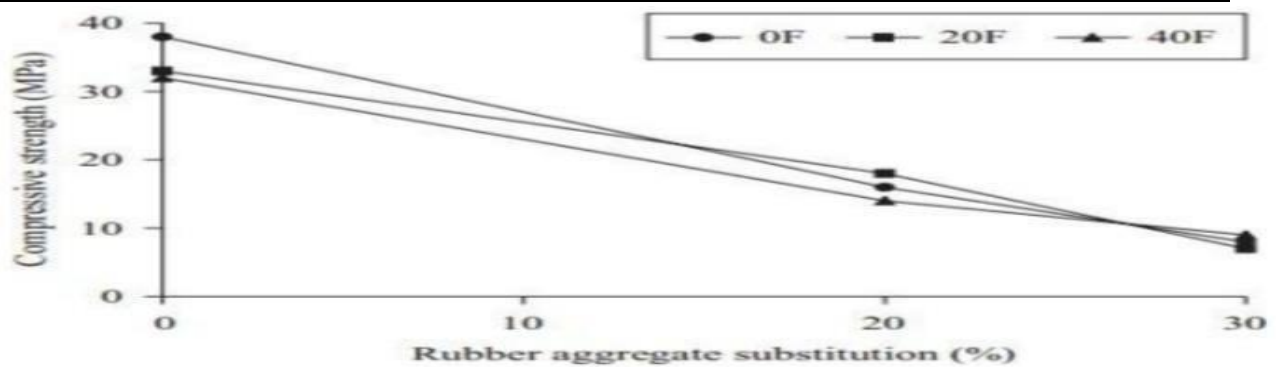


Figure I.3. Effet du taux de substitution de GCR sur la résistance en compression de mortiers de ciment renforcé par des fibres.

I.2.4. Les pneumatiques usagés :

Les déchets produits par l'industrie continuent de croître en quantité et en complexité, et parmi eux, les déchets de pneus usagés sont en augmentation avec le développement de l'industrie automobile. Selon les rapports des associations des fabricants de pneus, la production mondiale annuelle de pneus s'élève à environ 1,4 milliard d'unités, générant environ 17 millions de tonnes de pneus usagés chaque année.

Bien que les déchets de pneus soient classés dans les normes européennes comme des déchets courants, ils posent néanmoins des problèmes en raison de leur volume, de leur incompatibilité et de leur non-biodégradabilité, car ils résistent à divers types d'attaques physico-chimiques. Les pneus sont constitués d'un mélange de caoutchouc synthétique et naturel, auxquels sont ajoutés des éléments améliorant leurs qualités de résistance et de sécurité (voir Tableau I.1). Selon leur état de dégradation, on peut les classer en deux catégories principales.

Matière	Pneu
Elastomères	43 à 47%
Noir de carbone	21 %
Acier	16 à 27 %
Textile	0 à 5 5.5%
Oxyde de Zinc	1%
Soufre	1%
Additifs	6 à 7.5%

Tableau I.1. Composition chimique de pneu.

I.2.4.1. Les pneus usagés Réutilisables (PUR):

Effectivement, il existe deux filières principales pour les pneus usagés réutilisables. La première consiste en le rechapage, qui implique le remplacement de la bande de roulement. Cette pratique est principalement utilisée pour les pneus de poids lourds et les engins de chantier. La seconde

filière consiste à commercialiser les pneus sur le marché de l'occasion ou à les exporter, notamment dans les cas où les pneus n'ont pas atteint la limite d'usure autorisée. Ces deux approches permettent de prolonger la durée de vie des pneus et de réduire ainsi la quantité de déchets générée par leur élimination.

I.2.4.2. Les pneus non réutilisables (PUNR):

Les pneus qui ne peuvent plus remplir leur fonction initiale et qui ne sont pas adaptés au rechapage sont généralement destinés à être valorisés dans le domaine du génie civil. Cette opération de valorisation implique souvent le recyclage des pneus usagés pour les réutiliser dans la construction et d'autres projets d'ingénierie civile. Les pneus peuvent être transformés en granulats de caoutchouc pour être utilisés dans la fabrication de revêtements de sol, de matériaux d'isolation acoustique, de barrières de sécurité routière, ou même comme remblais dans des applications de génie civil. Ce processus de valorisation permet de donner une seconde vie aux pneus usagés tout en réduisant leur impact sur l'environnement.

La mise en décharge des pneus usagés pose en effet des risques significatifs, surtout en cas d'incendie criminel ou naturel, comme la foudre. Ces incidents peuvent entraîner des conséquences graves sur l'environnement et sur la santé publique. Le brûlage des déchets de caoutchouc dans les décharges publiques est non seulement préjudiciable sur le plan environnemental et économique, mais il constitue également une menace pour les ressources naturelles en eau et en air, ainsi que pour la santé publique.

Un exemple frappant de cette situation est l'incendie d'Hagersville au Canada, qui a nécessité 17 jours pour être éteint et a causé des dommages évalués à environ 12,6 millions de dollars. Les températures de combustion dans ces incendies ne sont généralement pas suffisamment élevées pour permettre une incinération complète, ce qui entraîne la libération de composés toxiques dans l'air, le sol et les cours d'eau, provoquant ainsi une contamination de ces milieux (voir Figure I.4).

De plus, l'eau de pluie qui s'accumule dans la forme concave des pneus constitue un habitat idéal pour les rongeurs et favorise la reproduction de moustiques, qui sont des vecteurs de maladies graves telles que la dengue et la fièvre jaune.



Figure I.4. Les risques de feu dans les décharges des pneus usages .

I.2.4.3. Valorisation des pneumatiques usagés

Effectivement, la valorisation des déchets, y compris des pneus usagés, est essentielle pour répondre aux risques et aux menaces qu'ils posent à notre environnement. En Europe, l'interdiction du stockage des pneus usagés dans les décharges publiques a stimulé le développement de méthodes de valorisation de ces déchets. L'objectif de cette démarche est de donner une nouvelle utilité aux pneus en les transformant en énergie ou en sous-produits pouvant être utilisés dans d'autres secteurs, comme le montre la Figure I.5.

La valorisation des pneus usagés peut prendre plusieurs formes, telles que le recyclage, la réutilisation, ou la conversion en énergie. Par exemple, les pneus peuvent être recyclés pour produire des granulats de caoutchouc utilisés dans la fabrication de revêtements de sols, d'isolants acoustiques, ou même dans la construction de routes. De plus, les pneus peuvent également être transformés en combustible pour produire de l'énergie, notamment par incinération dans des installations spécialisées.

En adoptant ces approches de valorisation, on peut réduire les impacts environnementaux négatifs associés à l'accumulation et à l'élimination des pneus usagés, tout en créant de nouvelles opportunités économiques et en contribuant à la préservation des ressources naturelles.

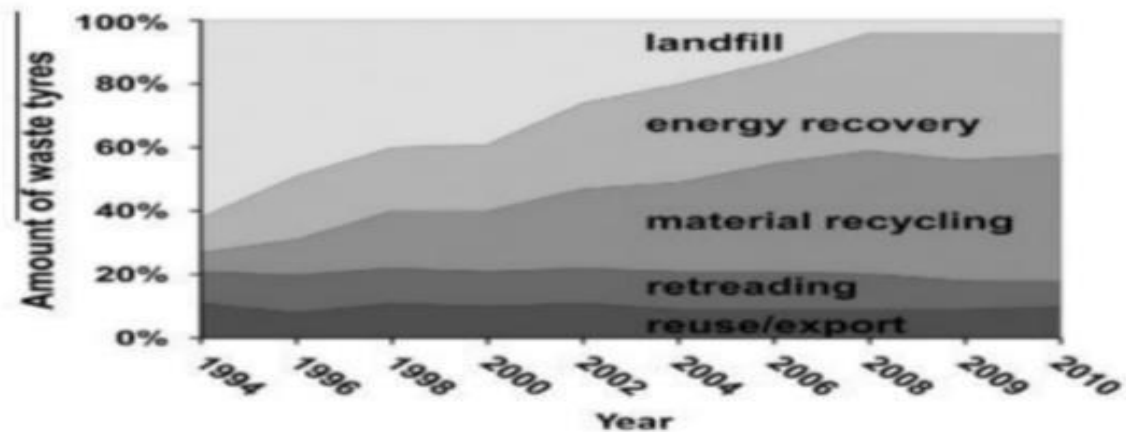


Figure I.5. La progression des activités de valorisation des pneus usagés en Europe.

I.2.4.4. Durée de vie du caoutchouc :

Dans les années 1850, une avancée majeure dans la technologie du caoutchouc a été réalisée avec l'introduction des fours à vieillissement accéléré. Ces fours ont permis d'étudier de manière approfondie la détérioration du caoutchouc dans le temps, en particulier lors de son exposition à l'oxygène atmosphérique. Grâce à ces équipements, il était désormais possible de mesurer rapidement les pertes de propriétés du caoutchouc dans différentes conditions. L'utilisation de ces fours a ouvert la voie à des tests plus approfondis sur les produits en caoutchouc, ce qui a conduit à l'identification de divers produits chimiques et antioxydants capables d'augmenter la durée de vie des produits en caoutchouc. Cela a notamment bénéficié aux pneus pour les véhicules ainsi qu'aux articles souples tels que les gants, les toiles et les tuyaux. Parallèlement, d'autres avancées ont été réalisées grâce à l'utilisation de latex non coagulé. De nouvelles méthodes ont été développées pour extruder le caoutchouc en fils minces, ou pour le déposer sur des métaux et d'autres matériaux, ouvrant ainsi de nouvelles possibilités d'utilisation dans l'industrie textile et dans d'autres secteurs.

I.2.4.5. Chiffre :

La production mondiale de caoutchouc s'élève à environ 10,9 millions de tonnes par an, ce qui équivaut à une production continue d'environ 340 kilogrammes de caoutchouc par seconde si l'on considère un compteur. Cette quantité importante de caoutchouc est principalement produite à partir d'hévéas, également appelés arbres à caoutchouc, qui sont cultivés dans diverses régions tropicales du monde.

Une grande partie de cette production de caoutchouc est consommée par l'industrie automobile pour la fabrication de pneumatiques. Les pneus automobiles représentent en effet l'une des principales applications du caoutchouc dans le monde, en raison de leurs propriétés d'adhérence, de résistance à l'usure et de flexibilité, qui sont essentielles pour assurer la sécurité et les performances des véhicules sur la route.

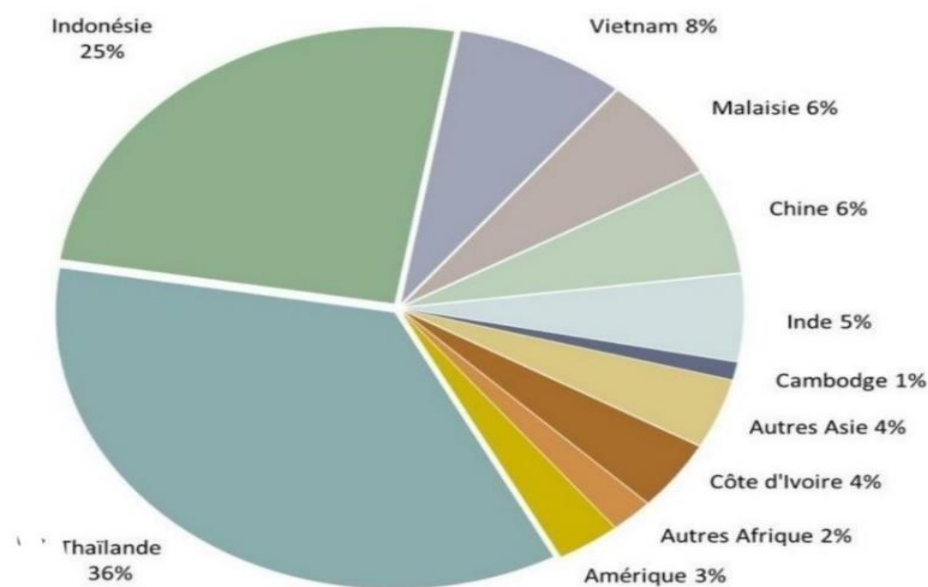


Figure I.6. La production mondiale de caoutchouc naturel en 2017..

Région	Productions en milliers de tonne
Asie-Océanie	7065
Union européenne	2481
Amérique du nord	2458
Reste de l'Europe	1403
Amérique latine	653
Afrique	66

Tableau I.2. Productions, en 2010, en milliers de tonnes. Monde.

I.2.4.6. Recyclage de caoutchouc :

Effectivement, le recyclage des caoutchoucs présente diverses difficultés, tant sur le plan économique que technique. La consommation apparente de produits finis vulcanisés se répartit principalement en deux grandes catégories : les déchets de pneumatiques, qui représentent environ 60%, et les déchets de caoutchoucs industriels, qui représentent environ 40%.

Dans une perspective de valorisation, il est crucial de prendre en compte le gisement disponible,

c'est-à-dire la quantité de déchets de caoutchouc qui peut être récupérée et traitée de manière économiquement viable. Cela implique d'évaluer non seulement la quantité de déchets disponibles, mais aussi leur qualité et leur composition, ainsi que les technologies et les infrastructures nécessaires pour les recycler de manière efficace.

Les défis du recyclage des caoutchoucs incluent la complexité des mélanges de caoutchouc utilisés dans les produits finis, les coûts élevés associés aux technologies de recyclage avancées, ainsi que les défis logistiques liés à la collecte, au tri et au transport des déchets de caoutchouc. Malgré ces défis, le développement de solutions innovantes et l'investissement dans des technologies de recyclage efficaces sont essentiels pour réduire l'impact environnemental des déchets de caoutchouc et pour promouvoir une économie circulaire plus durable.

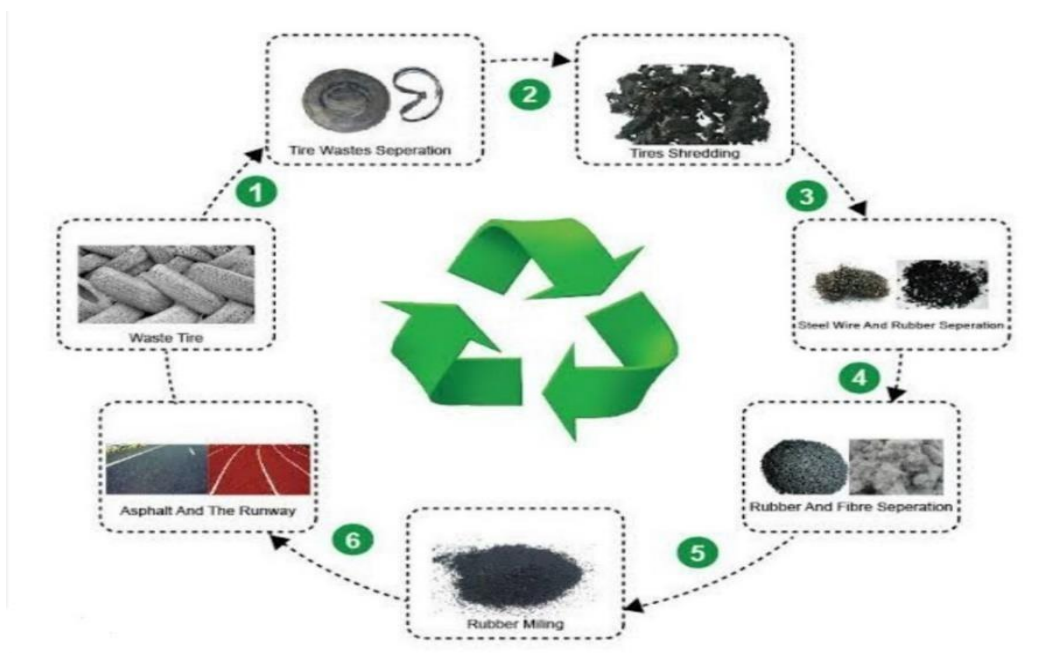


Figure I.7. Processus de recyclage de déchets de caoutchouc .

I.2.5. Granulats de construction :

Les granulats de caoutchouc provenant de pneus déchiquetés ou broyés sont utilisés dans la construction, tandis que les autres composants tels que les aciers et les fibres peuvent être séparés et valorisés individuellement. Les particules de caoutchouc conservent des propriétés similaires à celles du caoutchouc vierge, ce qui les rend idéales pour une réutilisation dans diverses applications.

La poudrette de caoutchouc est utilisée en combinaison avec des liants pour créer des structures telles que des murs anti-bruit, des dalles de sol pour les aires de jeux et des pistes d'athlétisme. Cette utilisation innovante du caoutchouc recyclé démontre non seulement une solution

écologique pour la gestion des pneus usagés, mais offre également des avantages pratiques dans la construction et l'aménagement de l'espace urbain(**la Figure I.8**).



Figure I.8. Piste d'athlétisme en granulats de pneus usagés recyclés.

Il est encourageant de voir que plusieurs actions de valorisation des déchets, en particulier des pneus usagés, sont menées à travers le monde, notamment dans le domaine des matériaux de construction. Ce secteur, qui consomme une quantité importante de granulats, peut en effet bénéficier de l'utilisation de ces déchets, ce qui pourrait contribuer à résoudre des problèmes économiques et environnementaux, surtout dans les régions où les ressources en granulats naturels sont épuisées.

Les recherches sur l'utilisation des particules de caoutchouc en substitution aux granulats traditionnels dans les matériaux cimentaires, telles que les bétons de caoutchouc, ont montré un grand potentiel. En associant le ciment et le caoutchouc, on peut obtenir des matériaux présentant des caractéristiques intéressantes, notamment en termes de résistance, de flexibilité et de durabilité.

Il est encourageant de savoir qu'en Algérie, des études ont également été menées sur la valorisation des granulats de caoutchouc recyclés dans les matériaux cimentaires. Ces recherches ont démontré les effets positifs de l'incorporation de granulats de caoutchouc recyclés sur certaines propriétés des matériaux cimentaires. Cela ouvre la voie à de nouvelles possibilités de recyclage et de valorisation des déchets dans le secteur de la construction en Algérie, ce qui pourrait avoir un impact positif sur l'économie et l'environnement.

I.2.6. Pneus Entier:

Les travaux menés par Nguyen et ses collègues en décembre 1993 ont permis de développer une technique novatrice et économique pour la valorisation des pneus usagés, en particulier dans l'amélioration des propriétés mécaniques du sol, souvent appelé "pneu-sol". Cette technique consiste à mélanger des pneus entiers ou déchiquetés avec du sol pour construire divers ouvrages tels que des réducteurs de poussées, des murs antichute de pierres et des bassins de rétention d'eau pluviale.

Cette approche a été largement adoptée à l'échelle mondiale, avec plus de 2000 ouvrages construits dans différents pays, dont l'Algérie, le Canada, les États-Unis et la France. Ces ouvrages témoignent de l'efficacité et de la polyvalence de cette méthode dans la résolution de divers problèmes d'ingénierie civile, tout en contribuant à la gestion des pneus usagés.

L'utilisation de pneus usagés dans la construction de ces ouvrages offre une solution durable et respectueuse de l'environnement, tout en offrant des avantages économiques et fonctionnels. C'est un exemple inspirant de l'innovation dans le domaine de la valorisation des déchets, qui contribue à la durabilité et à la résilience des infrastructures(Figure I.9).

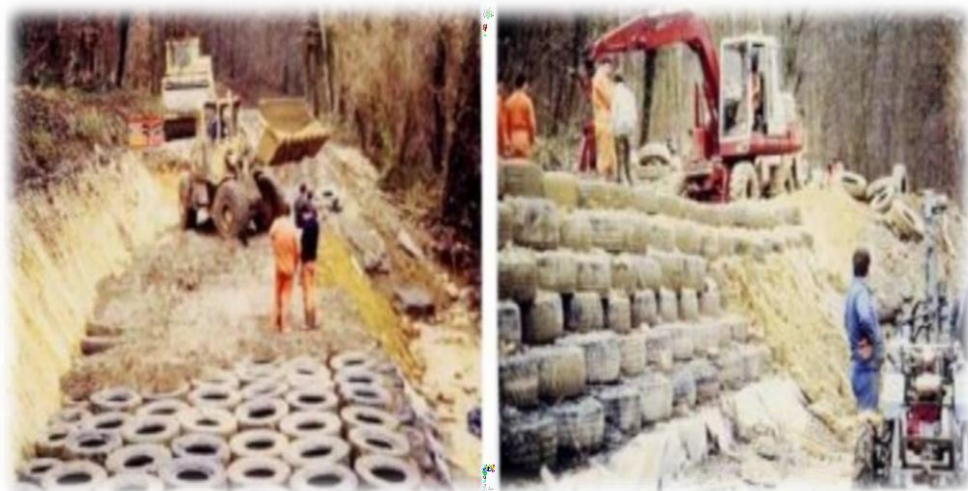


Figure I.9. La technique de pneu sol : le channes-Mandelieu en 1988

Effectivement, les pneus entiers peuvent être utilisés de manière très polyvalente dans le domaine des travaux publics (TP) pour diverses applications. Voici quelques exemples :

1. Passages souterrains : Les pneus entiers peuvent être utilisés dans la construction de passages souterrains pour leur capacité à absorber les chocs et à fournir une structure stable.

2. Ports et marinas : Les pneus entiers peuvent être utilisés pour créer des pare-battages et des éléments de protection le long des quais et des marinas, offrant ainsi une protection contre les chocs des bateaux et des navires.

3. Récifs artificiels : Les pneus entiers peuvent être disposés de manière stratégique pour créer des récifs artificiels, favorisant ainsi la vie marine en offrant des habitats pour les poissons et autres organismes marins.

4. Routes provisoires : Les pneus entiers peuvent être utilisés pour créer des routes temporaires dans des situations d'urgence ou pour des chantiers de construction où une circulation temporaire est nécessaire.

5. Conduits et drainage poreux : Les pneus entiers peuvent être utilisés dans la construction de conduits et de systèmes de drainage poreux pour permettre l'écoulement de l'eau tout en réduisant l'érosion.

6. Remblais de routes : Les pneus entiers peuvent être utilisés comme matériau de remblai dans la construction de routes, offrant une alternative durable aux matériaux traditionnels et contribuant à la gestion des déchets.

L'utilisation des pneus entiers dans ces applications offre non seulement des avantages en termes de durabilité et de gestion des déchets, mais peut également contribuer à réduire les coûts de construction et à améliorer la résilience des infrastructures face aux chocs et aux conditions environnementales adverses.

1.2.7. valorisation des déchets de caoutchouc en Algérie :

Il est vraiment encourageant de voir que les pneus usagés sont de plus en plus reconnus comme un matériau à fort potentiel pour diverses applications. Les chercheurs et les industriels explorent différentes façons de transformer ou d'éliminer les pneus non réutilisables, mettant en valeur leurs qualités intrinsèques telles que leur résistance structurelle, leur souplesse sous forme de granulats et leur pouvoir calorifique en tant que combustible.

Le problème des pneus usagés est en effet mondial et touche également les régions du Maghreb et de l'Afrique. Chaque année, des millions de tonnes de pneus sont jetées, ce qui représente un défi majeur en termes de gestion des déchets.

Dans le bassin méditerranéen, y compris en Algérie et dans d'autres pays, la prise de conscience de l'importance de la technologie dans le développement durable est de plus en plus forte. Les gouvernements et les acteurs concernés comprennent que l'adoption de nouvelles méthodes et

techniques, tout en intégrant la protection et la conservation de l'environnement, est essentielle pour assurer un développement durable.

Les photos que vous mentionnez illustrent parfaitement ces avancées, montrant des applications pratiques des pneus en caoutchouc pour stabiliser les talus à l'aide de la technique pneu-sol. Ces initiatives démontrent l'engagement des acteurs locaux en faveur de la durabilité et de l'innovation dans la gestion des déchets, tout en contribuant à la protection de l'environnement et à la création d'infrastructures durables.



Figure I.10. Ouvrage de mostaghanem RN11 (algérie) stabilité dun talus.



Figure I.11. Ouvrage végétalisé Projet de Bousmail



Figure I.12.Bétonnage de la 1ère file de pneus

I.3 déchets de céramique.

I.3.1 Définition de la ceramique:

Les céramiques sont en effet des matériaux remarquables qui ont été utilisés dans la construction depuis des siècles. Ils ont su s'adapter à l'évolution des techniques de construction, tant dans les méthodes traditionnelles que dans les processus industrialisés.

Le terme "céramique" évoque souvent des objets artisanaux tels que des poteries, des briques et des tuiles. Cependant, il englobe plus largement tout solide qui n'est ni un métal ni un polymère. Les céramiques sont des matériaux synthétiques solides qui nécessitent souvent des traitements thermiques pour être fabriqués. La plupart des céramiques modernes sont préparées à partir de poudres consolidées et sont densifiées par un traitement thermique appelé frittage.

La caractéristique principale des céramiques est leur structure poly-cristalline, ce qui signifie qu'elles sont composées d'un grand nombre de microcristaux bien ordonnés, appelés grains, qui sont reliés entre eux par des zones moins ordonnées, appelées joints de grains. Cette structure confère aux céramiques des propriétés uniques telles que leur résistance à la chaleur, leur résistance à la corrosion et leur dureté. Dans le domaine de la construction, les céramiques sont largement utilisées pour fabriquer des carreaux de revêtement, des briques réfractaires, des tuiles de toiture, des matériaux isolants et bien d'autres applications. Leur durabilité, leur résistance et leur esthétique en font des choix populaires pour une gamme variée de projets de construction.



Figure I.13. Diché ceramique de en oued souf- algérie.

I.3.2. Différents types de céramiques

On distingue deux types des céramiques :

Les céramiques traditionnelles sont fabriquées à partir de matières premières naturelles telles que l'argile, le kaolin et le quartz, et sont généralement mises en œuvre par des méthodes traditionnelles telles que la coulée. Quelques exemples de céramiques traditionnelles comprennent la faïence, les terres cuites (utilisées dans la fabrication de briques de construction) et la porcelaine (utilisée dans la fabrication de vaisselle et d'objets décoratifs).

D'autre part, les céramiques techniques sont des matériaux développés plus récemment en laboratoire en raison de leurs propriétés chimiques ou physiques exceptionnelles. Elles sont souvent obtenues par frittage, un processus thermomécanique dans des fours spéciaux, où les granulés de poudre sont cohésifs avec un aggloméré préparé à froid. Alternativement, elles peuvent être obtenues par électrofusion, où les oxydes sont coulés directement dans un moule.

Ces céramiques techniques sont utilisées dans une grande variété d'applications industrielles et technologiques en raison de leurs propriétés uniques, telles que leur résistance à la chaleur, leur résistance chimique, leur conductivité électrique ou thermique, et leur résistance à l'usure. Elles sont souvent utilisées dans des domaines tels que l'ingénierie des matériaux, l'aérospatiale, l'électronique, la médecine et bien d'autres encore, où des performances supérieures sont requises par rapport aux céramiques traditionnelles.

I.3.3 Propriétés des céramiques

I.3.3.1. Propriétés mécaniques:

Effectivement, les céramiques se distinguent par leur dureté élevée, ce qui signifie qu'elles sont résistantes aux rayures et à l'abrasion. Cependant, leur limite élastique, qui représente la limite au-delà de laquelle le matériau se déforme de manière permanente, est généralement assez faible par rapport à d'autres matériaux comme les métaux.

Le module de Young des céramiques, qui mesure leur rigidité à la température ambiante, se situe généralement entre 300 et 400 GPa (gigapascals), ce qui indique leur résistance à la déformation sous contrainte. De plus, leur résistance à la compression, qui mesure leur capacité à résister à une force appliquée dans le sens de la compression, est généralement comprise entre $2 \cdot 10^3$ et $30 \cdot 10^3$ Pa (pascals).

En résumé, les céramiques se caractérisent par leur dureté élevée, leur faible limite élastique, leur module de Young élevé et leur résistance à la compression, ce qui en fait des matériaux adaptés à de nombreuses applications où une grande résistance à l'usure et à la déformation est requise.

I.3.3.2. Propriétés thermiques

Les céramiques sont en effet réputées pour leur capacité à résister à des températures élevées. Leur température de fusion est souvent très élevée, atteignant parfois jusqu'à 2050 degrés Celsius. Cela les rend particulièrement adaptées pour des applications dans des environnements à haute température, tels que les moteurs, les fours industriels et les applications aérospatiales.

De plus, la chaleur spécifique des céramiques, qui mesure la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'une unité de masse d'un matériau d'une unité de température, ainsi que leur conductivité thermique et leur coefficient de dilatation thermique, augmentent généralement avec la température. Cela signifie que les céramiques peuvent mieux conduire la chaleur à des températures élevées et qu'elles ont tendance à se dilater davantage lorsqu'elles sont chauffées.

La **Figure I-2** illustre probablement comment la conductivité thermique des différents matériaux varie en fonction de la température. Dans de nombreuses céramiques, la conductivité thermique augmente avec la température, bien que cela puisse varier en fonction du type de céramique et de sa composition spécifique. Cette capacité à résister à des températures élevées

et à bien conduire la chaleur en fait des matériaux précieux dans de nombreuses applications industrielles et techniques.

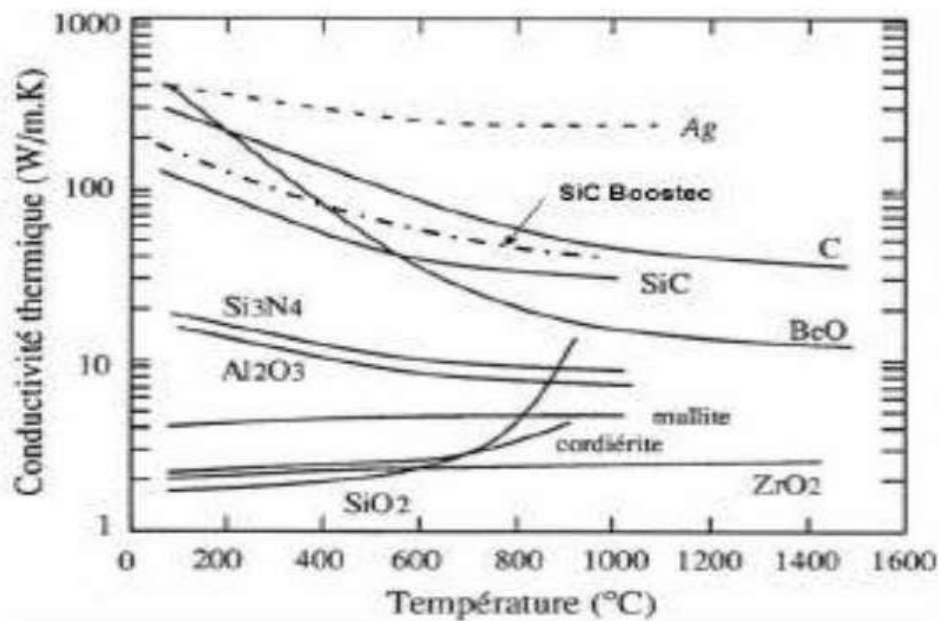


Figure I. 14 conductibilité thermique des matériaux en fonction de la température

I.3.4. Produits céramiques dans la construction

Les produits céramiques jouent en effet un rôle significatif dans le domaine du génie civil en raison de leur diversité de propriétés, qui varient en fonction de leur mode de fabrication. L'argile est souvent à la base de ces procédés de fabrication. Lorsqu'elle est mélangée à de l'eau, elle forme une pâte qui durcit lorsqu'elle est exposée à la chaleur. En ajustant les différents composants de la pâte, la quantité d'eau et la température de cuisson, on peut modifier les caractéristiques du matériau céramique final, le rendant plus ou moins dur, poreux, etc.

Dans le domaine du génie civil, divers produits céramiques sont utilisés pour des applications telles que les briques, les tuiles, les carreaux de revêtement, les tubes de drainage et les produits réfractaires. Chacun de ces produits est fabriqué selon des procédés spécifiques qui permettent d'obtenir les propriétés désirées pour son application particulière.

Par exemple, les briques utilisées dans la construction sont souvent fabriquées à partir d'argile mélangée à d'autres matériaux, puis cuites à des températures élevées pour les rendre solides et durables. Les carreaux de revêtement peuvent être fabriqués avec des caractéristiques spécifiques telles que la résistance à l'abrasion ou la résistance aux intempéries, en ajustant les ingrédients de la pâte et les conditions de cuisson.

En ajustant soigneusement ces paramètres de fabrication, les produits céramiques peuvent être adaptés à une large gamme d'applications dans le domaine du génie civil, offrant des solutions durables et efficaces pour la construction et l'aménagement de l'environnement bâti.

I.4. Déchets

Effectivement, la gestion des déchets est un défi mondial, et l'Algérie ne fait pas exception. Avec une population croissante et un développement économique accru, la quantité de déchets produits a augmenté de manière significative au fil des ans. Il est encourageant de voir que vous identifiez le potentiel économique et énergétique de la récupération et du recyclage des déchets.

Pour promouvoir une meilleure gestion des déchets en Algérie, il pourrait être utile d'explorer des stratégies telles que l'éducation environnementale pour sensibiliser la population à l'importance du recyclage et du tri des déchets, ainsi que des initiatives gouvernementales visant à soutenir le développement de l'industrie du recyclage. Encourager l'innovation dans le domaine de la gestion des déchets, par exemple en investissant dans des technologies de recyclage avancées, pourrait également être bénéfique.

Il est important de mobiliser tous les acteurs concernés, y compris le gouvernement, les entreprises, les organisations communautaires et les citoyens, pour mettre en œuvre des solutions efficaces de gestion des déchets. En travaillant ensemble, il est possible de transformer les défis liés aux déchets en opportunités pour créer une économie circulaire plus durable en Algérie.

I.5. Recyclage

Absolument, le recyclage est un processus crucial dans la gestion des déchets, car il permet de réutiliser les ressources et de réduire la quantité de déchets envoyés en décharge ou incinérés. En favorisant le recyclage à tous les niveaux, depuis les ménages jusqu'aux entreprises et aux administrations, nous pouvons contribuer à préserver les ressources naturelles et à réduire l'empreinte environnementale de nos activités.

Le tri sélectif est une étape essentielle dans le processus de recyclage, car il permet de séparer les différents types de matériaux et de faciliter leur traitement ultérieur. En encourageant et en facilitant le tri sélectif à domicile, sur les lieux de travail, dans les espaces publics et dans les transports, nous pouvons maximiser les quantités de matériaux recyclables collectées et traitées.

En plus des avantages environnementaux, le recyclage peut également avoir des avantages économiques, en créant des emplois dans l'industrie du recyclage et en réduisant les coûts liés à l'extraction et à la production de nouvelles matières premières.

En somme, le recyclage est un pilier important d'une gestion durable des déchets, et il est crucial que chacun contribue à cette démarche en adoptant des pratiques de tri et de recyclage dans sa vie quotidienne.

I.5.1 Recyclage dans le génie civil

L'utilisation de matériaux recyclables dans des applications de génie civil offre en effet de nombreux avantages tant sur le plan environnemental que sur le plan économique. Voici quelques-uns des avantages clés :

1. Conservation des ressources naturelles : En utilisant des matériaux recyclables tels que les pneus déchiquetés, le verre concassé et les scories, nous réduisons la demande de nouvelles ressources naturelles telles que le sable, le gravier et les agrégats, contribuant ainsi à la préservation des ressources limitées de la planète.

2. Réduction des déchets : L'utilisation de déchets recyclables dans la construction civile permet de détourner ces matériaux des sites d'enfouissement, réduisant ainsi la quantité de déchets envoyés dans les décharges et contribuant à la gestion durable des déchets.

3. Économies d'énergie : La fabrication de matériaux recyclables souvent nécessite moins d'énergie que la production de matériaux vierges à partir de matières premières. En utilisant des matériaux recyclés, nous réduisons la consommation d'énergie associée à l'extraction, au traitement et au transport des matériaux conventionnels.

4. Réduction des coûts : En utilisant des matériaux recyclables à la place de matériaux conventionnels, les projets de génie civil peuvent réaliser des économies significatives sur les coûts de matériaux, de traitement des déchets et de transport, ce qui peut rendre les projets plus rentables à long terme.

En incorporant ces pratiques dans les projets de génie civil, nous pouvons contribuer à promouvoir le développement durable en préservant les ressources naturelles, en réduisant les déchets et en minimisant l'impact environnemental des activités de construction.

I.6. Sable de dunes :

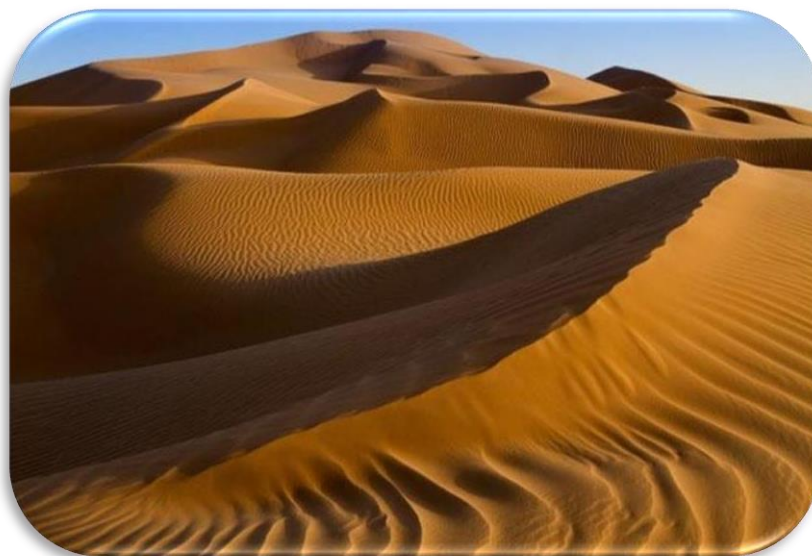
I.6.1. Définition d'un sable de dunes:

Effectivement, la composition et la distribution des sables dans les déserts, en particulier dans le Sahara, sont des aspects cruciaux à considérer lors de la planification et de la construction d'infrastructures dans ces régions arides. Les caractéristiques des particules de sable, leur taille uniforme et leur mobilité dans les dunes, posent des défis uniques pour l'ingénierie routière et la stabilisation des sols.

Dans des régions où les dunes de sable représentent une part importante du paysage, comme le Sahara, il est essentiel de comprendre la dynamique des dunes et leur impact sur l'environnement et les infrastructures. Des techniques spécifiques de construction routière et de stabilisation des sols doivent être développées pour faire face aux défis uniques posés par ces environnements.

De plus, la valorisation des matériaux locaux, y compris le sable, revêt une grande importance dans les régions désertiques où les ressources peuvent être limitées. En utilisant les matériaux disponibles localement de manière efficace, on peut réduire les coûts de construction et minimiser l'empreinte environnementale associée au transport de matériaux sur de longues distances.

En somme, la prise en compte des caractéristiques du sable et des conditions désertiques est essentielle pour le développement durable des infrastructures dans des régions comme le Sahara, où les défis environnementaux et logistiques sont significatifs.



FigureI.15 : Sable de dune

I.6.2. Intérêt de sable de dune:

Absolument, l'utilisation d'agréats provenant de matériaux locaux, tels que le sable dans les déserts, présente des avantages à la fois techniques et économiques.

Sur le plan technique, l'utilisation de sable local peut offrir une meilleure adaptation aux conditions environnementales spécifiques de la région. Par exemple, dans le cas des déserts, où le sable est abondant, l'utilisation de ce matériau pour la construction routière peut permettre une meilleure intégration des infrastructures dans le paysage désertique. De plus, en comprenant les propriétés spécifiques du sable local, les ingénieurs peuvent concevoir des techniques de construction et de stabilisation des sols adaptées aux caractéristiques uniques de ces matériaux.

Du point de vue économique, l'utilisation de matériaux locaux comme le sable peut contribuer à réduire les coûts de construction en évitant le transport de matériaux sur de longues distances. Cela peut également stimuler l'économie locale en favorisant l'utilisation des ressources disponibles sur place et en soutenant les industries locales liées à l'extraction et au traitement des matériaux.

En résumé, l'utilisation d'agréats tels que le sable dans les déserts présente des avantages tant techniques qu'économiques, en offrant des solutions adaptées aux conditions locales et en contribuant à la durabilité et à l'efficacité des projets d'infrastructures dans ces environnements spécifiques.

I.6.3. Mécanismes de formation de dune:

le processus de formation des dunes de sable, c'est impressionnant ! En effet, les dunes se forment dans des zones où le sable est abondant et où il n'est pas stabilisé par la végétation. Le vent, agissant comme un agent de transport, soulève et transporte les particules de sable, un processus connu sous le nom de "déflation". Lorsque la vitesse du vent diminue, les particules de sable se déposent et s'accumulent, formant ainsi une dune.

Les obstacles naturels, tels que les rochers ou les arbres, jouent un rôle crucial dans la formation des dunes. Ils ralentissent la vitesse du vent, ce qui permet au sable transporté de se déposer et de s'accumuler autour de ces obstacles, formant ainsi le noyau initial de la dune. Avec le temps, ce processus de dépôt et d'accumulation se poursuit, et la dune prend progressivement forme.

Les dunes sont en effet des structures dynamiques qui évoluent constamment sous l'effet du vent et des conditions environnementales. Elles peuvent changer de forme, de taille et de

position au fil du temps. C'est un processus continu de dépôt et d'érosion qui façonne les dunes et leur donne leur aspect caractéristique.

1.6.4. Propriétés des sables de dune :

C'est fascinant de considérer l'ampleur des ressources naturelles disponibles dans le désert algérien. Avec une telle abondance de sable dunaire, il est logique que les ingénieurs se penchent sur la manière de valoriser ces ressources pour la construction. Les propriétés physico-chimiques du sable dunaire peuvent jouer un rôle crucial dans la détermination de sa faisabilité pour diverses applications de construction.

Certains aspects que les ingénieurs pourraient examiner incluent la granulométrie du sable, sa composition minéralogique, sa porosité, sa résistance à la compression, et ses propriétés de liaison avec les liants tels que le ciment. Comprendre ces propriétés permettrait de déterminer dans quelle mesure le sable dunaire peut être utilisé comme matériau de construction et comment il peut être traité pour améliorer ses performances.

Par exemple, des techniques telles que le compactage, le lavage pour éliminer les impuretés, ou l'addition de stabilisants chimiques pour renforcer le matériau pourraient être envisagées. De plus, des études sur la durabilité et la résistance aux conditions environnementales, telles que l'érosion éolienne, pourraient également être nécessaires pour évaluer pleinement le potentiel du sable dunaire dans la construction.

En exploitant judicieusement cette ressource naturelle abondante, l'Algérie pourrait non seulement réduire sa dépendance à l'égard des importations de matériaux de construction, mais aussi développer une expertise locale dans l'utilisation efficace des ressources désertiques pour soutenir son développement économique et infrastructurel.

1.6.5. Les sables naturels :

Ce sont des matériaux qui existent, dans certaines régions, en abondance dans la nature. Ils sont le résultat d'un processus complexe d'érosion et de sédimentation. Leur formation s'effectue en trois étapes successives : la décomposition sur place des différentes roches suivie d'un transport qui les amène à un dépôt où ils demeurent sous différentes formes. Les plus rencontrés et les plus connus sont :

- Les sables marins.
- Les sables marins littoraux.
- Les sables fluviatiles.

- Les sables éoliens.
- Sables du Sahara.
- Sables éoliens.
- Sables de regs.
- Sables géologiques en place.
- Sables gypseux.
- Sables gypso-calcaires.

I.6.6. Nature de sable dune:

I.6.6.1. Mécanismes de formation:

Effectivement, les dunes se forment dans des environnements où le sable est libre et mobile, souvent dans des zones arides comme les déserts, les plages ou les lits de rivières asséchés. La formation des dunes est principalement due à l'action du vent, qui soulève et transporte les grains de sable.

Lorsque le vent rencontre des obstacles comme des rochers ou des plantes, il perd de la vitesse et dépose le sable qu'il transporte. Ce processus, appelé « dépôt éolien », est à l'origine de l'accumulation de sable qui constitue les dunes. La forme et la taille des dunes peuvent varier en fonction de la direction et de la force du vent, ainsi que des caractéristiques du terrain.

Les dunes sont des formations dynamiques, en constante évolution. Elles peuvent se déplacer lentement à mesure que le vent redistribue le sable, un processus connu sous le nom de migration des dunes. Cette migration peut se produire par érosion du côté exposé au vent et accumulation du côté abrité, ce qui entraîne un déplacement global de la dune dans la direction du vent dominant.

I.6.6.2. Types des dunes :

I.6.6.2.1. Les avant-dunes (fore dune) :

Les avant-dunes sont des formations côtières qui se trouvent juste derrière la plage, et sont souvent caractérisées par des bourrelets de sable plus ou moins stabilisés par la végétation, tels que les oyats. Contrairement aux dunes mobiles, les avant-dunes sont généralement solidaires de la plage et échangent du sable avec elle, faisant partie d'un même système sédimentaire côtier.

Ces avant-dunes ne doivent pas être confondues avec les anciennes arrière-dunes en cours d'érosion, ni avec les dunes formées par du sable venant de l'intérieur des terres, où un système actif d'avant-dune ne pourrait pas se former.

En Algérie, les avant-dunes sont souvent considérées comme faisant partie du domaine public maritime, ce qui facilite leur protection et leur conservation. Le processus de formation des avant-dunes commence généralement par la stabilisation du sable en haut de la plage par des plantes pionnières adaptées aux conditions venteuses et salines, comme les espèces spasmophiles. Ces plantes contribuent à la fixation du sable et à la formation des bourrelets de l'avant-dune.

I.6.6.2.2. Les falaises dunaires :

les dunes fossiles sont des dunes anciennes qui ont été stabilisées par la végétation ou d'autres processus géologiques.

Lorsque la végétation s'établit sur une dune mobile, elle peut aider à stabiliser le sable en place en formant une couverture végétale dense. Au fil du temps, cette végétation peut transformer la dune en un monticule fixe, stabilisé par la formation d'une couche d'humus ou de sol sableux au-dessus du sable. Cela crée essentiellement un profil de dune fossile, qui conserve la forme caractéristique d'une dune mais qui est essentiellement immobile.

Les dunes fossiles peuvent être trouvées dans divers environnements côtiers où les conditions sont favorables à la stabilisation du sable par la végétation ou d'autres processus géologiques. Elles sont souvent importantes pour la préservation de l'écosystème local et peuvent offrir un habitat pour une variété d'espèces végétales et animales.

I.6.6.2.3. Les dunes perchées :

ce qu'on appelle une « dune de falaise » ou une « dune littorale ». Les dunes de falaise se forment au sommet des falaises côtières abruptes, généralement là où le sable est transporté par le vent depuis la plage (estran) ou depuis le profil de pente de la falaise elle-même, dans le cas des falaises dunaires.

Dans les zones côtières où les falaises sont composées de sable ou d'autres matériaux meubles, le vent peut souffler le sable au sommet de la falaise. Ce sable s'accumule alors pour former des dunes au sommet de la falaise. Ces dunes peuvent être dynamiques et évoluer au fil du temps en raison de l'action du vent et des conditions météorologiques.

Les dunes de falaise sont souvent associées à des écosystèmes fragiles et uniques, abritant une biodiversité spécifique qui s'est adaptée aux conditions particulières de ces habitats côtiers. Elles peuvent également jouer un rôle important dans la protection côtière en stabilisant les falaises et en réduisant l'érosion.

I.6.7. Utilisation du sable de dunes

I.6.7.1.Diverses utilisations:

Effectivement, les sables sont une ressource extrêmement polyvalente et précieuse sur le plan économique, avec une gamme d'applications diverses. Leur utilisation dans la construction, notamment comme granulats pour le béton, est essentielle dans de nombreux projets d'infrastructure. Les sables siliceux sont également vitaux dans l'industrie du verre et des céramiques, ainsi que dans la fonderie.

Les placers, ou dépôts alluvionnaires concentrés de minéraux lourds dans les sables, représentent une source importante de minéraux précieux tels que l'or, les diamants et divers minerais métalliques. Ces ressources sont exploitées dans diverses industries, notamment la bijouterie, la fabrication de matériaux électroniques et la production de peintures.

En outre, les sables jouent un rôle crucial en tant que réservoirs potentiels pour les nappes phréatiques et les hydrocarbures, ce qui souligne leur importance pour la gestion des ressources en eau et en énergie. Cependant, il est vital de réglementer leur exploitation pour éviter des dommages environnementaux, tels que l'érosion côtière et la perturbation des écosystèmes aquatiques.

I.7.Méthode de taguchi :

La méthode Taguchi, initiée par Gen'ichi Taguchi, est une approche développée pour utiliser la statistique afin d'améliorer la qualité des produits manufacturés. Né le 1er janvier 1924 à Tōkamachi et décédé le 2 juin 2012 à Tokyo, Taguchi était un ingénieur et statisticien japonais. Depuis les années 1950, il a travaillé à développer une méthode visant à optimiser la qualité des produits.

Ce qui rend la méthode Taguchi particulièrement précieuse, c'est sa capacité à rendre les plans d'expériences utilisables pour des techniciens, démocratisant ainsi son utilisation. L'approche Taguchi se concentre principalement sur la minimisation des variations autour de la valeur de consigne. L'objectif est de rendre les produits, processus et systèmes aussi robustes et insensibles aux perturbations externes que possible.

En pratique, la méthode Taguchi est souvent utilisée dans le cadre de l'amélioration de la qualité, où elle permet de concevoir des expériences efficaces pour identifier et réduire les sources de variation dans les processus de fabrication. Cela contribue à garantir une qualité constante et fiable des produits.

I.7.1 Le plan de Taguchi (plan de Taguchi orthogonal):

Vous avez bien expliqué le principe et le fonctionnement des plans de Taguchi. Ces plans d'expériences sont conçus pour sélectionner un produit ou un processus qui fonctionne de manière plus cohérente dans un environnement opérationnel. Ils sont basés sur la reconnaissance que tous les facteurs contribuant à la variabilité ne peuvent pas être contrôlés et que certains sont inévitables, appelés facteurs de bruit.

L'approche de Taguchi vise à identifier les facteurs contrôlables, appelés facteurs de contrôle, qui minimisent l'effet des facteurs de bruit. Cela se fait en manipulant délibérément les facteurs de bruit pour évaluer leur impact sur la variabilité de la réponse, puis en déterminant les paramètres optimaux des facteurs de contrôle qui rendent le processus ou le produit plus robuste face à cette variation. Les plans de Taguchi utilisent des répertoires orthogonaux, ce qui permet d'évaluer les effets des facteurs sur la moyenne et la variation de la réponse de manière équilibrée. Cela signifie que chaque facteur peut être évalué indépendamment des autres, ce qui réduit la durée et le coût de l'expérience, en particulier lors de l'utilisation de plans fractionnés.

Bien que les plans de Taguchi se concentrent principalement sur les effets principaux des facteurs, des outils comme le logiciel Minitab permettent d'étudier les interactions entre les facteurs. Minitab calcule les tableaux de réponses, les résultats du modèle linéaire et génère des graphiques pour visualiser les effets principaux et les interactions. Cela aide à comprendre comment les différents facteurs influent sur la variabilité du processus ou du produit.

I.8. 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 25**).

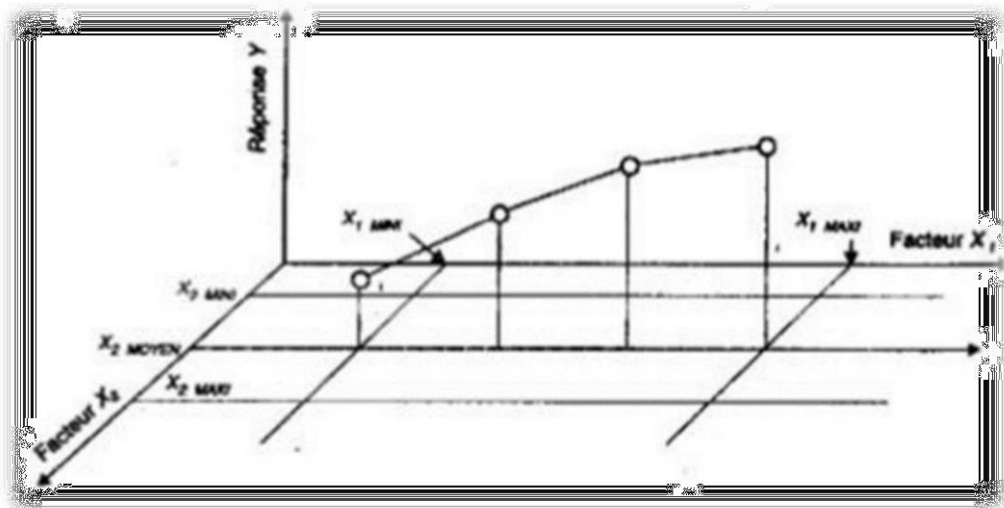


Figure.16. Méthode traditionnelle d'expérimentation et courbe de réponse [12]

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 $X_{1\min}$ à $X_{1\max}$ à l'aide des quatre essais présentés sur la Figure.16. Il réalise ensuite le même type d'essais avec X_2 .

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.26), 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.

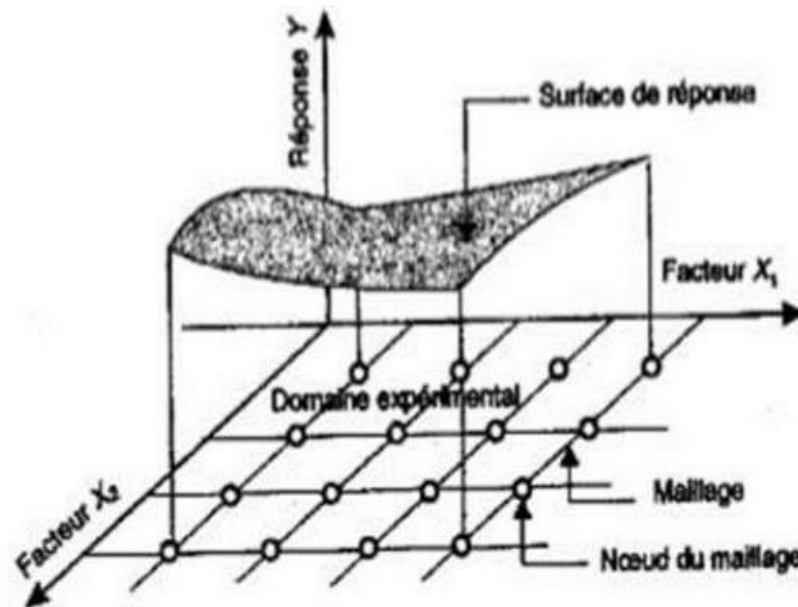


Figure.17. maillage du domaine expérimental et surface de réponse [12]

Pour améliorer la connaissance du phénomène observé, le formulateur réalise un maillage du domaine expérimental et exécute des essais à chacun des noeuds du maillage. Dans l'exemple (**Figure I.26**), 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.

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 [13]: 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 [13] des tests de comparaison d'écarts- types deux à deux (test de Fisher), ainsi que des tests de fusion de plusieurs écarts- types (test de Bartlett). Dans tous les cas, si les écarts- 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.28) avec les interactions d'ordre 2 et l'interaction d'ordre 3. Le modèle recherché pour une réponse Y sera du type:

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

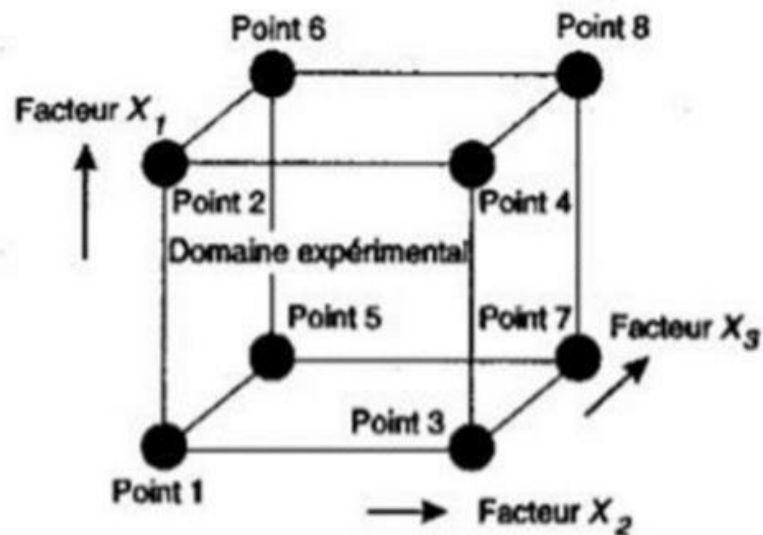
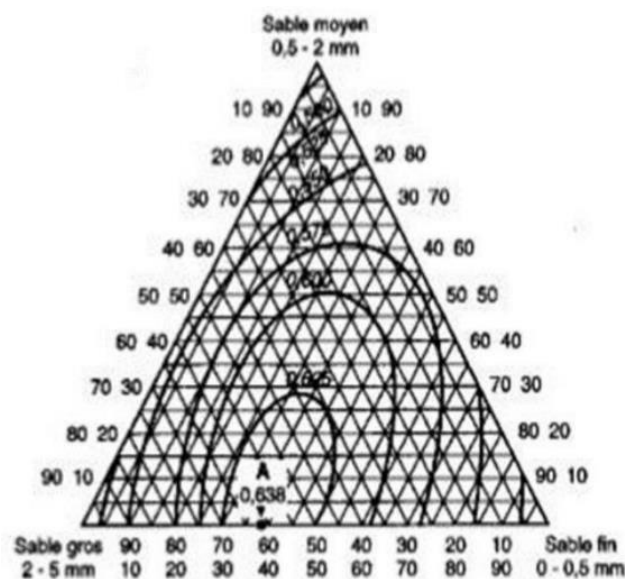


Figure I.17. Domaine expérimental d'un plan factoriel complet [14]

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. [14] C'est



le cas du triangle de Férret (Figure I.27) dont on souhaite déterminer la compacité en tout point, caractérisée par les proportions du mélange qu'il représente.

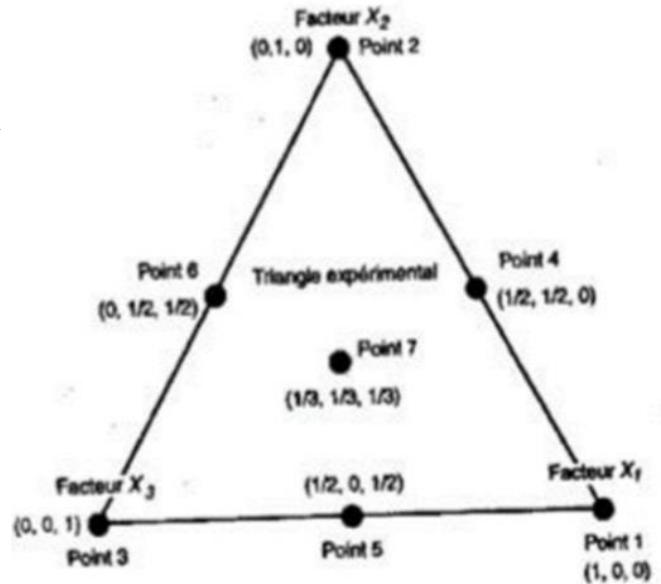
Figure I.18. Triangle de férét , 1892

Les sommets du triangle représentent chacun des facteurs. Les courbes d'isocompacité sont représentées ici et la compacité maximale est obtenue en A. Pour un plan de mélange à trois constituants, Le modèle recherché pour une réponse Y sera du:

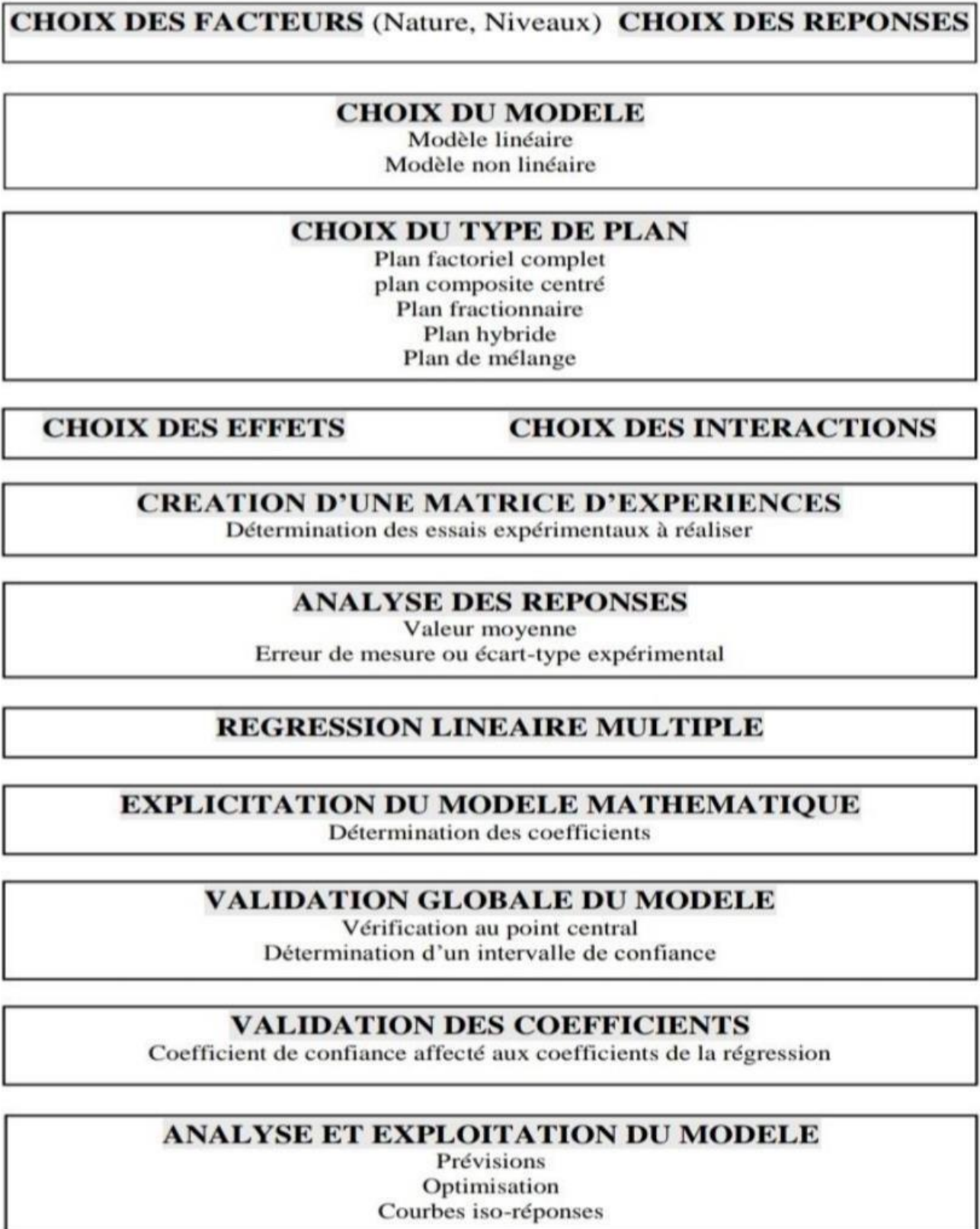
$$\text{type: } Y = BX + B_2X_2 + BX_3 + B_{12}XX_2 + BXX_1 + BX_2X + B_2XXX$$

Ce modèle comprenant trois facteurs avec interactions ne comporte que sept coefficients, donc il nécessite sept points expérimentaux distincts pour être entièrement déterminé (**Figure I.19**).

Figure I.19. Points expérimentaux pour un plan de mélange à trois constituants.



Les sept points expérimentaux sont situés sur la frontière du domaine sauf un, situé au 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: B_{1231} .



FigI.20. Organigramme général de traitement des plans d'expériences [15]

I.9. Conclusion :

L'analyse des résultats de recherche sur la problématique des pneus usagés et des déchets de céramique non réutilisables, ainsi que sur l'exploitation des sables de dune, indique que la valorisation de ces matériaux sous forme de granulats de construction, tels que pour le béton et le mortier, est réalisable. Cette pratique présente un potentiel pour réduire le stock de déchets de pneus usagés.

Malgré le fait que ce composite puisse présenter une faible résistance mécanique en compression et en traction, il offre néanmoins une capacité de déformation importante avant d'atteindre le point de fissuration. Cela suggère qu'il pourrait être utilisé efficacement dans des applications où une certaine flexibilité ou résilience est requise, même si sa résistance structurelle peut être relativement modeste.

En résumé, l'utilisation de granulats de pneus usagés et de déchets de céramique dans des mélanges de construction, en combinaison avec des sables de dune, représente une approche prometteuse pour la gestion durable des déchets et la création e .

Chapitre II

Matériaux et procédures expérimentales

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous étudierons dans la première partie, les caractéristiques des différents matériaux utilisés dans la composition du mortier incorporé des granulats de caoutchouc, de déchets de ceramique et de sable de dune à savoir : la masse volumique, la granulométrie, la propreté, la composition chimique et minéralogique ainsi que d'autres propriétés physiques. Dans la deuxième partie, nous allons donner les modes opératoires des différents essais réalisés dans la partie expérimentale, dans le but d'une bonne interprétation des différents résultats expérimentaux sur les mortiers à base de granulats de caoutchouc, de déchets de ceramique et de sable de dune.

II.2. Matériaux utilisés :**II.2.1. Sables :**

Deux types de sables ont été utilisés dans cette étude, alluvionnaire et dunaire.

Le sable alluvionnaire provenant de la sablière Djamaa, de la Willaya d'El Oued (Voire Figure II.1). Sa masse volumique apparente est : 1.83g/cm^3 et sa masse volumique absolue : 2.68g/cm^3 . Sa granulométrie varie de 0 à 5mm.

Le sable de dune utilisé est un sable provenant de la région d'El oued (**Voire Figure II.2**). Sa masse volumique apparente est : 1.77g/cm^3 et sa masse volumique absolue: 2.67g/cm^3 . Sa granulométrie varie de 0 à 0.63 mm.

Les **Figure II.1; II.2** montrent des tas des sables utilisés.



Figure II.1: Sable Alluvionnaire Djamaa (SA).



Figure II.2: sable de dune (SD).

II.2.1.1. Caractéristiques physiques :

Les caractéristiques physiques sont comme suit :

II.2.1.1.1. Les masses volumiques :**La masse volumique apparente :**

Cet essai est régi par la norme NF P18-554]17[, 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 NF P18-301]18[, 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.2.1.1.2. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux Respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Cet essai est défini par la norme NF P 18 560.]19[

En utilisant un tamis séquentiel comme indiqué sur **FigureII.3** .



Figure II.3: Tamis d'analyse granulométrique.

II.2.1.1.3. Module de finesse:

Le module de finesse est en effet un paramètre crucial pour évaluer la finesse des granulats utilisés dans le mortier. Il permet de quantifier la distribution des différentes tailles de particules dans le granulat, ce qui influence directement les propriétés du mélange final.

Pour calculer le module de finesse, vous devez suivre ces étapes :

1. Mesurez les pourcentages de refus cumulés sur les tamis de modules 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5 et 5.
2. Additionnez ces pourcentages.
3. Divisez le résultat par 100 pour obtenir le module de finesse.

Une fois que vous avez calculé le module de finesse, vous pouvez interpréter le résultat comme suit :

- Un module de finesse élevé indique une plus grande proportion de particules fines dans le granulat.
- Un module de finesse bas signifie que le granulat contient une plus grande proportion de particules grossières.

Cette information est précieuse pour ajuster la formulation du mortier en fonction des propriétés des granulats disponibles, afin d'optimiser la plasticité et la mise en place du mélange.

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

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 mortiers résistants mais moins maniables.

II.2.1.1.4. Équivalent de sable

Cet essai, référencé par la norme NF P18 598 [20], est utilisé pour évaluer la propreté des matériaux 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.4**).

La hauteur h1 : matériaux propres + éléments fins. La hauteur h2 : matériaux propres seulement.

On en déduit l'équivalent des matériaux qui, par convention, est :

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

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).

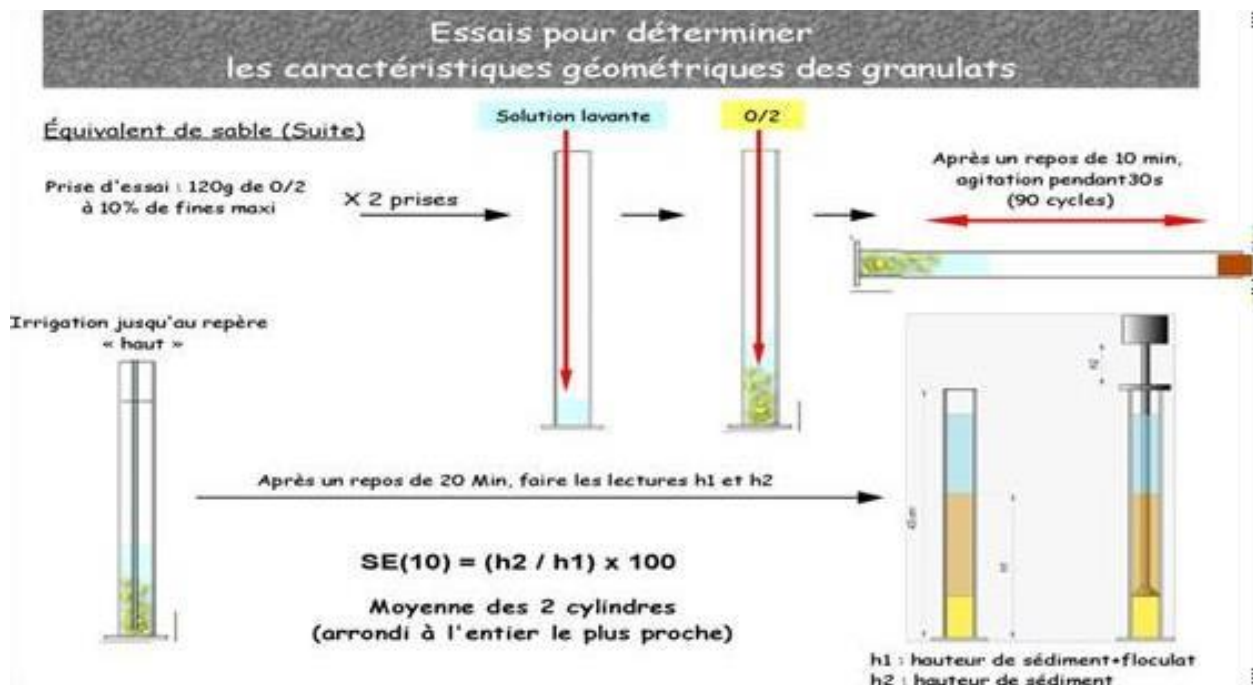


Figure II.4. Schémas de mesure d'équivalent de sable.

Selon la norme NF P18 598 [20], les préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les mortiers 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.

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

II.2.1.1.5. Synthèse des résultats :

Caractéristiques	Masse Volumique apparente (g/cm ³)	Masse Volumique absolue (g/cm ³)	Mf	ESV (%)
Sable Alluvionnaire (SA)	1.83	2.68	1.98	70.50
Sable de Dune (SD)	1.77	2.67	1.01	4.61

Tableau II.2. Regroupe l'ensemble des résultats relatifs aux essais physiques effectués sur utilisé.

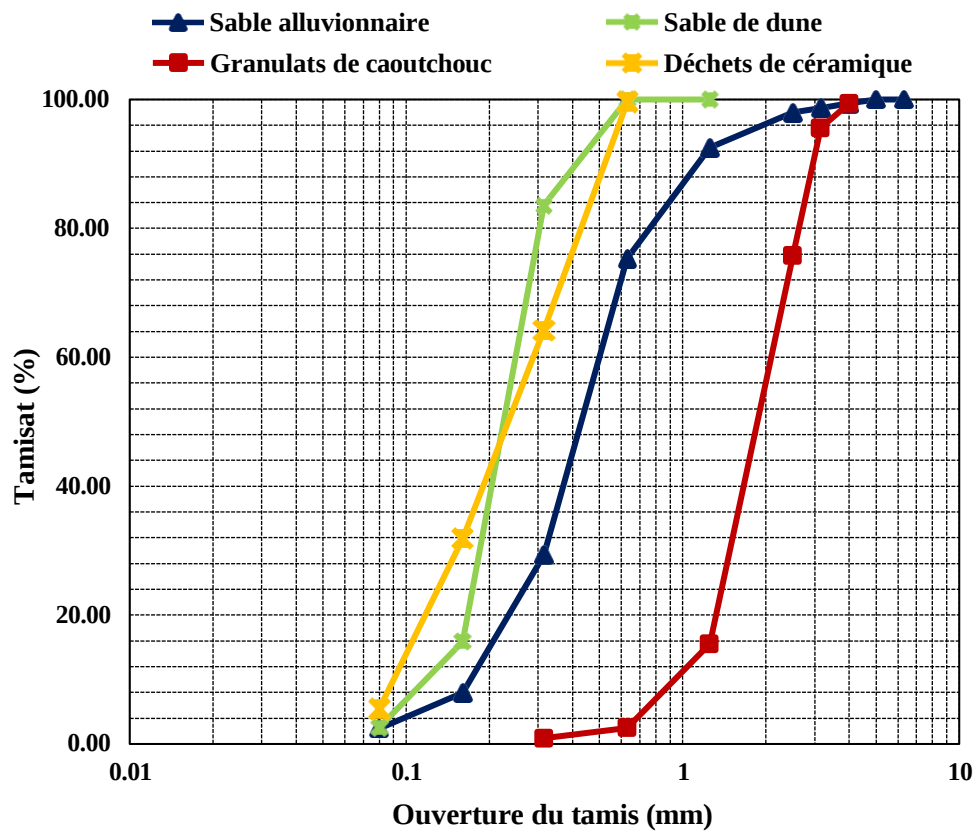


Figure II.5. Courbes granulométriques des sables utilisés et des granulats de caoutchouc.

II.2.2. Ciment

Le ciment utilisé dans toutes les expériences est un ciment portland composé CEM II / B-L 42.5N conforme à la norme NA 442. Ce ciment a été fourni par le Groupe Industriel des Ciments d'Algérie (LAFARGE), situé à Biskra, en Algérie.



Figure II.6. 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

Tableau II.3. Résistance à la compression (NA 234)

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

Tableau 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

Tableau 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	µm/m
Expansion	≤ 0.3	Mm
Masse volumique apparente	975	kg/m ³
Densité spécifique	3080	kg/m ³

Tableau II.6. Caractéristiques physiques du ciment MATINE

II.2.3. Granulats de caoutchouc (GC)

Les granulats de caoutchouc utilisés dans notre étude sont obtenus par le déchiquetage mécanique de déchets de pneus usagés. Après avoir retiré leurs parties métalliques et textiles, les pneus sont déchiquetés et broyés mécaniquement jusqu'à obtenir la finesse désirée, comme illustré dans la Figure II.7. La classe granulaire des granulats de caoutchouc recyclés utilisés dans notre composite est de 0 à 4 mm. Les propriétés physiques de ces granulats sont résumées dans le Tableau II.7. La Figure II.7 illustre l'analyse granulométrique de ces granulats.



Figure II.7. Granulats de caoutchouc (0-4mm).

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

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

II.2.4. Déchets de céramiques (< 0.63mm)

Les Déchets de céramiques utilisés, dans notre étude, sont issus du Fraisage manuel de résidus de construction. Ils sont déchiquetés et broyés manuellement pour obtenir la finesse désirée **Figure II.8**. La classe granulaire des Déchets de céramiques recyclés utilisés, dans notre composite est de 0 à 0.63 mm .

Les propriétés physiques de ceux-ci sont récapitulées dans le **Tableau II.8**

La **Figure II.8** illustre l'analyse granulométriques de ceux-ci.



Figure II.8. Déchets de céramiques (< 0.63mm).

Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.50
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.30
Granulométrie	< 0.63 mm
Module de finesse	1.04

Tableau II.8. Caractéristiques physiques du Déchets de céramiques (< 0.63mm).

II.2.5. 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 témoin (0%SD, 0%GC, 0%DC) :

Pour la composition du mortier témoin, nous avons suivi un dosage en ciment et en sable conforme à celui d'un mortier normalisé selon la norme EN 196-1. Cela signifie qu'une partie de ciment est mélangée avec trois parties de sable. En ce qui concerne le dosage en eau, nous avons utilisé le rapport E/C (0,55), ce qui signifie que pour chaque unité de ciment, 0,55 unité d'eau a été utilisée dans le mélange.

II.3.3. Compositions des mortiers :

Les compositions étudiées sont présentées dans le **Tableau II.9** suivant :

Désignation du mélange	Ciment (g)	Eau (g)	Sable Alluvionnaire (SA) (g)	Sable De dune (SD) (g)	Granulats de caoutchouc (GC) (g)	Déchets de céramiques (DC) (g)
Formulation 00 (0%SD, 0%GC et 0%DC)	400	220	1200	00	00	00
Formulation 01 (5%SD, 4%GC et 2%DC)	400	220	1068	59.81	18.35	22.25
Formulation 02 (5%SD, 9%GC et 5%DC)	400	220	972	59.81	41.31	56
Formulation 03 (5%SD, 9%GC et 5%DC)	400	220	876	59.81	64.27	89.50
Formulation 04 (5%SD, 19%GC et 11%DC)	400	220	780	59.81	87.23	123.25
Formulation 05 (10%SD, 4%GC et 5%DC)	400	220	972	119.62	18.35	56
Formulation 06 (10%SD, 9%GC et 2%DC)	400	220	948	119.62	41.31	22.5
Formulation 07 (10%SD, 14%GC et 11%DC)	400	220	780	119.62	64.27	123.25
Formulation 08 (10%SD, 19%GC et 11%DC)	400	220	756	119.62	87.23	89.5
Formulation 09 (15%SD, 4%GC et 8%DB)	400	220	876	179.42	18.35	89.5
Formulation10 (15%SD,9%GC,et11%DC)	400	220	780	179.42	41.31	123.25
Formulation11 (15%SD,14%GC,et2%DC)	400	220	828	179.42	64.27	22.5
Formulation12 (15%SD,19%GC,et5%DC)	400	220	732	179.42	87.23	56

Formulation13 (20%SD,4%GC,et11%DC)	400	220	780	239.23	18.35	123.25
Formulation14 (20%SD,9%GC,et8%DC)	400	220	756	239.23	41.31	89.5
Formulation15 (20%SD,14%GC,et5%DC)	400	220	732	239.23	64.27	89.5
Formulation16 (20%SD,19%GC,et2%DC)	400	220	708	239.23	87.23	22.5

- **Nombre des éprouvettes : $17 \times 14 = 238$ Ep**

Tableau II.9. Composition des mortiers utilisés.

II.3.4.Procédure expérimentale

II.3.4.1.Fabrication du mortier

II.3.4.1.1.Pesage des composants du mortier

Dans un premier temps nous avons pesé individuellement tous les composants du mortier pour chaque formulation du **Tableau II.10**.

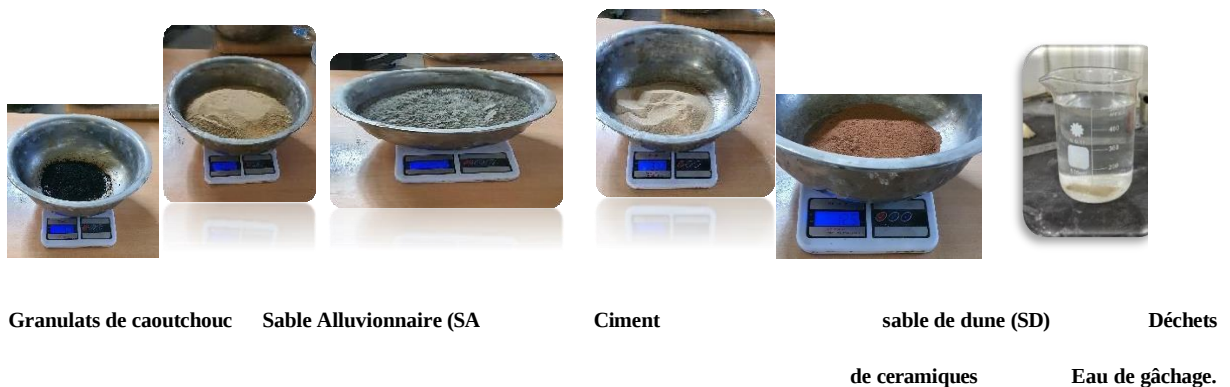


Figure. II.9. Pesage des composants du mortier.

II.3.4.1.2. Malaxage des composants du mortier :

Pour le malaxage des constituants, Le processus de mélange a été fait à la main dans l'ordre suivant :



Figure. II.10. Matériaux utilisés secs.

Mettre les ingrédients secs. (Ciment, et sable Alluvionnaire, granulats de caoutchouc et déchets de Brique et Sable de dune) dans le bol et mélanger jusqu'à ce qu'ils soient homogènes.



Figure. II.11. Mélanger les matières sèches.

Ajouter de l'eau petit à petit tout en mélangeant:



Figure. II.12. Ajouter de l'eau en mélangeant.

II.3.4.13. Coulage des éprouvettes :

Dans ce travail nous avons confectionné 14 éprouvettes de dimensions (4 x 4 x 16) cm Voir **Figures II.13.**



Figure. II.13. Moule des éprouvettes utilisés.

II.3.4.14. Étapes de coulage des éprouvettes:

a).Première étape : Lubrifier les moules avec de l'huile moteur brûlée pour que le mortier ne colle pas à ses parois Voir **Figure II.14**



Figure. II.14. Lubrifié de moul

b).Deuxième étape : Versez le mélange dans le moule et remplissez-le au texte comme indiqué sur la 2 **Figure II.15**



Figure. II.15. Verser la moitié de la quantité dans le moule.

c). **Troisième étape:** Ensuite, nous l'enroulons en frappant le moule 25 coups à gauche et à droite comme indiqué sur la **Figure II.16**



Figure. II.16. Décanter l'échantillon en secouant.

d). **Quatrième étape:** Ensuite, nous terminons de le remplir et de le secouer à nouveau de la même manière, puis j'ai nivelé la surface et laissé sécher pendant 24 h.



Figure. II.17. Remplissage du modèle terminé.

e). **Cinquième étape:** En effet pour chaque formulation, le démoulage des éprouvettes s'est fait après 24h. nous retirons les échantillons, les nettoyons (**Fig.II.18**) et y écrivons leur contenu (**Fig.II.19**). Puis on les met dans l'eau pendant 28 jours.



Figure. II.18. Ouvrir le éprouvettes.



Figure. II.19. Nettoyage des échantillons.



II.3.4.2. Les essais réalisés**II.3.4.2.1. Essais réalisés à l'état frais****II.3.4.2.2. Consistance du mortier frais à la table à secousses: (NBN EN 1015-3)****a) Principe :**

La valeur d'étalement est mesurée par le diamètre moyen d'un prélèvement de mortier frais, mis en place à l'aide d'un moule donné sur le plateau d'une table à secousses définie, et soumis à un nombre donné de secousses verticales en soulevant la table à secousses et en la laissant retomber librement d'une hauteur donnée .

b) Particularités de l'essai :

L'essai a été effectué en deux prélèvements (répéter deux fois) ❖ Confection des mortiers selon la méthode du mortier normal, avec un volume minimal de 1,51

c) Mode opératoire de l'essai :

Le moule est rempli en deux couches compactées par 10 coups brefs de dame. La surface libre du disque doit être propre et sèche. Au bout de 15 s, le moule est soulevé lentement et verticalement. Imprimer 15 secousses à la table à une fréquence constante d'environ 1 secousse par seconde. Le diamètre dans deux directions perpendiculaires est mesuré et exprimé à 1 mm près.



Figure II.20: Étalement du mortier à la table à secousses.

d) Classification de mortier: [NBN EN 1015-3] **Tableau II.10:** Classes des consistances du mortier selon la valeur d'étalement.

Consistance d'utilisation	Valeur d'étalement
Mortier raide	< 140 mm
Mortier plastique	entre 140 et 200 mm
Mortier fluide	> 200 mm

Tableau II.10 Classes des consistances du mortier selon la valeur d'étalement.

II.3.4.2.3. Détermination de la masse volumique:

Cette méthode permet de déterminer la masse volumique du mortier frais, ce qui est essentiel pour évaluer sa qualité et sa performance. En remplissant un récipient de volume et de masse connus avec le mortier frais, puis en mesurant la différence de masse entre le récipient plein et vide, on peut calculer la masse du mortier. En divisant cette masse par le volume du récipient, on obtient la masse volumique du mortier frais, exprimée en kg/m^3 . Cela permet de comparer la masse volumique mesurée à la formulation théorique pour évaluer la conformité du mortier préparé.

Cette mesure s'est faite en effet en trois étapes :

a) Première étape

Mise en place de la première couche du mortier jusqu'à la moitié du récipient suivi de Vingt-cinq coup avec la tige de piquage. (Voir figure II.14)



Figure II.21. Mise en place de la première couche

a) Deuxième étape

Mise en place de la deuxième couche du mortier jusqu'à remplissage du récipient suivi de Vingt-cinq coup avec la tige de piquage. (Voir figure II.15)



Figure II.22. Mise en place de la deuxième couche

C) Troisième étape

Uniformisation de la surface du mortier puis pesage sur la balance en gramme. Voir figure II.16



Figure II.23. Rasage et pesage

II.3.4.2.4. Essais réalisés à l'état sec :

Exactement, vous avez bien résumé la procédure. La cure de 28 jours dans l'eau permet au mortier de durcir complètement dans des conditions contrôlées, ce qui garantit une meilleure homogénéité et cohérence des échantillons. De plus, en choisissant un milieu avec un pH proche de 7, on minimise les influences extérieures sur le processus de durcissement.

Une fois cette période de cure terminée, les échantillons sont prêts pour les essais à l'état sec. Ces tests permettent d'évaluer différentes propriétés du mortier dans des conditions similaires à celles qu'il rencontrera dans son application finale. Cela inclut des mesures telles que la résistance à la compression, la porosité, la densité, et d'autres caractéristiques importantes pour assurer la qualité et la durabilité des structures construites avec ce mortier.

II.3.4.2.4.1. Essais de la masse Volumique :

Compris. Après la cure à l'eau, les échantillons ont été saturés d'eau. Pour réaliser d'éventuels essais, il a été nécessaire de sécher les échantillons dans une étuve à la température optimale de 105 degrés Celsius. Pour déterminer la masse volumique à l'état sec, vous avez d'abord séché les échantillons dans l'étuve jusqu'à ce que leur masse devienne constante. Une fois que la masse constante a été atteinte, vous avez mesuré les dimensions des échantillons pour calculer leur volume. En utilisant la masse constante trouvée et le volume calculé, vous avez pu déterminer la masse volumique de chaque échantillon à l'état sec. C'est une approche standard pour déterminer la masse volumique des matériaux à l'état sec. Avoir une masse constante indique que tout l'excès d'eau a été évaporé, laissant les échantillons à leur poids constant. En mesurant ensuite les dimensions, vous pouvez calculer le volume, et en divisant la masse par le volume, vous obtenez la masse volumique.



Figure. II.24. Séchage des échantillons.

II.3.4.2.4.2. 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 mortier 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, pourvue d'un dispositif de flexion à 3 points (**Figure II.23**). La valeur de la résistance considérée constitue la moyenne de la contrainte d'écrasement de trois éprouvettes.

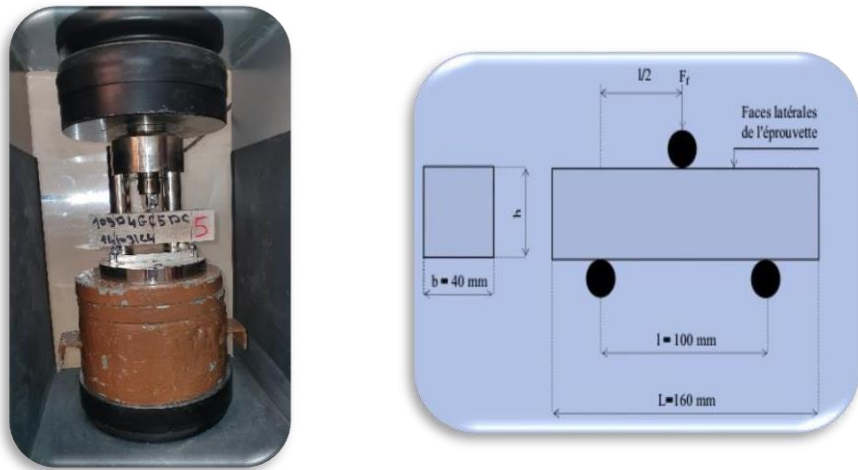


Figure. II.25. Essai de de traction par flexion.

II.3.4.2.4.3. 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 mortier 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 1500 KN, pourvue d'un dispositif de compression pour les moules de mortiers

(Figure.II.24.). La valeur de la résistance considérée constitue la moyenne de la contrainte d'écrasement de trois éprouvettes.

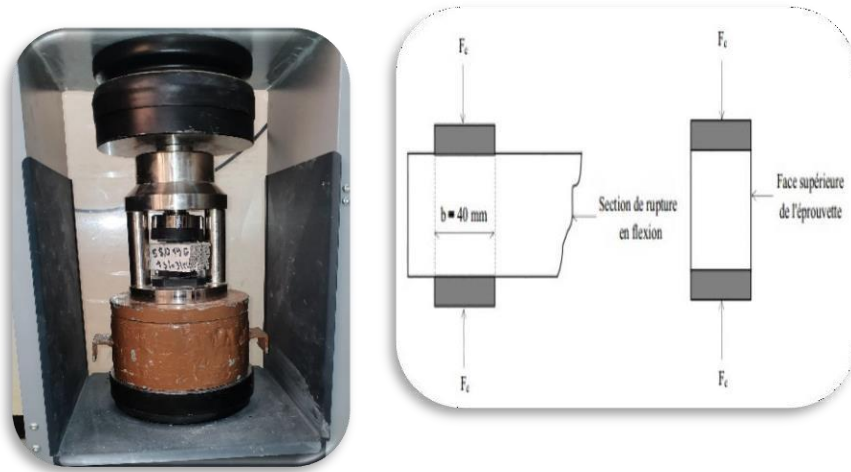


Figure. II.26. Essai de compression.

II.3.4.2.4.5. 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 mortier 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 ultra-sons consiste à mesurer le temps de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le mortier. Les principales caractéristiques de tous les appareils disponibles sur le marché comprennent un générateur d'impulsion et un récepteur d'impulsion, comme la montre là (Figure II.25).



Figure. II.27. Essai d'auscultation dynamique.

II.3.4.2.4.6. Essai d'absorption d'eau par capillarité.

L'absorption se mesure habituellement en faisant sécher des éprouvettes jusqu'à la masse constante, en l'immergeant dans l'eau et en mesurant l'augmentation de masse exprimée en pourcentage de la masse sèche.

L'essai d'absorption par immersion a été effectué effectivement, en séchant des éprouvettes (4 x 4 x 16) cm du mortier à l'étuve jusqu'à masse constante, ensuite en les immergeant totalement dans l'eau jusqu'à saturation des matériaux.

L'Objectif de cet essai est de déterminer la masse d'eau que peut absorber les éprouvettes après immersion totale durant une période donnée.

Les résultats obtenus sur trois éprouvettes de chaque type de mortier sont exprimés, en pourcentage, sous la forme de la moyenne de trois valeurs mesurées.

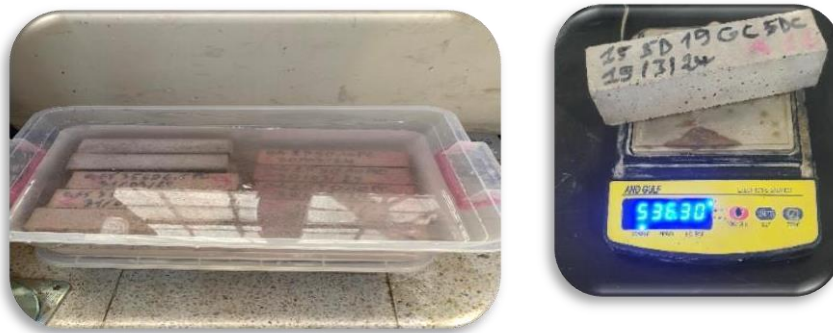


Figure. II.28. de l'essai d'absorption d'eau par.

Chapitre III

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

III- 1 Facteurs :

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

III- 2 Niveaux des facteurs :

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

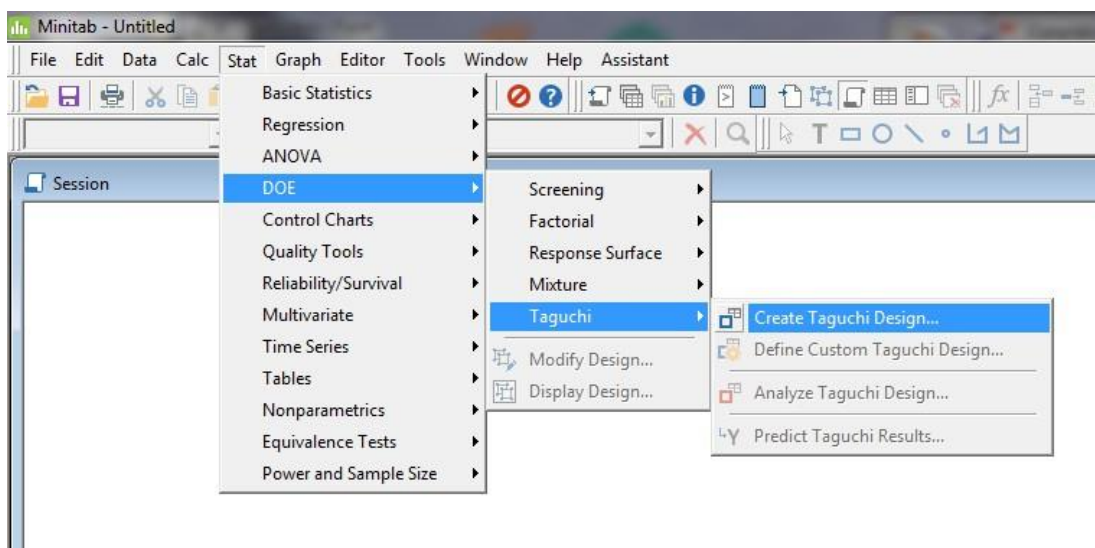
Tableau III.1 : Les facteurs et les niveaux ciblés.

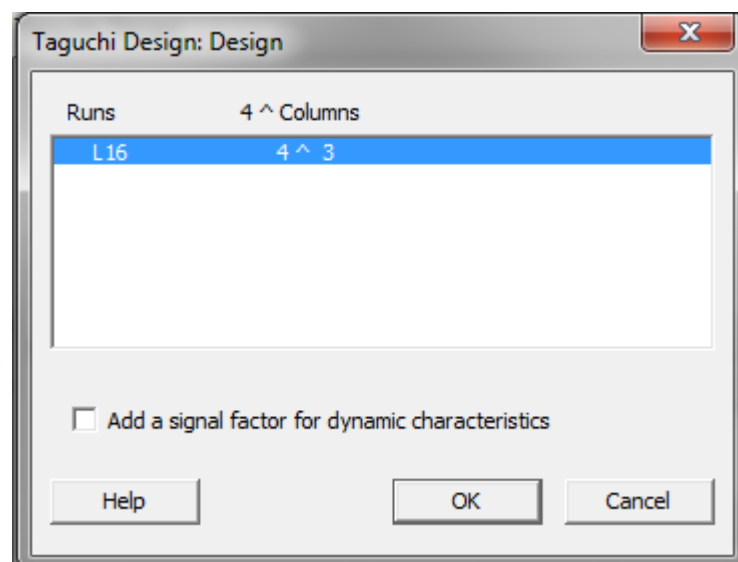
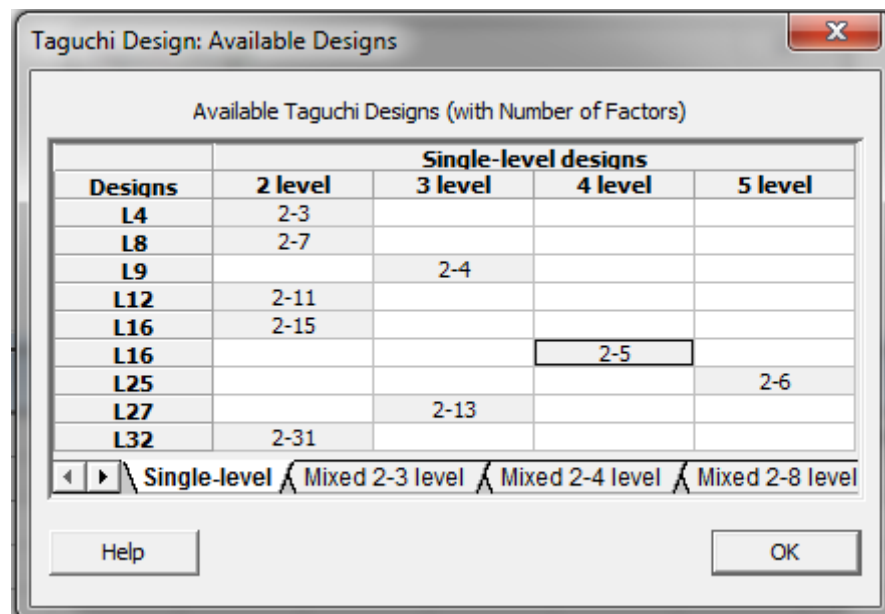
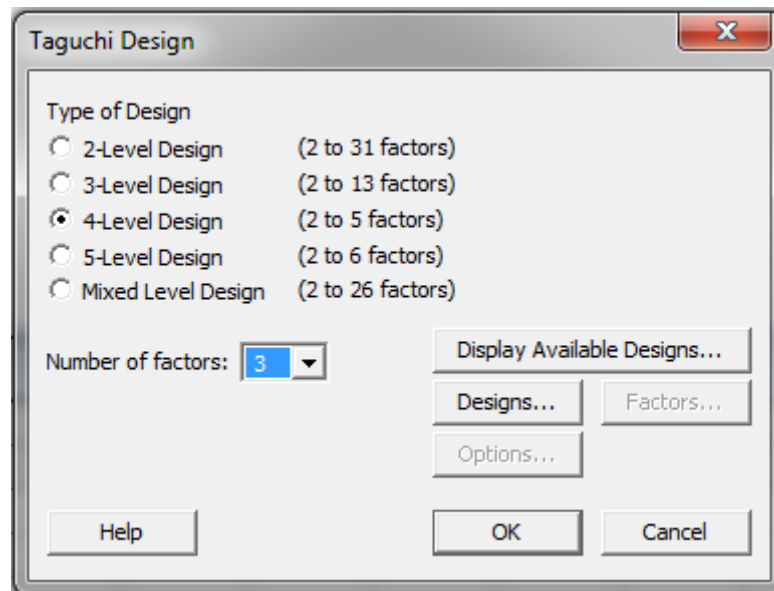
Facteurs	Niveaux			
Teneur en sable de dune (%)	5	10	15	20
Teneur en caoutchouc (%)	4	9	14	19
Teneur en déchets de céramique (%)	2	5	8	11

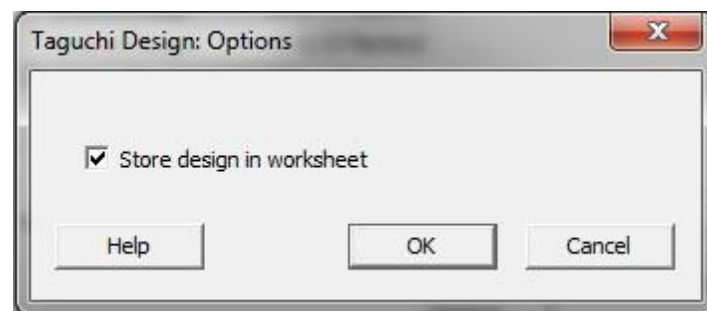
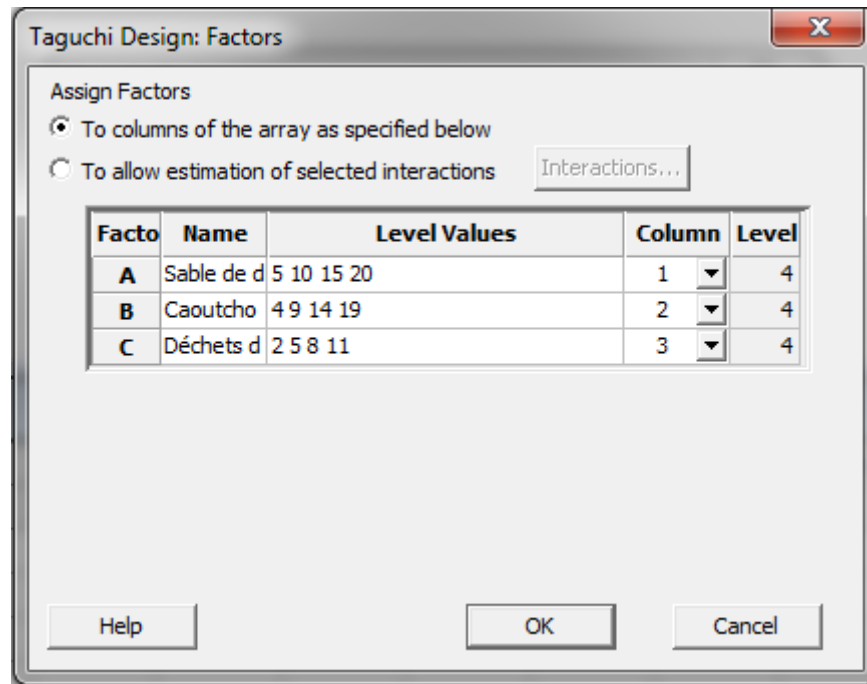
III-3 Choix de la matrice de Taguchi pour notre étude :

Avec une matrice de trois facteurs à quatre niveaux la méthode de Taguchi L16 (4^3), nous aurons un nombre d'essai qui sera égal à **16**. 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 :







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

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

N° de l'essai	Teneur en sable de dune (%)	Teneur en caoutchouc (%)	Teneur en déchets de céramique (%)
01	5	4	2
02	5	9	5
03	5	14	8
04	5	19	11
05	10	4	5
06	10	9	2
07	10	14	11
08	10	19	8
09	15	4	8

10	15	9	11
11	15	14	2
12	15	19	5
13	20	4	11
14	20	9	8
15	20	14	5
16	20	19	2

III-4 Mortier à l'état frais :

III-4-1 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 III .4 résume les valeurs de la mesure de l'étalement.

.4 : Résultats des essais de la masse maniabilité.

N°	Désignation du mélange	Etalement (cm)	Moyenne (cm) Intervalle de l'étalement (cm)
01	SD5 GC4 DC2	14.50	15.9±1.8
02	SD5 GC9 DC5	14.20	
03	SD5 GC14 DC8	14.50	
04	SD5 GC19 DC11	14.30	
05	SD10 GC4 DC5	14.90	
06	SD10 GC9 DC2	16.50	
07	SD10 GC14 DC11	14.10	
08	SD10 GC19 DC8	14.30	
9	SD15 GC4 DC8	14.20	
10	SD15 GC9 DC11	14.10	
11	SD15 GC14 DC2	16.40	
12	SD15 GC19 DC5	15.20	
13	SD20 GC4 DC11	14.10	
14	SD20 GC9 DC8	14.60	
15	SD20 GC14 DC5	15.40	
16	SD20 GC19 DC2	17.70	

L'intervalle de l'étalement est 15.9 ± 1.8 cm correspond à des mortiers plastiques. Tous les mortiers d'étude ont la même consistance plastique.

III-4-1-1 Détermination de la résultat optimal pour chaque facteur :

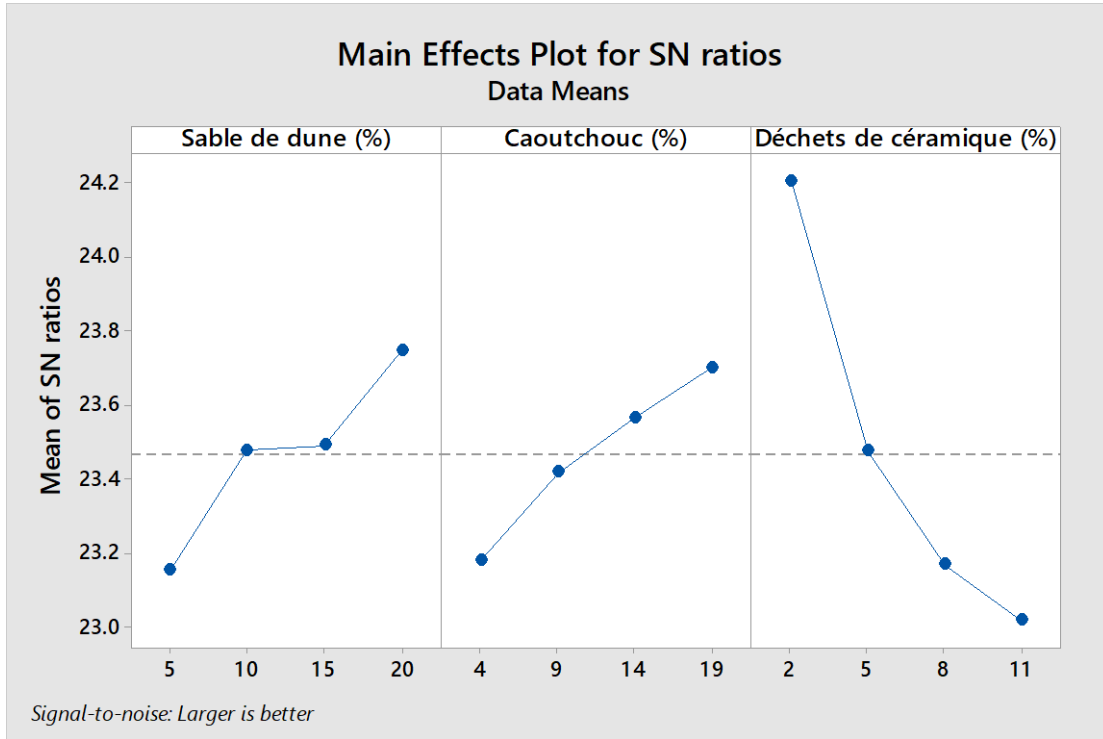


Figure III.1: Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios)

D'après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (*Signal to Noise Ratios*) représentés dans la Figure III.1, nous constatons que les résultats optimaux pour chaque facteur afin de donner les meilleurs résultats pour la maniabilité sont les suivant: la teneur en sable de dune (20%), la teneur en caoutchouc (19%) et la teneur en déchets de céramique (2%).

III-4-1-2 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	13.58	1.09	12.46	0.000	
Sable de dune (%)	0.266	0.130	2.04	0.087	56.78
Caoutchouc (%)	0.164	0.127	1.29	0.243	54.16
Déchets de céramique (%)	-0.276	0.209	-1.32	0.235	52.54
Sable de dune (%)*Sable de dune (%)	-0.001	0.00386	-0.26	0.804	32.25

Caoutchouc (%)*Caoutchouc (%)	-0.00150	0.00386	-0.39	0.711	27.45
Déchets de céramique (%)*Déchets de céramique (%)	0.0306	0.0107	2.85	0.029	24.47
Sable de dune (%)*Caoutchouc (%)	-0.00509	0.00521	-0.98	0.366	29.07
Sable de dune (%)*Déchets de céramique (%)	-0.02212	0.00868	-2.55	0.044	27.71
Caoutchouc (%)*Déchets de céramique (%)	-0.00985	0.00868	-1.13	0.300	25.53

Regression Equation

$$\text{Etalement (cm)} = 13.58 + 0.266 \text{ SD} + 0.164 \text{ GC} - 0.276 \text{ DC} - 0.00100 \text{ SD}^2 - 0.00150 \text{ GC}^2 + 0.0306 \text{ DC}^2 - 0.00509 \text{ SD*GC} - 0.02212 \text{ SD*DC} - 0.00985 \text{ GC*DC}$$

Model Summary

S	R-sq
0.386221	94.73%

III-4-1-3 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.

Par ailleurs l'augmentant de pourcentage de sable de dune SD dans les mortiers entraîne une augmentation de la maniabilité.

En plus, l'augmentant de pourcentage de granulats de caoutchouc GC, amène à réduire la demande en eau ce qui se traduit par une augmentation de la maniabilité des mortiers.

En effet, en augmentant de pourcentage de déchets de céramique DC, amène à augmenter la demande en eau ce qui se traduit par une réduction de la maniabilité.

D'après aussi le modèle de Taguchi qui illustre des interactions existent entre les facteurs expérimentaux qui influent sur la maniabilité des mortiers, nous constatons que toutes les interactions (SD×GC, SD×DC et SD×GC) influent négativement sur la maniabilité des mortiers.

Les courbes obtenues et qui peuvent prédire la maniabilité à partir les facteurs étudiés sont illustrées par les Figure III.2, 3.3 et 3.4.

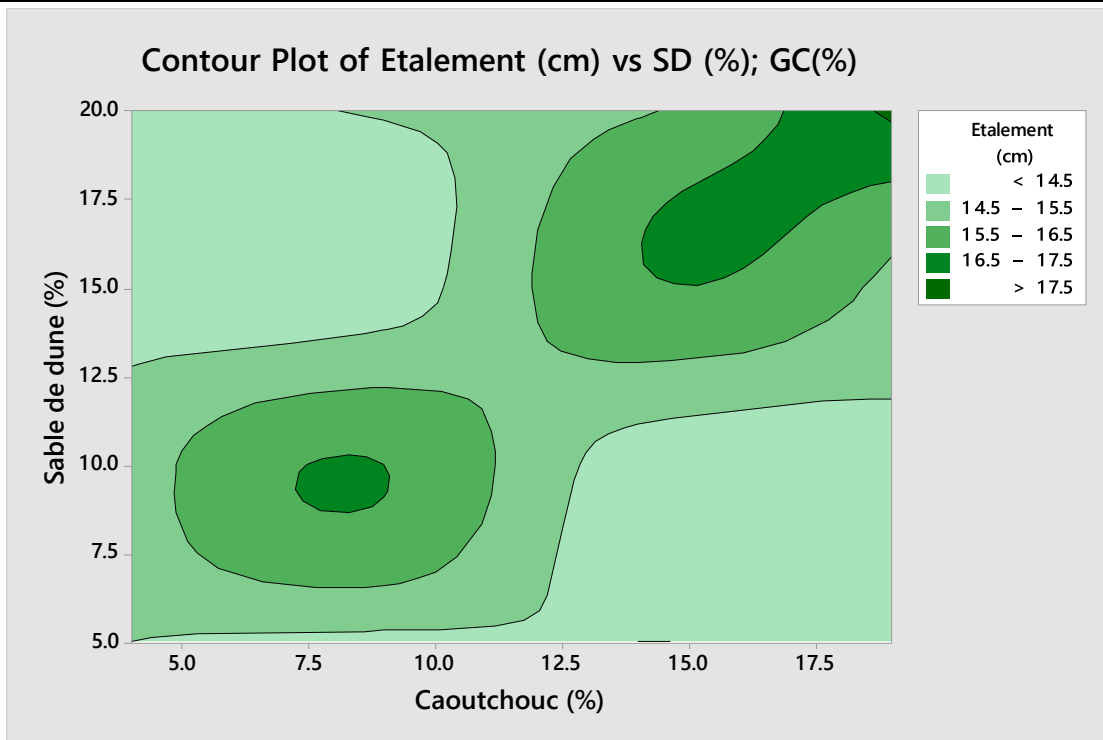


Figure III.2: La maniabilité en fonction de pourcentage de sable de dune et de granulats de caoutchouc.

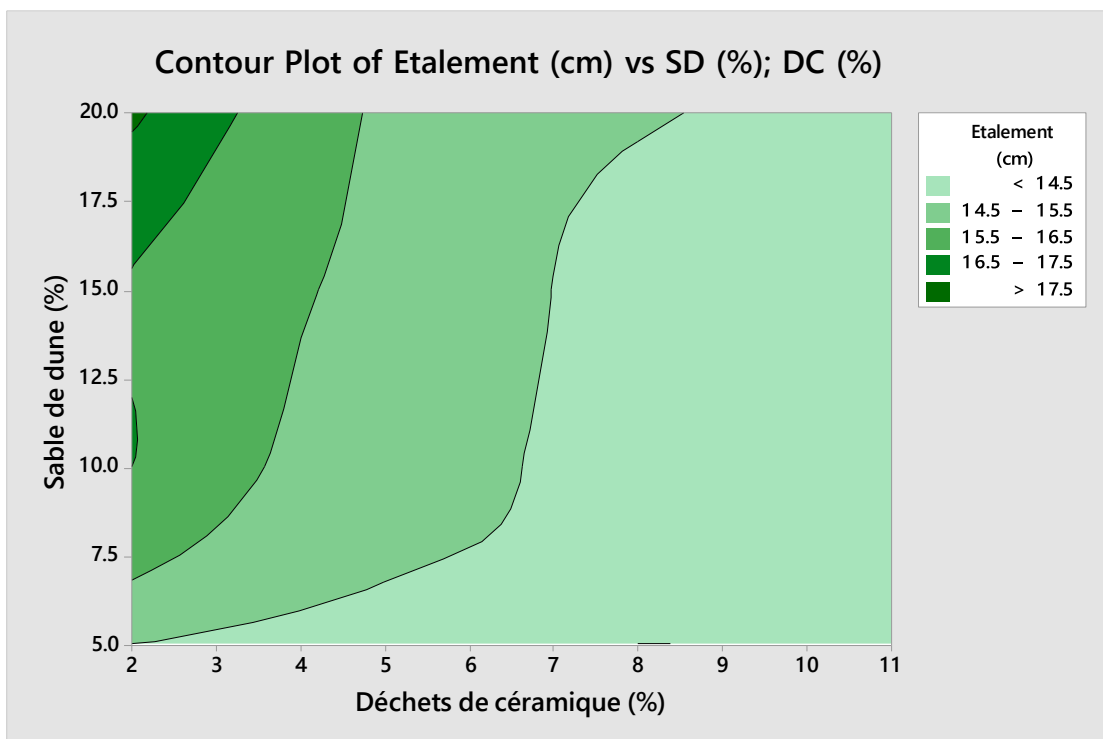


Figure III.3: La maniabilité en fonction de pourcentage de sable de dune et de déchets de céramique.

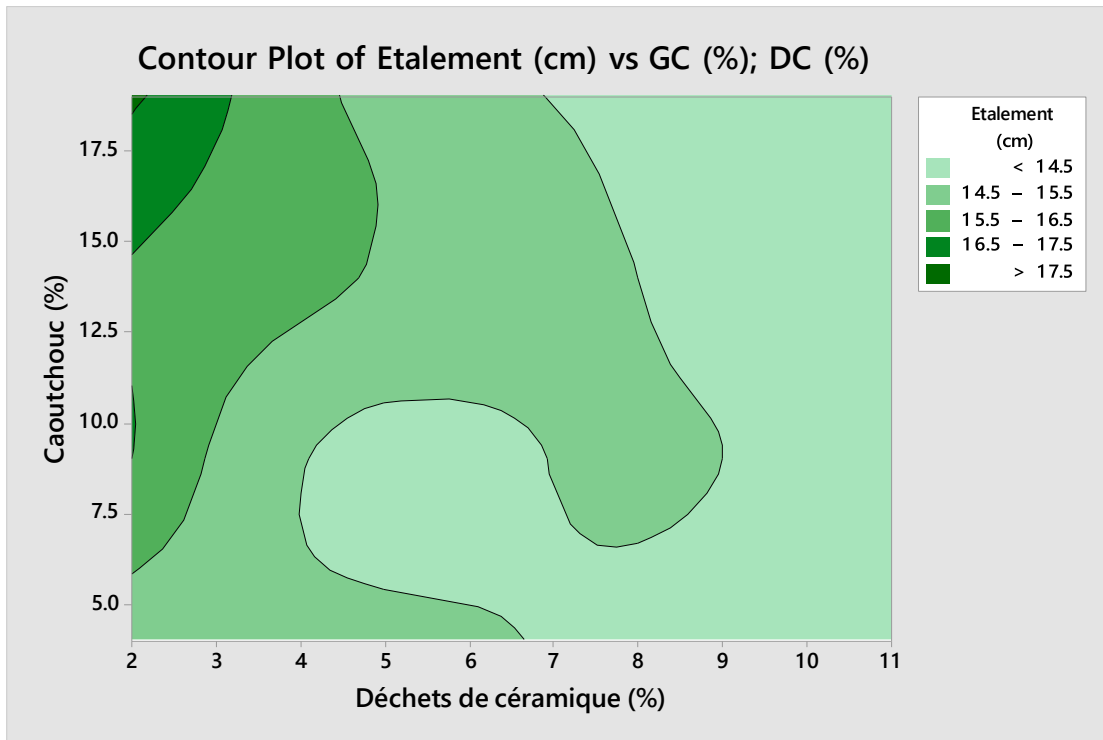


Figure III.4: La maniabilité en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de déchets de céramique.

Ces figures montrent clairement que la maniabilité peut atteindre 17.5 cm si le pourcentage de sable de dune SD varie entre 18.5 et 20% avec un pourcentage de granulats de caoutchouc GC entre 17.5 et 19% et un pourcentage de déchets de céramique DC variant entre 2 et 3%.

III-4-2 La masse volumique à l'état frais :

Tableau III.2 : Résultats des essais de la masse volumique à l'état frais.

N°	Désignation du mélange	La masse volumique à l'état durci (Kg/m ³)
01	SD5 GC4 DC2	2020
02	SD5 GC9 DC5	1935
03	SD5 GC14 DC8	1920
04	SD5 GC19 DC11	1745
05	SD10 GC4 DC5	2065
06	SD10 GC9 DC2	2000
07	SD10 GC14 DC11	1920

08	SD10 GC19 DC8	1860
9	SD15 GC4 DC8	2020
10	SD15 GC9 DC11	1970
11	SD15 GC14 DC2	1930
12	SD15 GC19 DC5	1890
13	SD20 GC4 DC11	2050
14	SD20 GC9 DC8	1970
15	SD20 GC14 DC5	1760
16	SD20 GC19 DC2	1940

III-4-2-1 Détermination de la résultat optimal pour chaque facteur :

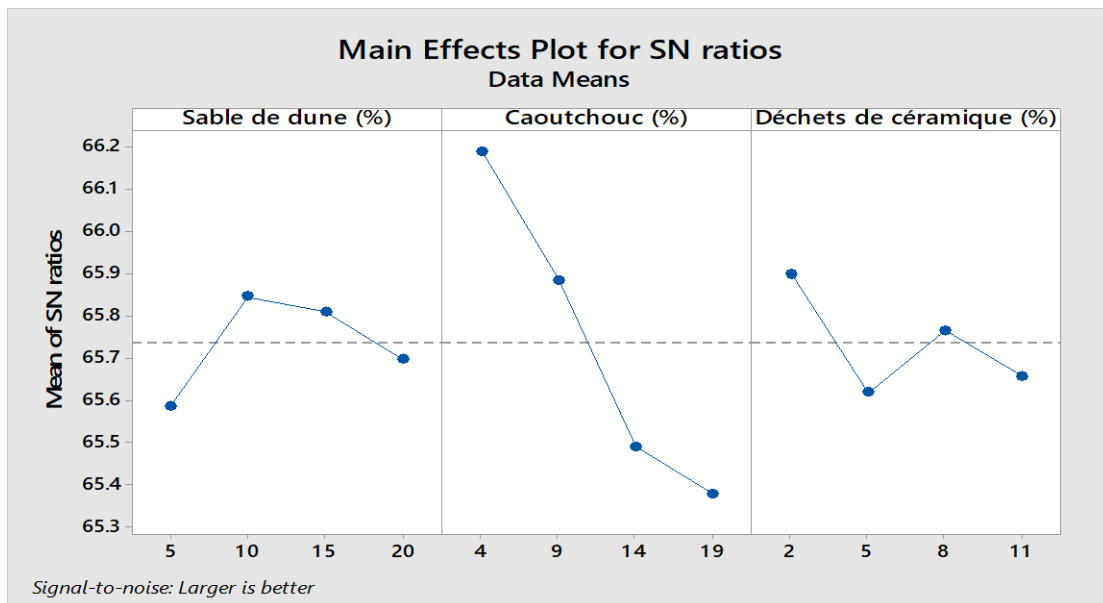


Figure III.5: Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios)

D'après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (*Signal to Noise Ratios*) représentés dans la Figure III.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 suivant: la teneur en sable de dune (10%), la teneur en caoutchouc (4%) et la teneur en déchets de céramique (2%).

III-4-2-2 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	2031	164	12.41	0.000	
Sable de dune (%)	6.7	19.6	0.34	0.744	56.78
Caoutchouc (%)	-9.2	19.1	-0.48	0.648	54.16
Déchets de céramique (%)	5.2	31.3	0.17	0.874	52.54
Sable de dune (%)*Sable de dune (%)	-0.788	0.580	-1.36	0.224	32.25
Caoutchouc (%)*Caoutchouc (%)	0.462	0.580	0.80	0.456	27.45
Déchets de céramique (%)*Déchets de céramique (%)	1.08	1.61	0.67	0.529	24.47
Sable de dune (%)*Caoutchouc (%)	0.311	0.782	0.40	0.704	29.07
Sable de dune (%)*Déchets de céramique (%)	0.62	1.30	0.47	0.653	27.71
Caoutchouc (%)*Déchets de céramique (%)	-2.50	1.30	-1.91	0.104	25.53
Model Summary					

S	R-sq
58.0262	83.97%

Regression Equation

$$\text{Masse volumique (kg/m}^3\text{)} = 2031 + 6.7 \text{ SD} - 9.2 \text{ GC} + 5.2 \text{ DC} - 0.788 \text{ SD}^2 + 0.462 \text{ GC}^2 + 1.08 \text{ DC}^2 + 0.311 \text{ SD*GC} + 0.62 \text{ SD*DC} - 2.50 \text{ GC*DC}$$

III-4-2-3 Interprétation des résultats:

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

En plus, un pourcentage élevé de granulats de caoutchouc GC dans les mortiers entraîne une réduction de la masse volumique à l'état durci. Cette diminution peut s'expliquer par la faible masse volumique des granulats de caoutchouc utilisés ($M_v=1025 \text{ kg/m}^3$) par rapport à celle du sable remplacé ($M_v=2680 \text{ kg/m}^3$).

En effet, en augmentant de pourcentage de céramique DC, amène à réduire les vides dans les mélanges des mortiers ce qui se traduit par une augmentation de 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 sable de dune et les granulats de caoutchouc ($\text{SD} \times \text{GC}$)) et entre le sable de dune et de déchets de céramique ($\text{SD} * \text{DC}$)) influent positivement sur la masse volumique. Par contre, les interactions entre les granulats de caoutchouc et de déchets de céramique ($\text{GC} * \text{DC}$) a un effet négative sur la masse volumique à l'état frais.

Les courbes obtenues et qui peuvent prédire la masse volumique à l'état frais à partir les facteurs étudiés sont illustrées par les Figure III.6, 3.7 et 3.8.

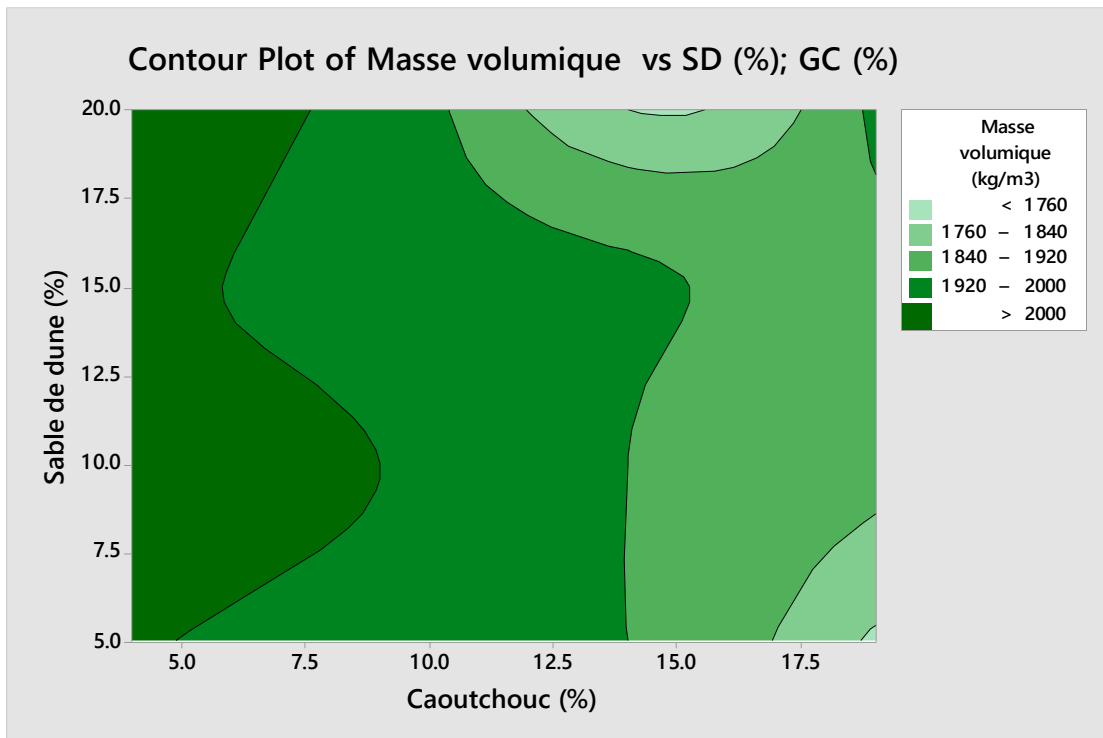


Figure III.6: la masse volumique à l'état frais en fonction de pourcentage de sable de dune et de granulats de caoutchouc.

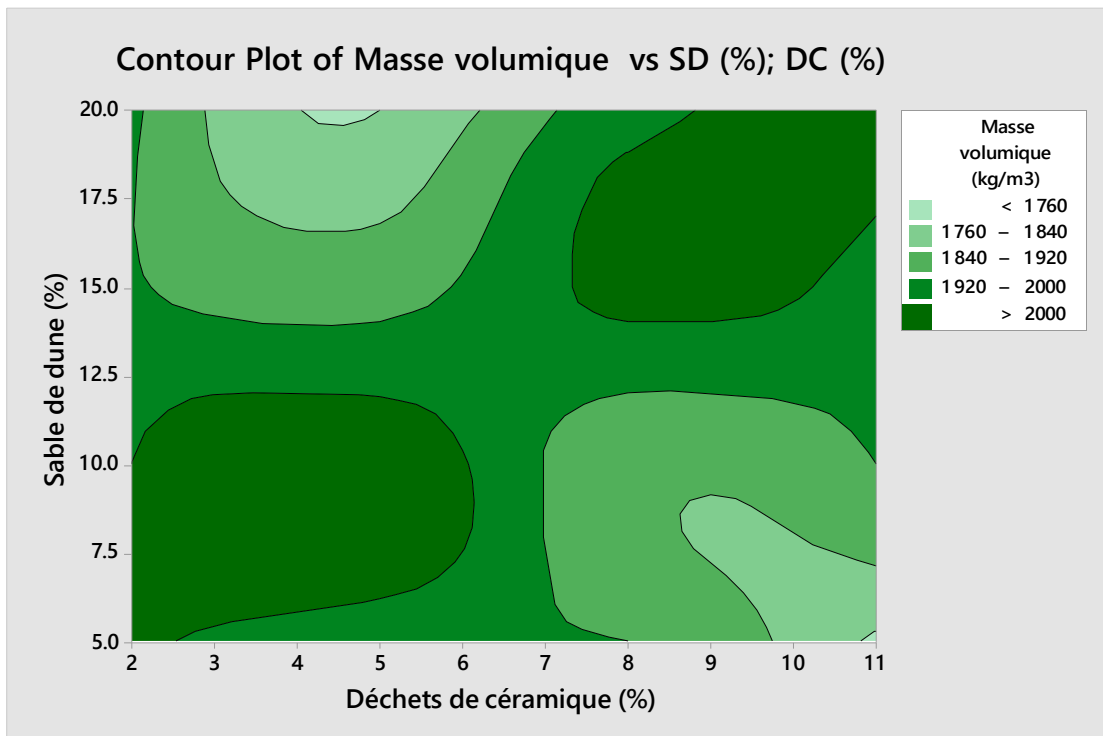


Figure III.7: la masse volumique à l'état frais en fonction de pourcentage de sable de dune et de déchets de céramique.

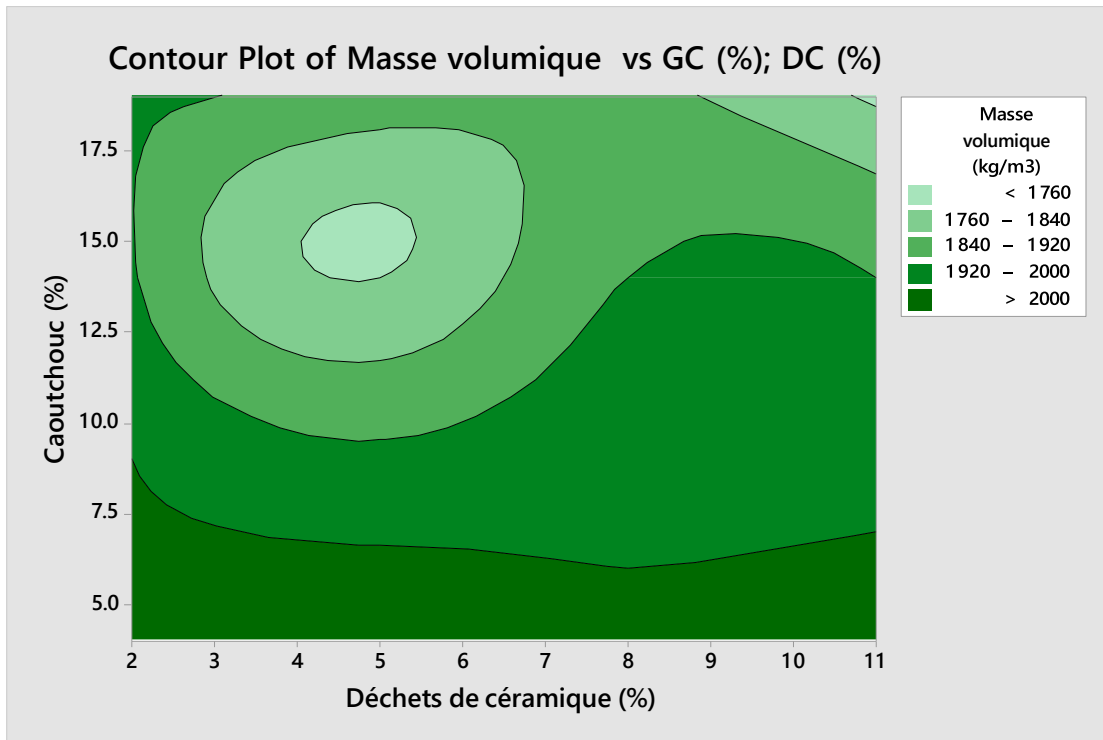


Figure III.8: la masse volumique à l'état durci en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de déchets de céramique.

Ces figures montrent clairement que la masse volumique à l'état durci peut dépasser 2000 kg/m³ si le pourcentage de sable de dune SD varie entre 6 et 12% avec un pourcentage de granulats de caoutchouc GC entre 4 et 6% et un pourcentage de déchets de céramique DC variant entre 2 et 6%.

III-5 Mortier à l'état durci :

III-5-1 La masse volumique à l'état durci:

Tableau III.3 : Résultats des essais de la masse volumique à l'état durci.

N°	Désignation du mélange	La masse volumique à l'état durci (Kg/m ³)
01	SD5 GC4 DC2	1998.65
02	SD5 GC9 DC5	1960.30
03	SD5 GC14 DC8	1878.78
04	SD5 GC19 DC11	1848.31
05	SD10 GC4 DC5	1952.16
06	SD10 GC9 DC2	1928.28
07	SD10 GC14 DC11	1858.72
08	SD10 GC19 DC8	1853.32

9	SD15 GC4 DC8	2013.47
10	SD15 GC9 DC11	1920.59
11	SD15 GC14 DC2	1981.13
12	SD15 GC19 DC5	1888.21
13	SD20 GC4 DC11	1920.90
14	SD20 GC9 DC8	1971.47
15	SD20 GC14 DC5	1928.97
16	SD20 GC19 DC2	1881.21

III-5-1-1 Détermination de la résultat optimal pour chaque facteur :

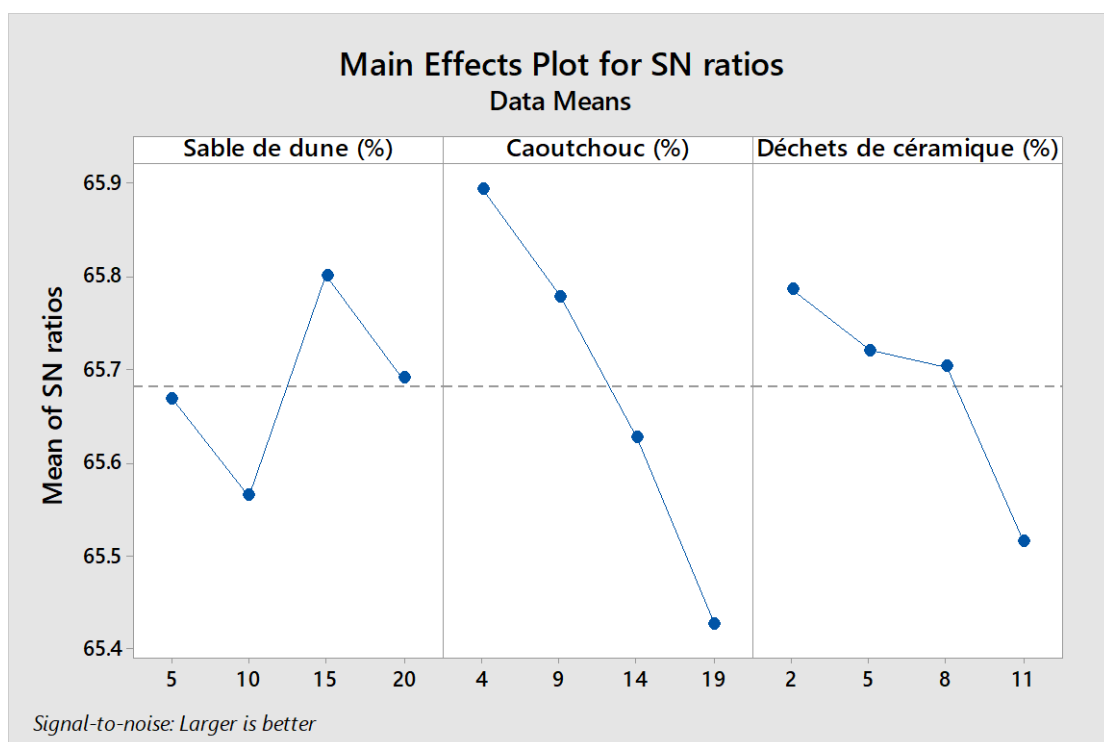


Figure III.9: Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios)

D'après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (*Signal to Noise Ratios*) représentés dans la Figure III.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: la teneur en sable de dune (15%), la teneur en caoutchouc (4%) et la teneur en déchets de céramique (2%).

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	1966	107	18.46	0.000	
Sable de dune (%)	6.5	12.7	0.51	0.628	56.78
Caoutchouc (%)	-3.4	12.4	-0.27	0.793	54.16
Déchets de céramique (%)	1.8	20.4	0.09	0.931	52.54
Sable de dune (%)*Sable de dune (%)	-0.018	0.377	-0.05	0.963	32.25
Caoutchouc (%)*Caoutchouc (%)	-0.180	0.377	-0.48	0.650	27.45
Déchets de céramique (%)*Déchets de céramique (%)	-0.76	1.05	-0.72	0.498	24.47
Sable de dune (%)*Caoutchouc (%)	-0.181	0.509	-0.35	0.735	29.07
Sable de dune (%)*Déchets de céramique (%)	-0.269	0.848	-0.32	0.762	27.71
Caoutchouc (%)*Déchets de céramique (%)	0.338	0.848	0.40	0.704	25.53

Model Summary

S	R-sq
37.7476	79.36%

Regression Equation

$$\begin{aligned}
 \text{Masse vol. à l'état durci (kg/m}^3\text{)} = & 1966 + 6.5 \text{ SD} - 3.4 \text{ GC} + 1.8 \text{ DC} - 0.018 \text{ SD*SD} \\
 & - 0.180 \text{ GC*GC} \\
 & - 0.76 \text{ DC*DC} - 0.181 \text{ SD*GC} - 0.269 \text{ SD*DC} \\
 & + 0.338 \text{ GC*DC}
 \end{aligned}$$

III-5-1-3 Interprétation des résultats:

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

En plus, un pourcentage élevé de granulats de caoutchouc GC dans les mortiers entraîne une réduction de la masse volumique à l'état durci.

D'après aussi le modèle de Taguchi qui illustre des interactions existent entre les facteurs expérimentaux qui influent sur la masse volumique à l'état durci, nous constatons que l'interaction entre les granulats de caoutchouc et de déchets de céramique (GC×DC) a un effet positif sur la masse volumique. Par contre, les interactions entre le sable de dune et de déchets

de céramique (SD*DC) et entre le sable de dune et les granulats de caoutchouc (SD*GC) influent négativement 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 Figure III.10, 3.11 et 3.12.

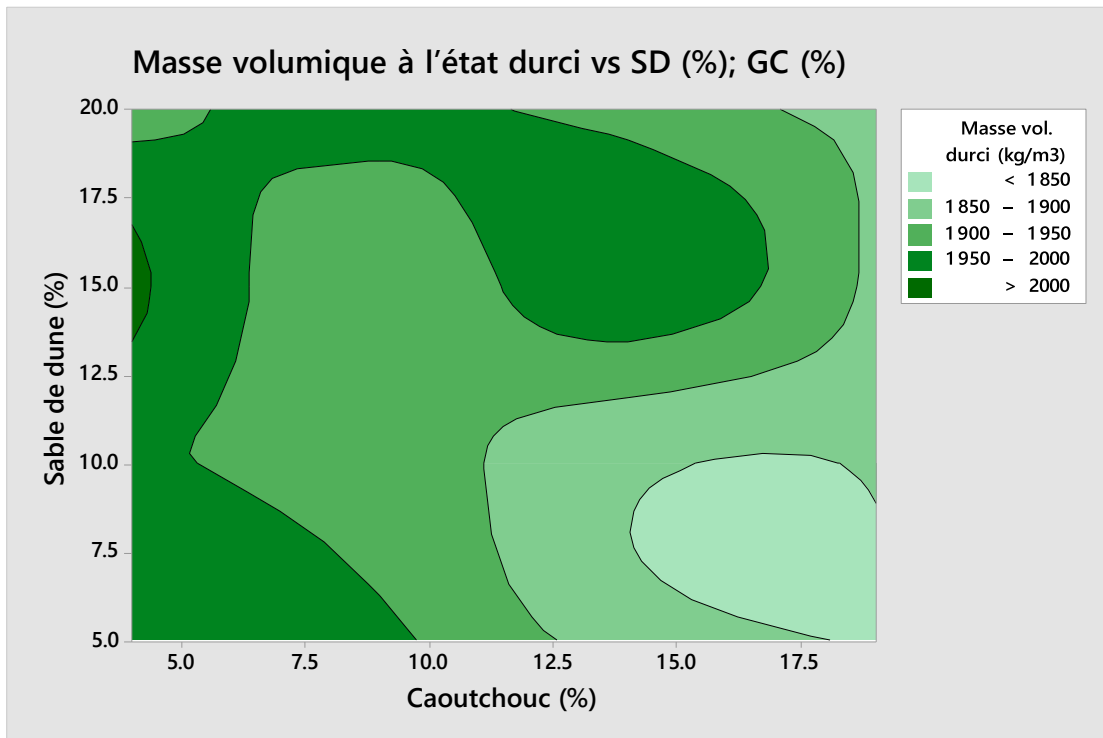


Figure III.10: la masse volumique à l'état durci en fonction de pourcentage de sable de dune et de granulats de caoutchouc.

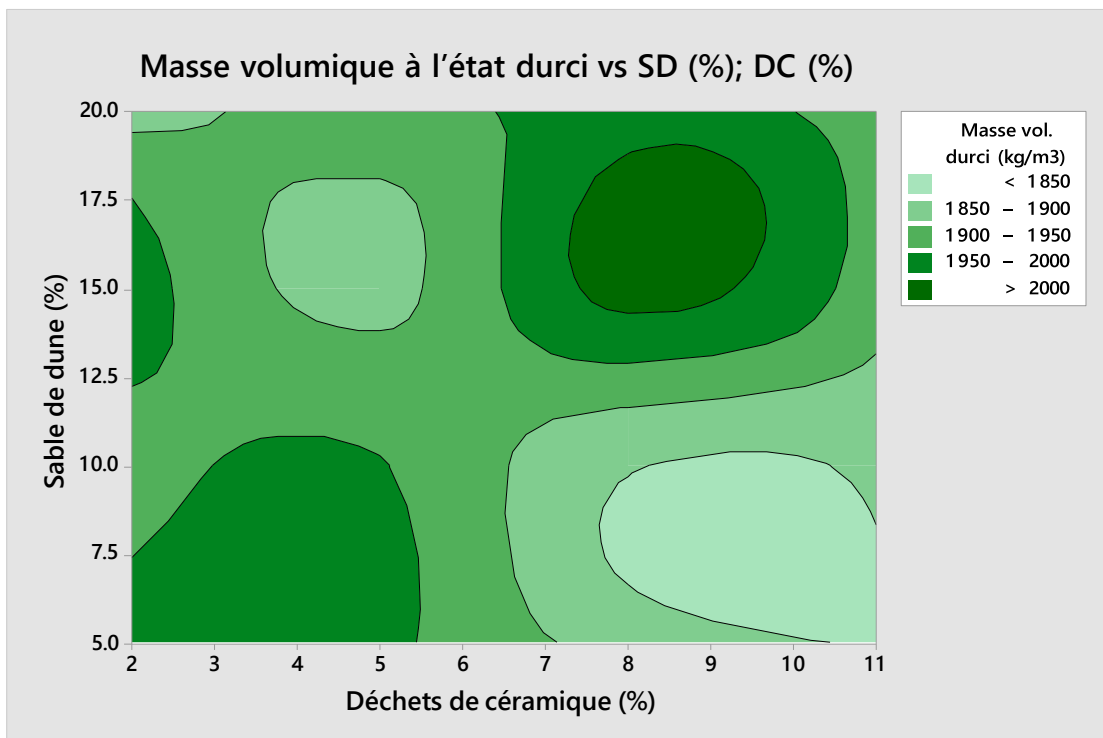


Figure III.11: la masse volumique à l'état durci en fonction de pourcentage de sable de dune et de déchets de céramique.

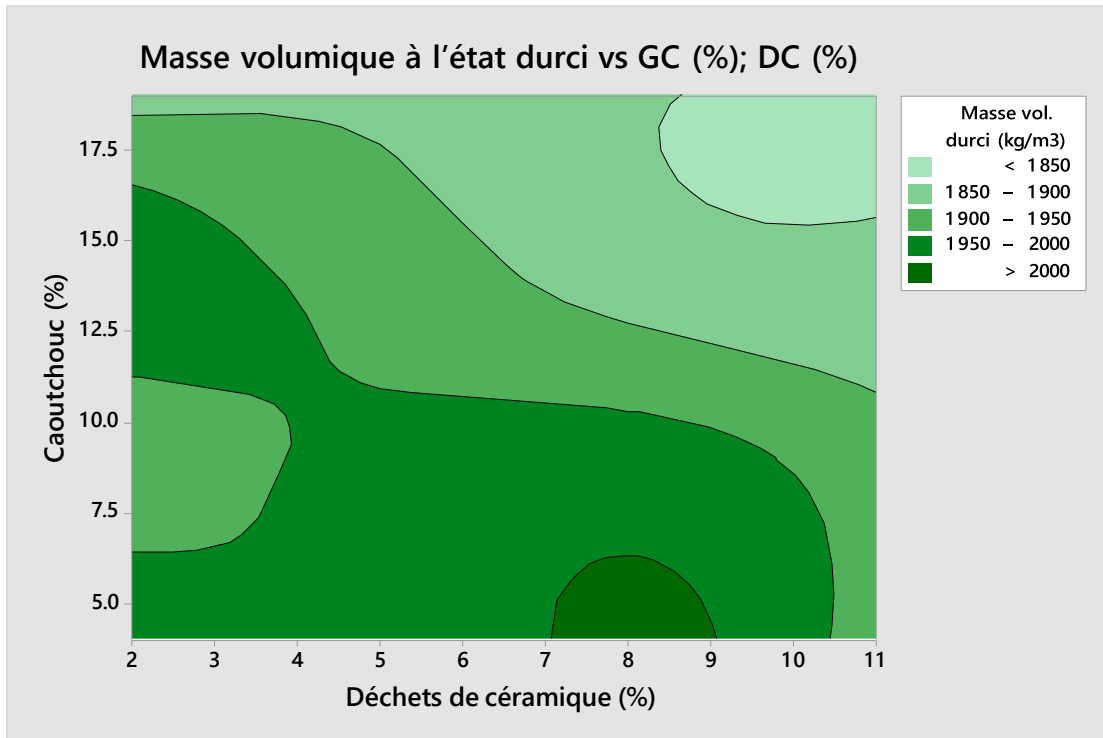


Figure III.12: la masse volumique à l'état durci en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de déchets de céramique.

Ces figures montrent clairement que la masse volumique à l'état durci peut atteindre 2000 kg/m^3 si le pourcentage de sable de dune SD varie entre 14 et 18% avec un pourcentage de granulats de caoutchouc GC entre 4 et 8.25% et un pourcentage de déchets de céramique DC variant entre 6.5 et 10.1%.

III-5-2 Résistance à la compression:

Tableau III.4 : Résultats des essais de la résistance mécanique à la compression à 28 jours.

N°	Désignation du mélange	Résistance à la compression Rc28 (MPa)
01	SD5 GC4 DC2	21.79
02	SD5 GC9 DC5	23.14
03	SD5 GC14 DC8	18.86
04	SD5 GC19 DC11	19.82
05	SD10 GC4 DC5	21.40
06	SD10 GC9 DC2	21.93
07	SD10 GC14 DC11	19.80
08	SD10 GC19 DC8	18.31
9	SD15 GC4 DC8	25.61
10	SD15 GC9 DC11	23.29

11	SD15 GC14 DC2	16.68
12	SD15 GC19 DC5	18.64
13	SD20 GC4 DC11	27.35
14	SD20 GC9 DC8	22.67
15	SD20 GC14 DC5	19.42
16	SD20 GC19 DC2	19.51

III-5-2-1 Détermination de la résultat optimal pour chaque facteur (Rc28):

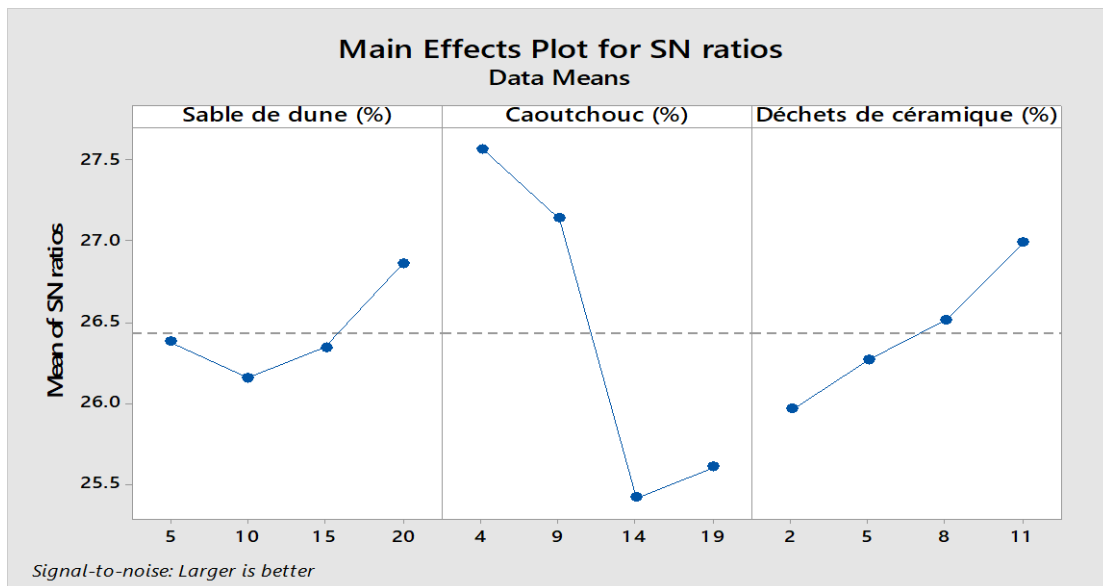


Figure III.13: Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios)

D'après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (*Signal to Noise Ratios*) représentés dans la Figure III.13, nous constatons que les résultats optimaux pour chaque facteur afin de donner les meilleurs résultats pour la résistance mécanique à la compression sont les suivant: la teneur en sable de dune (20%), la teneur en caoutchouc (4%) et la teneur en déchets de céramique (11%).

III-5-2-2 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	25.57	4.89	5.23	0.002	
Sable de dune (%)	-0.516	0.584	-0.88	0.411	56.78
Caoutchouc (%)	-0.370	0.570	-0.65	0.541	54.16
Déchets de céramique (%)	0.275	0.936	0.29	0.779	52.54
Sable de dune (%)*Sable de dune (%)	0.0173	0.0173	1.00	0.358	32.25

Caoutchouc (%)*Caoutchouc (%)	0.0166	0.0173	0.96	0.375	27.45
Déchets de céramique (%)*Déchets de céramique (%)	0.0147	0.0481	0.31	0.770	24.47
Sable de dune (%)*Caoutchouc (%)	-0.0055	0.0234	-0.24	0.822	29.07
Sable de dune (%)*Déchets de céramique (%)	0.0200	0.0389	0.51	0.625	27.71
Caoutchouc (%)*Déchets de céramique (%)	-0.0414	0.0389	-1.06	0.329	25.53

Model Summary

S	R-sq
1.73248	84.88%

Regression Equation

$$\begin{aligned} \mathbf{Rc\ 28\ (MPa)} = & \mathbf{25.57 - 0.516\ SD - 0.370\ GC + 0.275\ DC + 0.0173\ SD*SD + 0.0166\ GC*GC} \\ & \mathbf{+ 0.0147\ DC*DC - 0.0055\ SD*GC + 0.0200\ SD*DC - 0.0414\ GC*DC} \end{aligned}$$

III-5-2-3 Interprétation des résultats:

L'augmentant de sable de dune SD et de granulats de caoutchouc GC entraîne une réduction de la résistance mécanique à la compression à 28 jours.

En plus, en augmentant le pourcentage de déchets de céramique DC, les vides dans les mélanges des mortiers deviennent de plus en plus compacts, ce qui se traduit par une augmentation de la résistance mécanique à la compression à 28 jours. D'autre part, les interactions entre le sable de dune et de granulats de caoutchouc (SD*GC) et entre le sable de dune et de déchets de céramique (GC*DC) 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 Figure III.14, 3.15 et 3.16.

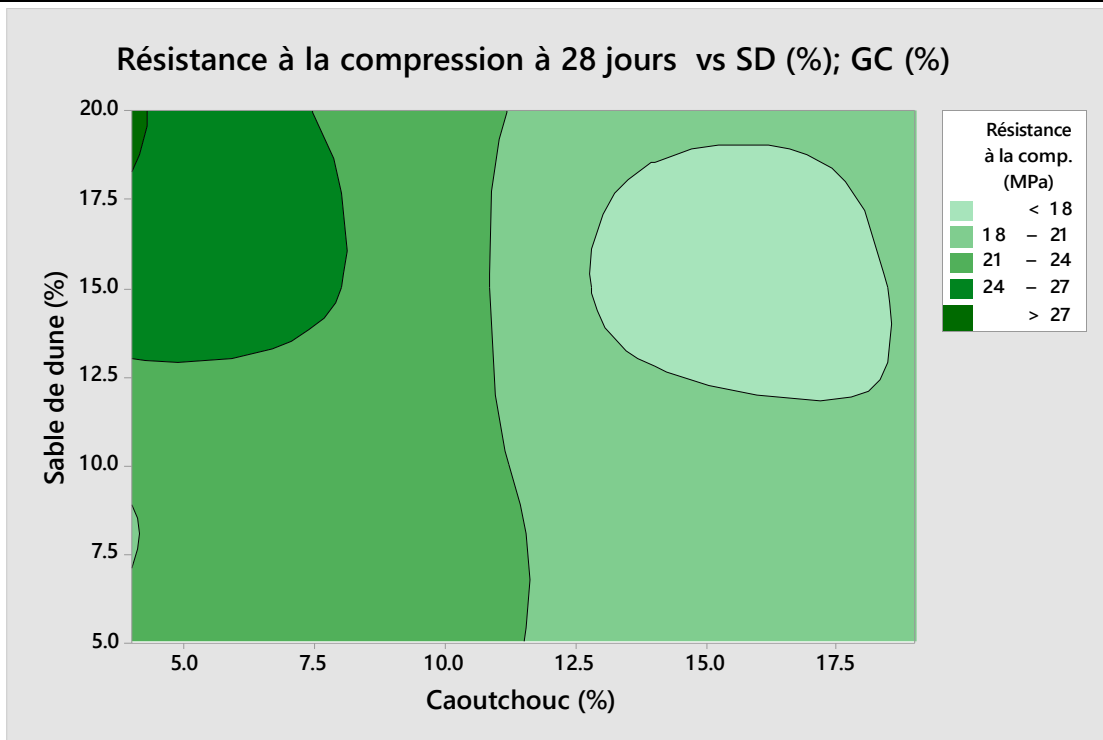


Figure III.14: La résistance mécanique à la compression à 28 jours en fonction de pourcentage de sable de dune et de granulats de caoutchouc.

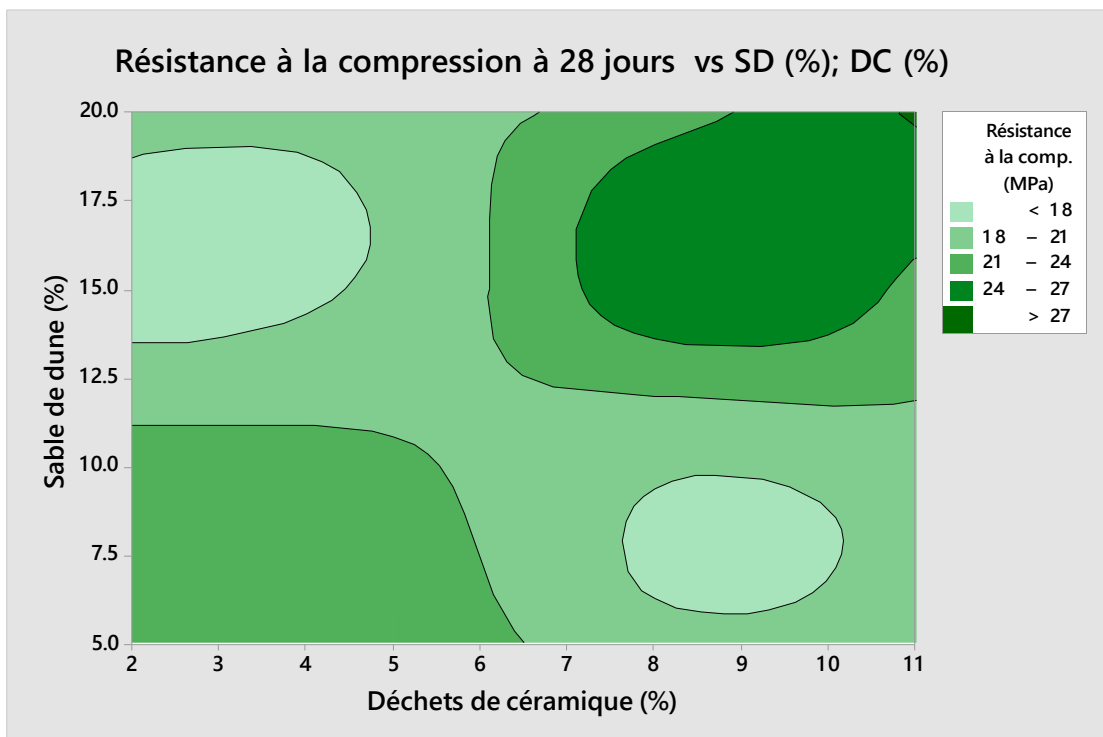


Figure III.15: La résistance mécanique à la compression à 28 jours en fonction de pourcentage de sable de dune et déchets de céramique.

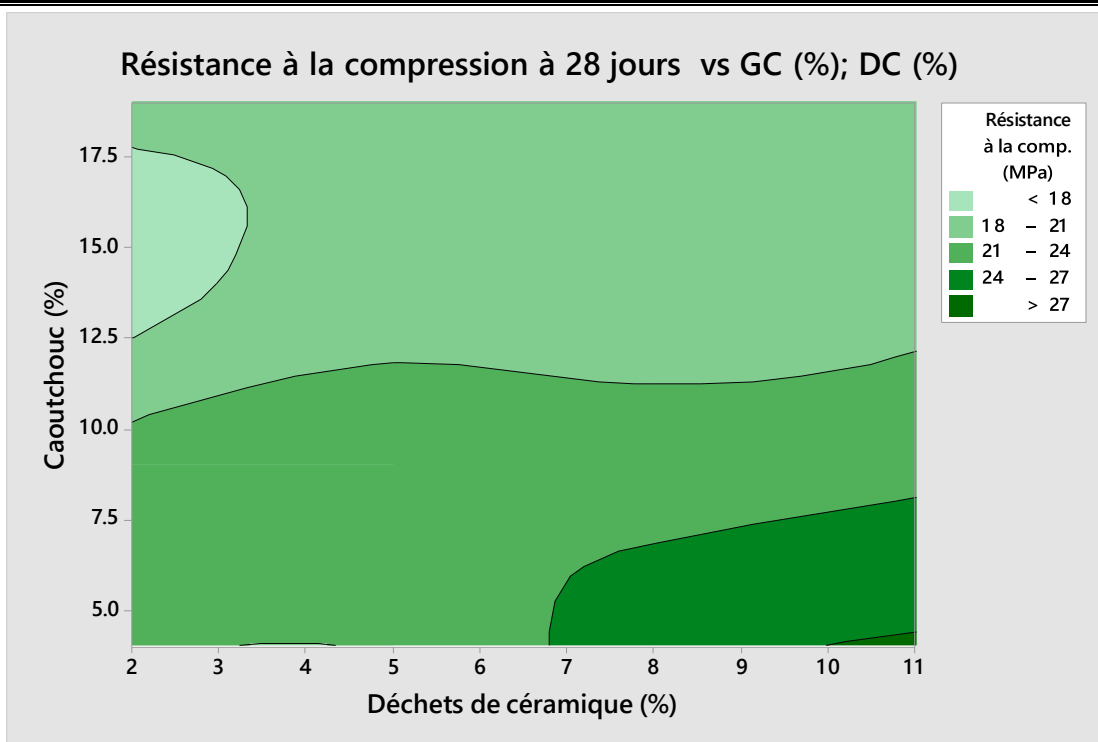


Figure III.16: La résistance mécanique à la compression à 28 jours en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de déchets de céramique.

Ces figures montrent clairement que la résistance mécanique à la compression à 28 jours peut atteindre 27 MPa si le pourcentage de sable de dune SD varie entre 15 et 20% avec un pourcentage de granulats de caoutchouc GC entre 4 et 7% et un pourcentage de déchets de céramique DC variant entre 8 et 11%.

III-5-3 Résistance mécanique à la flexion:

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

N°	Désignation du mélange	Résistance à la flexion Rt28 (MPa)
01	SD5 GC4 DC2	2.60
02	SD5 GC9 DC5	3.50
03	SD5 GC14 DC8	2.71
04	SD5 GC19 DC11	3.69
05	SD10 GC4 DC5	3.13
06	SD10 GC9 DC2	3.01
07	SD10 GC14 DC11	3.24
08	SD10 GC19 DC8	3.23
9	SD15 GC4 DC8	3.56

10	SD15 GC9 DC11	2.90
11	SD15 GC14 DC2	2.94
12	SD15 GC19 DC5	2.79
13	SD20 GC4 DC11	3.69
14	SD20 GC9 DC8	3.61
15	SD20 GC14 DC5	3.35
16	SD20 GC19 DC2	3.54

III-5-3-1 Détermination de la résultat optimal pour chaque facteur (Rt28):

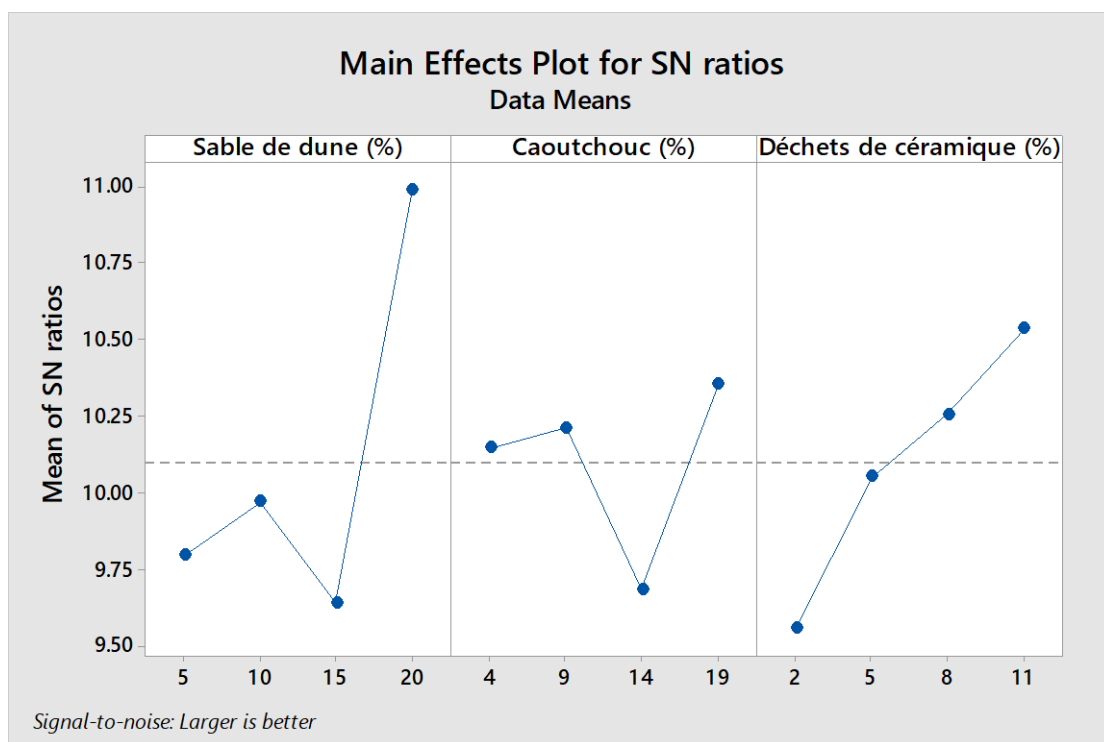


Figure III.17: Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios).

D'après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (*Signal to Noise Ratios*) représentés dans la Figure III.16, 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: la teneur en sable de dune (20%), la teneur en caoutchouc (19%) et la teneur en déchets de céramique (11%).

III-5-3-1 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	2.54	1.04	2.43	0.051	
Sable de dune (%)	0.026	0.125	0.21	0.839	56.78
Caoutchouc (%)	-0.031	0.122	-0.26	0.807	54.16
Déchets de céramique (%)	0.147	0.200	0.74	0.489	52.54
Sable de dune (%)*Sable de dune (%)	0.00473	0.00370	1.28	0.249	32.25
Caoutchouc (%)*Caoutchouc (%)	0.00243	0.00370	0.66	0.537	27.45
Déchets de céramique (%)*Déchets de céramique (%)	-0.0019	0.0103	-0.18	0.861	24.47
Sable de dune (%)*Caoutchouc (%)	-0.00459	0.00499	-0.92	0.393	29.07
Sable de dune (%)*Déchets de céramique (%)	-0.01022	0.00832	-1.23	0.265	27.71
Caoutchouc (%)*Déchets de céramique (%)	0.00080	0.00832	0.10	0.927	25.53

Model Summary

S	R-sq
0.370007	58.30%

Regression Equation

$$\begin{aligned}
 \text{Rt28} &= 2.54 + 0.026 \text{ SD} - 0.031 \text{ GC} + 0.147 \text{ DC} + 0.00473 \text{ SD*SD} \\
 (\text{MPa}) &+ 0.00243 \text{ GC*GC} \\
 &- 0.0019 \text{ DC*DC} - 0.00459 \text{ SD*GC} \\
 &- 0.01022 \text{ SD*DC} + 0.00080 \text{ GC*DC}
 \end{aligned}$$

III-5-3-2 Interprétation des résultats:

Il est clair que l'augmentation de pourcentage de sable de dune SD et de déchets de céramique DC se traduit par une augmentation de la résistance mécanique à la traction par flexion à 28 jours. Par contre, l'augmentation de pourcentage de granulats de caoutchouc GC se traduit par une réduction de la résistance à la flexion.

En plus, les interactions entre le sable de dune et les granulats de caoutchouc (SD*GC) et entre le sable de dune et de déchets de céramique (SD*DC) influent négativement 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 Figure III.17, 3.18 et 3.19.

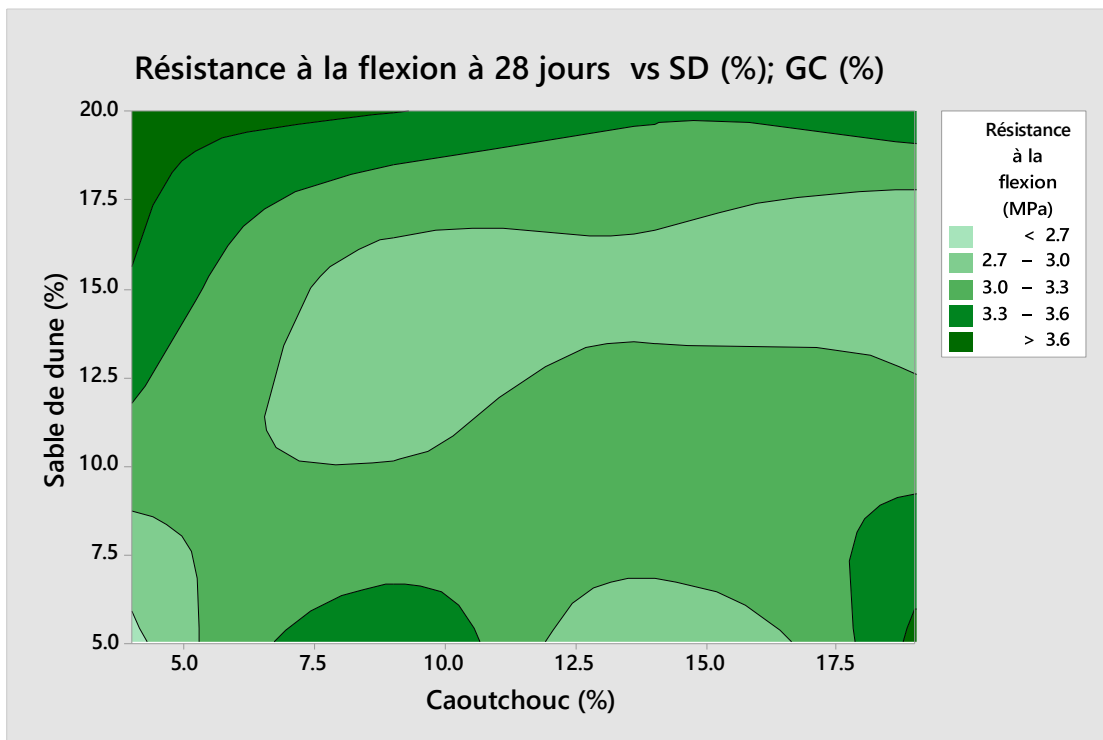


Figure III.18: La résistance à la flexion à 28 jours en fonction de pourcentage de sable de dune et de granulats de caoutchouc.

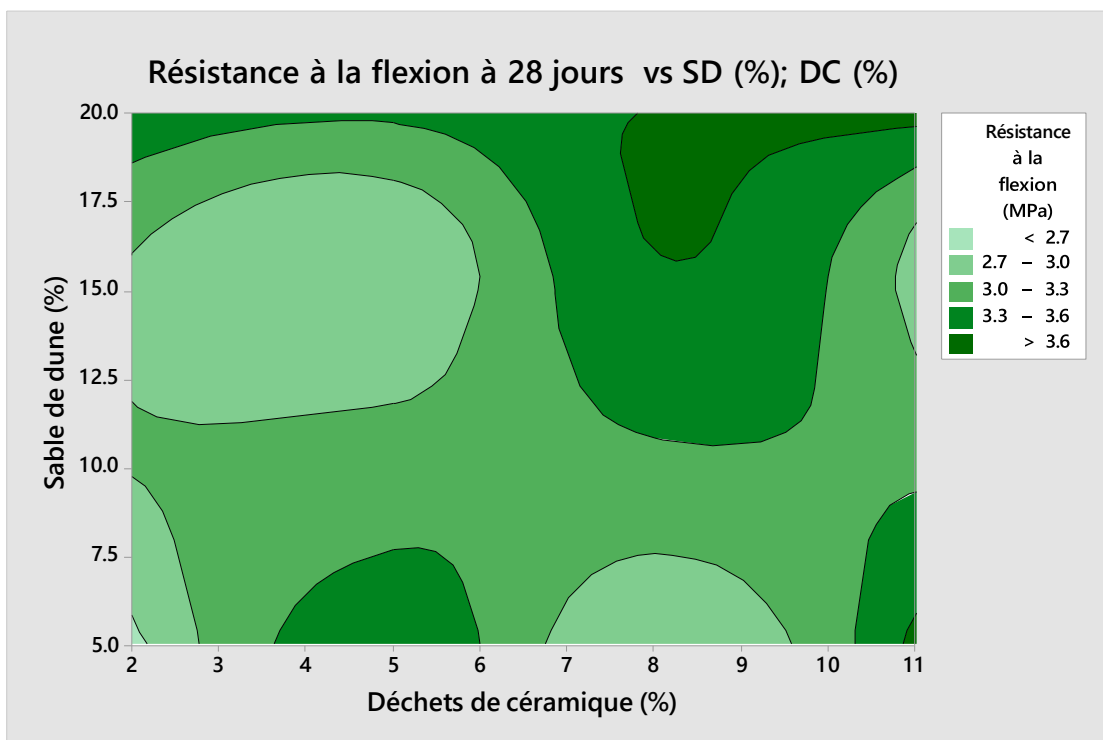


Figure III.20. La résistance à la flexion à 28 jours en fonction de pourcentage de sable de dune et de déchets de céramique.

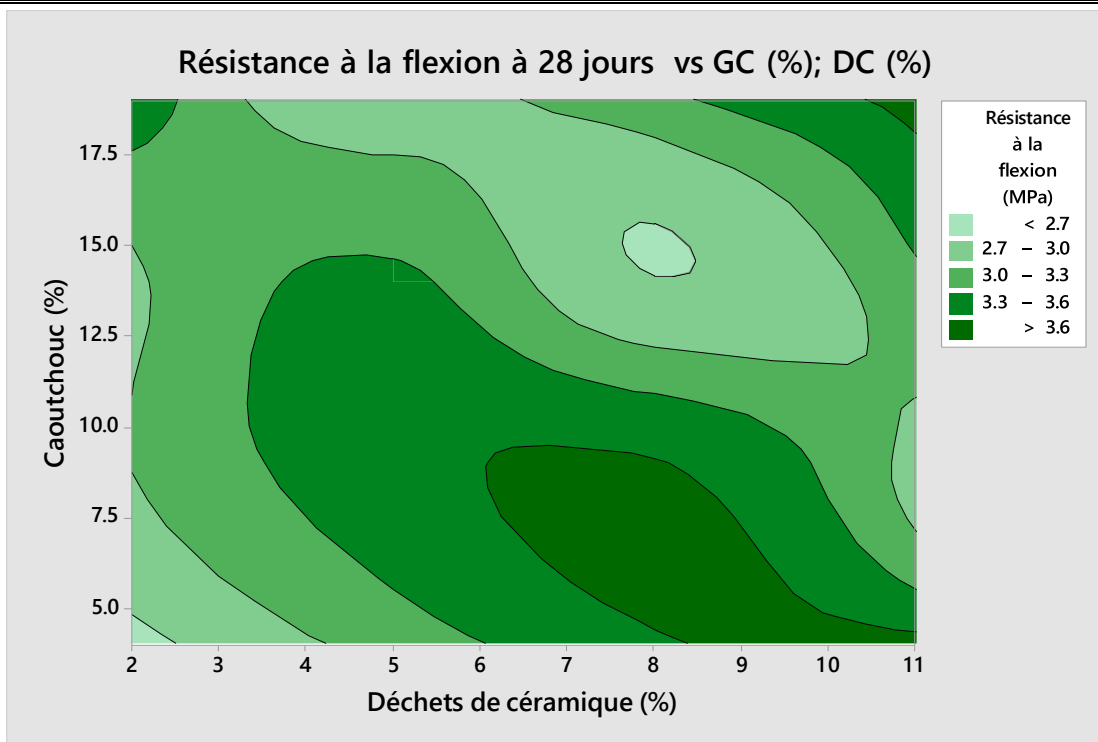


Figure III.21. La résistance à la flexion à 28 jours en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de déchets de céramique.

Ces figures montrent clairement que la résistance mécanique à la traction à 28 jours peut dépasser 3.6 MPa si le pourcentage de sable de dune SD varie entre 18.6 et 20% avec un pourcentage de granulats de caoutchouc GC entre 4 et 5.5% et un pourcentage de déchets de céramique DC variant entre 7.8 et 9.1%.

III-5-4 Vitesse de propagation d'ultrasons:

Tableau III.7 : Résultats des essais de la vitesse de propagation d'ultrasons.

N°	Désignation du mélange	Vitesse de propagation d'ultrasons (m/s)
01	SD5 GC4 DC2	3340.21
02	SD5 GC9 DC5	3447.17
03	SD5 GC14 DC8	3396.62
04	SD5 GC19 DC11	3255.29
05	SD10 GC4 DC5	3521.74
06	SD10 GC9 DC2	3465.66
07	SD10 GC14 DC11	3375.00
08	SD10 GC19 DC8	3239.40
9	SD15 GC4 DC8	3573.17
10	SD15 GC9 DC11	3514.71

11	SD15 GC14 DC2	3225.82
12	SD15 GC19 DC5	3256.08
13	SD20 GC4 DC11	3604.90
14	SD20 GC9 DC8	3500.55
15	SD20 GC14 DC5	3326.54
16	SD20 GC19 DC2	3329.92

III-5-4-1 Détermination de la résultat optimal pour chaque facteur (Ultrasons):

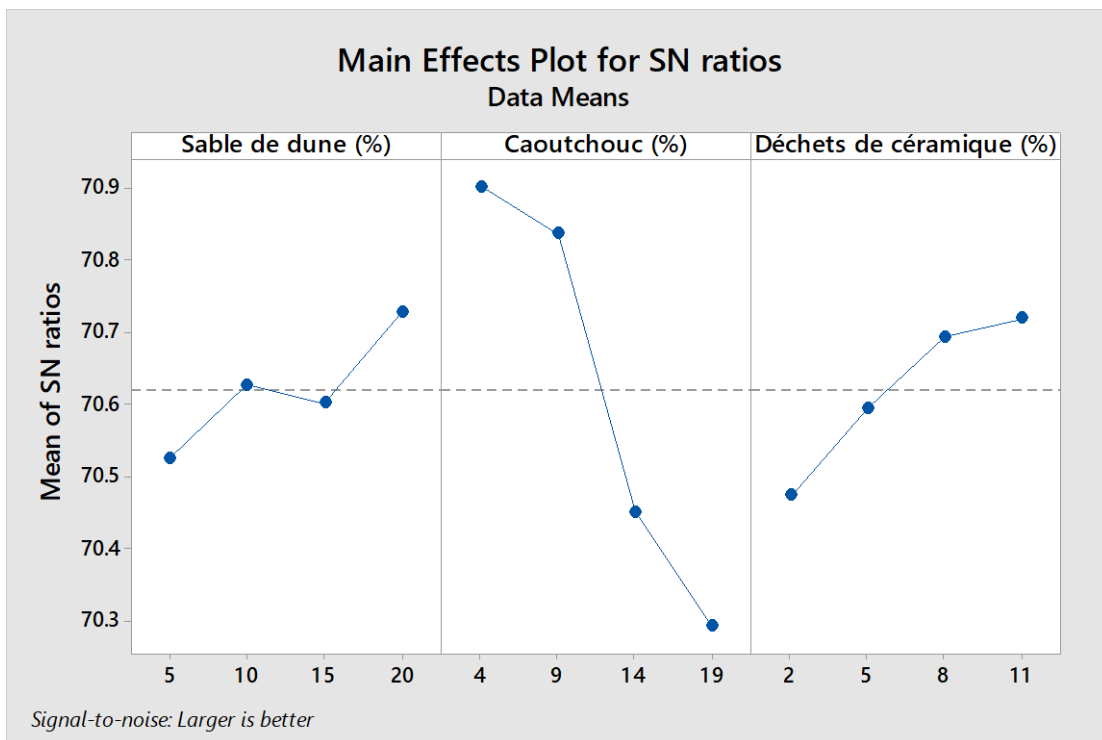


Figure III.22. Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios).

D'après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (*Signal to Noise Ratios*) représentés dans la Figure III.16, nous constatons que les résultats optimaux pour chaque facteur afin de donner les meilleurs résultats pour la vitesse de propagation d'ultrasons, sont les suivant: la teneur en sable de dune (20%), la teneur en caoutchouc (4%) et la teneur en déchets de céramique (11%).

III-5-4-2 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	3256	193	16.89	0.000	
Sable de dune (%)	4.0	23.0	0.17	0.867	56.78
Caoutchouc (%)	2.5	22.5	0.11	0.916	54.16
Déchets de céramique (%)	66.5	36.9	1.80	0.122	52.54
Sable de dune (%)*Sable de dune (%)	0.074	0.683	0.11	0.917	32.25
Caoutchouc (%)*Caoutchouc (%)	-0.328	0.683	-0.48	0.648	27.45
Déchets de céramique (%)*Déchets de céramique (%)	-1.04	1.90	-0.55	0.603	24.47
Sable de dune (%)*Caoutchouc (%)	-0.002	0.921	-0.00	0.998	29.07
Sable de dune (%)*Déchets de céramique (%)	-1.17	1.54	-0.76	0.476	27.71
Caoutchouc (%)*Déchets de céramique (%)	-2.38	1.54	-1.55	0.172	25.53

Model Summary

S	R-sq
68.3242	87.76%

Regression Equation

$$\begin{aligned} \text{Vitesse de propagation (m/s)} = & 3256 + 4.0 \text{ SD} + 2.5 \text{ GC} + 66.5 \text{ DC} + 0.074 \text{ SD*SD} \\ & - 0.328 \text{ GC*GC} \\ & - 1.04 \text{ DC*DC} - 0.002 \text{ SD*GC} - 1.17 \text{ SD*DC} - 2.38 \text{ GC*DC} \end{aligned}$$

III-5-4-3 Interprétation des résultats:

La remarque notée par les résultats de comparaison entre les coefficients du modèle qui sont représentées au-dessus montre que le coefficient de déchets de céramique DC est très élevé, ce qui montre l'influence très significative du pourcentage de déchets de céramique DC 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 Figure III.18, 3.19 et 3.20.

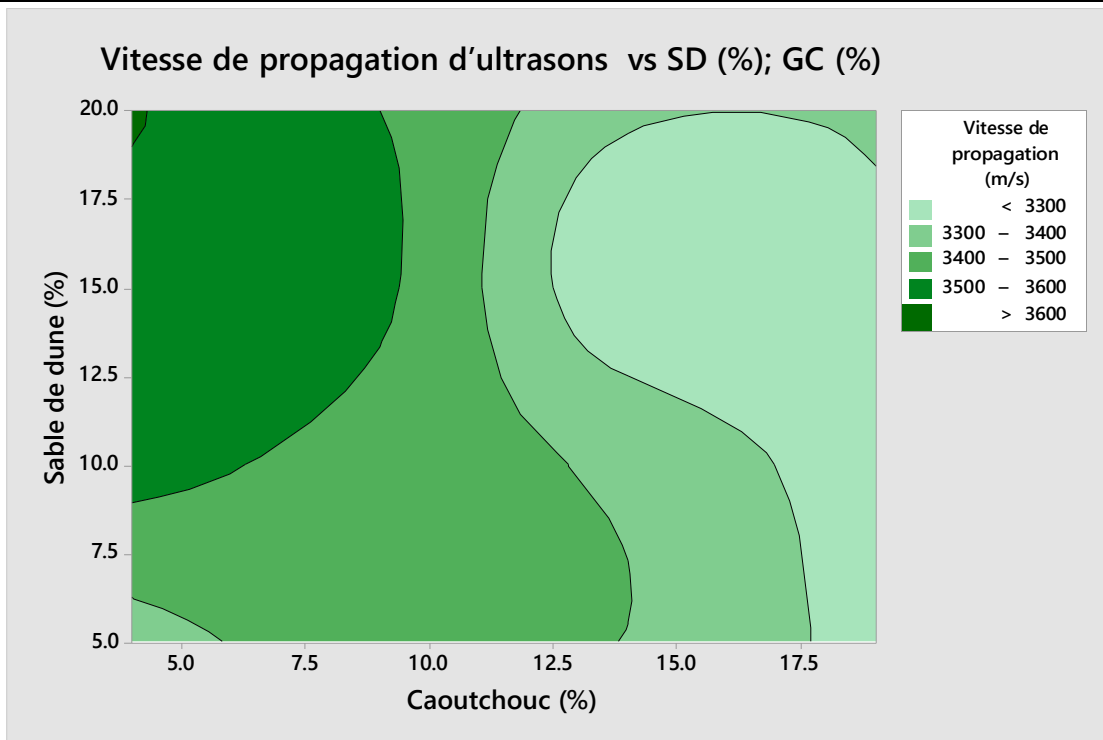


Figure III.23. : La vitesse de propagation d'ultrasons en fonction de pourcentage de sable de dune et de granulats de caoutchouc.

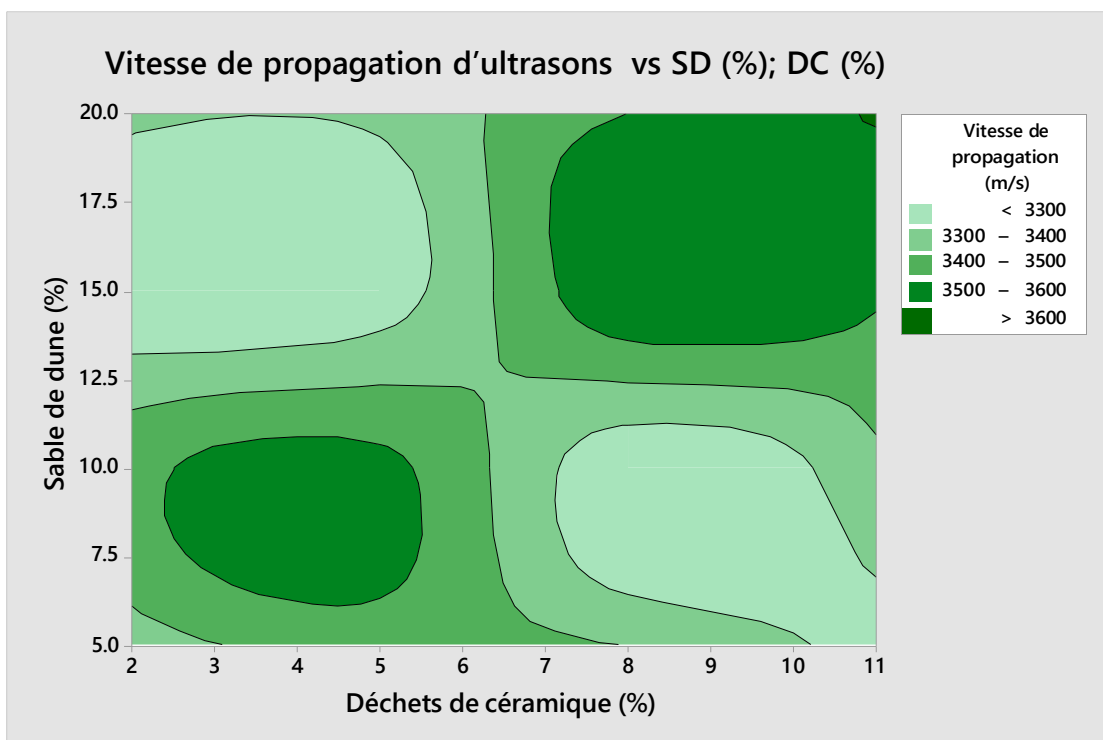


Figure III.24. : La vitesse de propagation d'ultrasons en fonction de pourcentage de sable de dune et de déchets de céramique.

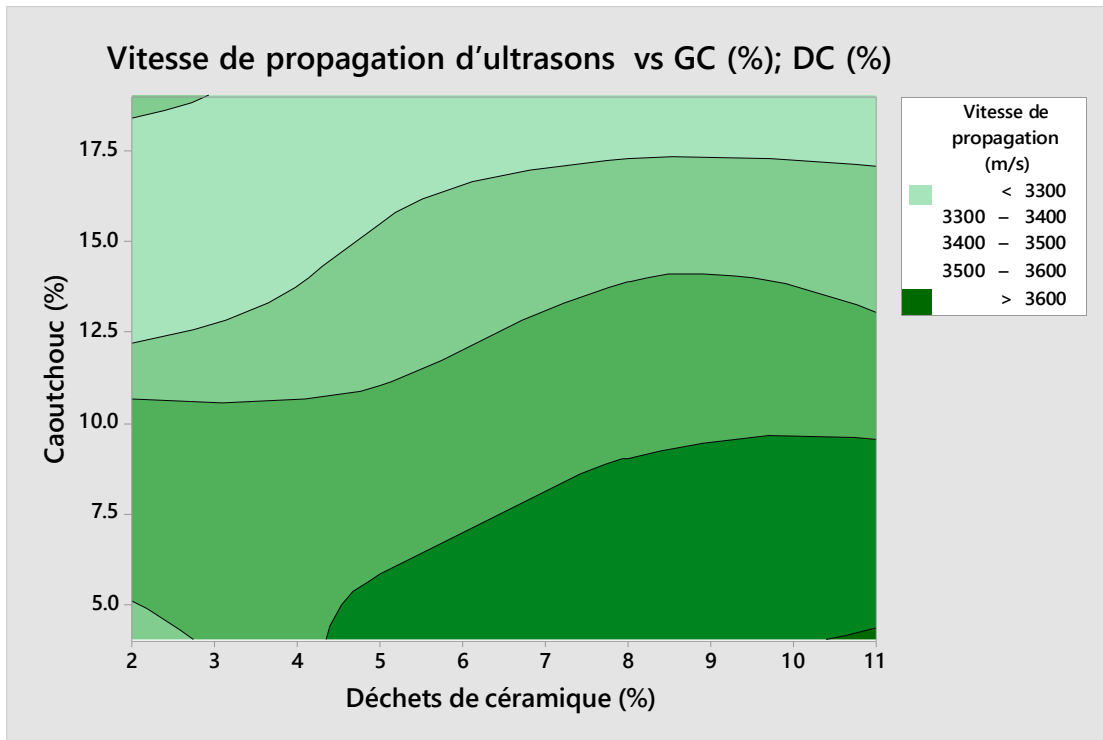


Figure III.25. La vitesse de propagation d'ultrasons en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de déchets de céramique.

Ces figures montrent clairement que La vitesse de propagation d'ultrasons peut dépasser 3600 m/s si le pourcentage de sable de dune SD varie entre 14.40 et 20% avec un pourcentage de granulats de caoutchouc GC entre 4 et 9% et un pourcentage de déchets de céramique DC variant entre 8 et 11%.

III-5-5 Absorption d'eau par immersion totale:

Tableau III.10 : Résultats des essais de l'absorption d'eau par immersion totale.

N°	Désignation du mélange	Absorption d'eau (%)
01	SD5 GC4 DC2	10.04
02	SD5 GC9 DC5	10.48
03	SD5 GC14 DC8	11.64
04	SD5 GC19 DC11	11.78
05	SD10 GC4 DC5	10.83
06	SD10 GC9 DC2	10.86
07	SD10 GC14 DC11	11.38
08	SD10 GC19 DC8	11.66

9	SD15 GC4 DC8	10.17
10	SD15 GC9 DC11	10.75
11	SD15 GC14 DC2	11.06
12	SD15 GC19 DC5	10.99
13	SD20 GC4 DC11	10.27
14	SD20 GC9 DC8	10.73
15	SD20 GC14 DC5	11.28
16	SD20 GC19 DC2	11.70

III-5-5-1 Détermination de la résultat optimal pour chaque facteur :

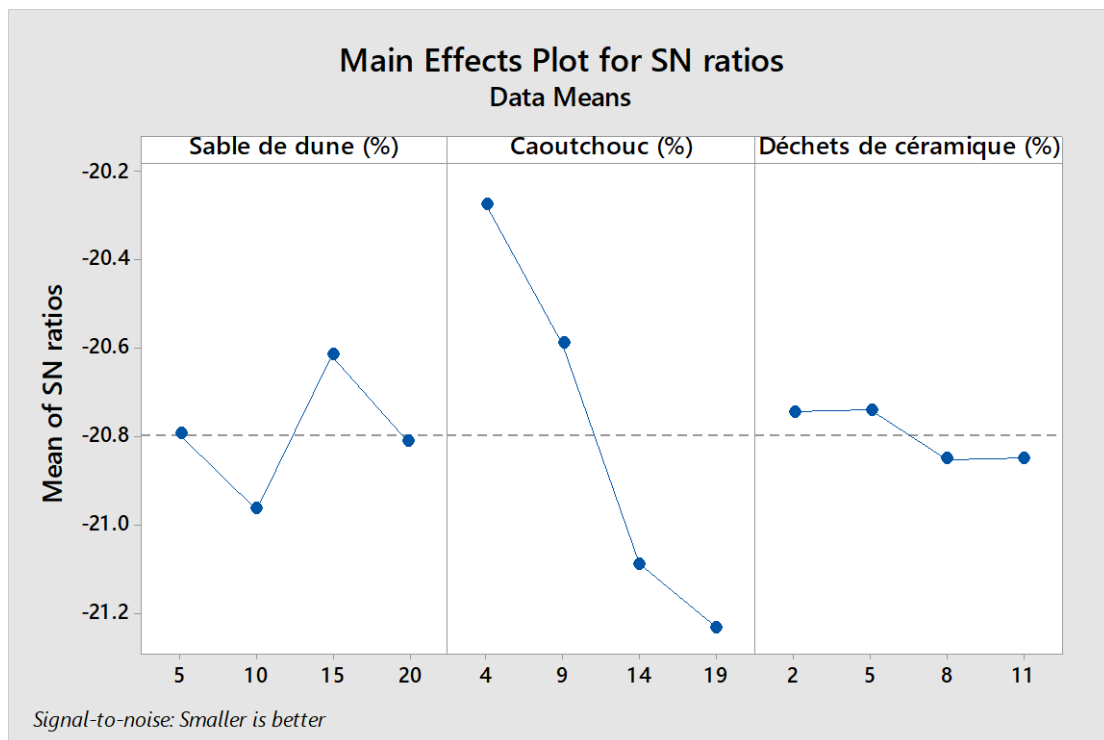


Figure III.25 Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios).

D'après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (*Signal to Noise Ratios*) représentés dans la Figure III.21, nous constatons que les résultats optimaux pour chaque facteur afin de donner les meilleurs résultats pour l'absorption d'eau par immersion totale, sont les suivant: la teneur en sable de dune (15%), la teneur en caoutchouc (4%) et la teneur en déchets de céramique (2%).

III-5-5-2 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	9.177	0.916	10.01	0.000	
Sable de dune (%)	0.084	0.109	0.77	0.470	56.78
Caoutchouc (%)	0.091	0.107	0.85	0.429	54.16
Déchets de céramique (%)	0.152	0.175	0.86	0.421	52.54
Sable de dune (%)*Sable de dune (%)	0.00055	0.00325	0.17	0.871	32.25
Caoutchouc (%)*Caoutchouc (%)	-0.00185	0.00325	-0.57	0.590	27.45
Déchets de céramique (%)*Déchets de céramique (%)	0.00042	0.00902	0.05	0.965	24.47
Sable de dune (%)*Caoutchouc (%)	-0.00106	0.00438	-0.24	0.816	29.07
Sable de dune (%)*Déchets de céramique (%)	-0.01364	0.00730	-1.87	0.111	27.71
Caoutchouc (%)*Déchets de céramique (%)	0.00206	0.00730	0.28	0.787	25.53

Model Summary

S	R-sq
0.324798	86.70%

Regression Equation

$$\begin{aligned} \text{Absorption d'eau (\%)} = & 9.177 + 0.084 \text{ SD} + 0.091 \text{ GC} + 0.152 \text{ DC} + 0.00055 \text{ SD*SD} \\ & - 0.00185 \text{ GC*GC} + 0.00042 \text{ DC*DC} - 0.00106 \text{ SD*GC} \\ & - 0.01364 \text{ SD*DC} + 0.00206 \text{ GC*DC} \end{aligned}$$

III-5-5-3 Interprétation des résultats:

L'augmentant de sable de dune SD, granulats de caoutchouc GC et de déchets de céramique DC entraîne une augmentation de l'absorption d'eau par immersion totale.

En plus, les interactions entre le sable de dune et de granulats de caoutchouc (SD*GC) et entre le sable de dune et de déchets de céramique (SD*DC) influent négativement sur l'absorption d'eau par immersion totale. Par contre, l'interaction entre les granulats de caoutchouc et de déchets de céramique (GC*DC) influence positivement sur l'absorption d'eau.

Les courbes obtenues et qui peuvent prédire l'absorption d'eau par immersion totale à 28 jours à partir les facteurs étudiés sont illustrées par les Figure III.22, 3.23 et 3.24.

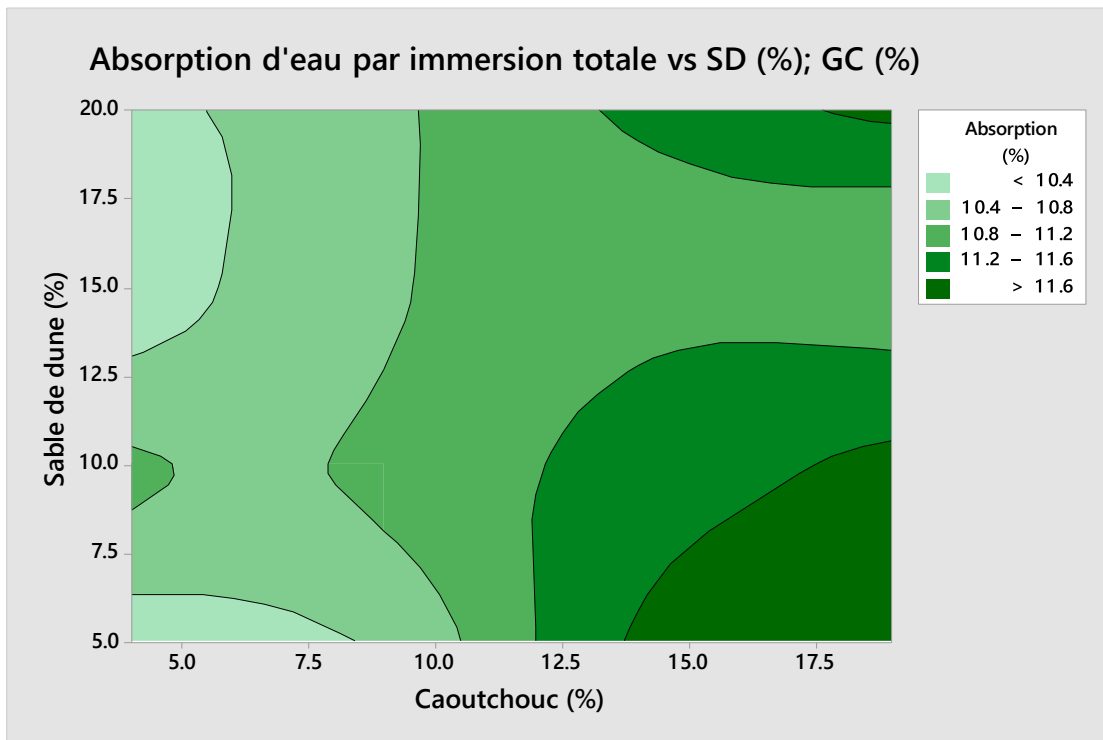


Figure III.26. L'absorption d'eau par immersion totale en fonction de pourcentage de sable de dune et de granulats de caoutchouc.

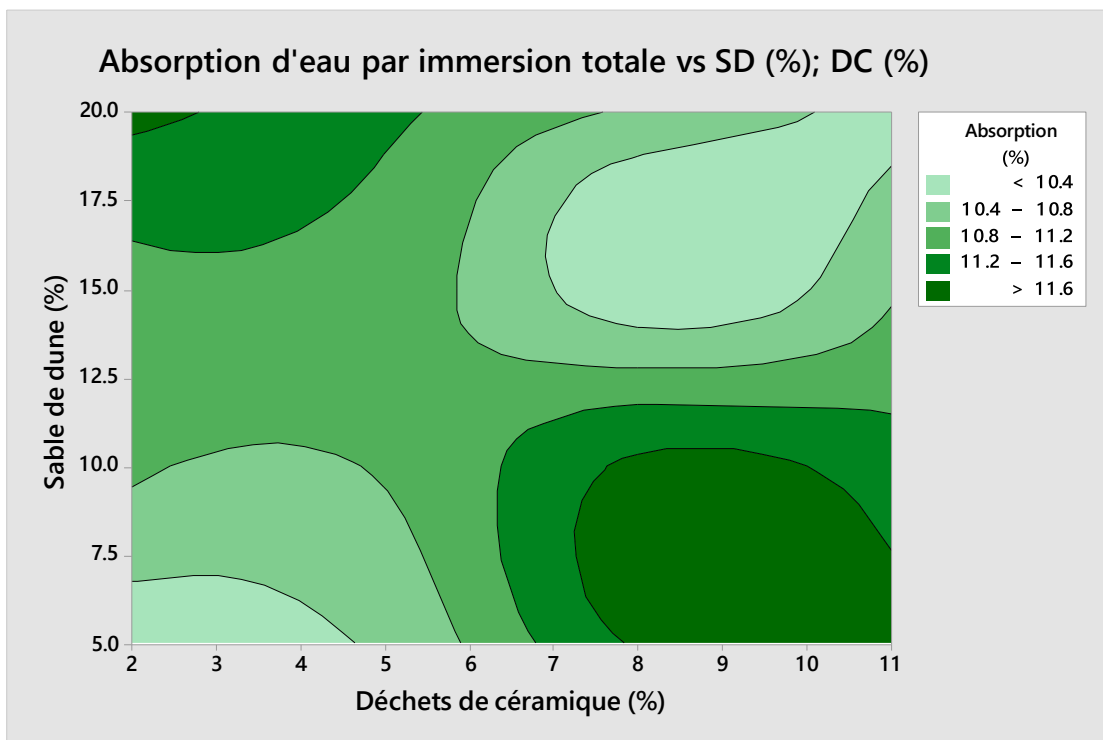


Figure III.27. L'absorption d'eau par immersion totale en fonction de pourcentage de sable de dune et de déchets de céramique.

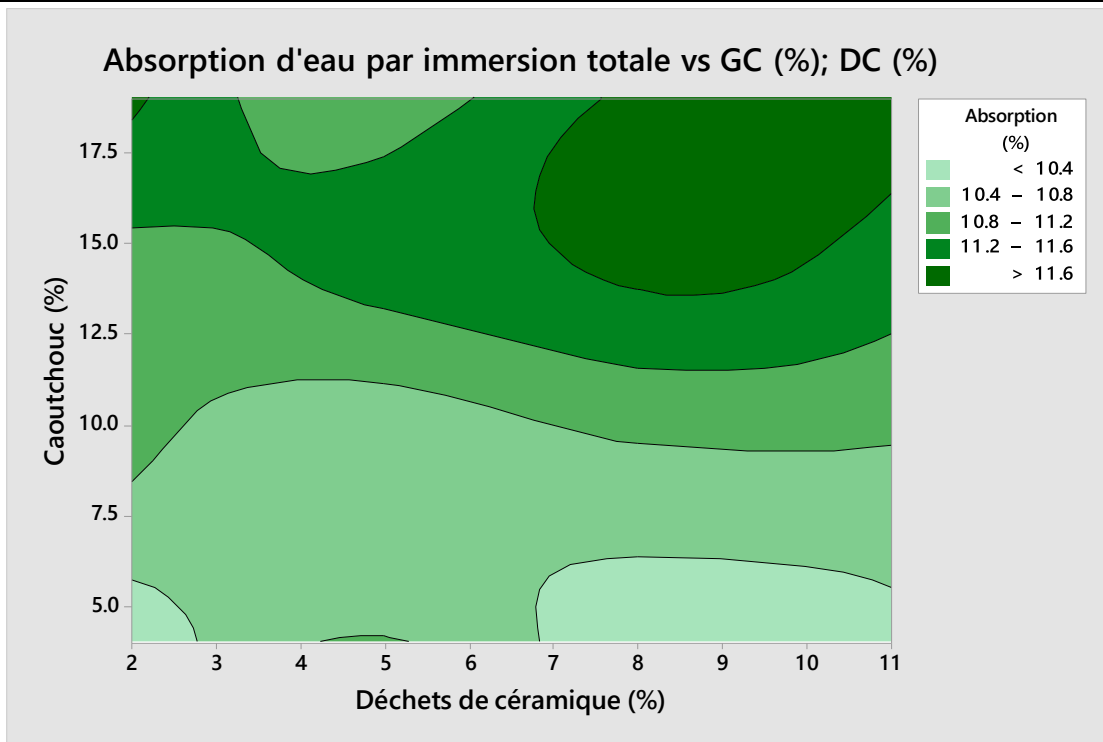


Figure III.28. L'absorption d'eau par immersion totale en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de déchets de céramique.

Ces figures montrent clairement que l'absorption d'eau par immersion totale peut être moins que 10.4 % si le pourcentage de sable de dune SD varie entre 14.5 et 18% avec un pourcentage de granulats de caoutchouc GC entre 4 et 5.5% et un pourcentage de déchets de céramique DC variant entre 7 et 9.8%.

Conclusion générale

Conclusion Générale

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 pourcentage de sable de dune (SD), le pourcentage de granulats de caoutchouc (GC) et le pourcentage de déchets de céramique (DC), 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, la vitesse de propagation d'ultrasons, et l'essais de l'absorption d'eau par immersion totale 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:

$$\begin{aligned}\text{Etalement (cm)} &= 13.58 + 0.266 \text{ SD} + 0.164 \text{ GC} - 0.276 \text{ DC} - 0.00100 \text{ SD}^2 \\ &\quad - 0.00150 \text{ GC}^2 + 0.0306 \text{ DC}^2 - 0.00509 \text{ SD*GC} \\ &\quad - 0.02212 \text{ SD*DC} - 0.00985 \text{ GC*DC} \\ \text{Masse vol. à l'état frais (kg/m}^3\text{)} &= 2031 + 6.7 \text{ SD} - 9.2 \text{ GC} + 5.2 \text{ DC} - 0.788 \text{ SD}^2 + 0.462 \text{ GC}^2 \\ &\quad + 1.08 \text{ DC}^2 + 0.311 \text{ SD*GC} + 0.62 \text{ SD*DC} - 2.50 \text{ GC*DC} \\ \text{Masse vol. à l'état durci (kg/m}^3\text{)} &= 1966 + 6.5 \text{ SD} - 3.4 \text{ GC} + 1.8 \text{ DC} - 0.018 \text{ SD*SD} \\ &\quad - 0.180 \text{ GC*GC} \\ &\quad - 0.76 \text{ DC*DC} - 0.181 \text{ SD*GC} - 0.269 \text{ SD*DC} \\ &\quad + 0.338 \text{ GC*DC} \\ \text{Rc 28 (MPa)} &= 25.57 - 0.516 \text{ SD} - 0.370 \text{ GC} + 0.275 \text{ DC} + 0.0173 \text{ SD*SD} \\ &\quad + 0.0166 \text{ GC*GC} + 0.0147 \text{ DC*DC} - 0.0055 \text{ SD*GC} \\ &\quad + 0.0200 \text{ SD*DC} - 0.0414 \text{ GC*DC} \\ \text{Rt28 (MPa)} &= 2.54 + 0.026 \text{ SD} - 0.031 \text{ GC} + 0.147 \text{ DC} + 0.00473 \text{ SD*SD} \\ &\quad + 0.00243 \text{ GC*GC} - 0.0019 \text{ DC*DC} - 0.00459 \text{ SD*GC} \\ &\quad - 0.01022 \text{ SD*DC} + 0.00080 \text{ GC*DC}\end{aligned}$$

Conclusion générale

Vitesse de propagation (m/s)	=	3256	+ 4.0 SD	+ 2.5 GC	+ 66.5 DC	+ 0.074 SD*SD
			- 0.328 GC*GC		- 1.04 DC*DC	- 0.002 SD*GC
					- 1.17 SD*DC	- 2.38 GC*DC
Absorption d'eau (%)	=	9.177	+ 0.084 SD	+ 0.091 GC	+ 0.152 DC	
			+ 0.00055 SD*SD			
			- 0.00185 GC*GC	+ 0.00042 DC*DC	- 0.00106 SD*GC	
			- 0.01364 SD*DC	+ 0.00206 GC*DC		

Et les résultats optimaux sont les suivants:

- Les meilleurs résultats pour la maniabilité des mortiers sont les suivant: la teneur en sable de dune (20%), la teneur en caoutchouc (19%) et la teneur en déchets de céramique (2%).
- Les meilleurs résultats pour la masse volumique à l'état frais sont les suivant: la teneur en sable de dune (10%), la teneur en caoutchouc (4%) et la teneur en déchets de céramique (2%).
- Les meilleurs résultats pour la masse volumique de à l'état durci sont les suivant: la teneur en sable de dune (15%), la teneur en caoutchouc (4%) et la teneur en déchets de céramique (2%).
- Les meilleurs résultats pour la résistance mécanique à la compression sont les suivant: la teneur en sable de dune (20%), la teneur en caoutchouc (4%) et la teneur en déchets de céramique (11%).
- Les meilleurs résultats pour la résistance mécanique à la traction par flexion à 28 jours sont les suivant: la teneur en sable de dune (20%), la teneur en caoutchouc (19%) et la teneur en déchets de céramique (11%).
- Les meilleurs résultats pour la vitesse de propagation d'ultrasons, sont les suivant: la teneur en sable de dune (20%), la teneur en caoutchouc (4%) et la teneur en déchets de céramique (11%).
- Les meilleurs résultats pour l'absorption d'eau par immersion totale, sont les suivant: la teneur en sable de dune (15%), la teneur en caoutchouc (4%) et la teneur en déchets de céramique (2%).

Bibliographie

Références bibliographique

CHAPITRE I

- [01] : Lac, et al. "Etude de l'effet de l'ajout de granulats de caoutchouc recyclés de pneus usagés sur le comportement de mortier de ciment." (2021).
- [02] : Zerrouki .effet de déchet de brique rouge sur la stabilisation des brique de terre crue mémoire de master en génie civil . université mohamed Khider - Biskra .2019.p.p 27_28.
- [03] : Aissa Salem. (2016). Effet de l'activation mécanique de l'argile cuite (déchets de briques) sur le comportement mécanique du mortier. Mémoire de master, université Mohamed Boudiaf M'sila, 112p.
- [04] : BEN DHIA. M.H (1998): Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière en milieu saharien, bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, P 33- 42.
- [05] : Khangaoui .S. (2013): Valorisation du sable de dunes en couche de roulement sable bitume, thèse de Magister en génie civil, Géo - Matériaux.
- [06] : GUERMITI. L(2013): Contribution a l'amélioration de certaines caractéristiques du béton de structure à base de Sable de dune corrigé et renforcé par des fibres Métalliques, Mémoire de MAGISTER, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [08] : Gueddouda M.K (2011): Comportement hydromécanique des sols compactés, application à la conception d'une barrière ouvragée sable de dune bentonite. Thèse de Doctorat, Université ABOUBAKR Belkaid - TLEMCEM.
- [09] : AZZOUZ. H. (2009): Etude des bétons à base des sables de dune, thème de Magister, université Mohamed Khider Biskra.
- [10] : LCPC, (1994): Guide technique, Conception et dimensionnement des structures de chaussées; LCPC-SETRA.
- [11] : OULD SIDA.C., HAVARD H.,VALIN. C. (1995): Terrassements routiers dans les sables de dunes de Mauritanie, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 199, pp 27-34.
- [12] : Pillet, Maurice Introduction aux plans d'expériences par la méthode Taguchi. Les Editions d'organisation, 1992.

[13] : Baron, Jacques. Les bétons-bases et données pour leur formulation. 1996.

[14] : Sado, gilles, and marie-christine sado. Les plans d'experiences: de l'experimentation a l'assurance qualite. Afnor, 2000.

[15] : Hacene, SMA Boukli. Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen. Diss. Thèse de Doctorat, Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen, Algérie, 2010.

[16] : Taguchi, T. "Questions about Nishioka's theory on 700 years climatic change in Japan." Journal of the Japanese Society of Snow and Ice 12.2 (1950); 37-4

CHAPITRE II

[17] : NF P18-554 Granulats. Mesures des masses volumiques, porosité, coefficient d'absorption et teneur en eau des granulats. (D supérieur ou égal à 4 mm). Homologuée décembre 1979.

[18] : NF P 18-301. Normes française "Granulats" Granulats naturels pour bétons hydrauliques. Homologuée décembre 1983.

[19] : NF P 18-560. Norme française « Analyse granulométrique ». septembre 1990.

[20] : NF P 18-598. Normes française « Equivalent de sable». octobre 1991.

[21] :NA 442. Caractérisation physico-mécanique d'un liant hydraulique à base de poudre de verre. Liant hydraulique, Poudre de verre, Ajouts cimentaires, SAYOUD, ACHRAF. Comportement mécanique, Réaction pouzzolanique. Publisher: Université 8Mai 1945 – Guelma

[22] : NF EN 196-1. Méthodes d'essais des ciments, Partie 1: détermination des résistances mécaniques Indice de classement. Avril .2006.

[23] : Contribution a l'étude de la caractérisation du béton renforcé par des déchets de verres. BOUAKBA, Mustapha. MEFATIH, Azzeddine. ciment. béton. poudre de verre. gravier. sable. Université Kasdi Merbah Ouargla. 2022.

[24] : Cuong Ho, A. (2010). Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés : application aux éléments de grande surface (Doctoral dissertation, Toulouse, INSA).