

République algérienne démocratique et populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université el-shahid Hama Lakhdar – El oued

Faculté de technologie

Département d'hydraulique de génie civil



Mémoire de fin d'étude :

Présenté par :

Azeb Ahmed Taha

Ben Amara Djaafar

Bouteraa Brahim Ahmed Saber

Messaoudi Ayoub

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

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

THÈME

**Caractérisation d'un béton de sable
contenant de déchet pneumatique**

Encadreur : Dr. Mohamed Zohaïr KAAB

Université d'El oued

Co-encadreur : Dr. Hamad KHELAIFA

Université d'El oued

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

*Après avoir rendu grâce à Dieu le tout puissant et le
miséricordieux.*

*Nous tenons à remercions vivement notre promoteur Dr. Mohamed
Zohair KAAB Et Dr. Hamad KHELIFA. pour l'aide précieuse
qu'il nous a offert dans l'élaboration de ce travail. Nous remercions
tous les membres du jury d'avoir accepté d'être les rapporteurs de notre
memoire.*

*Nous tenons à remercier sincèrement tout ce qui, de près ou de loin
ont participé à la rédaction de ce document il s'agit plus
particulièrement :*

*Responsables de laboratoire des travaux publics et bâtiment
« Nizolab »: *Saïd et Nizar* et à tous les membres de laboratoire qui
ont participé indirectement ou directement à ce flux de recherche et à
son objectif.*

*Enfin, on n'oserait oublier de remercier chers parents et nos
amies .*

Dédicaces

*Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU ;
De m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce
modeste travail.*

*Je tiens à dédier cet humble travail :
A ma tendre mère Mabrouka et mon très cher père Lâïd ,
Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.*

*A ma sœur et mes frères ;
A mes binômes :Djaafar ; Brahim et Ayoub*

*A mes meilleurs amis :
Haitham ; Abdelmalek ; Ali ; Maamar ; Ammar ;
Djabbari ; Abdelsattar ; Adel et Khalifa
A Tous mes amis d'enfance et du long parcours scolaire et
universitaire.*

A Toute ma famille

A vous, cher lecteur

Signé : Azeb ahmed taha

Dédicaces

*Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU ;
De m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce
modeste travail.*

*Je tiens à dédier cet humble travail :
A ma tendre mère Zainab et mon très cher père Boubakar,
Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.*

*A mes sœurs et mes frères ;
A mes binômes : Taha ; Brahim et Ayoub*

*A mes meilleurs amis :
Yacine ; Oussama ; Youssef ; ahmed ; Thabet ; Bachir ;
Ali ; Al-arousi et Hammouda
A Tous mes amis d'enfance et du long parcours scolaire et
universitaire.*

A Toute ma famille

*A vous, cher lecteur
Signé : Ben amara djaafar*

Dédicaces

Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU ;

*De m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce
modeste travail.*

Je tiens à dédier cet humble travail :

A ma tendre mère Safia et mon très cher père Belgacem ,

Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

*A mes sœurs en particuliere Warda et mes frères surtout
Nadjib;*

A mes binômes : Taha ; Djaafar et Ayoub

A mes meilleurs amis :

Ali et Ahmed

*A Tous mes amis d'enfance et du long parcours scolaire et
universitaire.*

A Toute ma famille

A vous, cher lecteur

Signé : Bouteraa brahim ahmed saber

Dédicaces

Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU ;

*De m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce
modeste travail.*

Je tiens à dédier cet humble travail :

*A ma tendre mère Aïcha et mon très cher père Abdelkader
et ma chère épouse ,*

A mes sœurs et mes frères ;

Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A mes binômes : taha ; djaafar et brahim

A mes meilleurs amis :

Ismail ; Abdelkader ; Al-Sayeh ; Youssef et Ali

*A Tous mes amis d'enfance et du long parcours scolaire et
universitaire.*

A chaque famille spéciale messaoudi

A vous, cher lecteur

*Signé : **Messaoudi ayoub***

Résumé

Dans de cadre de détermination à l'aide de la méthode de Taguchi, un ensemble de modèles prédictifs en fonction de la proportion des constituants des bétons formulés, notre étude comporte deux phases essentielles :

Une première phase dont l'objectif est la détermination des principales caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux utilisés, le choix de la méthode de formulation et la réalisation des différentes gâchées dans le domaine de notre étude.

La deuxième phase dont l'objectif est l'établissement des modèles mathématiques qui permettent de prédire la maniabilité du béton de sable ainsi que sa résistance à 28 jours tout en mettant en évidence les corrélations qui existent entre les différents constituants grâce au logiciel MINITAB 18.

Les résultats obtenus ont montré que les rapports E/C et les taux de l'incorporation des granulats de caoutchouc et les sables de dunes sont les principaux facteurs régissant le comportement rhéologique et mécanique du béton de sable.

Mots clés : Béton de sable, Granulats de caoutchouc, Sables de dune, Méthode de Taguchi.

ABSTRACT

Within the framework of determination using the Taguchi method, a set of predictive models according to the proportion of the constituents of the formulated concretes, our study comprises two essential phases:

A first phase whose objective is the determination of the main physical and mechanical characteristics of the materials used the choice of the method of formulation and the realization of the different waste in the field of our study.

The second phase, which aims to establish mathematical models to predict the workability sand concrete and its resistance to 28 days while highlighting the correlations that exist between the different components with MINITAB 18.

The results obtained showed that the W/C ratios and the incorporation rates of rubber aggregates and dune sands are the main factors governing the rheological and mechanical behavior of the sand concrete.

Keywords: Sand concrete, Rubber aggregates, Dune sand, Taguchi method.

ملخص

في إطار التحديد باستخدام طريقة تاجوشي ، مجموعة من النماذج التنبؤية وفقاً لنسبة مكونات الخرسانة المصاغة ، تشتمل دراستنا على مرحلتين أساسيتين:

المرحلة الأولى مع التقرير الموضوعي عن الخصائص الفيزيائية والميكانيكية الرئيسية عن المواد المستخدمة، واختيار طريقة صياغة وتنفيذ مختلف الخلطات في مجال دراستنا.

المرحلة الثانية، والتي تهدف إلى إنشاء النماذج الرياضية التي تتنبأ قابلية الخرسانة ومقاومتها إلى 28 يوماً مع تسليط الضوء على الترابط بين المكونات المختلفة من خلال برنامج MINITAB 18.

أظهرت النتائج المتحصل عليها أن نسب الماء /الاسمنت (E/C) ومعدلات دمج حبيبات المطاط ورمال الكثبان الرملية هي العوامل الرئيسية التي تحكم السلوك الريولوجي والميكانيكي للخرسانة الرملية.

الكلمات المفتاحية : خرسانة الرمل، حبيبات المطاط ، رمل الكثبان ، طريقة تاجوشي.

Liste des figures

Liste des Figures

Liste des Figures

Chapitre I : Synthèse Bibliographique

Figure I.1. Effet du dosage et de la finesse de l'adition sur la résistance.....	06
Figure I.2. Effet de la granularité sur la résistance.....	07
Figure I.3. Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines	09
Figure I.4. Influence de la dimension D sur la porosité minimale du béton pour deux taille de sable.....	10
Figure I.5. Effet des granulats de caoutchouc sur l'affaissement.....	13
Figure I.6. Effet du taux de substitution de GCR sur la résistance en compression de mortiers de ciment renforcé par des fibres	14
Figure I.7. Les risques de feu dans les décharges des pneus usagés	16
Figure I.8. Piste d'athlétisme en granulats de pneu usagés recyclés	16
Figure I.9. Poste de nappe de pneus projet pilote-bousmail.projet	18
Figure I.10. Ouvrage végétalisé route de bousmail	18
Figure I.11. Sable de dune	19
Figure I.12. Méthode traditionnelle d'expérimentation et courbe de réponse	22
Figure I.13. Maillage du domaine expérimentale et surface de réponse.....	23
Figure I.14. Domaine expérimentale d'un plan factoriel complet 2^3	25
Figure I.15. Triangle de féret , 1892	26
Figure I.16. Points expérimentaux pour un plan de mélange à trois constituants....	26
Figure I.17: Organigramme général de traitement des plans d'expériences.....	27

Chapitre II : procédures expérimentales

Figure II.1. Sable de dune el oued.....	30
Figure II.2. Sable Djamaa.....	30
Figure II.3. Schémas de mesure d'équivalent de sable.....	33
Figure II.4. Ciment utilisé.	35
Figure II.5. Granulats de caoutchouc (0-4mm.....	37
Figure II.6. Courbes granulométriques des sables et des granulats de caoutchouc.....	37
Figure II.7. Pesage des composants du béton	40
Figure II.8. Moule ($4*4*16$) cm^3	41
Figure II.9. Lubrification des moules.....	41
Figure II.10. Remplissage à moitié et vibration.....	42

Liste des Figures

Figure II.11. Remplissage total et vibration	42
Figure II.12. Dernière vibration et rasage.....	43
Figure II.13. Dispositif de mesure d'affaissement au cône d'Abrams.....	43
Figure II.14 (a ,b) : L'essai d'affaissement au cône d'Abrams (avant et après) le démoulage.....	44
Figure II.15. Mise à l'étuve des éprouvettes à une température de 105°.	45
Figure II.16. Essai de traction par flexion 3 points sur les éprouvettes (4x4x16) cm ³	46
Figure II.17. Essai de compression sur les éprouvettes (4x4x16) cm ³	47
Figure II.18 Mesure de la vitesse de propagation de sons sur des éprouvettes (4x4x16) cm ³	47

Chapitre III caractérisation d'un béton de sable contenant des déchets pneumatiques

Figure III .1: Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios).....	51
Figure III .2: la masse volumique à l'état frais en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et du rapport E/C.....	53
Figure III .3: la masse volumique à l'état frais en fonction de pourcentage de sable de dune et du rapport E/C.....	54
Figure III .4: la masse volumique à l'état frais en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de pourcentage de sable dune.....	54
Figure III .5: Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios).....	55
Figure III .6: La résistance mécanique à la compression à 28 jours en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et du rapport E/C.....	57
Figure III .7: La résistance mécanique à la compression à 28 jours en fonction de pourcentage de sable de dune et du rapport E/C.....	57
Figure III .8: La résistance mécanique à la compression à 28 jours en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de pourcentage de sable dune.....	58
Figure III .9: Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios).....	59
Figure III .10: La résistance mécanique à la traction à 28 jours en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et du rapport E/C.....	60
FigureIII .11: La résistance mécanique à la traction à 28 jours en fonction de pourcentage de sable de dune et du rapport E/C.....	61

Liste des Figures

Figure III.12: La résistance mécanique à la traction à 28 jours en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de pourcentage de sable dune.....	61
Figure III.13: Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios).....	62
Figure III.14: La vitesse de propagation d’ultrasons en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et du rapport E/C.....	64
Figure III.15: La vitesse de propagation d’ultrasons en fonction de pourcentage de sable de dune et du rapport E/C.....	64
Figure III.16: La vitesse de propagation d’ultrasons en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de pourcentage de sable dune.....	65

Liste des tableaux

Liste des Tableaux

Chapitre I : Synthèse Bibliographique

Tableau I.1. Composition chimique de pneu	15
--	----

Chapitre II : procédures expérimentales

Tableau II.1. Caractéristiques physiques des sables.....	30
Tableau II.2 Préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les bétons.....	34
Tableau II.3. Résistance à la compression (NA 234)	35
Tableau II.4. Analyses chimiques (NA 5042)	35
Tableau II.5. Composition minéralogique du ciment (CLINKER)	36
Tableau II.6. Caractéristiques physiques du ciment MATINE	36
Tableau II.7. Propriétés physiques des granulats de caoutchouc utilisés	37
Tableau II.8. Composition des bétons de sable utilisés.....	39
Tableau II.9. Classes de consistance du mortier.....	44

Chapitre III caractérisation d'un béton de sable contenant des déchets pneumatiques

Tableau III.1 : Les facteurs et les niveaux ciblés.....	48
Tableau III.2 : La matrice expérimentale des effets selon la méthode Taguchi.....	50
Tableau III.3 : Résultats des essais de la masse volumique à l'état frais.....	51
Tableau III.4 : Résultats des essais de la résistance mécanique à la compression.....	55
Tableau III.5 : Résultats des essais de la résistance mécanique à la traction par flexion....	58
Tableau III.6 : Résultats des essais de la vitesse de propagation d'ultrasons.....	62

Table des matières

Table des matières

Table des matières

Résumé	
ABSTRACT	
ملخص.....	
Introduction générale.....	1
 Chapitre I Synthèse Bibliographique	
I.1.Introduction:	3
I.2.Origines des bétons de sable :	3
I.2.1.DEFINITION :	4
I.2.2.LES COMPOSANTS DU BETON DE SABLE:	4
A). SABLES :	4
B). LES CIMENTS:	4
C). L'EAU:	5
I.2.3.PROPRIETES DES BETONS DE SABLE :	5
A). RESISTANCE ET MANIABILITE :	5
B). GRANULOMETRIE -RESISTANCE :	6
C). DURABILITE:	7
I.3 Formulation des bétons de sable:	7
I.3.1. METHODES THEORIQUE POUR LA FORMULATION DES BETONS DE SABLE:	8
I.3.1.1. LA COMPACITE ET LES METHODES DE FORMULATIONS DES BETONS:	8
I.3.1.2. ESTIMATION DU DOSAGE EN FINES D'UN BETON DE SABLE:	8
I.3.1.3 POROSITE ET DOSAGE EN EAU D'UN BETON DE SABLE :	9
I.3.1.4 ESTIMATION DU DOSAGE EN SABLE :	11
I.3.2 METHODE EXPERIMENTALE DE FORMULATION:	11
I.3.2.1 PRESENTATION GENERALE DE LA METHODE EXPERIMENTALE:	11
I.3.2.2 LES DIFFERENTES ETAPES DE LA FORMULATION	11
I.4. Les mortier de granulats de caoutchoucs :	12
I.4.1. GENERALITES SUR LES CAOUTCHOUCS :	12
I.4.2.LES CARACTERISTIQUES D'UN MORTIER DE CIMENT AVEC CAOUTCHOUC :	12
I.4.3. LES MORTIERS CAOUTCHOUC PLASTIQUES :	12
I.4.3.1. LES MORTIERS PLASTIQUES.....	12
A). L'OUVRABILITE	12
I.4.3.2.MORTIER DURCI.....	13
A). MASSE VOOLUMIQUE	13

Table des matières

B). RESISTANCE EN COMPRESSION.....	13
I.5. Les pneumatiques usagés :	14
I.5.1. LES PNEUS USAGES REUTILISABLES (PUR) :	14
I.5.2. LES PNEUS NON REUTILISABLES (PUNR) :	15
I.6. Granulats de construction :	16
I.7. La valorisation des déchets de caoutchouc en algérie :	17
I.8. Sable	18
I.8.1. DIFFERENTS TYPES DE SABLE :	19
I.8.2. LES SABLES ISSUS D'UNE CHAÎNE D'ÉLABORATION (SABLES ARTIFICIELS) :	19
I.8.3. LES SABLES NATURELS :	19
I.9. Les sables de dunes :	20
I.9.1. PROPRIÉTÉS DES SABLES DE DUNE :	20
I.9.2. NATURE DE SABLE DUNE :	21
I.9.2.1. MÉCANISMES DE FORMATION :	21
I.9.2.2. TYPES DES DUNES :	21
I.9.2.2.1. LES AVANT-DUNES (FORE DUNE POUR LES ANGLOPHONES)	21
I.9.2.2.2. LES FALAISES DUNAIRES (DUNE CLIFF POUR LES ANGLOPHONES).....	21
I.9.2.2.3. LES DUNES PERCHÉES (CLIFF-TOP DUNE POUR LES ANGLOPHONES).....	21
I.10. Méthode des plans d'expériences	22
I.11. Méthode de Taguchi	28
I.11.1. LE PLAN DE TAGUCHI (PLAN DE TAGUCHI ORTHOGONAL) :	28
Chapitre II Matériaux et Procédures Expérimentales	
II.1. Introduction:.....	30
II.2. Matériaux utilisés	30
II.2.1. SABLES	30
II.2.1.1. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES	31
II.2.1.1.1. LES MASSES VOLUMIQUES	32
LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE	32
LA MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE.....	32
II.2.1.1.2. ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE	33
II.2.1.1.3. MODULE DE FINESSE	33
II.2.1.1.4. ÉQUIVALENT DE SABLE	34
II.2.1.1.5. COMPACTÉ	35
II.2.2. CIMENT :	35
II.2.3. GRANULATS DE CAOUTCHOUC	36

Table des matières

II.2.4. EAU DE GACHAGE	38
II.3. Formulations	38
II.3.1 FORMULATIONS DU BETON DE SABLE TEMOIN (0%GC, 0%SD) :	38
II.3.2 FORMULATIONS DU BETON DE SABLE AVEC GC ET SD :	38
II.3.3 COMPOSITIONS DES BETONS DE SABLE :	39
II.4. Procédure Expérimentale:.....	40
II.4.1 FABRICATION DU BETON DE SABLE :	40
II.4.1.1 PESAGE DES COMPOSANTS DU BETON:	40
II.4.1.2 MALAXAGE DES COMPOSANTS DU BETON DE SABLE :	40
II.4.1.3 COULAGE DES EPROUVETTES:	41
II.4.1.4 ETAPES DE COULAGE DES EPROUVETTES:	41
II.4.1.5 DEMOULAGE ET PESAGE DES EPROUVETTES APRES 24H:	43
II.4.2 LES ESSAIS REALISES:	43
II.4.2.1 ESSAIS REALISES A L'ETAT FRAIS :	43
II.4.2.1.1. ESSAI DE MANIABILITE (CONE D'ABRAMS)	44
II.4.2.1.2. DETERMINATION DE LA MASSE VOLUMIQUE	45
II.4.3 ESSAIS REALISES A L'ETAT SEC:	45
II.4.3.1 DETERMINATION DE LA MASSE VOLUMIQUE :	45
II.4.3.2 ESSAI DE TRACTION PAR FLEXION :	46
II.4.3.3 ESSAI DE COMPRESSION :	46
II.4.3.4 ESSAI D'AUSCULTATION DYNAMIQUE:	47
 Chapitre III caractérisation d'un béton de sable contenant des déchets pneumatiques	
III- 1. Introduction	48
III- 2 Facteurs	48
III- 3 Niveaux des facteurs	48
III-4 Choix de la matrice de Taguchi pour notre étude	48
III-5 La masse volumique à l'état frais	51
III-5-1 DETERMINATION DU RESULTAT OPTIMAL POUR CHAQUE FACTEUR	51
III-5-2 DETERMINATION DES COEFFICIENTS DU MODELE	52
III-5-3 INTERPRETATION DES RESULTATS.....	52
III-6 Résistance mécanique à la compression	55
III-6-1 DETERMINATION DU RESULTAT OPTIMAL POUR CHAQUE FACTEUR (Rc28).....	55
III-6-2 DETERMINATION DES COEFFICIENTS DU MODELE	56
III-6-3 INTERPRETATION DES RESULTATS.....	56

Table des matières

III-7 Résistance mécanique à la traction.....	58
III-7-1 DETERMINATION DU RESULTAT OPTIMAL POUR CHAQUE FACTEUR (RT28)	59
III-7-2 DETERMINATION DES COEFFICIENTS DU MODELE	59
III-7-3 INTERPRETATION DES RESULTATS.....	60
III-8 Vitesse de propagation d’ultrasons.....	62
III-8-1 DETERMINATION DU RESULTAT OPTIMAL POUR CHAQUE FACTEUR (ULTRASONS)	62
III-8-2 DETERMINATION DES COEFFICIENTS DU MODELE	63
III-8-3 INTERPRETATION DES RESULTATS.....	63
Conclusion Générale	66
Références Bibliographiques.....	68

Introduction générale

Introduction générale

L'épuisement des gisements naturels de granulats et les difficultés pour mettre en place de nouvelles carrières imposent de rechercher de nouvelles sources d'approvisionnement.

Les déchets de pneumatiques représentent une source intarissable du fait de la relation directe avec la construction automobile et d'engins divers constituant un marché en plein extension ayant un rapport avec la croissance économique et démographique.

Les pneus usagés sont des déchets non dangereux mais ils présentent un risque sur l'environnement et l'humanité en cas d'incendie sur les sites de stockage; le problème du stockage des pneus usagés est un défi important auquel doivent faire face les gestionnaires de déchets.

Le sable de dunes est disponible en grande quantité au Sahara, où est enregistrée une déficience accrue en matière de granulats destinés à la fabrication du béton. A cela, s'ajoute le facteur de l'éloignement des régions sahariennes des endroits d'approvisionnement en matière de granulats, qui rend encore plus onéreux la valeur des granulats. De ces faits, le sable de dunes pourrait présenter un avantage économique sûr.

Le but de ce travail est une contribution à l'étude de ce matériau innovant, cette étude est d'ordre expérimental. Elle consiste à évaluer les performances physiques et mécaniques de ce matériau. Pour cela nous allons varier des proportions de caoutchouc en mélange avec du sable (0%, 8% et 16%), nous allons également varier des proportions de sable de dune en mélange avec du sable (0%, 10% et 20%).

Nous présentons tout d'abord dans le premier chapitre, une synthèse bibliographie regroupant d'une part des généralités sur les bétons de sable (définition, composition, composants, caractéristiques et utilisation) puis d'autre part, nous parlerons sur les déchets de caoutchouc et les sables de dunes.

Dans le deuxième chapitre nous exposerons les composants de notre béton de sable avec leurs caractéristiques : Sables, ciment, eau, granulats de caoutchouc ainsi que les procédures expérimentales adoptées.

Dans le troisième chapitre, nous élaborons des processus qui résument l'étude de l'approche processus appliqué à la méthode de Taguchi.

A l'issue de ce travail nous exposerons une conclusion générale et montrerons les voies et perspectives pour la suite éventuelle de ce travail.

Chapitre I Synthèse Bibliographique

I.1.Introduction:

Le béton de sable est un matériau ancien utilisé antérieurement au béton traditionnel. Il est tombé en désuétude, avec l'abondance des granulats du plus gros calibre permettant d'obtenir facilement des nouveaux élevés de résistances. Il retrouve cependant de nos jours un intérêt certain du fait des propriétés spécifiques de ce matériau, par rapport au béton traditionnel : excellente maniabilité et cohésion, bonne adaptation aux milieu fortement ferrailés, qualités esthétiques, etc. Par ailleurs, dans certaines régions riches en sable, il peut procurer des économies par rapport au béton traditionnel.

Dans ce chapitre on présentera un aperçu général sur les BS, ou on va exposer d'abord l'historique et l'origine des bétons de sable ainsi que leur définition et la différence entre les BS et les mortiers. Ensuite, on donnera une description des constituants entrant dans la fabrication, on décrit les propriétés mécaniques et hygrométriques, puis on explique le caractère non fissurant du BS. Finalement, on met en relief les innovations et les avantages apportés par les BS et on donnera quelques exemples de réparation structurale réalisés par ce matériau.

I.2.Origines des bétons de sable :

Le béton de sable trouve ses origines en France dans le béton aggloméré confectionné par F.coignet dans le 3ème quart de XIX siècle. Il était constitué de sable, de ciment, de chaux et d'eau. Le mur de soutènement a Passy, la maison Coignet à Saint-Denis, constituent les premières applications de cette technique que l'on retrouve aussi dans la réalisation de la tour de Port Said en Egypt (hauteur : 52m) et du pont de New-York Les premières tentatives de correction granulaire reste l'apanage de F.Coignet qui, pour les besoins de réalisation de certaines parties de l'aqueduc de Vanne construit entre 1869 et 1872, mélangea un sable fin traditionnel à un sable non utilisé à l'époque car jugé impropre à la construction.

Cette technique a été mise au point depuis des décennies, en URSS, en témoignent les réalisation du port Kaliningrad en Prusse- Orientale en béton de sable au début du siècle et aussi du pont de Chernavskif coulé sur place à Voronej (500Km de Moscou). A la fin du second conflit mondial, le professeur académicien Rebinder a permit l'utilisation de ce matériau dans plusieurs domaines : (les chaussés, les pistes d'aviation, élément de remplissage, murs architecturaux, planchers, dalles, réhabilitation, etc.).

I.2.1.Définition :

Le béton de sable est un matériau constitué principalement de ciment, de sable d'eau et de filler naturel ou industriel. Ce qui distingue le béton de sable du béton ordinaire réside essentiellement dans l'emploi de granulats, le béton traditionnel est généralement constitué d'un granulat 0/16 à 0/22.5, par contre le béton de sable est constitué de granulat de faible diamètre $\varnothing < 10\text{mm}$.

Une question pourrait se poser : quelle est la différence entre le béton de sable et le mortier?

Le béton de sable comme son nom l'indique est un béton où le gros granulat est le sable ($D_{\text{max}} = 5\text{mm}$), il ne consomme que (250 à 400) Kg/m^3 de ciment, dosage habituel des bétons classiques, la compacité optimale étant atteinte par un ajout complémentaire de fines (fillers) et de plastifiant, tandis que le mortier utilise un fort dosage en ciment de (400 à 600) Kg/m^3 .

I.2.2.Les composants du béton de sable:

Un béton de sable est composé de sable, de fines d'ajouts, de ciment et d'eau. Par rapport à cette composition de base et pour répondre aux besoins de certains usages, d'autres ajouts spécifiques peuvent être envisagés : gravillons, fibres, adjuvants ...

a) Sables :

Par sable on entend tous granulats 0/D conformes aux définitions des normes NF P 18- 540 [01] et NF P 18-101 [02] il peut s'agir soit d'un sable naturel alluvionnaire ou de ballastière, soit d'un sable de carrière issu du concassage d'une roche massive ou détritique. Aucun critère granulométrique n'est a priori exigible pour réaliser un béton de sable : on peut aussi bien utiliser un sable fin (même homogène, type sable de dune) qu'un sable alluvionnaire moyen ou grossier, ou un 0/D de concassage. La seule restriction d'emploi des sables réside dans leur propreté.

b) Les ciments:

Comme pour le béton classique, le ciment utilisé pour la confection d'un béton de sable est conforme à la norme NF P 15-301 [03]. Le choix du ciment est fait à partir de sa classe de résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu...et, d'une façon plus générale, de la composition du béton et de l'usage auquel on le destine.

c) L'eau:

L'eau utilisée pour la confection des bétons de sable est conforme à la norme NFP18-303. L'eau efficace comprend, en plus de l'eau de gâchage, une quantité non négligeable d'eau apportée par les additions, adjuvants et autres ajouts, et surtout par les sables.

I.2.3. Propriétés des bétons de sable :

Un concepteur qui retient le béton de sable comme matériau pour un élément de construction a une démarche de « pensée béton », c'est-à-dire qu'il adopte un matériau répondant aux critères qui ont permis le succès du béton, en termes de performances et durabilité, mais aussi d'image et de comportement.

Les propriétés du béton durci sont largement influencées par les propriétés du béton frais, qui sont principalement l'ouvrabilité (maniabilité) et la compacité. La maniabilité dépend non seulement du rapport E/C, mais aussi du module de finesse de sable, et elle dépend surtout du type et de la teneur en fines d'ajouts. Nous avons vu qu'il nécessite plus d'eau qu'un béton classique. D'autre part, il apparaît évident que le mélange ciment- sable présentera une porosité plus élevée que la porosité du béton traditionnel. Cet inconvénient est compensé par l'ajout de fines de bonne nature pour améliorer la compacité. Il faut choisir donc des sables de bonne répartition granulair. Il s'agit de trouver un compromis entre la maniabilité du béton et sa compacité .

a) Résistance et maniabilité :

Les bétons de sable se situent vers les bétons dont les usages requièrent une bonne ouvrabilité. Les bétons de sable peuvent même autoriser des ouvrabilités qu'un béton traditionnel ne permet pas d'atteindre. Ce raisonnement reste évidemment très schématique, car il est clair que les progrès dans les techniques d'adjuvantation, de composition, de traitement et de fabrication des bétons permettent aujourd'hui de proposer des bétons de gravillons à hautes performances mécaniques présentant de bonnes maniabilités. De même sion fabrique des bétons de sable très maniables possédant d'excellentes performances mécaniques. Les dosages en ciment de ces bétons sont de l'ordre de 250 à 450 Kg/m³, la compacité optimale est atteinte par adjonction des fines et de plastifiant. La résistance à la compression à 28 jours se situe entre 12 et 60MPa selon la composition.

b) Granulométrie -Résistance :

A dosage en ciment constant, la résistance peut être différente en fonction d'un certain nombre de paramètres :

- ❖ **La finesse de l'addition**: plus l'addition est fine plus elle est efficace au niveau du gain en compacité et donc en gain de résistance ; ce résultat est valable quelque soit la granulométrie du sable. **(Figure.I.1)**
- ❖ **La nature de l'addition** : l'extrême diversité du niveau de performance atteint selon la nature du filler : si l'addition de fines permet d'améliorer systématiquement la résistance, ce gain est en effet très variable.
- ❖ **La dimension du D max (0/D)** :

Pour une même valeur du rapport E/C, on constate **(figure I.2)** que l'effet du diamètre Dmax est peu important, mais par contre il influe sur la maniabilité; ou il faut employer un plastifiant réducteur d'eau, afin de fixer la maniabilité et atteindre la résistance voul

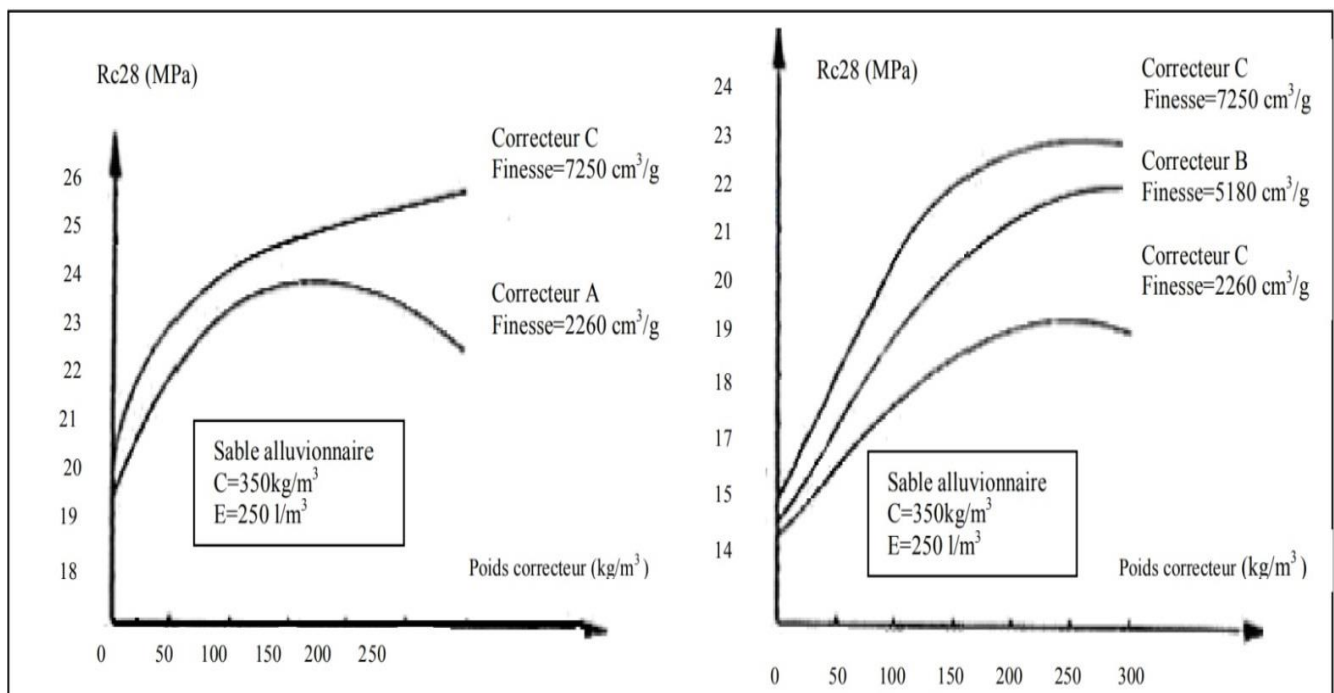


Figure.I.1: Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance.

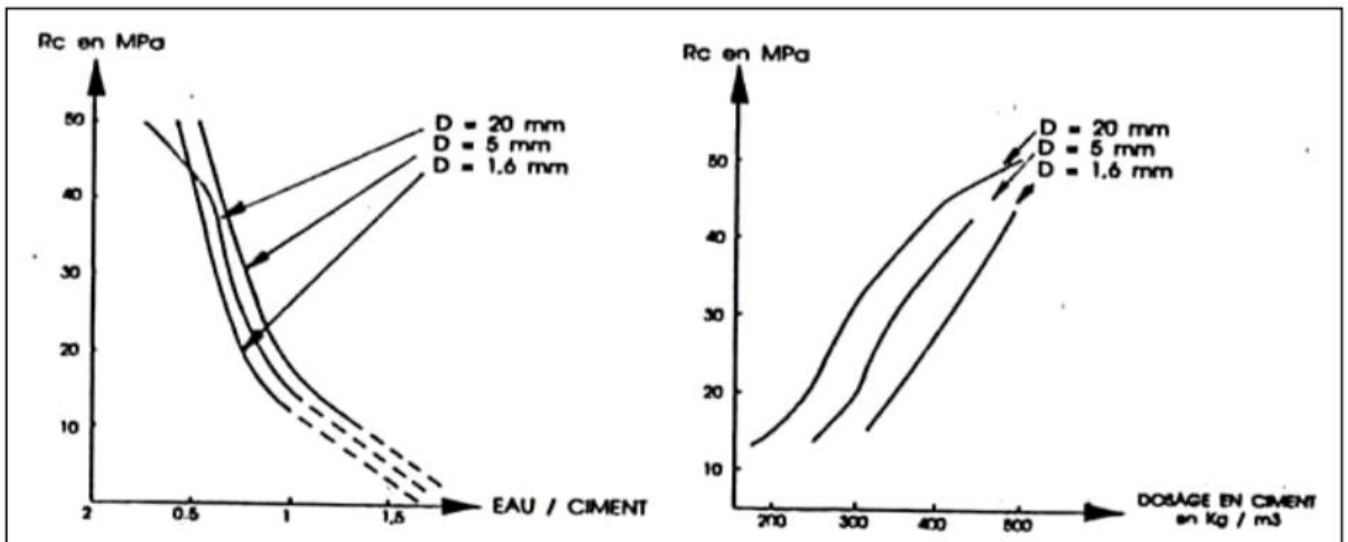


Figure I.2 : Effet de la granularité sur la résistance.

C) Durabilité:

Le béton de sable étant un béton, il se doit être durable, et c'est le cas. En effet, comme un béton classique, les mêmes facteurs influent sur la durabilité : porosité, fissuration, corrosion des armatures, agressions chimiques.....etc. c'est de la même façon qu'on y remédie, essentiellement en recherchant la compacité, c'est-à-dire en prenant en compte la granulométrie des constituants et leur complémentarité. Les soins dans la formulation et la fabrication, l'utilisation d'adjuvants appropriés et le respect de quelques règles élémentaires à la mise en oeuvre sont autant de gages pour obtenir des bétons de sable compacts et durables.

Enfin les données sur la durabilité sont encore peu nombreuses, encore que rassurantes on cite souvent des réalisations en béton de sable plus que centenaires aqueduc de la Vanne, phare de Port –Said en Egypte, le grand mur de retenue qui domine la place du Trocadéro à Paris, etc.

I.3 Formulation des bétons de sable:

Dans un béton de sable, il convient de distinguer le dosage en ciment, nécessaire à l'obtention d'une résistance suffisante pour l'usage envisagé, et celui des fines d'ajouts, nécessaires à l'obtention d'une bonne compacité, ce dosage va dépendre de la nature et de la granularité respective du sable et des fines d'ajouts [04].

I.3.1. Méthodes théorique pour la formulation des bétons de sable:

I.3.1.1. La compacité et les méthodes de formulations des bétons:

La formulation d'un béton consiste à choisir les constituants ainsi que leurs proportions en vue d'obtenir des propriétés spécifiques répondant à des critères techniques et économiques souhaités.

Le problème de la formulation d'un béton se pose en termes d'optimisation de la compacité du squelette granulaire, par un choix judicieux de la proportion de sable et de gravillons puis par un comblement de la porosité de cet empilement avec la pâte afin d'obtenir l'ouvrabilité désirée.

Le béton de sable, à la différence des mortiers, utilise un dosage en ciment proche du béton ordinaire (300 à 400 kg/m³). Ce qui distingue le béton de sable des bétons ordinaires réside essentiellement dans l'emploi de granulats de faible diamètre ($D \leq 5\text{mm}$). Les dosages en ciment ont été possibles grâce au remplissage des vides du sable par un filler calcaire (0/80 μm), ceci a pour conséquence favorable d'augmenter la compacité par la création d'une distribution granulaire continue [04].

En effet, au début du siècle, Caquot a pu établir, à partir des résultats expérimentaux une relation mathématique entre le volume des vides (v) d'un mélange granulaire et son étendue granulaire (d/D) :

$$V = V_0 (d / D)^{0.2} \quad 1.1$$

Avec V_0 : constante expérimentale

I.3.1.2. Estimation du dosage en fines d'un béton de sable:

Considérant l'étendue granulaire du sable, il est alors évident qu'il présente une porosité (PS) définie par la formule de Caquot, soit :

$$PS = 0,75 (0,08/ D)^{0.2} \text{ (\% volumique)} \quad 1.2$$

Moyennant quelques hypothèses simplificatrices, en désignant par [fines], le volume de l'ensemble des particules inférieures à 80 μm et [v] le volume de vides associé à l'empilement de ces fines, Caquot a obtenu le résultat suivant :

$$[Fines] = [v]^{1.3}$$

Ainsi, le dosage volumique optimal en fines s'écrit en combinant des équations (1.6.2) et (1.6.3):

$$[Fines] = 0.38 (0.08 / D)^{0.2} \quad 1.4$$

Cette formule montre que le dosage en fines dépend surtout de la limite supérieure de l'étendue granulaire. Il apparaît clairement que plus le diamètre D diminue, plus le dosage en fines augmente et devient rapidement excessif en termes de ciment seul : il faut nécessairement avoir recours à l'utilisation de fines de remplissage type fillers (figure I.3) [04]

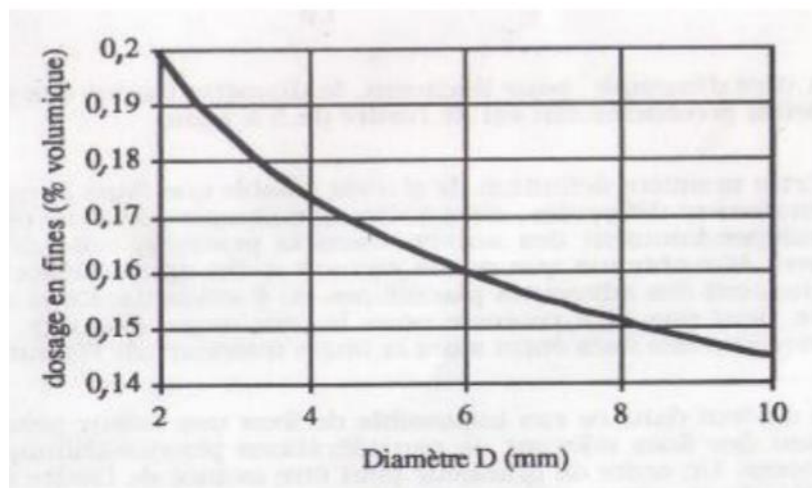


Figure I.3 : Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines [04]

I.3.1.3 Porosité et dosage en eau d'un béton de sable :

Dans le béton, le squelette particulaire comprenant des particules fines est optimisé, et il présente toujours une certaine porosité. Dans des conditions de mise en oeuvre données, la compacité maximale, conduisant à une porosité minimale, ne sera atteinte que si la consistance le permet. En admettant que les vides inters granulaires se décomposent en la somme d'un volume d'eau (e) et d'un volume de vides piégés (v), la porosité minimale théorique du béton est donnée par la relation suivante, issue une nouvelle fois des travaux sur la compacité de Caquot [04] :

$$(e + v)_{\min} = 0.8 (d / D)^{0.2} \quad 1.5$$

Avec d/D : l'étendue granulaire y compris les fines.

Le calcul de la porosité minimale nécessite la valeur de d , borne inférieure de l'étendue granulaire (figure 1.4). L'estimation de cette valeur est délicate, compte tenu des effets de floculation dans l'eau qui peuvent se produire à l'échelle des fines particules. Par conséquent, dans le cas d'un mélange complètement dé floculé, d peut être défini comme la moyenne harmonique de la granulométrie du composant le plus fin. Connaissant alors la surface spécifique

f (finesse Blaine par exemple en cm^2/g) de ce constituant et sa densité ρ (exprime en g/cm^3), le diamètre moyen des grains. L'assimilation dans une sphère est donnée par la formule suivante :

$$d = 60 / f \cdot \rho \text{ en mm } 1.6$$

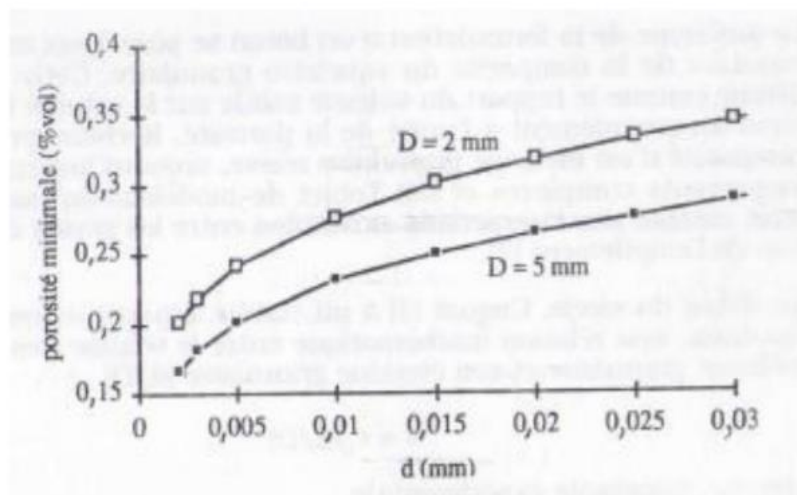


Figure I.4 : Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles de sable [04]

Pour estimer le dosage en eau, il faut préalablement évaluer la quantité d'air piégé. Dans le cas des bétons de sable, cette quantité est légèrement supérieure à ce qu'elle est dans les bétons ordinaires. Un ordre de grandeur peut être obtenu par la formule suivante, qui conduit à des teneurs en air de l'ordre de 3 à 5% [04].

$$[\text{Vides}] = k [\text{eau}] \left(\frac{\text{L}}{\text{m}^3} \right) 1.7$$

Avec k compris entre 0.2 et 0.25

I.3.1.4 Estimation du dosage en sable :

L'estimation du dosage en sable, il suffit de compléter au mètre cube la somme des dosages des constituants fines, eau et vides. Nous avons alors tout simplement [04]:

$$[\text{Sable}] = 1000 - [\text{fines}] - [\text{eau}] - [\text{vides}] \text{ (L/m }^3 \text{) } 1.8.$$

I.3.2 Méthode expérimentale de formulation:

I.3.2.1 Présentation générale de la méthode expérimentale:

La méthode expérimentale doit pouvoir formuler des bétons de sable, mais son but n'est pas d'expliquer ou de formaliser les phénomènes qui interviennent dans la préparation du béton. Il existe d'autres méthodes, et elles peuvent varier selon les méthodes théoriques et les habitudes de travail, mais le but reste le même : formuler un béton le plus compact possible selon d'autres caractéristiques requises (pompabilité , faculté de moulage, capacité de projection). Le ciment sera utilisé pour mieux répondre aux exigences du contrat ou du cahier des charges qui stipulent généralement une quantité minimale. Cette méthode est une adaptation de la méthode dite de Baron-Lesage, qui est itérative et basée sur la génération de déchets légers. Les caractéristiques du mélange sont l'ouvrabilité et la densité apparente mesurées avec le mortier LCL.

Différentes formulations de béton de sable ont été réalisées grâce à cette méthode : béton de pieux, béton routier, béton projeté, etc. et ont donné toute satisfaction [04].

I.3.2.2 Les différentes étapes de la formulation :[04]

- . Détermination d'une formule de base sans fines d'addition :
 - choix de la teneur en ciment.
 - fixation d'une teneur en eau.
 - Détermination de la quantité de sable.
 - Ajuste de la maniabilité et du rendement.
- . Détermination du dosage en fine d'addition.

- . Adaptation de la maniabilité à la mise en oeuvre.
- . Contrôle de la résistance.

I.4. Les mortier de granulats de caoutchoucs :

I.4.1. Généralités sur les caoutchoucs :

Il existe deux grandes familles de caoutchoucs :

- Les caoutchoucs naturels qui proviennent de l'hévéaculture (hévéa : arbre qui produit du latex),
- Les caoutchoucs synthétiques fabriqués à partir de dérivés du pétrole. Les caoutchoucs sont :

utilisés dans de nombreux secteurs : automobile/transport (pneumatiques, système de freinage, airbag, étanchéité, ..), équipement industriel, bâtiment et travaux publics (BTP), médical (préservatifs, gants, ...), alimentation (tétine...), colles et adhésifs...

Les déchets de caoutchouc ont quatre origines :

- Les déchets de caoutchouc industriel (8%),
- Les déchets de fabrication de pneumatiques et chambres à air (3,5%),
- Les pneumatiques usagés (86,6%),
- Les déchets du recyclage (poudrettes, copeaux) (2%).

I.4.2. 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.4.3. Les mortiers caoutchouc plastiques :

I.4.3.1. Les mortiers plastiques :

a) L'ouvrabilité :

L'ouvrabilité est la propriété essentielle des matériaux cimentaires à l'état frais. Selon la nature du matériau à étudier, elle est estimée par l'essai d'affaissement ou d'étalement, elle révèle le degré de fluidité de la pâte du béton et sa facilité de mise en œuvre. (Figure I.5). Ce comportement est expliqué par la forme rigoureuse des granulats de caoutchouc.

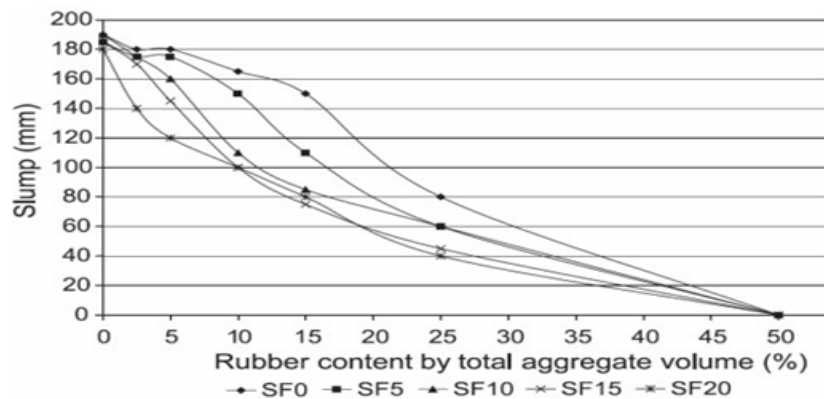


Figure I.5. Effet des granulats de caoutchouc sur l'affaissement

I.4.3.2. Mortier durci:

a) Masse volumique:

Les travaux de [05] ont montré une diminution de la masse volumique apparente, à l'état durci, des mortiers obtenus par substitution des granulats naturels (sable) par les granulats de caoutchouc de même taille (taille de 0-6 mm). En effet, l'allègement obtenu, à 28 jours de cure, varie de 4,3% à 9,9% pour un taux de remplacement allant de 5% à 15%, respectivement.

b) Résistance en compression:

L'incorporation des déchets de caoutchouc, sous forme des agrégats, dans les matériaux cimentaires conduit à la diminution de la résistance en compression. Cette réduction varie en fonction de plusieurs facteurs, notamment du pourcentage de GCR, de la taille et de la surface des particules de caoutchouc. En effet [06] lors de ses travaux, a remplacé le sable naturel par les GCR de même taille (taille maximale de 4 mm) dans les mortiers, avec un taux de substitution allant de 10 % à 30%. Les résultats de cette étude ont montré une réduction importante de la résistance en compression (Figure I.6). La perte de performances est de 58% et 79%, correspondant aux taux de substitution de 20% et 30% de caoutchouc, respectivement. Cette chute importante de résistance en compression, des matériaux cimentaires, enregistrée est due à la faible adhérence entre les particules de caoutchouc et la matrice.

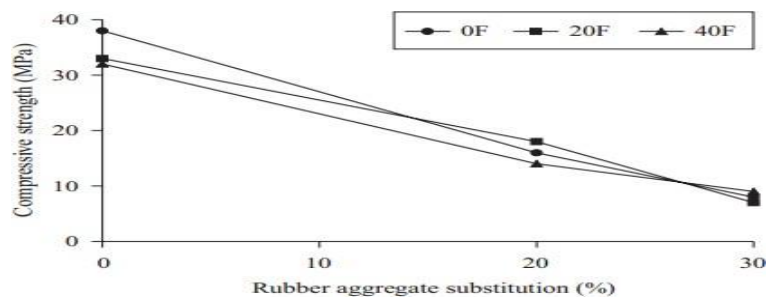


Figure I.6. Effet du taux de substitution de GCR sur la résistance en compression de mortiers de ciment renforcé par des fibres

I.5. Les pneumatiques usagés :

Les déchets produits par la société industrielle ne cessent de croître en quantité et en complexité. Parmi ceux-ci, on trouve les déchets de pneus usagés qui croient avec le développement de l'industrie automobile. Selon les rapports des associations des fabricants des pneus, la production mondiale annuelle de pneus est de 1,4 milliard d'unités, ce qui correspond à environ 17 millions de tonnes des pneus usagés chaque année.

Malgré que les déchets pneumatiques soient classés dans les contextes normatifs Européennes comme des déchets banals, néanmoins, ils sont volumineux, incompatible et non biodégradable, en raison de leur résistance aux différentes sortes d'attaques physico-chimiques.

Un pneu, est un mélange, à base de caoutchouc synthétique et naturel, dans lequel sont ajoutés des éléments améliorant les qualités de résistance et de sécurité (Tableau I.4).

Suivant l'état de dégradation, on peut classer les pneus usagés en deux catégories essentielles

I.5.1. Les pneus usagés réutilisables (pur) :

Il existe deux filières pour les Pneus Usagés Réutilisables, l'une est le rechapage (remplacement de la bande de roulement) qui concerne surtout les pneus de poids lourds et d'engins de chantier et la seconde est la commercialisation sur le marché de l'occasion ou à l'export, dans le cas où les pneus n'ont pas atteint la limite d'usure autorisée.

I.5.2.Les pneus non réutilisables (punr) :

Ils sont les pneus qui ne peuvent plus de remplir leur fonction initiale, de plus, ce sont des pneus qui ne se prêtent pas à un rechapage. Ces pneus, sont concernés par l'opération de valorisation dans le domaine de Génie Civil.

Tableau I.1. Composition chimique de pneu.

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%

La mise en décharges, des pneus usagés, n'est pas sécurisée en cas d'incendie criminel ou naturel (foudre). De plus, Le brûlage des déchets de caoutchouc dans les décharges publique présente une gêne environnementale et économique extrêmement danger pour la nature, il menace non seulement les ressources naturelles en eaux et en air, mais aussi la santé publique. Un exemple concret, relatant cette situation, est celui de l'incendie d'Hager-ville (Canada) qui a fallu 17 jours pour l'éteindre et a fait des dégâts estimés à environ de 12.6 millions de Dollars, la température de combustion n'est pas assez élevée pour qu'il y ait incinération complète, et des composés toxiques sont libérés dans l'air, le sol et les cours d'eau, provoquant une contamination de ces milieux (FigureI.7).

Par ailleurs, l'eau de pluie qui s'accumule dans la forme concave des pneus présente un abri idéale pour les rongeurs et la reproduction de moustiques qui transmettent aux êtres humains des maladies graves comme la dengue et la fièvre jaune.



FigureI.7 .Les risques de feu dans les décharges des pneus usagés.

I.6. Granulats de construction :

Les pneus usagés, sont réutilisés sous forme des granulats de construction, déchiquetés ou broyés, à différentes tailles, selon le type d'application. Les autres constituants des pneus (aciers, fibres), sont séparés et peuvent être valorisés aussi à part. Les particules de caoutchouc, présentent des caractéristiques chimiques et physiques semblables à celles du caoutchouc vierge. La poudrette est utilisée en combinaison avec des liants pour réaliser des murs anti-bruit, des dalles de sol pour les aires de jeux et des pistes d'athlétisme, comme montre (la Figure I.8).



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

En vue de l'état de l'art, on constate que plusieurs actions de valorisation des déchets, de pneus usagés, ont été menées dans le monde, particulièrement dans le domaine des matériaux de construction. Ce secteur, grand consommateur de granulats, peut en effet résorber une

quantité importante de ces déchets et pallier ainsi les contraintes économiques et environnementales particulièrement dans les régions qui ont souffrit du problème d'épuisement des granulats naturels. A cet effet, nombreux travaux ont été réalisés sur l'emploi des particules de caoutchouc, en substitution aux granulats siliceux- calcaires, dans les matériaux cimentaires, ont montré l'intérêt de l'association du ciment/caoutchouc dans l'élaboration des bétons de caoutchouc.

En Algérie, il y a quelques études réalisées sur la thématique de valorisation des granulats de caoutchouc recyclés dans les matériaux cimentaires .Ces travaux ont bien montré les effets bénéfiques des granulats de caoutchouc recyclés sur quelques propriétés des matériaux cimentaires.

I.7. La valorisation des déchets de caoutchouc en Algérie :

Aujourd'hui, les nombreuses possibilités de transformation ou d'élimination offertes par le pneu usagé non réutilisable en font un matériau à fort potentiel. Les chercheurs et les industriels découvrent ses nombreuses qualités: la résistance de sa structure lorsqu'il est conservé en entier, sa souplesse lorsqu'il est transformé en granulat, ou son pouvoir calorifique lorsqu'il est utilisé comme combustible.

Le problème des pneus usagés est non seulement Mondial mais aussi Maghrébin et Africain; des millions de tonnes sont jetés chaque année dans le monde (déchet encombrant et abondant).

Dans le bassin méditerranéen, l'Algérie comme certains d'autres pays a compris que la technologie est la clé de l'évolution, sur des méthodes et des techniques nouvelles, tout en pensant à la protection et la conservation de l'environnement dans le cadre du développement durable. Les photos des (figures I.9 à I.10) montrent des applications pratiques avec des pneus de caoutchouc pour la stabilité des talus à l'aide de la technique pneu-sol.



Figure I.9. Pose de nappe de pneus projet pilote bousmail.projet



figure I.10. ouvrage vegetalise Route de de bousmail.

I.8. Sable: [07]

On définit les sables comme étant la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre 80 μm et 05 mm ; il s'agit d'une définition globale, dont les bornes varient d'une classification à une autre. Ce sont aussi les matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3mm et dont le passant à 80 microns n'excède pas 30% . Dans le sens le plus courant, on entend par "sable" une roche sédimentaire meuble constituée de petites particules provenant de la désagrégation d'autres roches dont la dimension est comprise entre les dimensions 0 à 5mm, non compris les fillers. A cette définition se rattachent les sables de concassage ; mais lorsqu'on dit sable, on pense essentiellement aux sables naturels abondants dans de nombreux pays et dont les réserves sont quasi inépuisables En fait, la définition granulométrique du sable est plus compliquée, elle varie suivant les époques et diffère suivant les pays et selon la destination.

I.8.1. Différents types de sable :

Les sables se différencient par un grand nombre de paramètres et on peut distinguer les deux types de sables : Les sables naturels et ceux issus d'une chaîne d'élaboration.

I.8.2. Les sables issus d'une chaîne d'élaboration (sables artificiels) :

Ce sont des matériaux produits dans une chaîne d'élaboration de granulats, et qui peuvent se trouver en excédent pour la production recherchée (gravier ou gravillon), ils peuvent être soit :

- Des sables roulés de dessablage qui résultent du criblage primaire d'un tout venant.
- Des sables de concassage qui sont très souvent l'excédent de la production d'une carrière ou d'une ballastière, ces derniers sont de plus en plus utilisés en technique région de la wilaya d'Eloued ainsi autres routière.



FigureI.11 : Sable de dune

I.8.3. 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.9. Les sables de dunes :

Le sable des dunes est le résultant d'une érosion et d'une sédimentation des différentes roches suivie d'un transport fluviatile et parfois éolienne. La plus grande partie des formations sableuses est généralement constituée de quartz. Il est caractérisé par une granulométrie fine.

Dans une autre signification le sable de dune qui s'impose du fait de son abondance dans la nature (Sahara), de son coût d'extraction presque nul, et de sa propreté apparente, constitue la solution au problème d'épuisement des ressources naturelles et se présente comme un matériau d'avenir [07].

I.9.1. Propriétés des sables de dune :

Le sable dunaire est en abondance dans près de 60% de la superficie du territoire algérien. L'épaisseur moyenne de la couche sableuse est de 6m. Cette énorme quantité a amené les ingénieurs à s'interroger sur les propriétés physico-chimiques de ces sables afin de les valoriser et de les utiliser dans le domaine de la construction.

I.9.2. Nature de sable dune:

I.9.2.1. Mécanismes de formation :

Les dunes se forment dans des zones où le sable est abondant et non fixé par la végétation (désert, plage, lit fluvial à l'étiage). Le sable est érodé et pris en charge par le vent (déflation). Il est transporté aux ras du sol par saltation, puis s'accumule quand la compétence du vent chute (versant sous le vent). Une dune peut se déplacer par érosion du versant au vent et accumulation sur le versant opposé.

I.9.2.2.Types des dunes :

I.9.2.2.1. Les avant-dunes (fore dune pour les anglophones) :

Qui sont des bourrelets plus ou moins fixés par la végétation (oyats par exemples), parallèles au trait de côte et solidaire de la plage, c'est à dire échangeant du sable avec elle, dans un même système sédimentaire. À ne pas confondre avec une ancienne arrière dune en cours d'érosion, ou avec une dune formée par du sable venant de terre sur un secteur ou un avant-dûner active ne pourrait pas se former. En algerie, ces avant-dunes sont systématiquement considérées comme faisant partie du domaine public maritime, ce qui facilite leur protection. L'avant dune se forme à partir de fixation du sable en haut de plage, par des plantes pionnières spasmophiles.

I.9.2.2.2. Les falaises dunaires (dune Cliff pour les anglophones) :

N'est pas une vraie dune mais un profil résultant de l'érosion marine d'une dune ancienne fixée par une pelouse ou un boisement qui ont été à l'origine de la formation d'une couche d'humus ou de sol sableux .

I.9.2.2.3. Les dunes perchées (cliff-top dune pour les anglophones) :

Qui apparaissent au sommet d'une falaise vive ; alimentée en sable par le vent à partir de l'estran, voire à partir du profil de pente, quand il s'agit d'une falaise Dunaire .

I.10.Méthode des plans d'expériences :

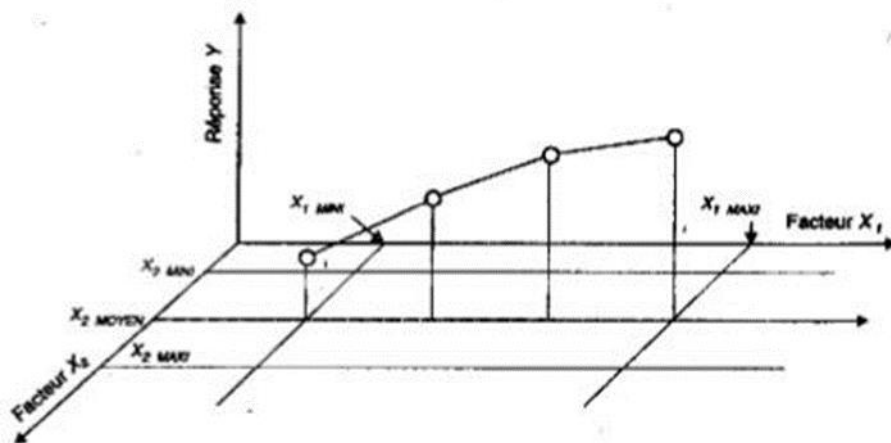
L'utilisation d'un plan d'expérience est intéressante dans le sens où elle fait réduire le nombre des mélanges tout en faisant varier plusieurs paramètres (facteurs) à la fois, ce qui va nous permettre d'évaluer leurs influences ainsi que leurs interactions sur les caractéristiques des bétons.

Parmi ces facteurs, on peut citer : le dosage en ciment, le dosage en additions, le dosage en eau, le rapport E/L, 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 (figureI.12) [08].



FigureI.12: méthode traditionnelle d'expérimentation et courbe de réponse [08].

De manière intuitive, le formulateur étudie de façon séparée les deux facteurs (variables) X_1 et X_2 . Il fixe généralement X_2 à un niveau moyen et regarde l'évolution de la réponse quand X_1 varie de $X_{1\text{mini}}$ à $X_{1\text{maxi}}$ à l'aide des quatre essais présentés sur la figure I.13. Il réalise ensuite le même type d'essais avec X_2 .

Un bon exemple est présenté sur la figure I.11 qui montre l'influence du rapport G/S sur l'affaissement pour un béton courant et un béton à haute performance. Le dosage en ciment ainsi que le rapport E/C ont été fixés et pour une étendue granulaire d/D donnée, le rapport G/S a été varié. Dans ce cas le formulateur obtient une réponse. Est-elle satisfaisante ? bien sur, elle apporte un enrichissement de la connaissance et nous donne la valeur G/S optimale pour chacun des deux bétons, en ce sens, l'expérience est bénéfique. Par ailleurs, elle peut laisser des points d'ombre : que se passe-t-il si l'un des paramètres initialement fixés varie ? Retrouvera-t-on les mêmes lois de variation ? Dans la pratique (figure I.13), le formulateur réalise une expérience aux nœuds 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.

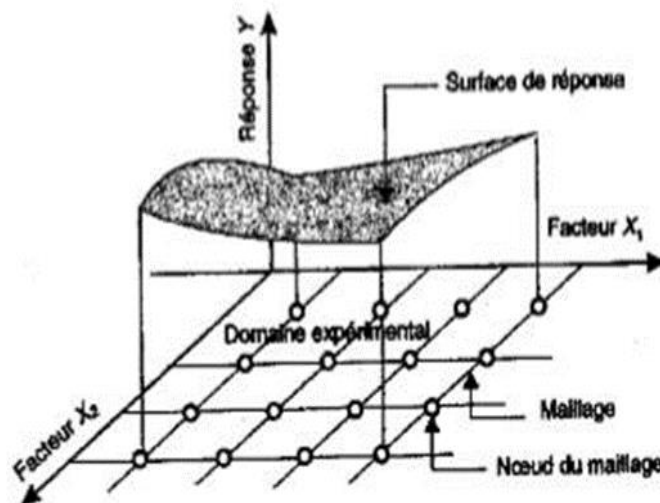


Figure I.13: Maillage du domaine expérimental et surface de réponse [08]

Pour améliorer la connaissance du phénomène observé, le formulateur réalise un maillage du domaine expérimental et exécute des essais à chacun des nœuds du maillage. Dans l'exemple (figure I.13), 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 [09] :

Les valeurs des facteurs (variables explicatives) sont connues sans erreur. Cette condition semble très restrictive : en effet, peut-on prétendre, dans la préparation d'une gâchée de béton, peser exactement la même quantité de ciment lorsqu'on répète un essai ? Bien évidemment, la réponse est négative. Mais, pour satisfaire cette condition N°1, on supposera que la variation du facteur autour d'un niveau fixé est très petite par rapport à la différence entre deux niveaux consécutifs et a, par conséquent, une incidence négligeable sur la réponse. Par exemple, une erreur de quelques dizaines de grammes (correspondant, généralement, à la précision des balances) sur la pesée du ciment pour une gâchée de laboratoire de quatre-vingt-dix litres, aura une influence négligeable sur les variations des résistances à la compression devant la variation du dosage en ciment lui-même, dont on cherche à analyser l'influence.

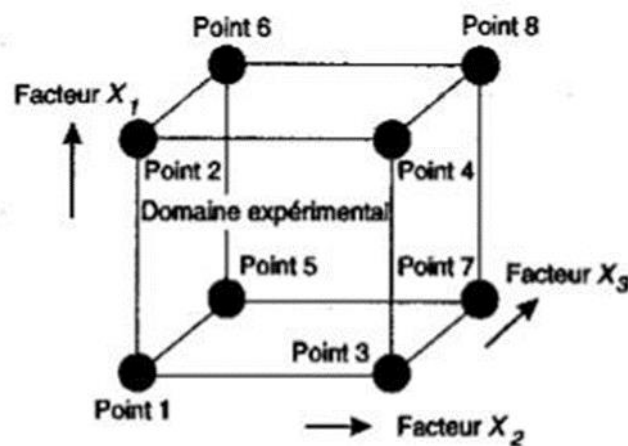
La réponse (variable à expliquer) est homoscedastique. Cela signifie que l'aléa de mesure est constant sur l'ensemble du domaine étudié. Il est, en effet, difficile d'accorder une bonne confiance à un modèle établi sur des données dont la précision ne serait pas homogène. Pour résoudre ce problème, il existe (CETAMA (1986), Sanders et Allard, (1992)) cité dans la référence de [09] 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.

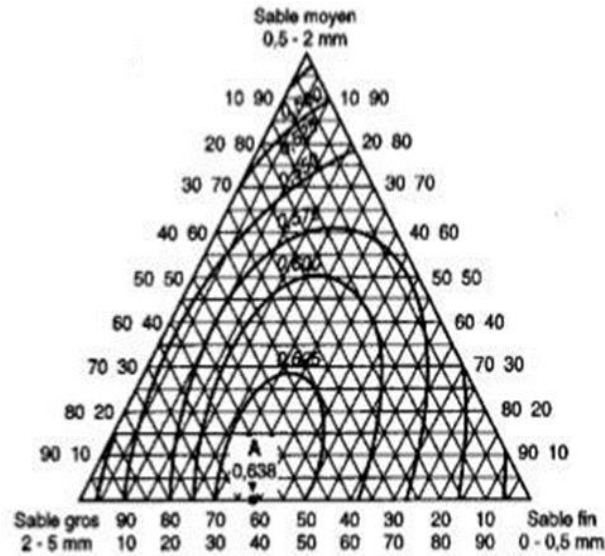
Un plan factoriel est un plan d'expériences comprenant k facteurs, chacun de ces facteurs possédant deux niveaux (un niveau inférieure (-1) et un niveau supérieur $(+1)$), d'où le terme 2^k . Pour k représentant trois facteurs, et, huit expériences sont à réaliser afin d'établir le modèle (figureI.14) avec les interactions d'ordre 2 et l'interaction d'ordre 3. Le modèle recherché pour une réponse Y sera du type :

$$Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_3 + A_{12}X_1X_2 + A_{13}X_1X_3 + A_{23}X_2X_3 + A_{123}X_1X_2X_3$$



FigureI.14: Domaine expérimental d'un plan factoriel complet 2^3 [10]

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 [10]. C'est le cas du triangle de Féret (figureI.15) dont on souhaite déterminer la compacité en tout point, caractérisée par les proportions du mélange qu'il représente.



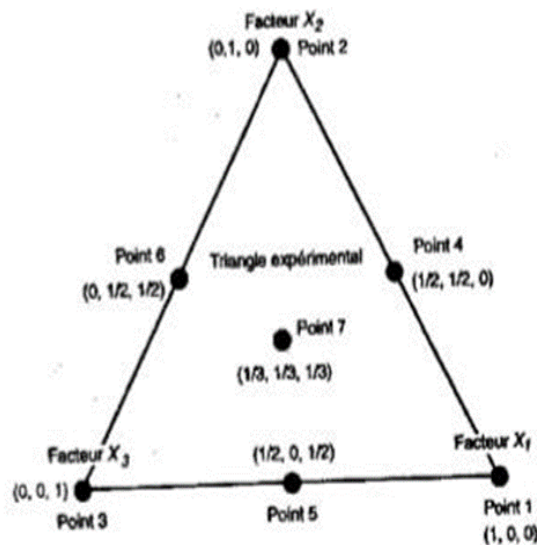
FigureI.15: Triangle de Féret, 1892 .

Les sommets du triangle représentent chacun des facteurs. Les courbes d'isocompactit  sont représentées ici et la compactit  maximale est obtenue enA.

Pour un plan de mélange à trois constituants, Le modèle recherché pour une réponse Y sera du type :

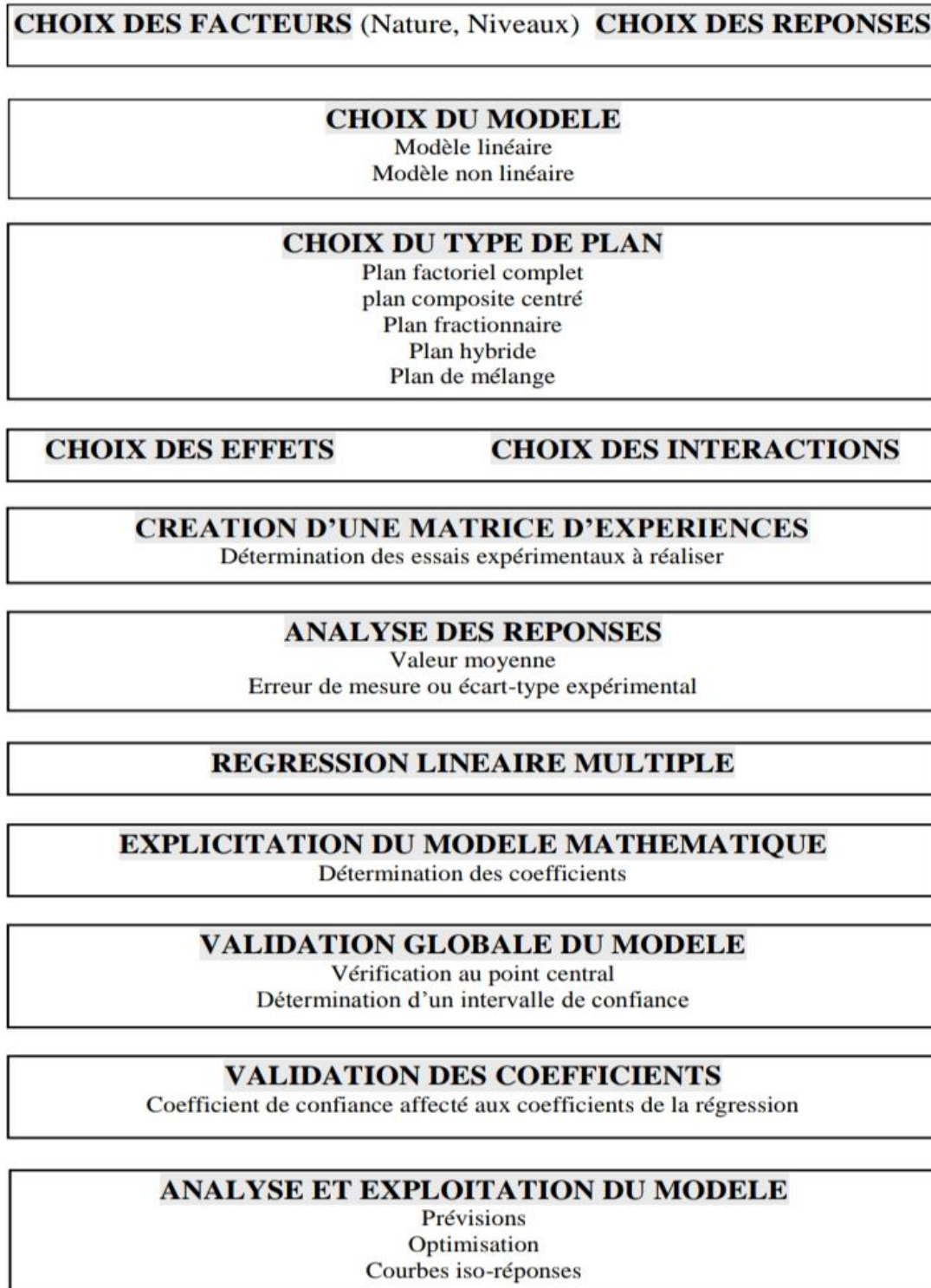
$$Y = BX_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_{12}X_1X_2 + B_{13}X_1X_3 + B_{23}X_2X_3 + B_{123}X_1X_2X_3$$

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.16.



FigureI.16: 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_{123}



Figurel.17: Organigramme général de traitement des plans d'expériences [11]

I.11. Méthode de taguchi :

La méthode Taguchi, inventée par Gen'ichi Taguchi: né le 1^{er} janvier 1924 à Tōkamachi- mort le 2 juin 2012 à Tokyo est un ingénieur et statisticien japonais. Depuis les années 1950, il développe une méthode en vue d'utiliser la statistique comme outil pour améliorer la qualité des produits manufacturés.

Gen'ichi Taguchi a su démocratiser et rendre les plans d'expériences utilisables pour des techniciens. Cette méthode se concentre avant tout à minimiser les variations autour de la valeur de consigne. L'objectif est d'obtenir des produits, processus et systèmes aussi robustes et insensibles aux perturbations externes que possible. La méthode Taguchi est appliquée dans le cadre de l'amélioration de la qualité [12].

I.11.1. Le plan de Taguchi (plan de Taguchi orthogonal) :

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

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

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

Les plans de Taguchi orthogonaux se concentrent sur les effets principaux. Certains des applications sont intégrées dans le logiciel Minitab pour permettre d'étudier les interactions.

Minitab calcule les tableaux de réponses et les résultats du modèle linéaire, et génère des graphiques des effets principaux et des diagrammes des interactions [12].

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 béton de sable incorporé des granulats de caoutchouc et le 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 bétons de sable à base de granulats de caoutchouc et sable de dune.

II.2. Matériaux utilisés :

II.2.1. Sables :

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



Figure II.1. Sable de dune El oued



Figure II.2. Sable Djamaa

Tableau II.1. Caractéristiques physiques des sables

Sables	Masse Volumique apparente (g/cm ³)	Masse Volumique absolue (g/cm ³)	Module de finesse	Equivalent de Sable (%)	Absorption d'eau (%)
Sable Alluvionnaire	1.64	2.70	1.87	80	2.60
Sable de Dune	1.56	2.64	1.2	85	1.62

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

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

Où :

γ : Masse volumique apparente ;

M: Masse du matériau ;

V: Volume total du matériau.

- **La masse volumique absolue :**

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

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

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 pourcentage pondéral respectifs des différentes familles de grain constituant l'échantillon. Cet essai est défini par la norme NF P18 560 [14].

II .2.1.1.3 Module de finesse:

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

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

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

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

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

✚2.8 et 3.3 : le sable est un peu grossier. Il donnera des bétons résistants mais moins maniables

II.2.1.1.4. Equivalent de sable :

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

La hauteur h1 : sable propre + éléments fins.

La hauteur h2 : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention, est: $ES = \left(\frac{h_2}{h_1}\right) \times 100$ (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.

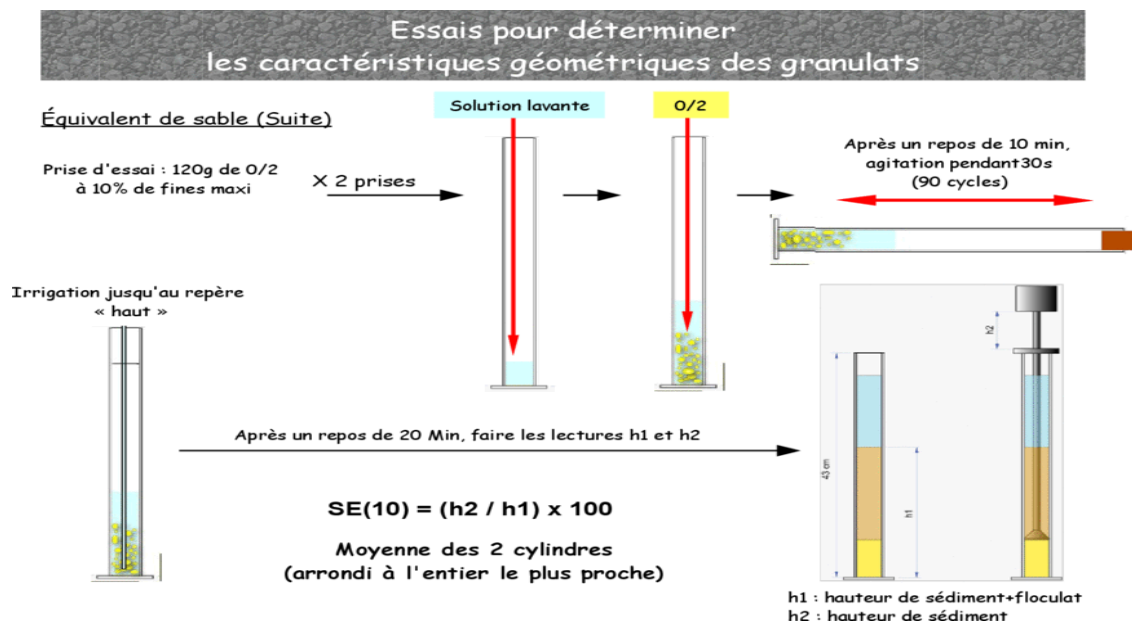


Figure II.3. Schémas de mesure d'équivalent de sable.

Selon la norme NFP18 598, les préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les bétons sont indiquées sur le Tableau II.2 :

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

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

II.2.1.1.5 Compacité :

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

$$\mathbf{C_p = \frac{v_s}{v} = 1 - p = \frac{\gamma}{\gamma_s} \quad (II.5.)}$$

Où : **p** est la porosité.

II.2.2. Ciment :

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



Figure II.4. Ciment utilisé.

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

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

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

Tableau II.4. Analyses chimiques (NA 5042)

Paramètre	Valeur
Pert au feu (%)	10.0 ± 2
Résidus insoluble (%)	1.35 ± 0.65
Teneur en sulfates SO_3 (%)	2.5 ± 0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.7 ± 0.5
Teneur en chlorures (%)	$0.02 - 0.05$
Teneur équivalent en alcalis (%)	$0.3 - 0.75$

Tableau II.5. Composition minéralogique du ciment (CLINKER).

Minéraux	Pourcentage
C ₃ S	60 ± 3.0
C ₂ S	15 ± 3.0
C ₃ A	7.5 ± 1.0
C ₄ AF	11 ± 1.0

Tableau II.6. Caractéristiques physiques du ciment MATINE

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

II.2.3. Granulats de caoutchouc :

Les granulats de caoutchouc utilisés, dans notre étude, sont issus du déchiquetage mécanique de déchets de pneus usagés (la source des GCR utilisés dans notre étude est Les Granulats de caoutchouc proviennent d'une usine de broyage de pneus de caoutchouc située dans la ville de Setif. Après l'élimination de leurs parties métalliques et textiles, ils sont déchiquetés et broyés mécaniquement pour obtenir la finesse désirée Figure II.5. La classe granulaire des granulats de caoutchouc recyclés utilisées, dans notre composites est de 0 à 4mm.

Les propriétés physiques de ceux-ci sont récapitulées dans le Tableau II.7. La Figure II.5 illustre l'analyse granulométriques de ceux-ci.

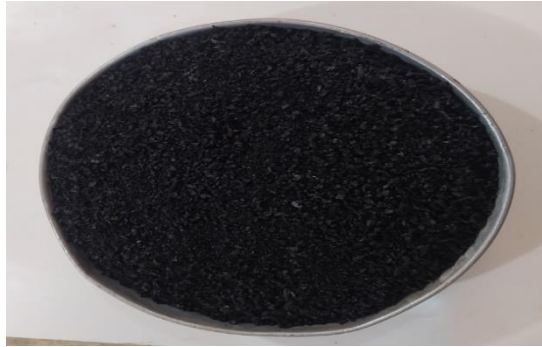


Figure II.5. Granulats de caoutchouc (0-4mm)

Tableau II.7. Propriétés physiques des granulats de caoutchouc utilisés.

Masse volumique absolue	940 Kg/m ³
L'absorption d'eau (%)	0.3
Granulométrie	0-4 mm

Les courbes granulométriques des sables et des granulats de caoutchouc sont présentées sur la figure II.6.

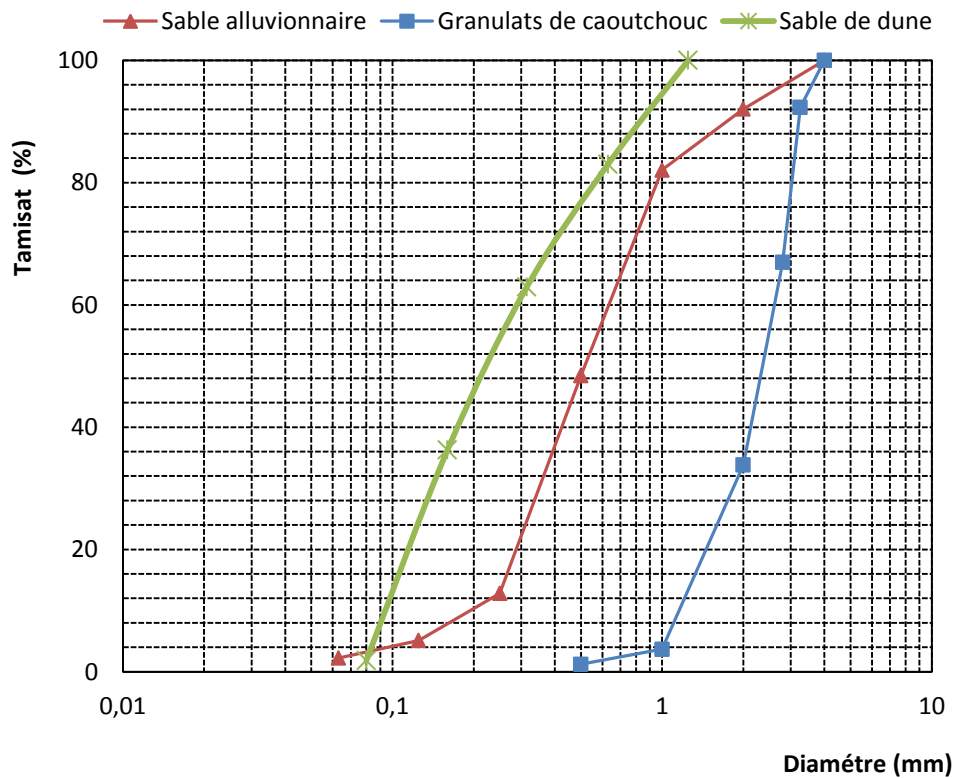


Figure II.6. Courbes granulométriques des sables et des granulats de caoutchouc.

II.2.4. Eau de Gâchage :

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

II.3. Formulations :

II.3.1 Formulations du Béton de sable Témoin (0%GC, 0%SD) :

Pour la composition du béton de sable témoin, nous avons utilisé un dosage en ciment et sable qui correspond à celui d'un mortier normalisé conformément à la norme EN 196-1 [16]; c'est à dire une part de ciment et trois part de sable. Concernant le dosage en eau nous avons utilisé l'essai de cône D'Abrams pour la détermination de la quantité d'eau correspondant à un béton de sable "plastique".

II.3.2 Formulations du Béton de sable avec GC et SD :

Nous avons incorporé des granulats de caoutchouc (GC 0/4 mm) issus du recyclage de pneus usagés en substitution volumique du sable alluvionnaire (SA) avec deux substitutions volumétriques 08, 16 % et une formulation sans substitution (mélange témoin).

Nous avons incorporé des sables de dune (SD) en substitution volumique du sable alluvionnaire (SA) avec deux substitutions volumétriques 10, 20 % et une formulation sans substitution (mélange témoin).

Nous avons fixé le dosage en ciment ($C=400 \text{ kg/m}^3$) et nous avons varié les rapports E/C (0,55-0,60-0,65).

II.3.3 Compositions des bétons de sable :

Les compositions étudiées sont présentées dans le Tableau II.8 suivant :

Tableau II.8. Composition des bétons de sable utilisés

Désignation du mélange	Ciment (kg)	Sable alluvionnaire (kg)	Granulats de caoutchouc (kg)	Sable de dune (kg)	Eau (L)	E/C
GC0 SD0	400	1200	/	/	220	0,55
GC8 SD10	400	984	32,90	116,16	220	0,55
GC16SD20	400	768	66,74	234,96	220	0,55
GC0 SD10	400	1080	/	116,16	240	0,60
GC8 SD20	400	864	32,90	234,96	240	0,60
GC16 SD0	400	1008	66,74	/	240	0,60
GC0 SD20	400	960	/	234,96	260	0,65
GC8 SD10	400	1104	32,90	/	260	0,65
GC16SD10	400	888	66,74	116,16	260	0,65

II.4. Procédure Expérimentale:

II.4.1 Fabrication du béton de sable :

II.4.1.1 Pesage des composants du béton:

Dans un premier temps nous avons pesés individuellement tous les composants des bétons de sable pour chaque formulation du tableau II-8.



Figure. II.7. Pesage des composants du béton.

II.4.1.2 Malaxage des composants du béton de sable :

Pour le malaxage des constituants, un malaxeur à mortier de capacité 5 litres a été utilisé avec le séquençage suivant :

Introduction dans un premier temps de tous les composants solides et secs dans le malaxeur (ciment, sables, granulats de caoutchouc) puis malaxage pendant trois (3) minutes à vitesse lente (1) afin d'assurer une bonne dispersion des G.C. parmi les éléments traditionnels du mortier.

Introduction dans un second temps du mélange contenant 80% d'eau puis malaxage pendant deux (2) minutes à vitesse lente.

Introduction dans un troisième temps éventuellement les 20% restant d'eau puis malaxage pendant 2 minutes à vitesse lente.

Dans un quatrième temps malaxage de tout le mélange pendant trois à quatre (3-4) minutes à vitesse rapide.

II.4.1.3 Coulage des éprouvettes:

Dans ce travail nous avons confectionnés 126 éprouvettes de dimensions (4 x 4 x 16) cm Voir FiguresII.8.



Figure. II.8. Moule (4 x 4 x 16) cm.

II.4.1.4 Etapes de coulage des éprouvettes:

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

Première étape:

Dans un premier temps nous avons mis en place les moules puis les avons lubrifiés avec de l'huile à moteur 40 afin que le mortier ne se colle pas aux parois des celles-ci. (Voir figure II.9).



Figure II.9. Lubrification des moules.

Deuxième étape:

Dans un deuxième temps nous avons rempli l'éprouvette à moitié puis vibrer le tout pendant trente (30) secondes afin d'éliminer les vides. (Voir Figure II.10)



Figure II.10. Remplissage à moitié et vibration

Troisième étape:

Dans un troisième temps nous avons rempli totalement l'éprouvette puis vibrer le tout une deuxième fois pendant trente (30) secondes. (Voir Figure II.11.)



Figure II.11. Remplissage total et vibration.

Quatrième étape:

Dans un quatrième temps nous avons vibré une troisième fois l'éprouvette et tout son contenu pendant vingt (20) secondes puis rendu uniforme sa face supérieure en la rasant avec la truelle (Voir Figure II.12).

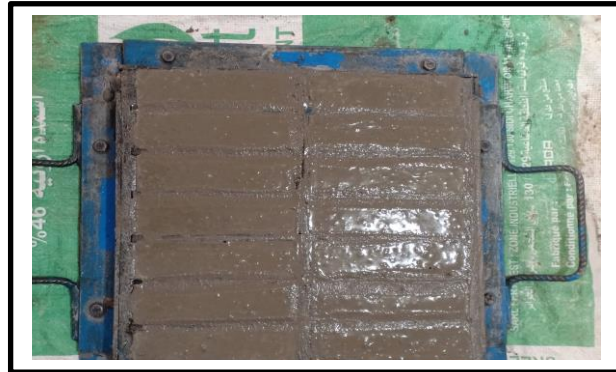


Figure II.12. Dernière vibration et rasage

II.4.1.5 Démoulage et pesage des éprouvettes après 24h:

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

II.4.2 Les essais réalisés:

II.4.2.1 Essais réalisés à l'état frais :

II.4.2.1.1 Essai de maniabilité (cône d'Abrams) :

Cet essai consiste à :

- Remplir le cône en trois couches, tassés avec une tige d'acier pointue de 16 mm de diamètre à raison de 25 coups par couche.
- Soulever le moule avec précaution et mesurer l'affaissement en cm (voir figure II.13.14a., 14b).

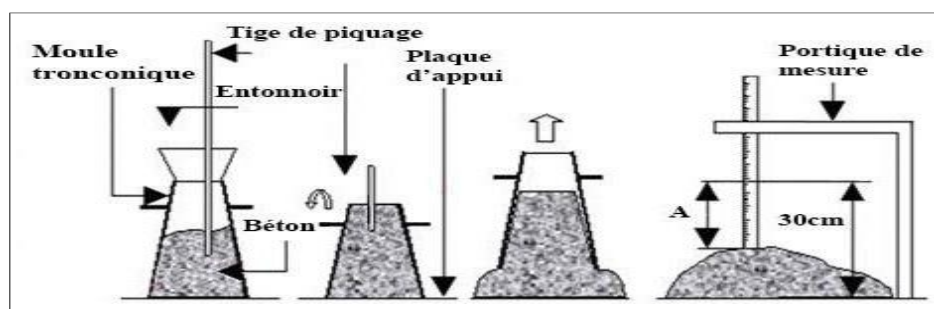


Figure II.13. Dispositif de mesure d'affaissement au cône d'Abrams



Figure II.14a. L'essai d'affaissement au cône d'Abrams avant le démoulage.



Figure II.14b. L'essai d'affaissement au cône d'Abrams après le démoulage

Afin de définir la classe d'affaissement, la norme NF P18 305 définit les classes d'affaissement indiquées sur le Tableau II.9.

Tableau II.9. Classes de consistance du mortier.

Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams Norme NF P18 305	
Consistance	Affaissement au cône d'Abrams (en cm)
Ferme	1 – 4
Plastique	5 - 9
Très plastique	10 - 15
Fluide	16 - 21
Très fluide	≥ 22

Dans notre étude, nous avons obtenu un béton de sable plastique dans ($E/C = 0.55$), nous avons obtenu un béton de sable très plastique dans ($E/C = 0.60$ et $E/C = 0.65$).

II.4.2.1.2 Détermination de la masse volumique :

Cette mesure détermine le rendement volumique de la composition du béton frais et permet de vérifier la validité de la formulation théorique.

Pour effectuer cette mesure, on utilise un récipient de volume et de masse connus. Ce récipient est rempli entièrement du béton de sable et sa surface libre est ensuite arasée. On pèse alors le

réceptier plein. Le rapport entre la masse du béton (masse du réceptier plein à laquelle on soustrait la masse du réceptier vide) sur le volume du réceptier correspond à la masse volumique du mortier frais exprimée en kg/m^3 .

II.4.3 Essais réalisés à l'état sec:

Les essais sur le béton de sable à l'état sec ont tous débuté lorsque les éprouvettes ont subi une cure de 28 jours dans l'eau.

En effet les éprouvettes ont subi une cure de 28 jours dans l'eau pour les permettre de bien sécher dans un milieu naturel dont le ph est sensiblement égal à 7 sans être influer par des facteurs externes.

II.4.3.1 Détermination de la masse Volumique :

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

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

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



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

II.4.3.2 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 béton de sable durci ont été évaluées à 28 jours en utilisant une machine de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 20 KN, pourvue d'un dispositif de flexion à 3 points (Figure II.16). La valeur de la résistance considérée constitue la moyenne de la contrainte d'écrasement de trois éprouvettes.

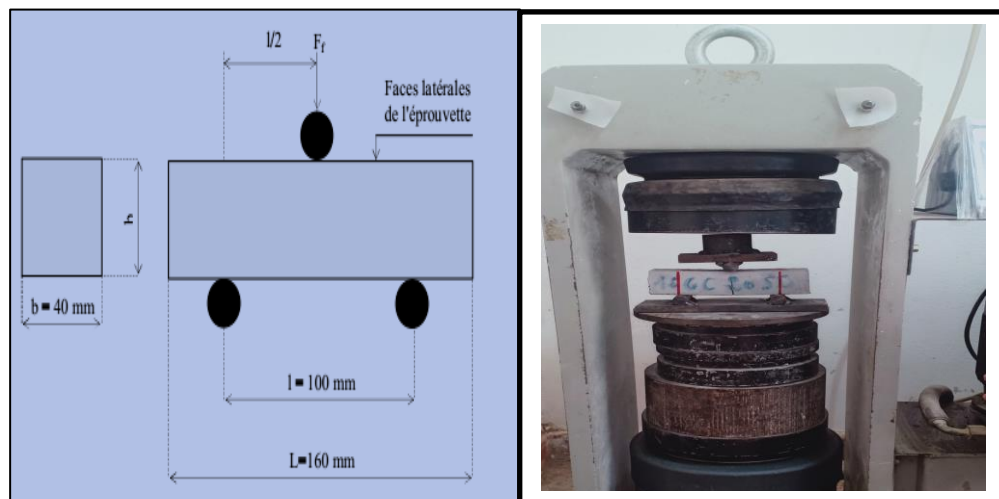


Figure II.16. Essai de traction par flexion 3 points sur les éprouvettes (4x4x16) cm³

II.4.3.3 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 béton durci.

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

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression.

L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture.

La charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai.

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

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

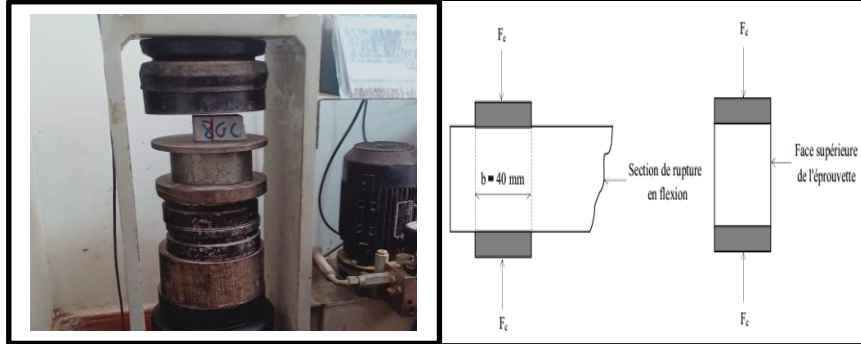


Figure II.17 : Essai de compression sur les éprouvettes (4x4x16) cm³

II.4.3.4 Essai d'auscultation dynamique:

La vitesse sonique est un paramètre qui permet d'obtenir une information qualitative sur le matériau et sur la structure. La vitesse des ondes ultrasoniques à travers le béton résulte du temps mis par les ondes pour traverser la pâte de ciment durci et les granulats. Elle dépend énormément du module d'élasticité des granulats et de leur quantité dans le béton et le mortier. Le principe de la méthode des ultrasons consiste à mesurer le temps de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le béton. Les principales caractéristiques de tous les appareils disponibles sur le marché comprennent un générateur d'impulsion et un récepteur d'impulsion, comme le montre la Figure II.18.



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

Chapitre III Analyser et discussion des résultats

III.1. Introduction:

Dans ce chapitre nous allons appliquer la méthode de Taguchi pour modéliser l'effet des rapports E/C et des taux de l'incorporation des granulats de caoutchouc et des sables de dunes sur le comportement rhéologique et mécanique du béton de sable.

III- 2. Facteurs :

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

III- 3. Niveaux des facteurs :

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

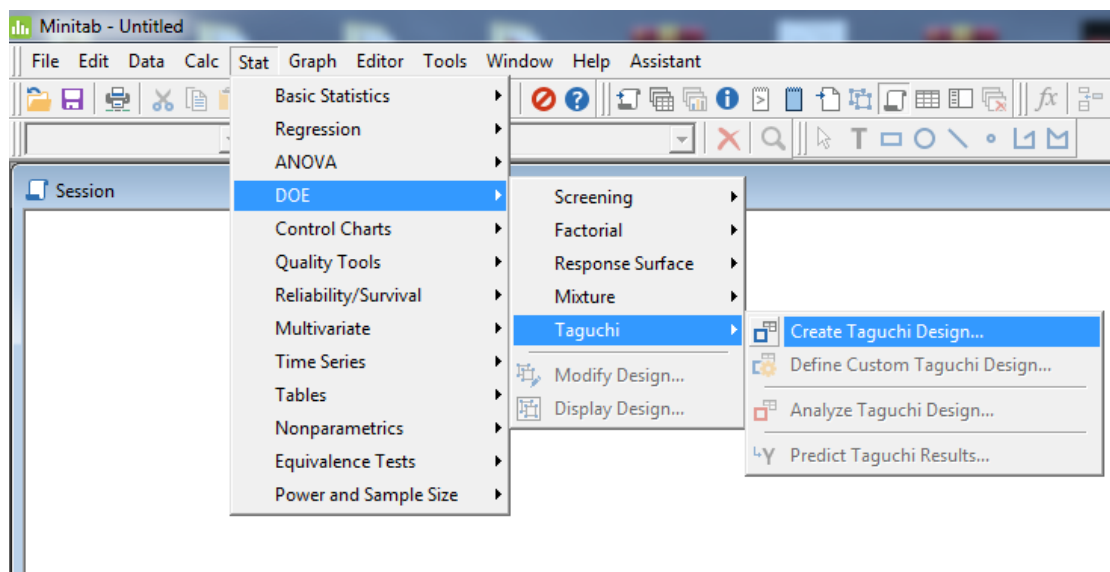
Tableau III .1 : Les facteurs et les niveaux ciblés.

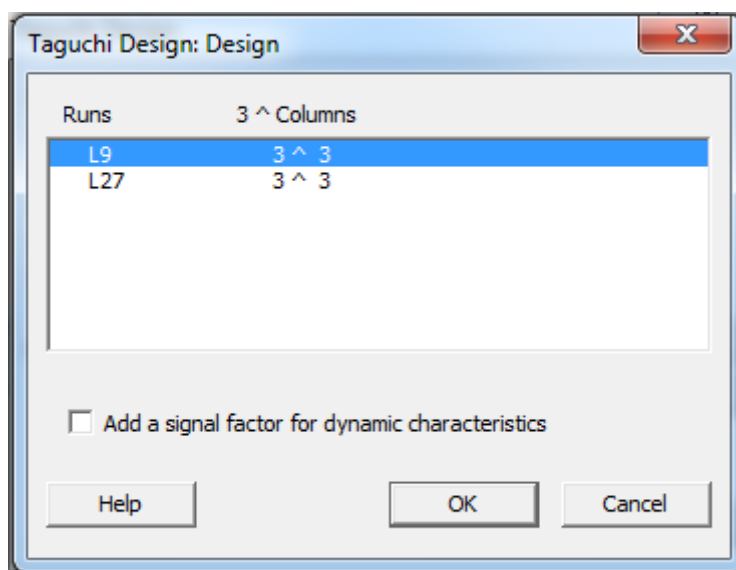
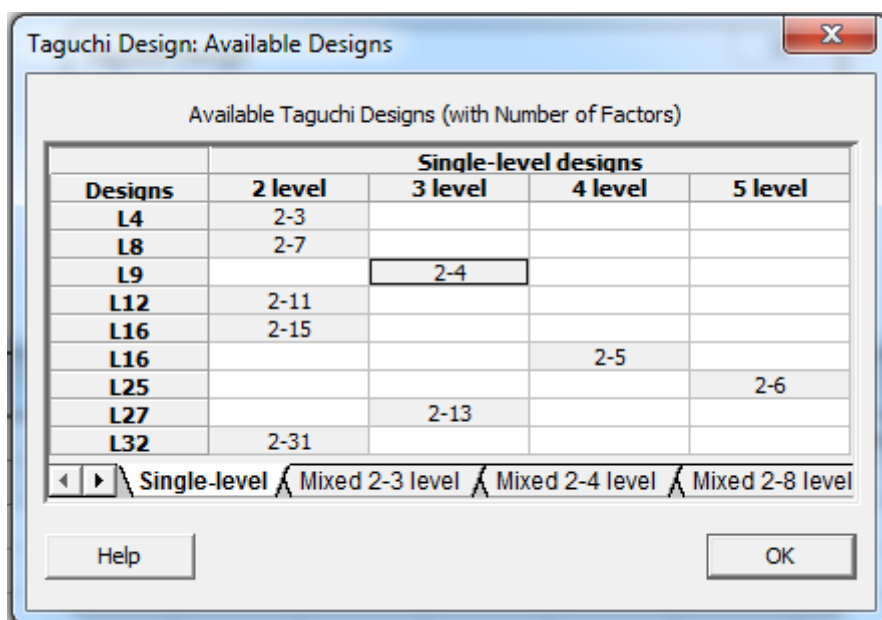
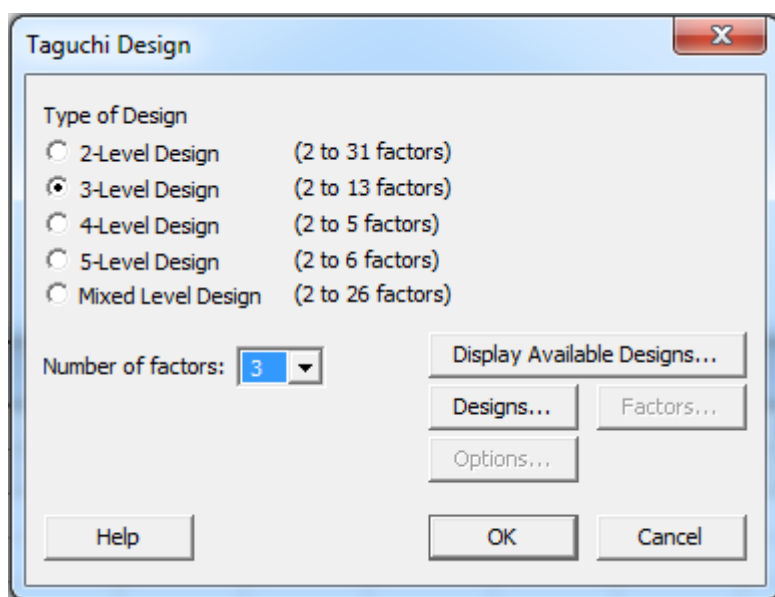
Facteurs	Niveaux		
Eau/ciment (E/C)	0.55	0.60	0.65
Teneur en caoutchouc (%)	0	08	16
Teneur en sable de dune (%)	0	10	20

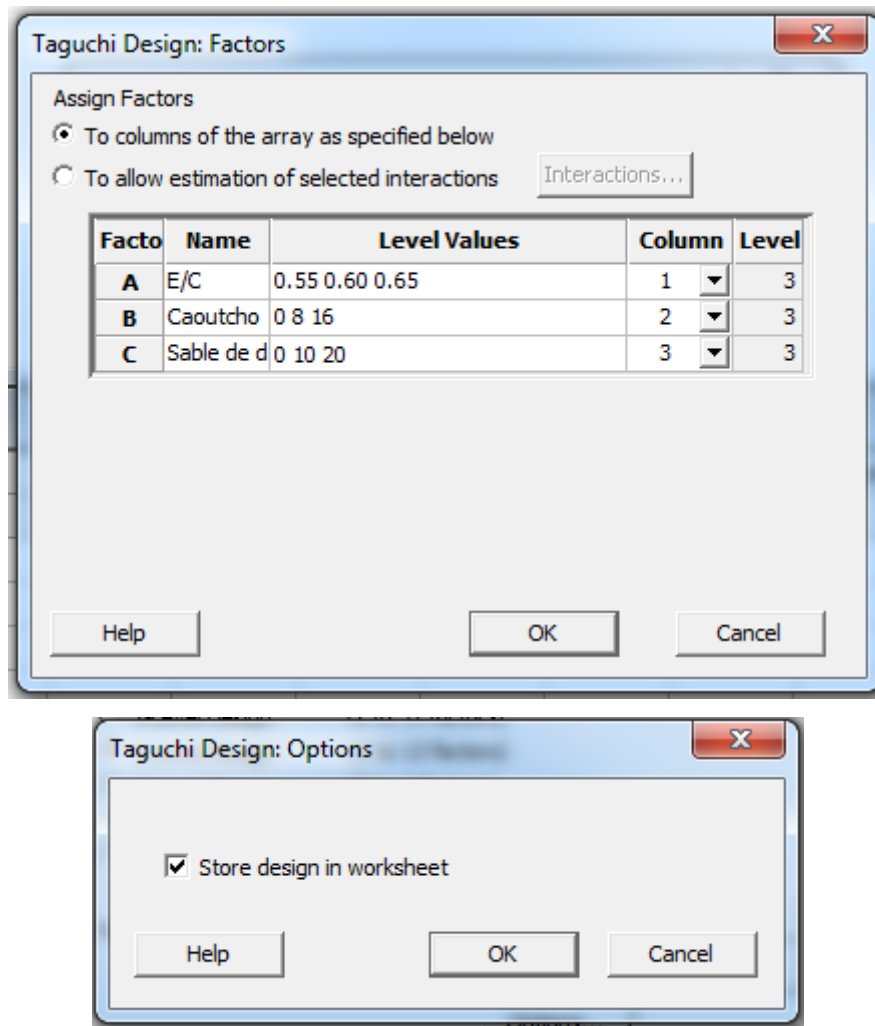
III-4. Choix de la matrice de Taguchi pour notre étude :

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

La matrice des effets selon la méthode Taguchi est établie à l'aide du logiciel MINITAB 18, selon les étapes suivantes :







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	Eau/ciment (E/C)	Teneur en caoutchouc (%)	Teneur en sable de dune (%)
01	0.55	0	0
02	0.55	8	10
03	0.55	16	20
04	0.60	0	10
05	0.60	8	20
06	0.60	16	0
07	0.65	0	20
08	0.65	8	0
09	0.65	16	10

III-5. La masse volumique à l'état frais:

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

N°	Bétons de sable	La masse volumique à l'état frais (Kg/m ³)
1	GC0 SD0	2190
2	GC8 SD10	2140
3	GC16 SD20	2125
4	GC0 SD10	2160
5	GC8 SD20	2070
6	GC16 SD0	2050
7	GC0 SD20	2210
8	GC8 SD0	2152
9	GC16 SD10	2010

III-5-1 Détermination du résultat optimal pour chaque facteur :

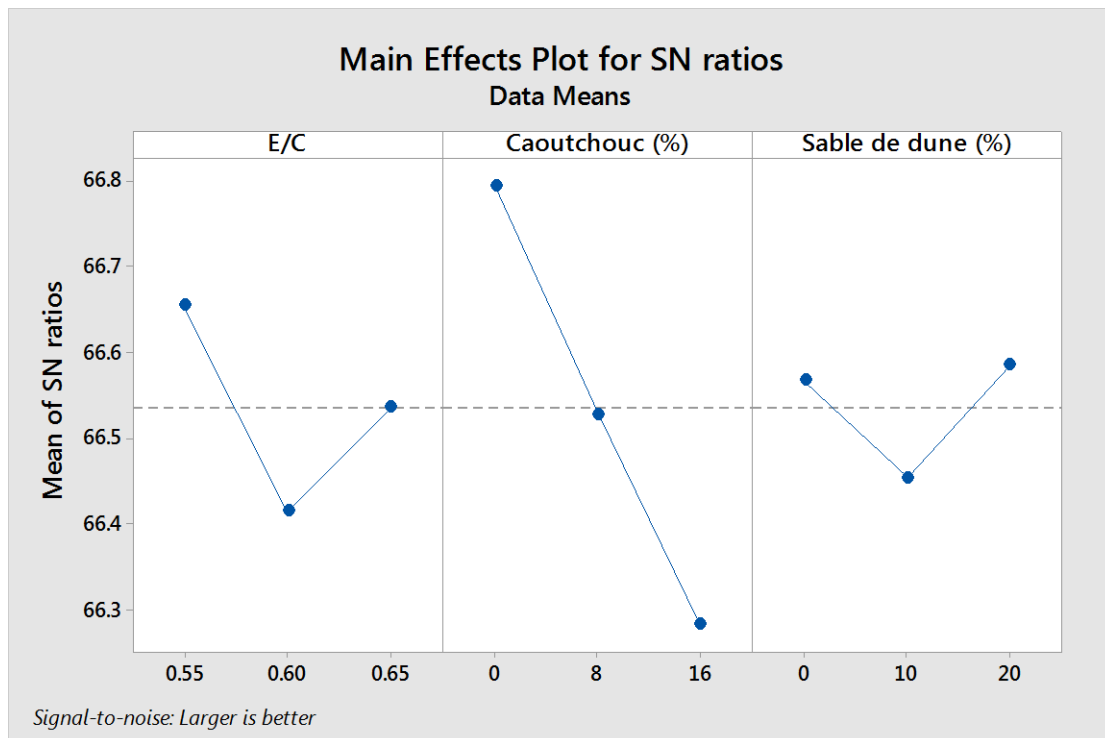


Figure III .1: Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios)

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 masse volumique de à l'état frais, sont les suivant: E/C (0.55) , teneur en caoutchouc (0%) et le teneur en sable de dune (20%).

III-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	2349	230	10.20	0.000	
E/C	-277	380	-0.73	0.500	1.00
Caoutchouc (%)	-7.81	2.38	-3.29	0.022	1.00
Sable de dune (%)	0.22	1.90	0.11	0.914	1.00

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
46.5922	69.40%	51.04%	0.00%

Regression Equation

$$\text{Masse volumique (Kg/m}^3\text{)} = 2349 - 277 \text{ E/C} - 7.81 \text{ Caoutchouc (\%)} + 0.22 \text{ Sable de dune (\%)}$$

III-5-3 Interprétation des résultats:

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

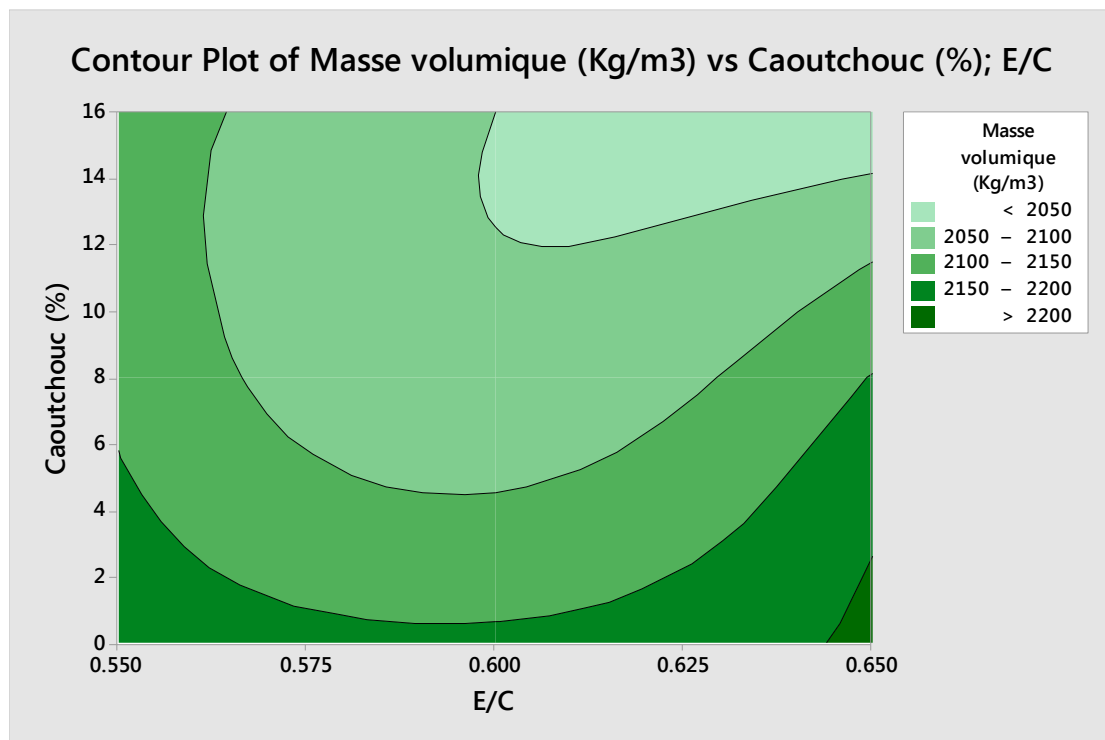
Par ailleurs la diminution du rapport E/C implique moins d'eau dans le mélange ce qui se traduit par une augmentation de la masse volumique à l'état frais.

En plus, un pourcentage élevé de granulats de caoutchouc GC qui se traduit par une grande quantité d'eau dans le mélange. Par conséquent, ce qui se traduit par une réduction de la masse volumique à l'état frais.

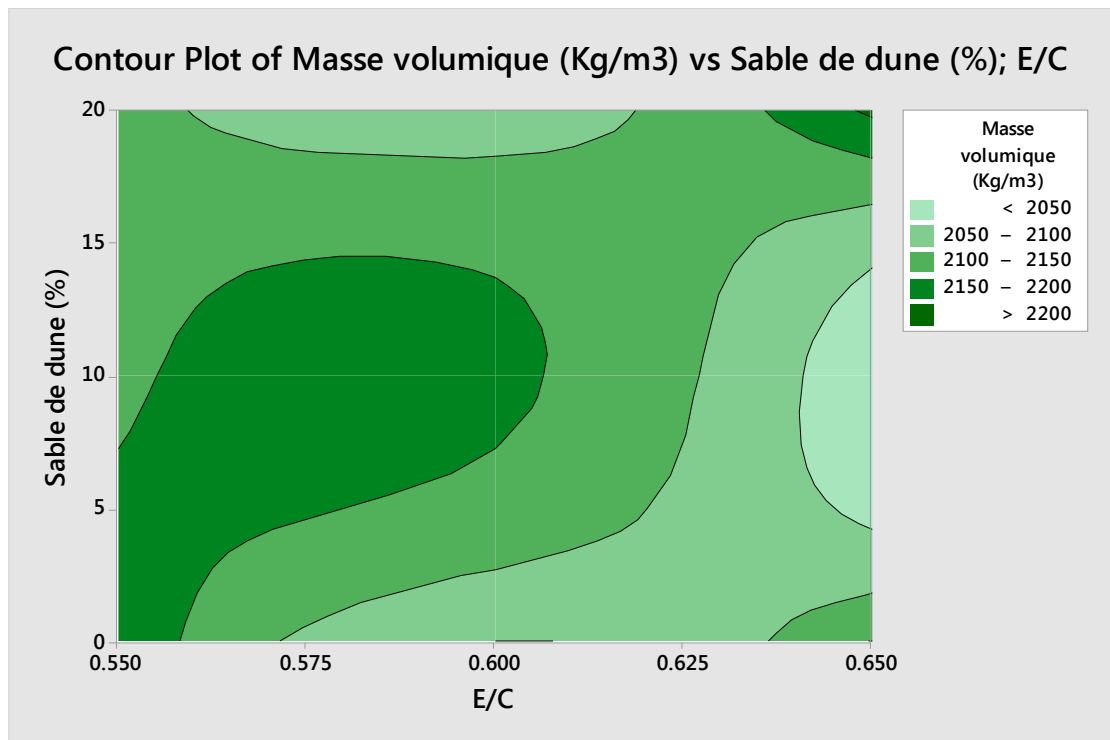
En effet, en augmentant de pourcentage de sable de dune SD, amène à réduire la demande en eau qui est plus important pour les grains du sable de dune ce qui se traduit par une augmentation de la masse volumique à l'état frais.

Toutefois il est toujours recommandé d'optimiser de pourcentage de sable de dune SD pour avoir les meilleures caractéristiques rhéologiques et mécaniques du mélange.

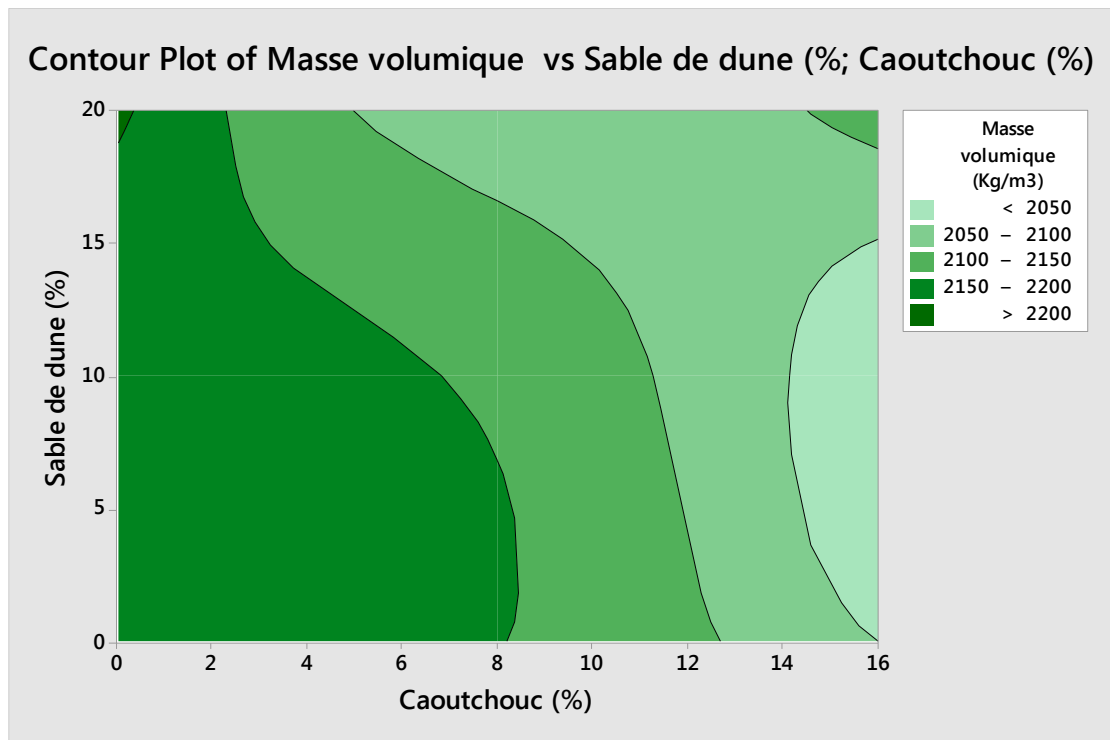
Les courbes obtenues et qui peuvent prédire la masse volumique à l'état frais à partir des paramètres étudiés sont illustrées par les figures III.2, III.3 et III.4.



Figures III .2: la masse volumique à l'état frais en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et du rapport E/C.



Figures III.3: la masse volumique à l'état frais en fonction de pourcentage de sable de dune et du rapport E/C.



Figures III .4: la masse volumique à l'état frais en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de pourcentage de sable dune.

Ces figures montrent clairement que la masse volumique à l'état frais peut atteindre 2200 kg/m³ si le rapport E/C varie entre 0.56 et 0.60 avec un pourcentage de granulats de caoutchouc GC entre 0 et 4% et un pourcentage de sable de dune SD variant entre 0 et 13.6%.

III-6. Résistance mécanique à la compression:

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

N°	Bétons de sable	Résistance Mécanique Rc28 (MPa)
1	GC0 SD0	36,50
2	GC8 SD10	33,12
3	GC16 SD20	31,37
4	GC0 SD10	34,62
5	GC8 SD20	31,06
6	GC16 SD0	27,75
7	GC0 SD20	30,90
8	GC8 SD0	32,25
9	GC16 SD10	25,56

III-6-1 Détermination du résultat optimal pour chaque facteur (Rc28):

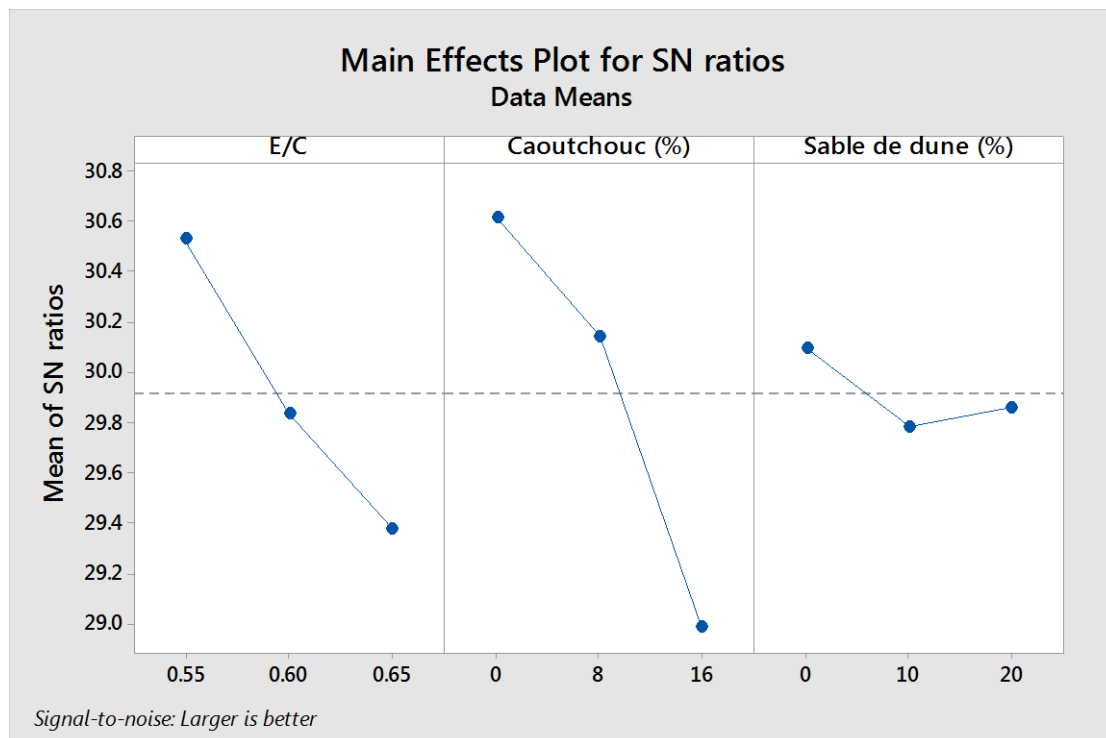


Figure III .5: Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios)

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 résistance mécanique à la compression, sont les suivant: E/C (0.55) , teneur en caoutchouc (0%) et le teneur en sable de dune (0%).

III-6-2 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	59.44	7.30	8.14	0.000	
E/C	-40.9	12.1	-3.40	0.019	1.00
Caoutchouc (%)	-0.3612	0.0754	-4.79	0.005	1.00
Sable de dune (%)	-0.0528	0.0603	-0.88	0.421	1.00

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.47663	87.59%	80.14%	50.20%

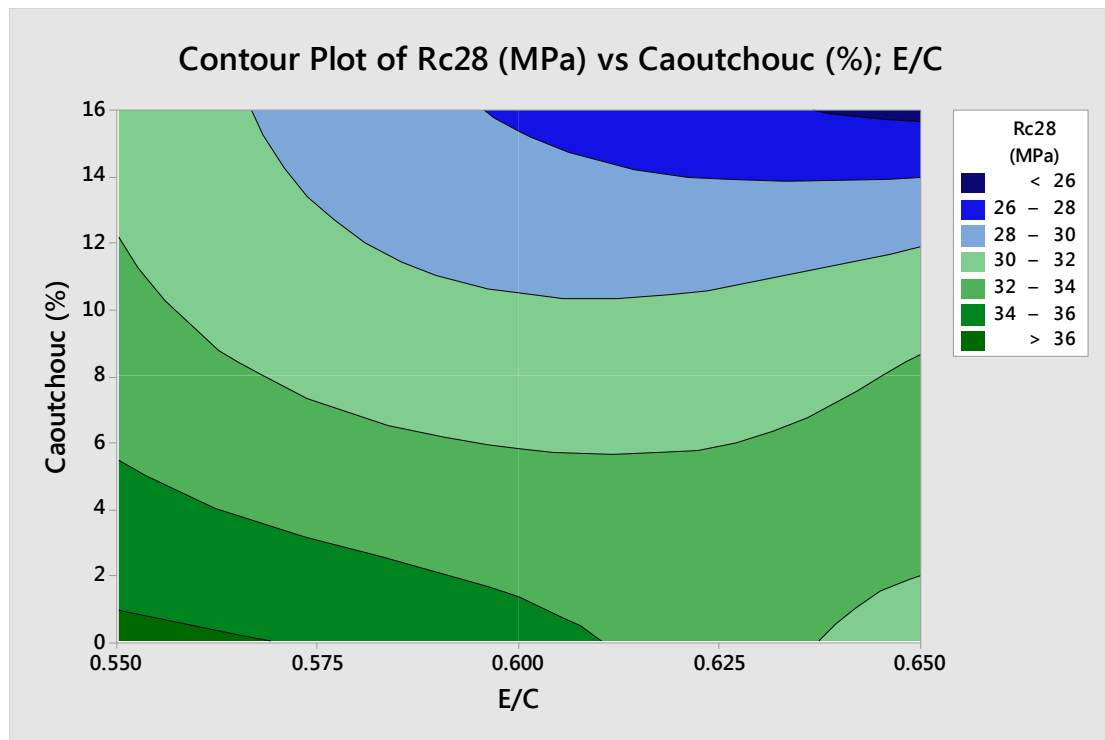
Regression Equation

$$\text{Rc28 (MPa)} = 59.44 - 40.9 \text{ E/C} - 0.3612 \text{ Caoutchouc (\%)} - 0.0528 \text{ Sable de dune (\%)}$$

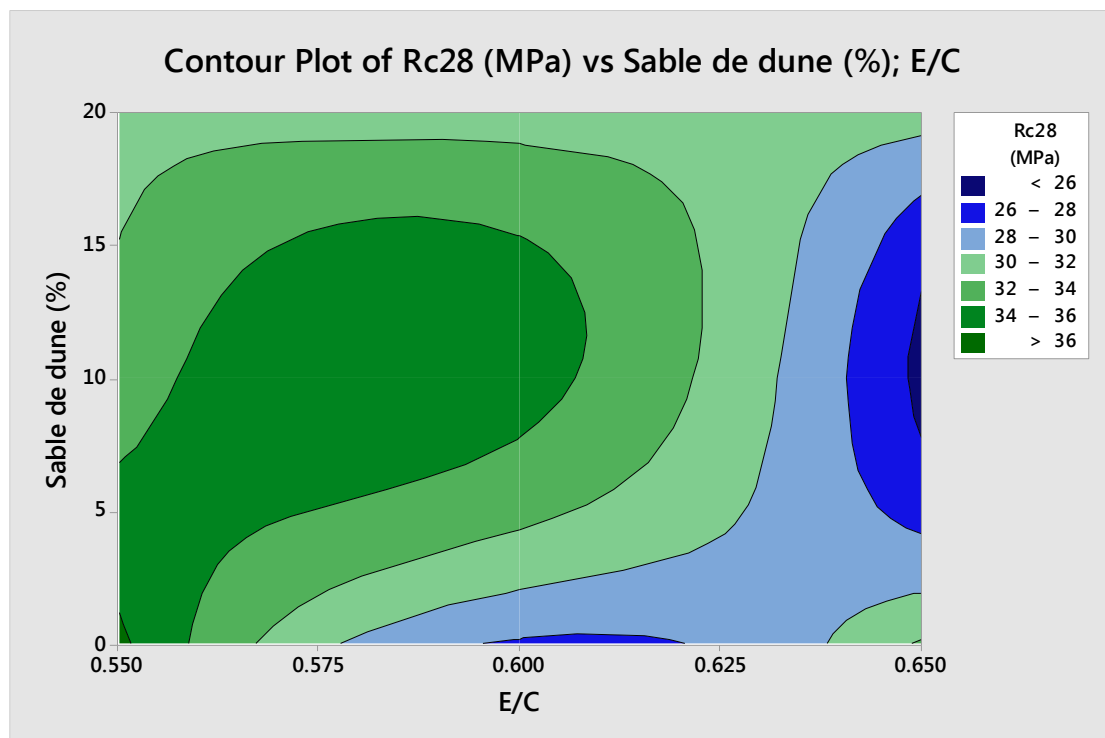
III-6-3 Interprétation des résultats:

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

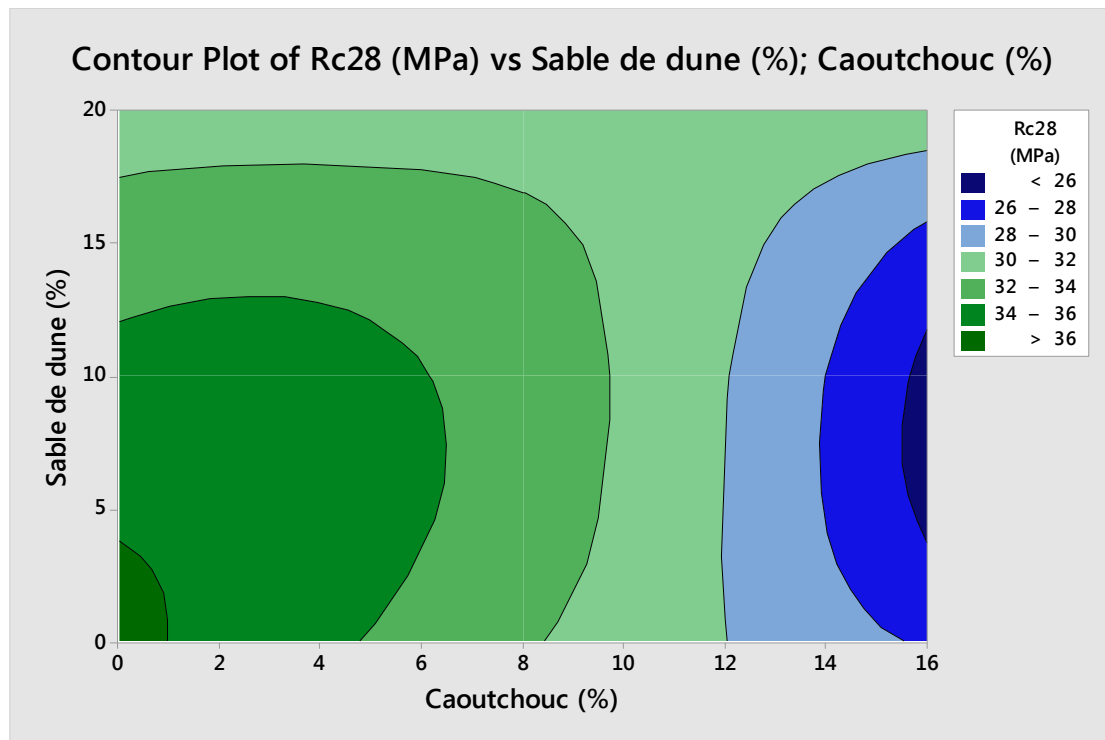
Par ailleurs la diminution du rapport E/C ou la diminution de pourcentage de granulats de caoutchouc GC et le pourcentage de sable de dune SD implique moins d'eau dans le mélange ce qui se traduit par une augmentation de la résistance mécanique à la compression à 28 jours. Les courbes obtenues et qui peuvent prédire la résistance mécanique à la compression à 28 jours à partir des paramètres étudiés sont illustrées par les figures III.6, III.7 et III.8.



Figures III .6: La résistance mécanique à la compression à 28 jours en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et du rapport E/C.



Figures III .7: La résistance mécanique à la compression à 28 jours en fonction de pourcentage de sable de dune et du rapport E/C.



Figures III .8: La résistance mécanique à la compression à 28 jours en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de pourcentage de sable dune.

Ces figures montrent clairement que la résistance mécanique à la compression à 28 jours peut dépasser 36MPa si le rapport E/C varie entre 0.55 et 0.60 avec un pourcentage de granulats de caoutchouc GC entre 0 et 5% et un pourcentage de sable de dune SD variant entre 0 et 12%.

III-7. Résistance mécanique à la traction:

Tableau III.5 : Résultats des essais de la résistance mécanique à la traction par flexion.

N°	Bétons de sable	Résistance mécanique à la traction Rt28 (MPa)
1	GC0 SD0	7,40
2	GC8 SD10	8,90
3	GC16 SD20	10,30
4	GC0 SD10	8,56
5	GC8 SD20	10,90
6	GC16 SD0	8,17
7	GC0 SD20	9,59
8	GC8 SD0	9,15
9	GC16 SD10	10,08

III-7-1 Détermination du résultat optimal pour chaque facteur (Rt28) :

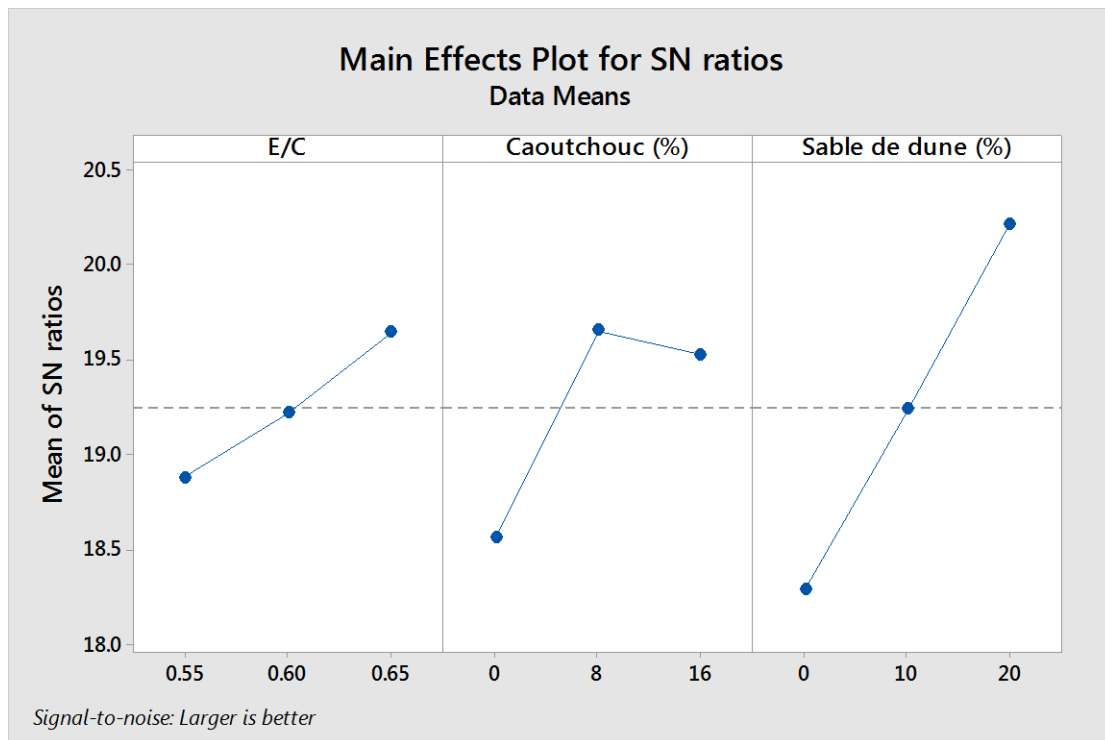


Figure III .9: Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios)

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 résistance mécanique à la traction par flexion à 28 jours, sont les suivant: E/C (0.65) , teneur en caoutchouc (8%) et le teneur en sable de dune (20%).

III-7-2 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	3.28	2.58	1.27	0.260	
E/C	7.40	4.26	1.74	0.143	1.00
Caoutchouc (%)	0.0625	0.0266	2.35	0.066	1.00
Sable de dune (%)	0.1012	0.0213	4.75	0.005	1.00

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.521601	86.15%	77.84%	51.88%

Regression Equation

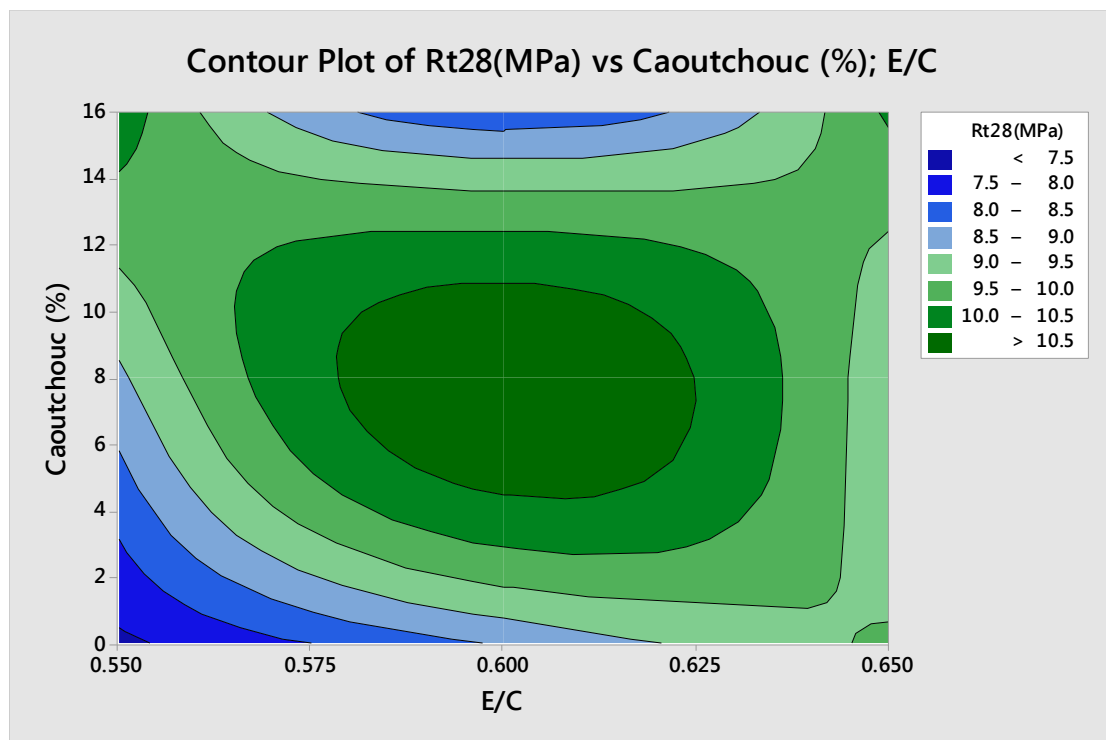
$$Rt28(MPa) = 3.28 + 7.40 E/C + 0.0625 \text{ Caoutchouc (\%)} + 0.1012 \text{ Sable de dune (\%)}$$

III-7-3 Interprétation des résultats:

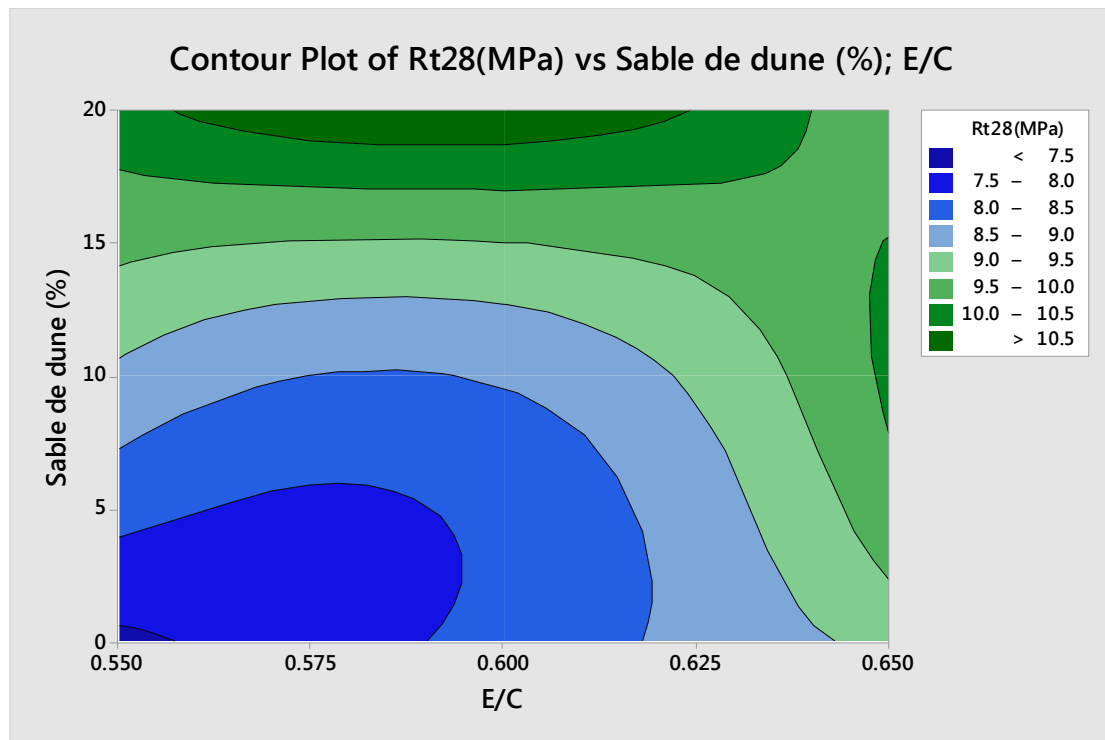
Le signe plus (+) indique que les facteurs influent positivement sur la résistance mécanique à la traction par flexion à 28 jours.

Il est clair que l'augmentation du rapport E/C ou l'augmentation de pourcentage de granulats de caoutchouc GC avec le pourcentage de sable de dune SD traduit par une augmentation de la résistance mécanique à la traction par flexion à 28 jours.

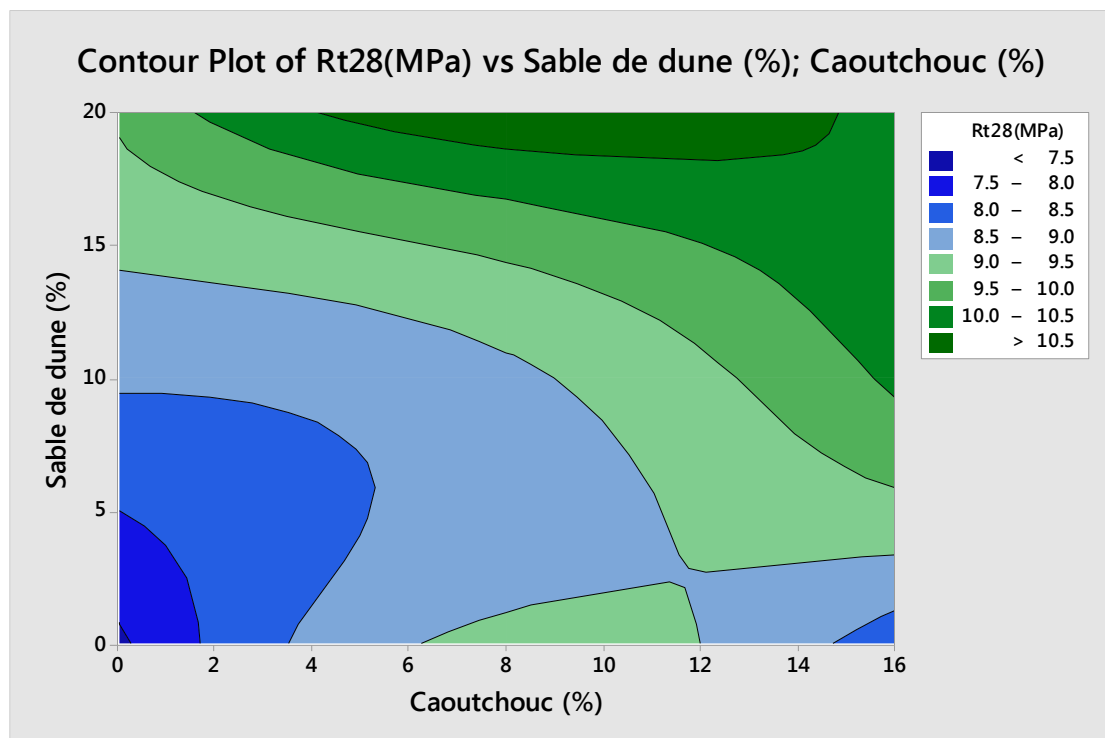
Les courbes obtenues et qui peuvent prédire la résistance mécanique à la traction à 28 jours à partir des paramètres étudiés sont illustrées par les figures III.10, III.11 et III.12.



Figures III.10: La résistance mécanique à la traction à 28 jours en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et du rapport E/C.



Figures III.11: La résistance mécanique à la traction à 28 jours en fonction de pourcentage de sable de dune et du rapport E/C.



Figures III.12: La résistance mécanique à la traction à 28 jours en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de pourcentage de sable dune.

Ces figures montrent clairement que la résistance mécanique à la traction à 28 jours peut dépasser 10 MPa si le rapport E/C varie entre 0.58 et 0.63 avec un pourcentage de granulats de caoutchouc GC entre 4 et 12% et un pourcentage de sable de dune SD variant entre 18 et 20%.

III-8 Vitesse de propagation d'ultrasons:

Tableau III .6 : Résultats des essais de la vitesse de propagation d'ultrasons.

N°	Bétons de sable	Vitesse de propagation d'ultrasons (m/s)
1	GC0 SD0	3587
2	GC8 SD10	3519
3	GC16 SD20	3448
4	GC0 SD10	3699
5	GC8 SD20	3477
6	GC16 SD0	3257
7	GC0 SD20	3600
8	GC8 SD0	3325
9	GC16 SD10	3135

III-8-1 Détermination du résultat optimal pour chaque facteur (Ultrasons):

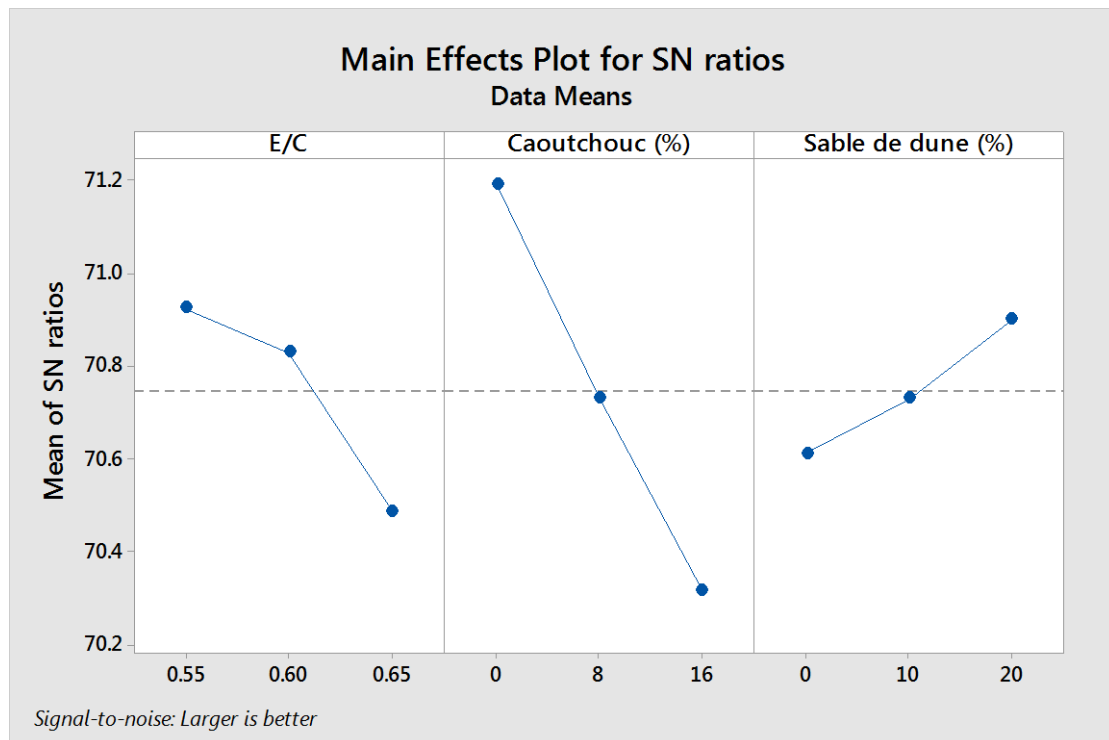


Figure III .13: Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios).

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 vitesse de propagation d'ultrasons, sont les suivant: E/C (0.55) , teneur en caoutchouc (0%) et le teneur en sable de dune (20%).

III-8-2 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	4575	310	14.75	0.000	
E/C	-1680	512	-3.28	0.022	1.00
Caoutchouc (%)	-21.62	3.20	-6.75	0.001	1.00
Sable de dune (%)	5.63	2.56	2.20	0.079	1.00

Model Summary

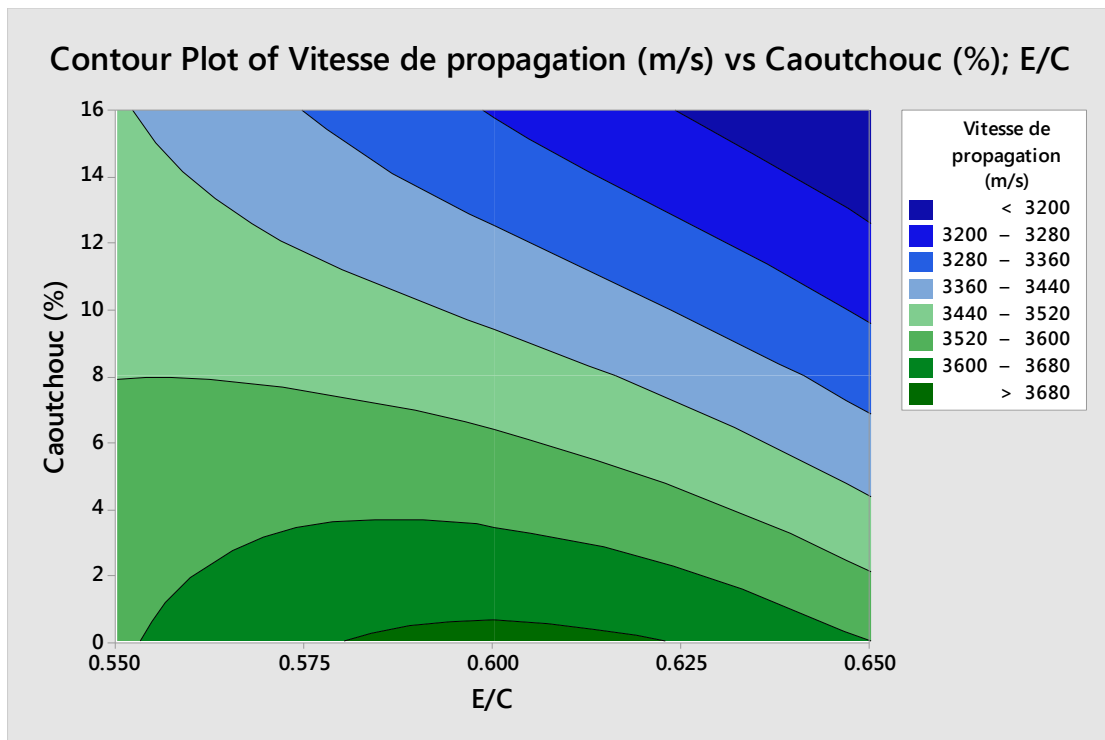
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
62.7464	92.45%	87.92%	72.46%

Regression Equation

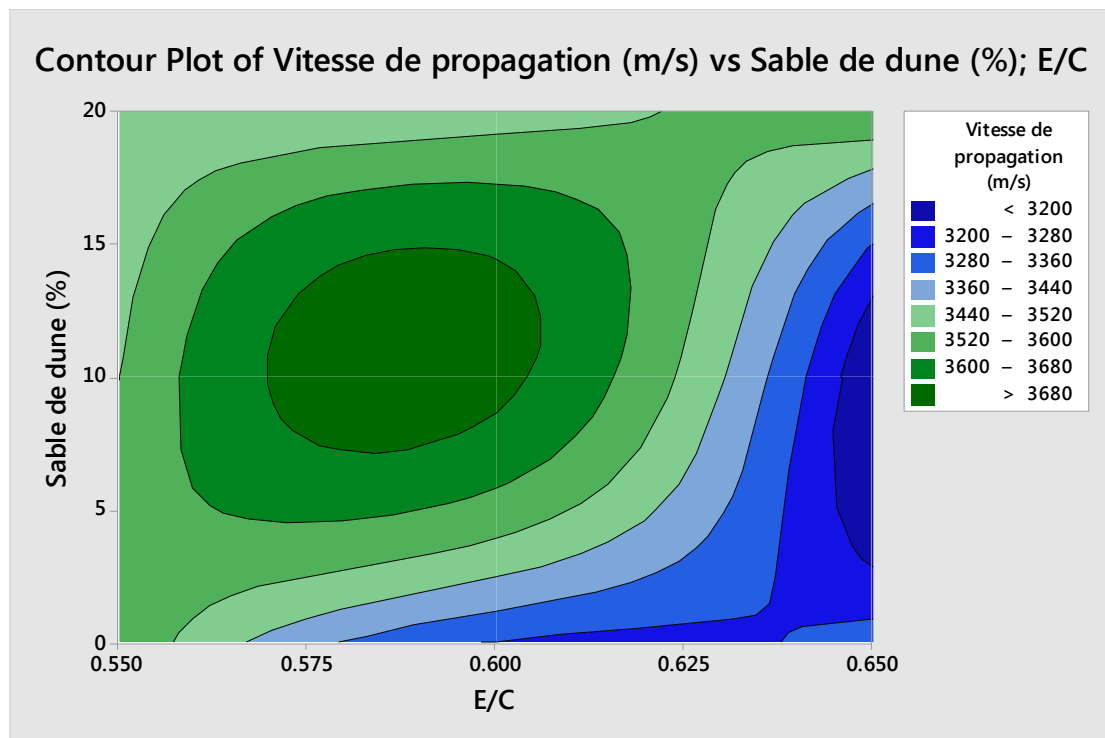
Vitesse de propagation (m/s) = 4575 - 1680 E/C - 21.62 Caoutchouc (%) + 5.63 Sable de dune (%)

III-8-3 Interprétation des résultats:

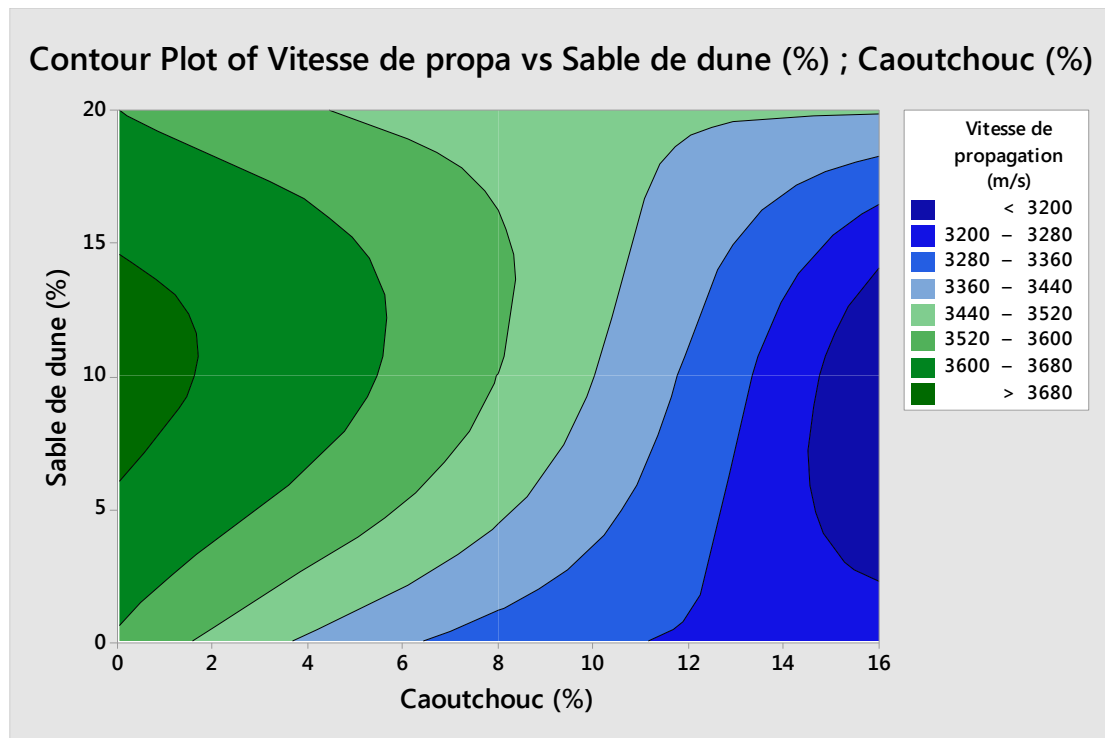
La remarque notée par les résultats de comparaison entre les coefficients du modèle qui sont représentées au-dessus montre que le coefficient au rapport E/C est très élevé, ce qui montre l'influence très significative du rapport E/C sur les résultats de la vitesse de propagation d'ultrasons. Ceci est expliqué par les figures III.14, III.15 et III.16.



Figures III.14: La vitesse de propagation d'ultrasons en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et du rapport E/C.



Figures III .15: La vitesse de propagation d'ultrasons en fonction de pourcentage de sable de dune et du rapport E/C.



Figures III.16: La vitesse de propagation d’ultrasons en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de pourcentage de sable dune.

Ces figures montrent clairement que La vitesse de propagation d’ultrasons peut dépasser 3680 m/s si le rapport E/C varie entre 0.56 et 0.61 avec un pourcentage de granulats de caoutchouc GC entre 0 et 3% et un pourcentage de sable de dune SD variant entre 06 et 16%.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le travail expérimental et numérique présenté s'inscrit dans le cadre de l'application des statistiques et probabilités dans le domaine des matériaux en génie civil. Plus particulièrement, l'objet du travail est d'appliquer les plans d'expériences de Taguchi pour voir les différentes relations entre les facteurs ciblés par notre recherche (E/C, pourcentage de granulats de caoutchouc GC et pourcentage de sable de dune SD) sur les niveaux de chaque facteurs.

La méthode de Taguchi utilise un design robuste qui permettra d'obtenir les facteurs les plus significatifs à la maîtrise de la régularité de la qualité du béton dans un temps d'expérimentation court et avec un nombre réduit d'expériences.

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 masse volumique à l'état frais, la résistance à la compression à 28 jours, la résistance mécanique à la traction et la vitesse de propagation d'ultrasons. Afin de déterminer les résultats optimaux pour chaque facteur pour donner les meilleurs résultats pour chaque réponse.

Avec les modèles mathématiques sont les suivants:

Masse volumique (Kg/m^3) = $2349 - 277 \text{ E/C} - 7.81 \text{ Caoutchouc (\%)} + 0.22 \text{ Sable de dune (\%)}$

Rc28 (MPa) = $59.44 - 40.9 \text{ E/C} - 0.3612 \text{ Caoutchouc (\%)} - 0.0528 \text{ Sable de dune (\%)}$

Rt28(MPa)= $3.28 + 7.40 \text{ E/C} + 0.0625 \text{ Caoutchouc (\%)} + 0.1012 \text{ Sable de dune (\%)}$

Vitesse de propagation (m/s) = $4575 - 1680 \text{ E/C} - 21.62 \text{ Caoutchouc (\%)} + 5.63 \text{ Sable de dune (\%)}$

Et les résultats optimaux sont les suivants:

- La masse volumique à l'état frais: E/C (0.55), granulats de caoutchouc (0%) et Sable de dune (20%).
- La résistance mécanique à la compression à 28 jours: E/C (0.55), granulats de caoutchouc (0%) et Sable de dune (0%).
- La résistance mécanique à la traction: E/C (0.65), granulats de caoutchouc (8%) et le teneur en sable de dune (20%).
- La vitesse de propagation d'ultrasons: E/C (0.55), granulats de caoutchouc (0%) et le teneur en sable de dune (20%).

Ensuite, Les résultats des analyses statistiques sur les corrélations entre les différentes facteurs et niveaux utilisés dans notre travail pour chaque réponse nous ont permis de déduire les conclusions suivantes :

- La masse volumique à l'état frais peut atteindre 2200 kg/m^3 si le rapport E/C varie entre 0.56 et 0.60 avec un pourcentage de granulats de caoutchouc GC entre 0 et 4% et un pourcentage de sable de dune SD variant entre 0 et 13.6%.
- La résistance mécanique à la compression à 28 jours peut dépasser 36 MPa si le rapport E/C varie entre 0.55 et 0.60 avec un pourcentage de granulats de caoutchouc GC entre 0 et 5% et un pourcentage de sable de dune SD variant entre 0 et 12%.
- La résistance mécanique à la traction à 28 jours peut dépasser 10 MPa si le rapport E/C varie entre 0.58 et 0.63 avec un pourcentage de granulats de caoutchouc GC entre 4 et 12% et un pourcentage de sable de dune SD variant entre 18 et 20%.
- La vitesse de propagation d'ultrasons peut dépasser 3680 m/s si le rapport E/C varie entre 0.56 et 0.61 avec un pourcentage de granulats de caoutchouc GC entre 0 et 3% et un pourcentage de sable de dune SD variant entre 06 et 16%.

Perspective :

Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour étudier l'influence de la température sur l'effet de l'optimisation du pourcentage de caoutchouc et de sable de dune, ainsi que sur les caractéristiques mécaniques du béton de sable.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [01] NF, P. "P 18-540, Granulats, definitions, conformite, specifications." AFNOR, Paris (1997).
- [02] AFNOR, P. "P 18-101." Granulats-Vocabulaire-Définitions et classifications (1990).
- [03] NF, P. "P 15-301,"," Liants hydrauliques Ciments courants Composition, spécifications et critères de conformité (1994).
- [04] Sablocrete. Bétons de sable, caractéristiques et pratiques d'utilisation. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Paris1994: 235 pages.
- [05] pedro, D, j , De Brito,and R. veiga "mortars made with fine granulate from shedded tires " journal of materials in civil engineering 25.4 (2013) : 519-529
- [06] Siddique, Rafat et Tarun R. Naik. "Propriétés du béton contenant du caoutchouc de pneus usés - un aperçu." Gestion des déchets 24.6 (2004) : 563-569.
- [07] bouyahia, chérifa, karima tayeb hammani, and hamid khelafi. Influence des effets de temperature et de conservation sur la resistance mecanique du beton. Diss. Universite ahmed draia-adrar, 2018.
- [08] Pillet, Maurice. Introduction aux plans d'expériences par la méthode Taguchi. Les Éditions d'organisation, 1992.
- [09] Baron, Jacques. Les bétons-bases et données pour leur formulation. 1996.
- [10] sado, gilles, and marie-christine sado. Les plans d'experiences: de l'experimentation a l'assurance qualite. Afnor, 2000.
- [11] 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.
- [12] 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): 37-45.

- [13] NF, P. "P 18-554: Granulats–Mesure des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux." AFNOR, Paris (1979).
- [14] NF, P. "P 18-560: Granulats-Analyse granulométrique par tamisage." AFNOR, Paris (1990).
- [15] NF, P. "P 18-598 «Granulats–Equivalent de sable»." AFNOR, Paris (1990).
- [16] NF EN 196-1. "Méthodes d'essais des ciments-Partie 1: détermination des résistances mécaniques [Methods of testing cements–part 1: determination of mechanical strengths]." (2006).