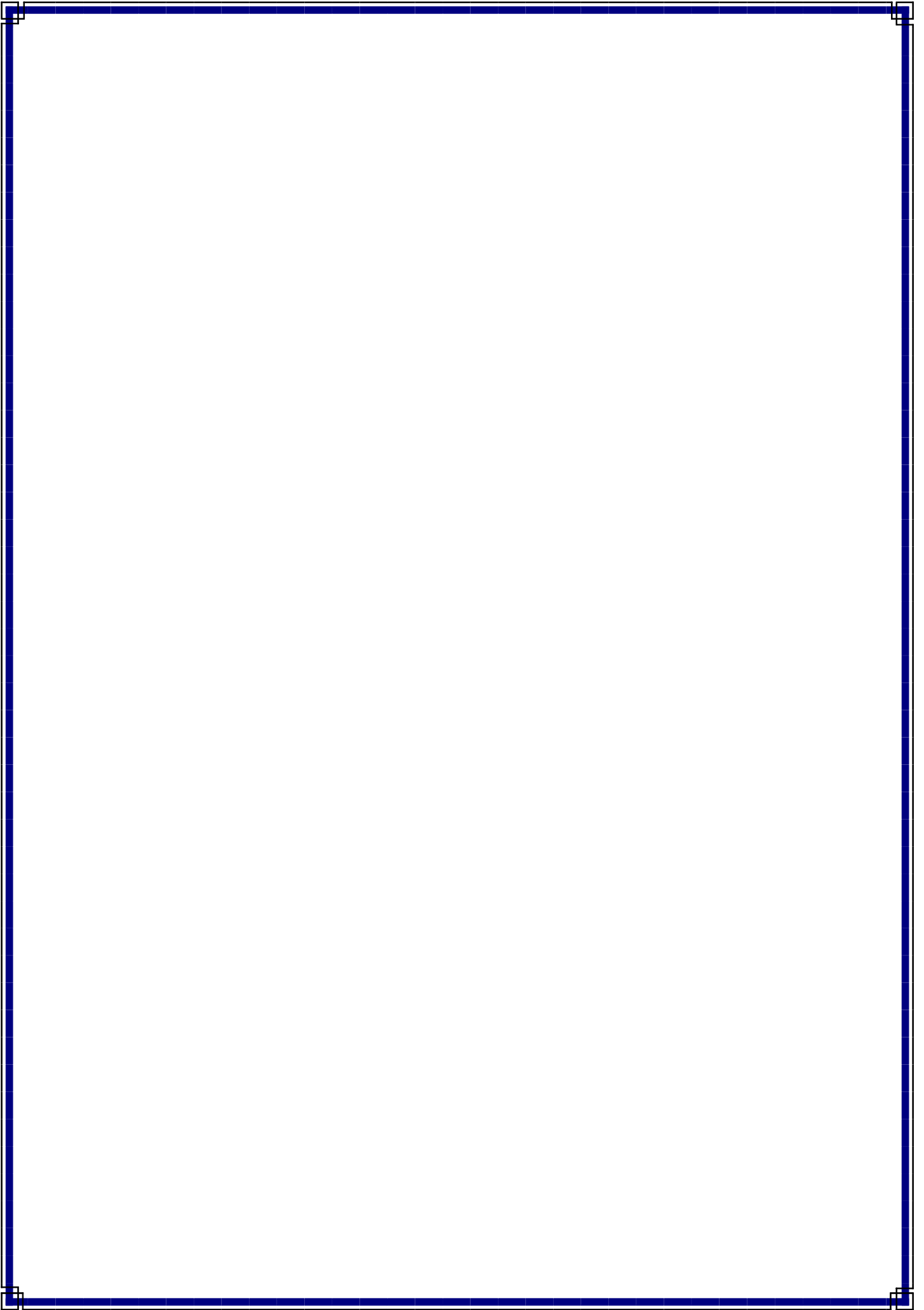




République Algérienne Démocratique Et Populaire



**Ministère De L'enseignement Supérieur
et de La Recherche Scientifique**



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

Departement d'Hydraulique et de Génie Civil

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

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

THÈME :

**Optimisation de sable de dune, de déchets de brique et
des granulats de caoutchouc dans le mortier de ciment
par l'application de la méthode des plans d'expériences**

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

- Assala Chihani
- Nour Hamima
- Asma Bouloussa
- Abdelrahman Henka
- Ammar Grira

Encadreur :

Dr. Mohamed Zohaïr kaab

Co-encadreur :

Dr. Hamad khelaifa

Soutenue publiquement le 08/06/2023

Université EL OUED

Année Universitaire: 2022/2023



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

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

Nous tenons à remercions vivement notre promoteur Dr. Mohamed Zohaïr kaab et Mr.Hamad Khelaifa pour l'aide précieuse qu'il nous a offert dans l'élaboration de ce travail. Nous remercions tous les membres du jury d'avoir accepté d'être les rapporteurs de notre mémoire

Nous tenons à remercier sincèrement tout ce qui, de près ou de loin ont participé à la rédaction de ce mémoire, il s'agit plus particulièrement les responsables de laboratoire des travaux publics et bâtiment « Newzelab » et à tous les membres de laboratoire qui ont participé indirectement ou directement à ce flux de recherche et à son objectif et aussi un merci spécial à Daoud Bousnina pour sa contribution à ce travail

Enfin, on ne saurait oublier de remercierons chers parents et nos amies.



Dédicace

*Nous dédions cet humble travail avec amour, sincérité et fierté
A notre famille, source de tendresse, de noblesse et de dévouement. Ce mémoire
n'aurait pas été possible sans leur soutien actif, en particulier nos parents, qui nous
ont toujours encouragés moralement et financièrement et que nous tenons à
remercier. Que cette démarche soit une source de satisfaction pour eux et pour tous
nos amis et tous nos professeurs.*

*Enfin, nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et notre profonde
gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à sa
réalisation, car le projet ne peut être le fruit d'une seule personne.*



RÉSUMÉ

L'objet du travail est d'appliquer les plans d'expériences de la méthode de Taguchi pour trouver les résultats optimaux et pour voir les différentes relations entre les facteurs ciblés par notre recherche (sable de dune, granulats de caoutchouc et déchets de brique) sur les niveaux de chaque facteur. Ce travail expérimental et numérique s'inscrit dans le cadre de l'application des statistiques dans le domaine des matériaux en génie civil.

Pour atteindre cet objectif, nous avons envisagé l'incorporation dans le mortier des quantités suivant des pourcentages de substitutions volumiques différentes pour le sable de dune 7%, 14% et 21%, les granulats de caoutchouc 5%, 10% et 15% et les déchets de brique 3%, 6% et 9%.

Des modèles mathématiques prédictifs ont été développés en fonction des tests effectués, ce qui nous a permis de comprendre les principaux facteurs qui régissent le comportement mécanique du mortier, et les résultats optimaux obtenus ont montré que la meilleure formulation pour le mortier est de 14 % de sable de dune, 5 % granulats de caoutchouc et 6 % de déchets de briques.

Mots clés: Mortier, Sables de dune, Granulats de caoutchouc, Déchets de briques, Méthode de Taguchi, Optimisation.

ABSTRACT

The object of the work is to apply the experimental designs of the Taguchi method to find the optimal results and to see the different relationships between the factors targeted by our research (dune sand, rubber aggregates and brick waste) on the levels of each factor. This experimental and numerical work is part of the application of statistics in the field of materials in civil engineering.

To achieve this objective, we considered the incorporation into the mortar of quantities according to different volume substitution percentages for dune sand 7%, 14% and 21%, rubber aggregates 5%, 10% and 15% and brick waste 3%, 6% and 9%.

Predictive mathematical models were developed based on the tests carried out, which allowed us to understand the main factors that govern the mechanical behavior of the mortar, and the optimal results obtained showed that the best formulation for the mortar is 14% of dune sand, 5% rubber aggregate and 6% brick waste.

Keywords: Mortar, Dune sands, Rubber aggregates, Waste bricks, Taguchi method, Optimization.

الملخص

الهدف من العمل هو تطبيق التصاميم التجريبية لطريقة تاجوشي لإيجاد النتائج المثلى ومعرفة العلاقات المختلفة بين العوامل التي يستهدفها بحثنا (رمل الكثبان ، ركام المطاط ومخلفات الطوب) على مستويات كل عامل. هذا العمل التجريبي والعددي هو جزء من تطبيق الإحصاء في مجال المواد في الهندسة المدنية.

لتحقيق هذا الهدف ، أخذنا في الاعتبار دمج الكميات وفقاً لنسب استبدال الحجم المختلفة لكثبان الرمل 7٪ ، 14٪ و 21٪ ، ركام المطاط 5٪ ، 10٪ و 15٪ ومخلفات الطوب 3٪ ، 6٪ و 9٪.

تم تطوير النماذج الرياضية التنبؤية بناءً على الاختبارات التي تم إجراؤها ، والتي سمحت لنا بفهم العوامل الرئيسية التي تحكم السلوك الميكانيكي للملأط ، وأظهرت النتائج المثلى التي تم الحصول عليها أن أفضل صيغة للملأط هي 14٪ من الكثبان الرملية ، 5٪ ركام المطاط و 6٪ نفايات الطوب.

الكلمات المفتاحية: ملأط ، رمال كثبان ، ركام مطاط ، نفايات الطوب ، طريقة تاجوشي ، أمثلية.

Liste des Figures

Liste des Figures :

<i>Chapitre I : Synthèse bibliographique</i>	<i>4</i>
Figure I.1.Effet des granulats de caoutchouc sur laffaissement.	8
Figure I.2.linfluence des GCR sur la masse volumique de béton.	8
Figure I.3.Effet du taux de substitution de GCR sur la résistance en compression de mortiers de ciment renforcé par des fibres.	9
Figure I.4.Les risques de feu dans les décharges des pneus usages.	11
Figure I.5.La progression des activités de valorisation des pneus usagés en Europe.	12
Figure I.6.la production mondiale de caoutchouc naturel en 2017.	13
Figure I.7.processus de recyclage de déchets de caoutchouc.	14
Figure I.8.Piste d'athlétisme en granulats de pneus usagés recycles.	15
Figure I.9.la technique de pneu sol : le channes-Mandelieu en 1988.	16
Figure I.10.pose des nappes de pneus Projet pilote-Route de bousmail.	17
Figure I.11.ouvrage végétalisé projet de bousmail.	17
Figure I.12.ouvrage de mostaghanem RN11 (algérie) stabilité dun talus.	17
Figure I.13.superposition et attache des penus.	17
Figure I.14.bétonage de la lière file de pneus.	17
Figure I.15.diché de brique en oued souf- algérie.	18
Figure I.16.Sable de dunes en oued souf- algérie.	20
Figure I.17.Dune de barkhane [07].	22
Figure I.18.Dune parabolique [07].	22
Figure I.19.Dunes en étoile [07].	23
Figure I.20.Dune transversale [07].	23
Figure I.21.Dune longitudinale [07].	24
Figure I.22. Analyse de Drx du sable dunaire.	25

Figure I.23.Courbes granulométriques de deux sables de dunes.	26
Figure I.24.vue générale (a grande échelle, MER.) du sable de dune.	27
Figure I.25.méthode traditionnelle d'expérimentation et courbe de réponse [12].	29
Figure I.26.maillage du domaine expérimental et surface de réponse [12].	30
Figure I.27.domaine expérimental d'un plan factoriel complet [14].	32
Figure I.28.triangle de féret, 1892.	32
Figure I.29.points expérimentaux pour un plan de mélange à trois constituants.	33
Figure I.30.Organigramme général de traitement des plans d'expériences [15].	34

Chapitre II : Matériaux et procédures expérimentales **38**

Figure II.1.Sable Alluvionnaire Djamaa (SA).	39
Figure II.2.sable de dune (SD).	39
Figure II.3.Tamis d'analyse granulaire.	41
Figure II.4.Schémas de mesure d'équivalent de sable.	42
Figure II.5.Courbes granulométriques des sables utilisés et des granulats de caoutchouc.	44
Figure II.6.Ciment utilisé.	44
Figure II.7.Granulats de caoutchouc (0-4mm).	46
Figure II.8.Déchets de brique (< 0.63mm).	47
Figure II.9.Pesage des composants du mortier.	50
Figure II.10.Matériaux utilisés secs.	50
Figure II.11.Mélanger les matières sèches.	51
Figure II.12.Ajouter de l'eau en mélangeant.	51
Figure II.13.éprouvettes utilisés.	51
Figure II.14.Graisser le éprouvettes.	52
Figure II.15.Verser la moitié de la quantité dans le éprouvettes.	52
Figure II.16.Décanter l'échantillon en secouant.	52

Figure II.17.Remplissage du modèle terminé.	53
Figure II.18.ouvrir le éprouvettes.	53
Figure II.19.Nettoyage des échantillons.	53
Figure II.20.Dispositif de mesure d'affaissement au cône d'Abrams.	54
Figure II.21.Échantillons après leur sortie de l'eau.	55
Figure II.22.Séchage des échantillons.	55
Figure II.23.Essai de flexion.	56
Figure II.24.Essai de compression.	57
Figure II.25.Essai d'auscultation dynamique.	58
Figure II.26.Microscope optique.	58
Figure II.27.Défaut d'adhérence entre le caoutchouc et la matrice cimentaire vu au microscope, pour la formulation 08 (grossissement x100).	59

Chapitre III : Analyse des résultats expérimentaux par l'application de la méthode de Taguchi 60

Figure III.1.Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios).	64
Figure III.2.Comparaison entre les résultats expérimentaux de la masse volumique à l'état durci avec ceux prédits par le modèle de Taguchi.	66
Figure III.3.la masse volumique à l'état durci en fonction de pourcentage de sable de dune et de granulats de caoutchouc.	67
Figure III.4.la masse volumique à l'état durci en fonction de pourcentage de sable de dune et de déchets de brique.	67
Figure III.5.la masse volumique à l'état durci en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de déchets de brique.	68
Figure III.6.Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios).	69
Figure III.7.Comparaison entre les résultats expérimentaux de la résistance à la compression à 28 jours avec ceux prédits par le modèle de Taguchi.	71
Figure III.8.La résistance mécanique à la compression à 28 jours en fonction de pourcentage de sable de dune et de granulats de caoutchouc.	71

Figure III.9.La résistance mécanique à la compression à 28 jours en fonction de pourcentage de sable de dune et de déchets de brique .	72
Figure III.10.La résistance mécanique à la compression à 28 jours en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de déchets de brique.	72
Figure III.11.Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios).	74
Figure III.12.Comparaison entre les résultats expérimentaux de la résistance à la flexion à 28 jours avec ceux prédits par le modèle de Taguchi.	76
Figure III.13.La résistance à la flexion à 28 jours en fonction de pourcentage de sable de dune et de granulats de caoutchouc.	76
Figure III.14.La résistance à la flexion à 28 jours en fonction de pourcentage de sable de dune et de déchets de brique.	77
Figure III.15.La résistance à la flexion à 28 jours en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de déchets de brique.	77
Figure III.16.Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios).	78
Figure III.17.Comparaison entre les résultats expérimentaux de la vitesse de propagation d'ultrasons à 28 jours avec ceux prédits par le modèle de Taguchi.	80
Figure III.18.La vitesse de propagation d'ultrasons en fonction de pourcentage de sable de dune et de granulats de caoutchouc.	80
Figure III.19.La vitesse de propagation d'ultrasons en fonction de pourcentage de sable de dune et de déchets de brique.	81
Figure III.20.La vitesse de propagation d'ultrasons en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de déchets de brique.	81

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux :

<i>Chapitre I : Synthèse bibliographique</i>	4
Tableau I.1.Composition chimique de pneu.	11
Tableau I.2.Productions, en 2010, en milliers de tonnes. Monde.	13
Tableau I.3.Composition minéralogique de déchets de briques.	19
Tableau I.4. analyse chimique du sable de dune.	24
<i>Chapitre II : Matériaux et procédures expérimentales</i>	38
Tableau II.1.Préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les mortiers.	43
Tableau II.2.regroupe l'ensemble des résultats relatifs aux essais physiques effectués sur utilisé.	43
Tableau II.3.Résistance à la compression (NA 234)	45
Tableau II.4.analyse chimique du sable de dune.	45
Tableau II.5.Composition minéralogique du ciment (CLINKER).	45
Tableau II.6.Caractéristiques physiques du ciment MATINE	45
Tableau II.7.Caractéristiques physiques du Granulats de caoutchouc (0/4mm).	46
Tableau II.8.Caractéristiques physiques du Déchets de brique (< 0.63mm).	47
Tableau II.9.Composition des mortiers utilisés.	49
Tableau II.10.Classes de consistance du mortier.	54
<i>Chapitre III : Analyse des résultats expérimentaux par l'application de la méthode de Taguchi</i>	60
Tableau III.1.Les facteurs et les niveaux ciblés.	61
Tableau III.2.La matrice expérimentale des effets selon la méthode Taguchi.	63
Tableau III.3.Résultats des essais de la masse volumique à l'état durci.	64
Tableau III.4.Résultats des essais de la résistance mécanique à la compression à 28 jours.	68

Tableau III.5.Résultats des essais de la résistance mécanique à la traction par flexion à 28 jours.	73
Tableau III.6.Résultats des essais de la vitesse de propagation d’ultrasons.	78

Liste des abréviations

Liste des abréviations :

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

Sommaire

Sommaire

II. Remerciements

III. Dédicace

IV. Résumé

V. Abstract

VI. ملخص

VII. Liste des Figures

XII. Liste des Tableaux

D. Liste des abréviations

Introduction générale	2
Chapitre I : Synthèse bibliographique	4
I.1. Introduction	5
I.2. Les mortiers	5
I.2.1. Généralités sur les mortiers	6
I.2.2. Typologie des mortiers	6
I.2.3. Les Mortier de granulats de caoutchoucs	7
I.2.3.1. Généralités sur les caoutchoucs	7
I.2.3.2. Les caractéristiques d'un mortier de ciment avec caoutchouc	7
I.2.3.3. Les mortiers caoutchouc plastiques	7
I.2.3.3.1. Les mortiers plastiques	7
I.2.3.3.2. Mortier durci	9
I.2.4. Les pneumatiques usages	10
I.2.4.1. Les pneus usagés Réutilisables (PUR)	10
I.2.4.2. Les pneus non réutilisables (PUNR)	10
I.2.4.3. Valorisation des pneumatiques usages	12
I.2.4.4. Durée de vie du caoutchouc	12

<i>I.2.4.5. Chiffre</i>	<i>13</i>
<i>I.2.4.6. Recyclage de caoutchouc</i>	<i>14</i>
<i>I.2.5. Granulats de construction</i>	<i>14</i>
<i>I.2.6. Pneus Entier</i>	<i>15</i>
<i>I.2.7. La valorisation des déchets de caoutchouc en Algérie</i>	<i>16</i>
<i>I.3 DECHET DE BRIQUE</i>	<i>18</i>
<i>I.3.1. Définition de la brique</i>	<i>18</i>
<i>I.3.2. Technique de la production de la brique</i>	<i>18</i>
<i>I.3.3. Les caractéristiques physico-chimiques de la brique</i>	<i>19</i>
<i>I.4. Sable de dunes</i>	<i>19</i>
<i>I.4.1. Définition d'un sable de dunes</i>	<i>19</i>
<i>I.4.2. Intérêt de sable de dune</i>	<i>20</i>
<i>I.4.2.1. Les aspects économiques</i>	<i>20</i>
<i>I.4.2.2. Les aspects techniques</i>	<i>21</i>
<i>I.4.3. Mécanismes de formation des dunes</i>	<i>21</i>
<i>I.4.4. Différentes formes des dunes</i>	<i>21</i>
<i>I.4.4.1. Dune de barkhane</i>	<i>21</i>
<i>I.4.4.2. La dune parabolique</i>	<i>22</i>
<i>I.4.4.3. Les dunes en étoile</i>	<i>22</i>
<i>I.4.4.4. Les dunes transversales</i>	<i>23</i>
<i>I.4.4.5. Les dunes longitudinales</i>	<i>23</i>
<i>I.4.5. Identification des sables de dunes du Sahara</i>	<i>24</i>
<i>I.4.5.1. Composition chimique</i>	<i>24</i>
<i>I.4.5.2. Analyses minéralogiques</i>	<i>25</i>
<i>I.4.5.2.1. Silice <<quartz>></i>	<i>25</i>
<i>I.4.5.2.2. Granulométrie</i>	<i>26</i>
<i>I.4.5.2.3. Propriété</i>	<i>26</i>
<i>I.4.5.2.4. Comportement mécanique</i>	<i>26</i>

<i>I.4.5.2.5. Microscope électronique à balayage (MEB)</i>	<i>27</i>
<i>I.4.6. Utilisation du sable de dunes</i>	<i>27</i>
<i>I.4.6.1. Diverses utilisations</i>	<i>27</i>
<i>I.5. Méthode des plans d'expériences</i>	<i>28</i>
<i>I.6. Méthode de taguchi</i>	<i>35</i>
<i>1.6.1. Le plan de Taguchi (plan de Taguchi orthogonal)</i>	<i>35</i>
<i>I.7. Conclusion</i>	<i>37</i>

<i>Chapitre II : Matériaux et procédures expérimentales</i>	<i>38</i>
--	------------------

<i>II.1. Introduction</i>	<i>39</i>
<i>II.2. Matériaux utilisés</i>	<i>39</i>
<i>II.2.1. Sables</i>	<i>39</i>
<i>II.2.1.1. Caractéristiques physiques</i>	<i>40</i>
<i>II.2.1.1.1. Les masses volumiques</i>	<i>40</i>
<i>II.2.1.1.2. Analyse granulométrique</i>	<i>41</i>
<i>II.2.1.1.3. Module de finesse</i>	<i>41</i>
<i>II.2.1.1.4. Equivalent de matériaux</i>	<i>42</i>
<i>II.2.1.1.5. Synthèse des résultats</i>	<i>43</i>
<i>II.2.2. Ciment</i>	<i>44</i>
<i>II.2.3. Granulats de caoutchouc (GC)</i>	<i>46</i>
<i>II.2.4. Déchets de brique (< 0.63mm)</i>	<i>47</i>
<i>II.2.5. Eau de gâchage</i>	<i>47</i>
<i>II.3. Formulations</i>	<i>47</i>
<i>II.3.1. Formulations du mortier témoin (0%SD, 0%GC, 0%DB)</i>	<i>47</i>
<i>II.3.2. Formulations du mortier avec SD, GC et DB</i>	<i>48</i>
<i>II.3.3. Compositions des mortiers</i>	<i>49</i>
<i>II.3.4. Procédure expérimentale</i>	<i>50</i>
<i>II.3.4.1. Fabrication du mortier</i>	<i>50</i>

II.3.4.1.1. Pesage des composants du mortier	50
II.3.4.1.2. Malaxage des composants du mortier	50
II.3.4.1.3. Coulage des éprouvettes	51
II.3.4.1.4. Etapes de coulage des éprouvettes	52
II.3.4.2. Les essais réalisés	53
II.3.4.2.1. Essais réalisés à l'état frais	53
II.3.4.2.1.1. Essai de maniabilité (cône d'Abrams)	53
II.3.4.2.2. Essais réalisés à l'état sec	54
II.3.4.2.2.1. Essais de la masse Volumique	55
II.3.4.2.2.2. Essai de traction par flexion	56
II.3.4.2.2.3. Essai de compression	56
II.3.4.2.2.4. Essai d'auscultation dynamique	57
II.4. Analyse par microscope	58
Chapitre III : Analyse des résultats expérimentaux par l'application de la méthode de Taguchi	60
III.1. Facteurs	61
III.2. Niveaux des facteurs	61
III.3 Choix de la matrice de Taguchi pour notre étude	61
III.4. La masse volumique à l'état durci	64
III.4.1. Détermination du résultat optimal pour chaque facteur	64
III.4.2. Détermination des coefficients du modèle	65
III.4.3. Interprétation des résultats	65
III.5. Résistance à la compression	68
III.5.1. Détermination du résultat optimal pour chaque facteur (Rc28)	68
III.5.2. Détermination des coefficients du modèle	69
III.5.3. Interprétation des résultats	70
III.6. Résistance mécanique à la flexion	73

<i>III.6.1. Détermination du résultat optimal pour chaque facteur (Rt28)</i>	74
<i>III.6.2. Détermination des coefficients du modèle</i>	75
<i>III.6.3. Interprétation des résultats</i>	75
<i>III.7. Vitesse de propagation d'ultrasons</i>	78
<i>III.7.1. Détermination de la résultat optimal pour chaque facteur</i>	78
<i>III.7.2. Détermination des coefficients du modèle</i>	79
<i>III.7.3. Interprétation des résultats</i>	79
Conclusion Générale	83
<i>Références bibliographique</i>	87

Introduction générale

Introduction générale

Devant les besoins croissants des ressources en matériaux de construction et aux exigences de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire de prospecter et d'étudier toutes les possibilités de valorisation des matériaux locaux comme le sable de dune et réutilisation des déchets dans le domaine de la construction en génie civil comme les pneus usés et déchets de brique.

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.

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.

Les déchets de briques sont des sous produits trouvent en grande quantité au niveau national à cause du nombre élevé de briqueteries et des taux de rejets (briques non conformes ou cassées) qu'elles génèrent et qui représentent 10 à 15 % de leurs productions.

Le but de ce travail est d'appliquer les plans d'expériences de la méthode de Taguchi pour trouver les résultats optimaux dans les performances physiques et mécaniques de ces matériaux dans les composites cimentaires. Pour cela nous allons varier des proportions de sable de dune en mélange avec du sable (7%, 14% et 21%), nous allons également varier des proportions de caoutchouc en mélange avec du sable (5%,

10% et 15%) et varier des proportions de déchets de brique avec du sable (3%, 6% et 9%).

Nous présentons tout d'abord dans le premier chapitre, une synthèse bibliographie regroupant d'une part des généralités sur les mortiers classiques (définition, composition, composants, caractéristiques et utilisation) puis, d'autre part, nous parlerons sur les sables de dunes, les granulats de caoutchouc de pneus et les déchets de brique avec une brève sur l'utilisation de la méthode de conception expérimentale.

Dans le deuxième chapitre nous exposerons les composants de notre éco-mortier avec leurs caractéristiques : Sables, ciment, eau, granulats de caoutchouc, déchets de brique ainsi que les procédures expérimentales adoptées.

Le troisième chapitre sera consacré à l'analyse statistique des tests réalisés sur cet éco-mortier par l'application de la méthode de Taguchi.

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

Chapitre I :

Synthèse bibliographique

Chapitre I

I.1. Introduction :

Le présent chapitre est une synthèse bibliographies des travaux de recherches réalisés sur le comportement du mortier. Il sera divisé en trois parties. La première portera sur la description de la problématique des déchets, issus de pneus usagés et déchets de Brique et Sable de dune et leur valorisation dans le domaine des matériaux de construction à matrice cimentaire. Alors que la deuxième partie nous renseigne sur les constituants du mortier, la troisième partie est consacrée à l'influence des granulats des matériaux utilisés dans le mélange de mortier sur les propriétés aux états frais et durcis des matériaux cimentaires. Enfin, on termine par les résultats de l'étude de l'influence des granulats sur le comportement des mortiers.

I.2. Les mortiers :

I.2.1. Généralités sur les mortiers :

Une construction est généralement réalisée par éléments, dont il faut assurer la liaison ou qu'il faut protéger par un enduit. On doit alors effectuer des scellements ou divers travaux de reprise, de bouchage, etc.

Toutes ces opérations se font à l'aide d'un liant toujours mélangé à du sable, de l'eau (et éventuellement un adjuvant) pour obtenir un <<mortier>>, qui se distingue du béton par l'absence de gravillons.

Des compositions multiples de mortiers peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres: liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables; leur choix et le dosage sont fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement.

Les mortiers bâtards sont constitués par des mélanges de ciment et de chaux avec du sable, dans les proportions variables.

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

Les mortiers peuvent être :

Préparés sur le chantier en dosant et mélangeant les différents constituants, adjuvants compris

Chapitre I

Préparés sur le chantier à partir de mortiers industriels secs pré-dosés (il suffit d'ajouter la quantité d'eau nécessaire)

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

On peut aujourd'hui trouver dans les surfaces de bricolages des mortiers répondant à tous les besoins non seulement par la nature du produit, mais aussi par son conditionnement plus adapté: sacs de 5 à 20 Kg.

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

I.2.2. Typologie des mortiers :

Il existe plusieurs types de mortiers:

Mortier de terre

Mortier de chaux grasse

Mortier de chaux hydraulique

Mortier de plâtre

Mortier de ciment Portland.

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

I.2.3. Les Mortier de granulats de caoutchoucs :

I.2.3.1. Généralités sur les caoutchoucs :

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, alimentation, colles et adhésifs...etc.

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.2.3.2. 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.2.3.3. Les mortiers caoutchouc plastiques :

I.2.3.3.1. 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 1.1)**. Ce comportement est expliqué par la forme rigoureuse des granulats de caoutchouc.

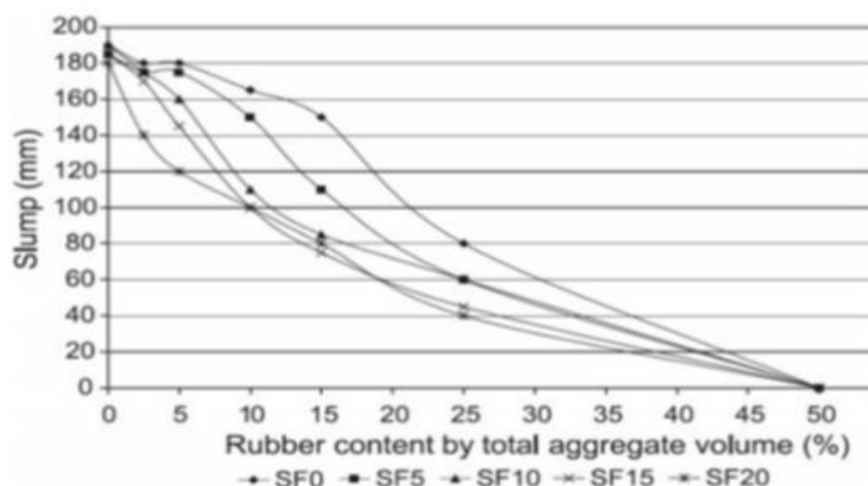


Figure I.1. Effet des granulats de caoutchouc sur l'affaissement.

b) La masse volumique fraîche :

Les travaux de recherches, menés par bravo et al 2012, sur l'évolution de la masse volumique des bétons de caoutchouc obtenus par substitution partielle des granulats classiques silico-calcaires de densités relativement élevées, avec des granulats de caoutchouc de densité faible, ont révélé que les densités fraîches de ceux-ci sont diminuées avec l'augmentation du taux des granulats de caoutchouc dans la masse du béton. Cette tendance est expliquée par la légèreté des granulats de caoutchouc (Figure I.2).

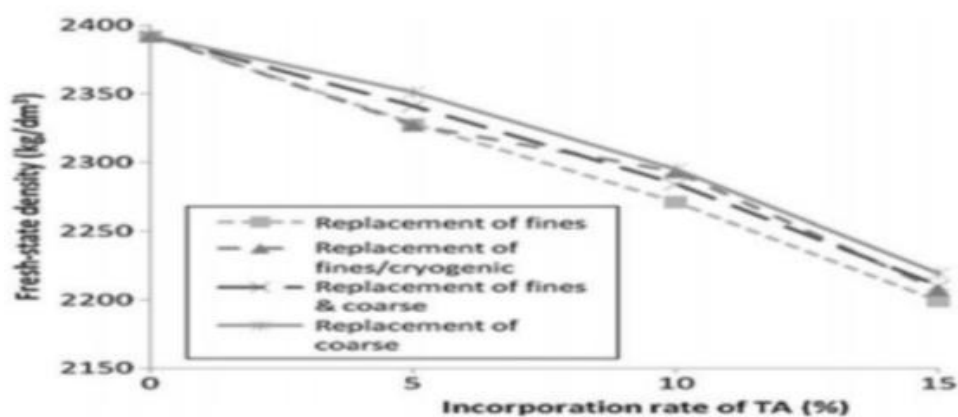


Figure I.2. L'influence des GCR sur la masse volumique de béton

I.2.3.3.2. Mortier durci :

a) Masse volumique :

Les travaux de (Pedro et al 2013) 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'allégement 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, (Turatsinze et al 2004), 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 1.3**). 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 .

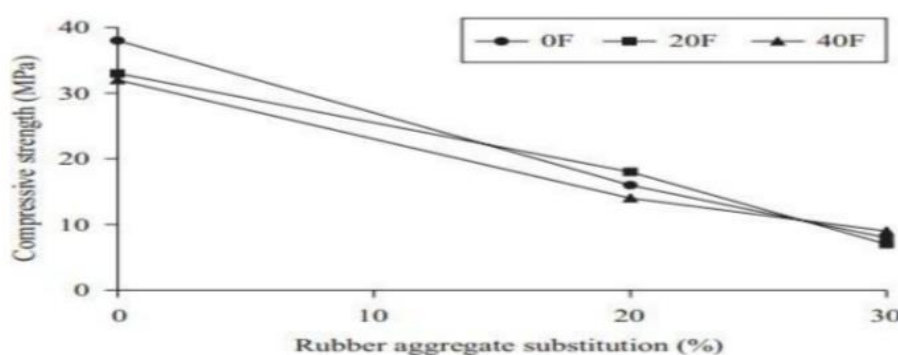


Figure I.3. Effet du taux de substitution de GCR sur la résistance en compression de mortiers de ciment renforcé par des fibres.

I.2.4. Les pneumatiques usagés :

Les déchets produits par la société industrielle ne cessent de croître en quantité et en complexité. Parmi ceux-ci, on trouve les déchets de pneus usagés qui croissent 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, incompatibles et non biodégradables, 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.1**) Suivant l'état de dégradation, on peut classer les pneus usagés en deux catégories essentielles

I.2.4.1. 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.2.4.2. Les pneus non réutilisables (PUNR):

Ils sont les pneus qui ne peuvent plus 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 sécurisés en cas d'incendie criminel ou naturel (foudre). De plus, Le brûlage des déchets de caoutchouc dans les décharges publiques 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 (**Figure I.4**).

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



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

I.2.4.3. Valorisation des pneumatiques usagés :

La valorisation des déchets consiste en tout traitement des déchets qui permet de leur trouver une utilisation ayant une valeur économique positive. En vue des risques, cités ci-dessus, la valorisation des pneus usagés devient une obligation pour faire face aux nombreuses menaces qu'ils font encourir à notre environnement. En Europe, l'interdiction de stockage de pneus usagés, dans les décharges publiques, a conduit au développement de méthodes de valorisation de ce type de déchets. L'objectif de cette démarche consiste à apporter une valeur ajoutée à ces derniers, par leur transformation soit en énergie soit en sous-produits pouvant être utilisés dans d'autres secteurs, comme illustré par la **Figure I.5**.

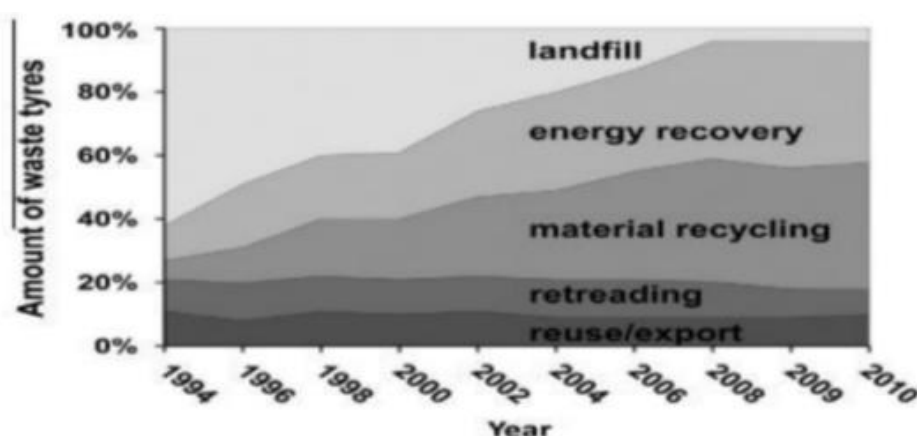


Figure I.5. La progression des activités de valorisation des pneus usagés en Europe.

I.2.4.4. Durée de vie du caoutchouc :

Une dizaine d'années plus tard (1850), la technologie du caoutchouc connut une nouvelle avancée avec l'apparition des fours à vieillissement accéléré permettant d'étudier la détérioration du caoutchouc dans le temps. On put alors mesurer rapidement les pertes de propriétés dans différentes conditions, en particulier lors de l'exposition à l'oxygène atmosphérique. L'utilisation de ces fours permit de tester différents produits chimiques et d'ajouter des antioxydants qui augmentent la durée de vie des produits en caoutchouc, comme les pneus pour les véhicules et les articles souples, tels que gants, toiles et tuyaux. D'autres progrès vinrent de l'utilisation du latex non coagulé. On introduisit des méthodes permettant d'extruder le caoutchouc en

Chapitre I

films minces pour l'utilisation textile; on peut également déposer le caoutchouc sur des métaux et d'autres matériaux.

I.2.4.5. Chiffre :

On produit 10.9 millions de tonnes de caoutchouc par an dans le monde, soit 340 kilos de caoutchouc par seconde (compteur); essentiellement produit par les hévéas et consommé par l'industrie automobile pour les pneumatiques.

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

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

En 2010, la production dans l'Union européenne est de 798 346 t d'ABS (dont Espagne : 97 8091, Italie: 96 931 t) et de 188 322 t de SAN (dont Italie: 16 450 t, Royaume Uni: 762t) La production mondiale de caoutchouc naturel s'est élevée à 11,8 millions de tonnes en 2014. La part de l'Asie dans ce chiffre est supérieure à 91%.

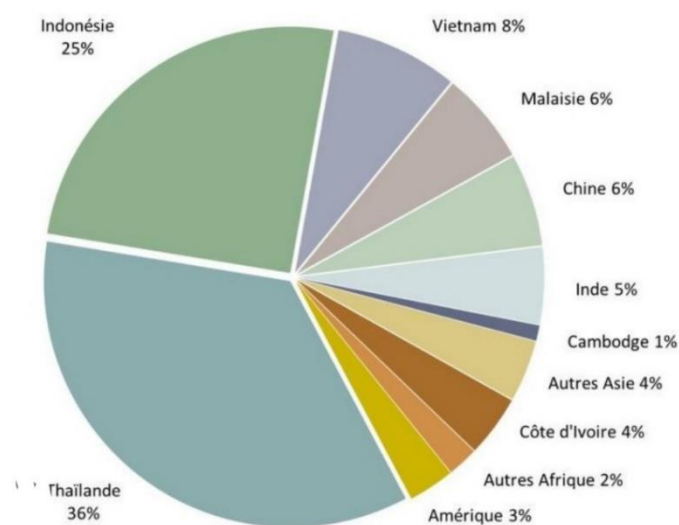


Figure I.6. La production mondiale de caoutchouc naturel en 2017..

I.2.4.6. Recyclage de caoutchouc :

Les difficultés liées au recyclage des caoutchoucs sont nombreuses, à la fois économiques et techniques. La consommation apparente de produits finis vulcanisés est répartie en deux grandes catégories:

Les déchets de pneumatiques (60%) et les déchets de caoutchoucs industriels (40%)
Dans une optique de valorisation, il est essentiel de considérer le gisement disponible, c'est-à-dire celui qui peut être récupéré et traité dans des conditions économiquement viables.

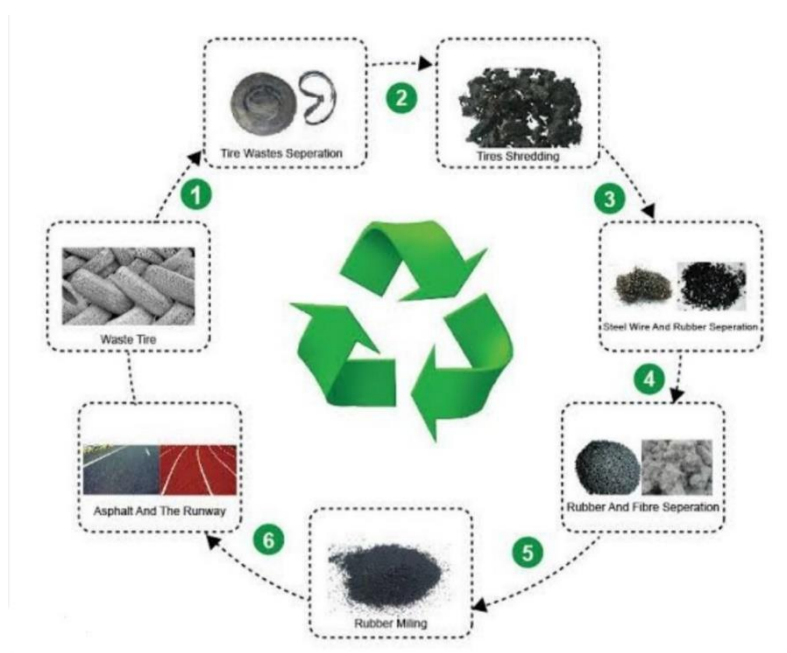


Figure I.7. Processus de recyclage de déchets de caoutchouc .

I.2.5. Granulats de construction :

Les pneus usages, 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).



Figure I.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 réalisées 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.2.6. Pneus Entier : Dans le cadre de la valorisation des pneus usagés, les travaux réalisés par (Nguyen & al Décembre 1993), a consisté en la mise au point d'une technique très efficace et économique, permettant d'améliorer de façon durable les propriétés mécaniques du sol "pneu-sol". Celle-ci consiste à combiner des pneus entiers ou déchiquetés avec de sol afin de construire des ouvrages ayant le rôle de réducteurs de poussées, de murs antichute de pierres et de bassins de rétentions d'eau pluviale. Ainsi, on compte plus de 2000 ouvrages, à travers le monde entier, construits dans cette optique, notamment en Algérie, au Canada, aux Etats-Unis et en France (**Figure I.9**).



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

De plus, dans le domaine des travaux publics (TP), les pneus entiers sont des matériaux idéaux pour réaliser des passages souterrains, Ports et marinas, Récifs artificiels, Routes provisoires, Conduits et drainage poreux et remblais de routes.

I.2.7. 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 granulats, 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 1.10 à 1.15) montrent des applications pratiques avec des pneus de caoutchouc pour la stabilité des talus à l'aide de la technique pneu-sol. [01]



Figure I.10. Pose des nappes de pneus
Projet pilote-Route de bousmail.



Figure I.11. Ouvrage végétalisé projet de
bousmail.



Figure I.12. Ouvrage de mostaghanem RN11 (algérie) stabilité dun talus.



Figure I.13. Superposition et attache des penus/
de pneus.



Figure I.14.bétonage de la lière file

I.3 Déchets de brique :

I.3.1. Définition de la brique :

La brique de terre argileuse crue et séchée au soleil ou cuite au four, utilisé comme un matériau de construction. Elle est un parallélépipède rectangle. L'argile est souvent mêlée de sable.



Figure I.15. Diché de brique en oued souf- algérie.

I.3.2. Technique de la production de la brique :

La production de la brique, est un travail complexe qui permet une production en grande quantité à des coûts raisonnables, demande une parfaite organisation; c'est la raison qui, sans doute, explique qu'il a fallu attendre la naissance, au troisième millénaire avant J-C. Pour une société organisée, on envisage de cuire des briques, alors que la céramique existait depuis l'époque néolithique. (Manuel de sensibilisation, 2006). Il y a cinq étapes se succèdent dans la fabrication de la brique: L'extraction de la terre, jusqu'à la fin du XIXe siècle où furent inventées les premières excavatrices motorisées, se faisait à la pelle.

La préparation de la pâte : mélange d'une ou plusieurs terres argileuses, ou de limon, avec de l'eau et des éléments dits "dégraissants", comme le sable.

Le façonnage de l'antiquité, on voit apparaître le moule, cadre de bois avec ou sans fond, aux dimensions de la brique à produire.

Chapitre I

Le séchage est, en effet, indispensable de faire sécher doucement la brique de terre crue, avant de la cuire. Ce séchage se fait actuellement en séchoir artificiel, mais autrefois, la brique était mise à sécher sous de vastes hangars à l'air libre.

La cuisson est l'opération la plus délicate, la brique est mise à cuire dans un four.

I.3.3. Les caractéristiques physico-chimiques de la brique :

Selon (Manuel de sensibilisation, 2006), les types d'argiles sont dans les briques cuites. Ils sont : les illitiques (couleur marron gris à rouge) les kaolinique et les bravaistiques (couleur orange à rose). Les éléments métalliques sont aussi trouvés dans la pâte argileuse. Ces éléments dits «< réfractaires » le degré de fusion est très supérieur à celui de la température (800 à 1000") des fours à brique: la silice (SIO) et de l'aluminium (AL₂Os). Les déterminants de la couleur basique de la brique (les colorants) ce sont :

1- L'oxyde de fer.

2- L'oxyde de titane.

3- L'oxyde de manganèse.

Les fondants aussi ce sont à deux types:

Les oxydes alcalins (oxyde de sodium et potassium)

Les oxydes alcalino-terreux (chaux etmagnésie) [02]

la composition minéralogique de déchet de brique rouge a été déterminée par fluorescence X. le tableau 1.1 présente les résultats obtenus qui mettent en évidence des pourcentages élevés en cilice et en alumine. [03]

Tableau I.3: Composition minéralogique de déchets de briques.

Eléments	CaO	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	SO3	K2O	Na2O	MnO	P.F
Pourcentages %	6.06	66.52	14.20	5.45	2.35	0.73	2.09	0.73	/	1.00

I.4. Sable de dunes :

I.4.1. Définition d'un sable de dunes:

Les sables, que l'on trouve dans les dunes mouvantes, sont composés de particules siliceuses pratiquement de même taille et de petites dimensions. Ces sables sont

Chapitre I

accumulés sous forme de dunes mouvantes de hauteur très variable. D'après Fookes et Higginbotham (1968) [04]

le Sahara est constitué d'environ 40 % de montagnes désertiques, 15% de plaines désertiques et 30% de dunes de sable, le reste étant constitué de sebkhas, de chotts, etc. Le Sahara, quant à lui, couvre environ le tiers du continent africain. Ces chiffres montrent bien l'intérêt que l'on doit apporter à la construction routière dans le Sahara, qui reste fort démunie en infrastructures, et aussi l'importance que l'on doit accorder au sable dans toute investigation visant la valorisation des matériaux locaux dans ces lieux [05]



Figure I.16. Sable de dunes en oued souf- algérie.

I.4.2. Intérêt de sable de dune:

L'intérêt d'utilisation de tels agrégats se situe à deux niveaux: technique et économique.

I.4.2.1. Les aspects économiques:

Les aspects sont évidents dans la mesure où l'utilisation du sable de dune permet une économie certaine dans le transport des matériaux, puisqu'il est partout disponible en quantité inépuisable. Par ailleurs, son extraction n'engendre pratiquement pas de frais supplémentaires et son mélange avec les autres matériaux sur chantier peut se faire facilement [06]

Chapitre I

I.4.2.2. Les aspects techniques:

Le sable peut contribuer à la densification des matériaux. Ceci permet, par la même occasion, l'amélioration de leurs caractéristiques géotechniques en augmentant le frottement interne et en améliorant la portance. Il peut être utilisé pour diminuer la plasticité des matériaux de base [06]

I.4.3. Mécanismes de formation de dune:

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 (deflation). 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 opposer. Une dune est une accumulation de sable formée par le vent, et l'action des vagues qui est recouverte de végétation. Les dunes sont des structures dynamiques qui changent de formes constamment. Pour la formation d'une dune es il faut y avoir d'obstacles, tels que les rochers ou les arbres, qui réduisent la vitesse du vent et permet le dépôt du sable transporté selon les étapes suivantes :

- chute des particules de sable devant l'obstacle après le choc, ou on assiste en deuxième étape à l'accumulation de ces particules.

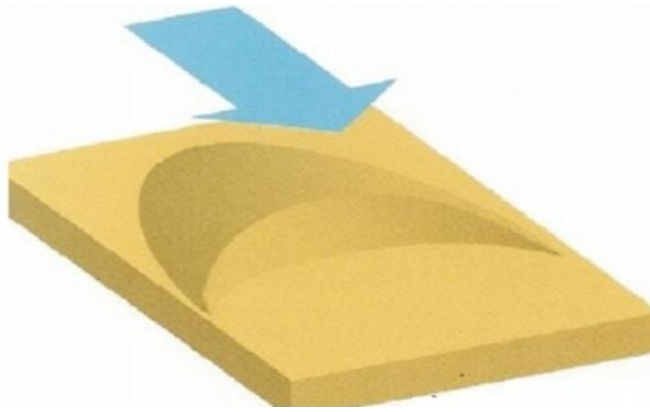
courant d'air se divise en deux bras passant prochain obstacle où Athrip sable autour de cet obstacle. augmente la taille des bras jusqu'à ce qu'ils rencontrent deux composantes de teinte de sable.

Et continuer à croître dans les dunes adsorption de plus de granules de sable que la taille jusqu'à la dune Pour arrêter la scène, puis de plus en plus et quand il décrit la dune qu'il était arrivé au stade de la maturité, ni Peut attirer plus de grains [07]

I.4.4. Différentes formes des dunes:

I.4.4.1. Dune de barkhane:

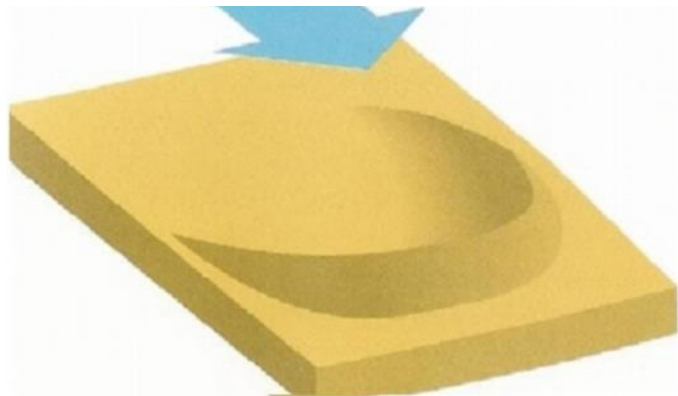
Ces dunes sont des dunes d'accumulation, édifiées en terrain plat, mobiles, en forme de croissant dont la convexité est tournée au vent. Elles peuvent atteindre une taille de 300 m et s'assembler pour former des formes complexes.(Figure I.17.) :



FigI.17. Dune de barkhane [07]

I.4.4.2. La dune parabolique:

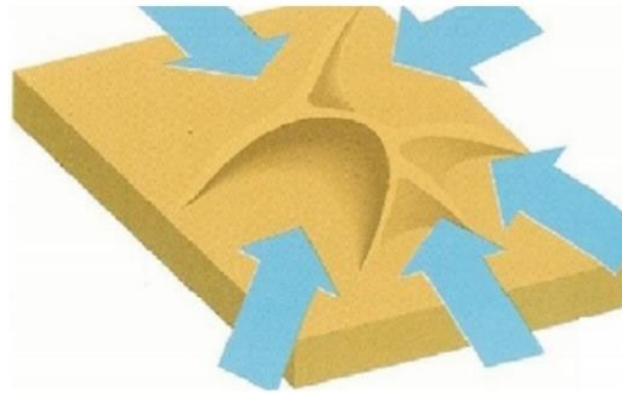
Une dune dissymétrique en forme de fer à cheval à concavité au vent souvent plus ou moins fixée par la végétation (Figure I.18). Sa disposition par rapport à la direction du vent est donc inverse de celle de la barkhane. La dune parabolique est peu mobile et généralement ne migre guère une fois qu'elle est formée;



FigI.18. Dune parabolique[07]

I.4.4.3. Les dunes en étoile:

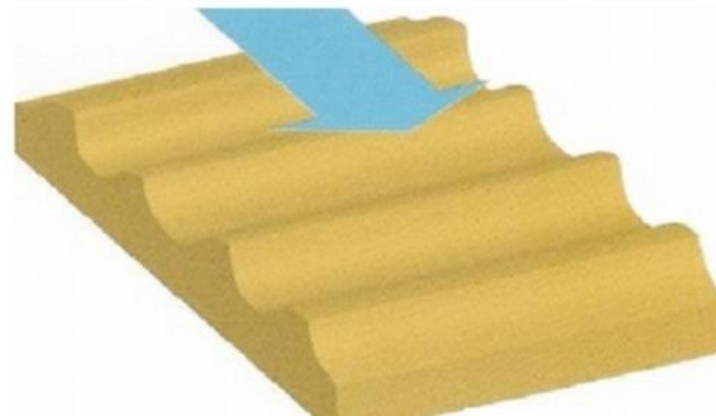
Immobiles se rencontrent dans les clairières des forêts de pins et seraient dues à un déséquilibre dans le système des vents. **(figure I.19)**



FigI.19. Dunes en étoile[07]

I.4.4.4. Les dunes transversales:

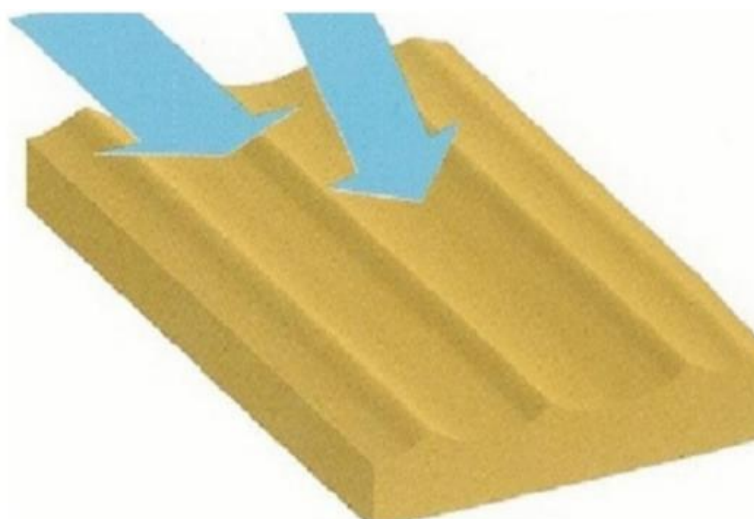
Mobiles rectilignes, perpendiculaires la direction du vent: la dune du Pilat.



FigI.20. Dune transversale [07]

I.4.4.5. Les dunes longitudinales:

Allongées dans le sens du vent. Elles peuvent apparaître si le vent change de direction au cours de l'année. Plus précisément elles peuvent apparaître si le vent possède deux directions privilégiées. La dune est alors étirée dans le sens du vent moyen. On parle aussi du >> Seif » dunes. Leur dynamique est bien plus complexe que pour les barkhanes puisque leur forme évolue beaucoup au cours du temps.



FigI.21. Dune longitudinale [07]

I.4.5. Identification des sables de dunes du Sahara:

I.4.5.1. Composition chimique:

Ce sont des sables dont la composition chimique est très simple: plus de 95% de silice ,de 1 à 2% de calcaire et des traces de différents oxydes. Du fait de cette constitution, le sable a une couleur blanche légèrement jaune et ocre il se dessèche et perd facilement sa cohésion en surface [04] a titre d'exemple Gueddouda [08] fait une étude sur Comportement hydromécanique des sols compactes: Application à la conception d'une barrière ouvragée, il a utilisé deux matériaux, le bentonite et le sable de dune de la région de Laghouat, le **tableau 1.4** illustre les résultats de l'analyse chimique effectuée par LNHC de Djelfa (Laboratoire National d'Habitat et de Construction).

Tableau I.4. Analyse chimique du sable de dune

	Symboles	Unité	Sable de dune
Résidu insoluble	SiO ₂ +Silice	%	95,87
Sulfates	SO ₃	%	0,91
Chlorures	Cl ⁻	%	0,36
Carbonate de calcium	CaCO ₃	%	2,5
Matières organiques	MO	%	-----

Chapitre I

I.4.5.2. Analyses minéralogiques:

L'analyse par DRX du sable dunaire révèle la présence d'atomes Si et O2 ce qui correspond à la présence de l'espèce SiO₂(silice). De plus le pourcentage atomique important de Si nous indique que SiO₂ est l'espèce prépondérante. Les autres valeurs de pourcentages atomiques nous permettent d'établir que le sable dunaire contient aussi quelques traces, en comparaison avec SiO₂, d'espèces calciques et magnésiques les résultats sont présente dans le spectre. (figure I.22) [08]

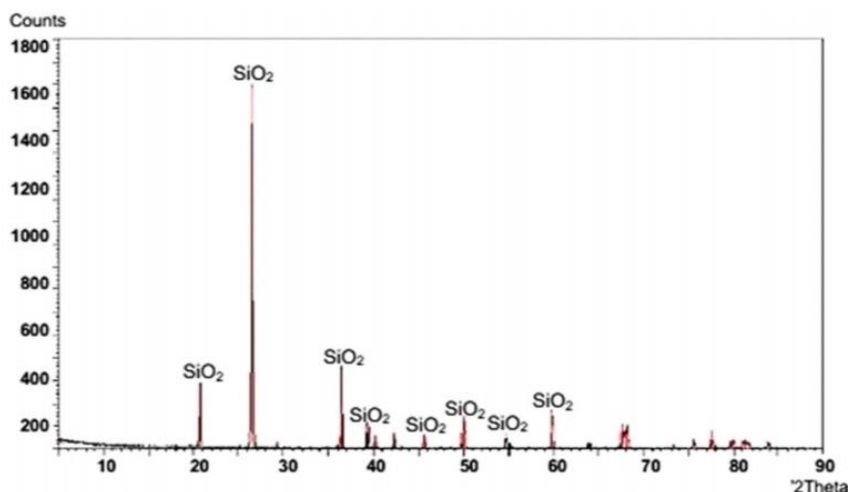


Figure I.22. Analyse de Drx du sable dunaire.

I.4.5.2.1. Silice <<quartz>>:

Le silice (quartz) est un composé chimique (dioxyde de silicium) et un minéral de formule SiO₂.

Le silice pure se présente sous la forme d'un minéral dur et existe sous des formes variées dans la nature:

principal constituant des roches sédimentaires détritiques (sables, grès), elle représente 27% de la croûte terrestre :

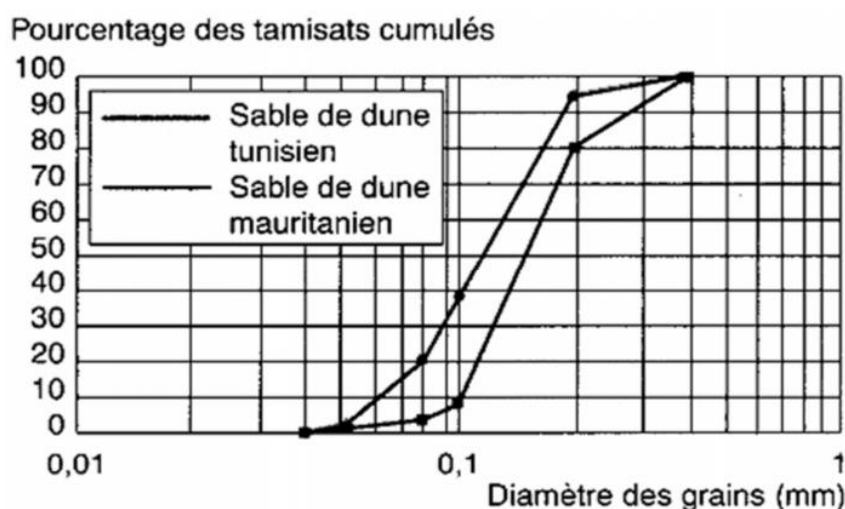
fréquente dans les roches métamorphiques :

fréquente dans les roches magmatiques: quartz dans les roches magmatiques acides, cristallisé ou amorphe dans les roches volcaniques.

Le silice se présente soit sous forme de cristaux non-moléculaires formes de motifs tétraédriques SiO₄ liés entre eux par les atomes d'oxygène de façon régulière, comme dans le quartz, soit sous forme amorphe, comme dans le verre [09]

I.4.5.2.2. Granulométrie:

Le diamètre des plus gros éléments des sables de dunes du Sahara est de l'ordre de 0,5 mm. Il est maximal aux endroits les plus proches de la roche mère et diminue de plus en plus quand on s'en éloigne. Les particules deviennent aussi de plus en plus arrondies. Le diamètre des éléments les plus fins est de l'ordre de 0,04mm. Le coefficient d'uniformité ($C_u = D_{60} / D_{10}$) est de l'ordre de 1,8 et le coefficient de courbure ($C_c = D_{30} / [D_{10} D_{60}]$) est de l'ordre de 10. Il s'agit donc d'un sable très fin mal gradué. La figure 2 montre deux courbes granulométriques de sables de dunes prélevés dans deux zones sahariennes différentes en Tunisie [10] et en Mauritanie [11, 04].



FigI.23. Courbes granulométriques de deux sables de dunes.

I.4.5.2.3. Propriété:

Le sable de dune ne contient pratiquement pas de traces d'argile, il a une limite de liquidité W de l'ordre de 25 et une limite de plasticité non mesurable. La valeur de l'équivalent de sable est supérieure à 60%. La valeur de bleu est de l'ordre de 0,1 [04]

I.4.5.2.4. Comportement mécanique:

Des essais de compactage puis de cisaillement direct ont été réalisés par Ould Sid et al. 1995. Les principaux résultats trouvés sont que:

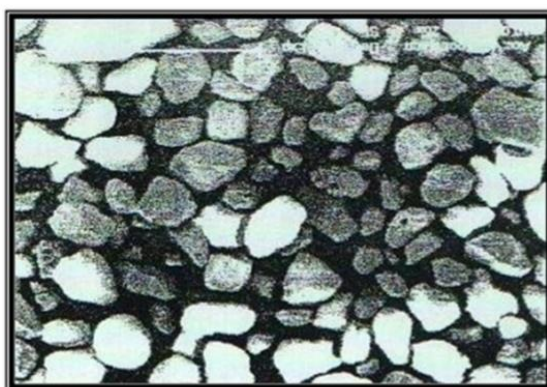
l'effet de la teneur en eau sur le compactage est peu significatif quand la teneur en eau est faible (0 à 6%); la cohésion a une valeur très faible, de l'ordre de kPa ; l'angle de frottement interne varie de 30 à 35° selon la densité du sable.

Chapitre I

Les valeurs de ces paramètres montrent que le sable de dune peut avoir un bon comportement mécanique même lorsque sa compacité est faible, à condition d'être à l'abri du vent. Par ailleurs, l'indice portant CBR de ces sables, au poids volumique et à la teneur en eau de l'optimum Proctor modifié, est relativement faible I 1 est de l'ordre de 10%. C'est ce qui permet, entre autres, d'écarter toute possibilité d'utilisation de ces sables seuls en corps de chaussée [04]

I.4.5.2.5. Microscope électronique à balayage (MEB):

Cet essai a été mené avec le microscope électronique à balayage à I LUT d'Amiens en France. La photo présentée à grande échelle par la figure 8, montre que le sable dunaire visualisé par microscope électronique à balayage (MEB), présente des grains de formes arrondies avec une faible angularité [08]



FigI.24. Vue générale(a grande échelle, MER.) du sable de dune.

I.4.6. Utilisation du sable de dunes:

I.4.6.1. Diverses utilisations:

Les sables sont un élément essentiel du processus sédimentaire et représentent une ressource très importante du point de vue économique: remblais, granulats pour béton, matériaux de construction, sables siliceux pour l'industrie. Ces derniers (appelés autrefois sables industriels) constituent l'essentiel de la matière première de l'industrie du verre, des moules, des noyaux de fonderie: ils entrent aussi dans la fabrication des céramiques et des mortiers spéciaux.

Le sable est aussi le milieu naturel où s'accumulent les minéraux lourds alluvionnaires: ces concentrations minéralisées sableuses sont dénommées placers (un mot espagnol) et l'on y extrait de l'or, des diamants, de la cassitérite (minerai d'étain),

Chapitre I

de la magnetite (oxyde de fer), de l'ilmenite (oxyde de titane et de fer), etc. Les placers d'ilmenite, ou «<sables noirs>», sont importants économiquement pour la fabrication des pigments de la peinture blanche (gisements côtiers en Australie) et comme source du titane métal.

Les sables jouent également un grand rôle comme réservoirs potentiels pour les nappes d'eau (aquifères) ou les hydrocarbures. Il importe que l'exploitation du sable, souvent anarchique, soit réglementée pour éviter de perturber de fragiles équilibres naturels: érosion des plages dont l'alimentation naturelle en sable a été coupée; destruction à terre de la nappe phréatique, etc [09]

I.5.Méthode des plans d'expériences :

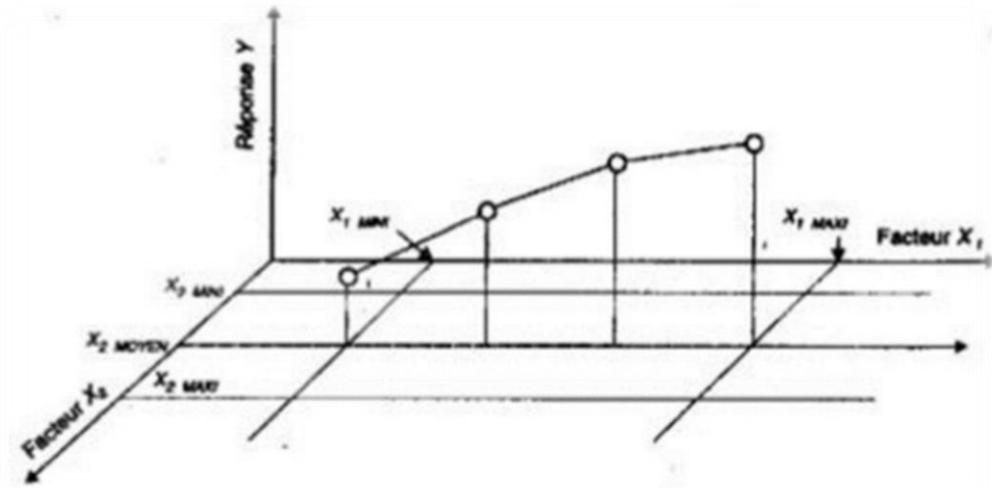
L'utilisation d'un plan d'expérience est intéressante dans le sens où elle fait réduire le nombre des mélanges tout en faisant varier plusieurs paramètres (facteurs) à la fois, ce qui va nous permettre d'évaluer leurs influences ainsi que leurs interactions sur les caractéristiques des bétons

Parmi ces facteurs, on peut citer: le dosage en ciment, le dosage en additions, le dosage en eau, le rapport EL, le rapport Additions/Ciment, le dosage en adjuvant, le rapport G/S....

L'analyse statistique peut être réalisée en utilisant certains logiciels tels que le Minitab, Statistica.... Ainsi, des modèles mathématiques obtenus par régression peuvent être développés en fonction des différents facteurs.

Les plans d'expériences sont un instrument bien adapté à la recherche-développement chaque fois qu'intervient un grand nombre de paramètres. Bien utilisés, ils permettent de réduire fortement le nombre d'essais, de gagner du temps et de l'argent, tout en parvenant à un résultat encore mieux assuré Leur application au béton s'impose chaque fois que l'on veut concilier au mieux de nombreuses exigences différentes

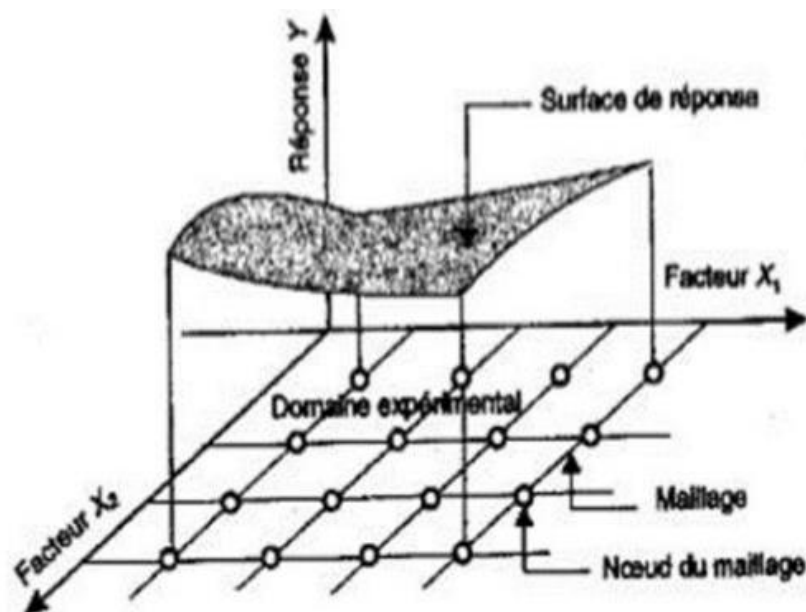
En termes d'expériences, il suffit de fixer, à un niveau constant, toutes les variables d'un problème sauf celles dont on espère étudier l'influence (**Figure 25**) [12]



FigI.25. Méthode traditionnelle d'expérimentation et courbe de réponse [12]

De manière intuitive, le formulateur étudie de façon séparée les deux facteurs (variables) X_1 et X_2 . Il fixe généralement X_2 à un niveau moyen et regarde l'évolution de la réponse quand X_1 varie de $X_{1\text{mini}}$ à $X_{1\text{maxi}}$ à l'aide des quatre essais présentés sur la **FigureI.26**. Il réalise ensuite le même type d'essais avec X_2 .

Un bon exemple est présenté sur la **FigureI.11**? (شكل غير متوافق عليك تثبيت برقم الشكل) 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 (**figureI.26**), le formulateur réalise une expérience aux noeuds d'un maillage établi de façon empirique pour tracer ensuite des surfaces de réponse. Si le maillage est très serré, le nombre d'essais devient rapidement très grand. Généralement, un maillage serré traduit un manque de connaissance du phénomène étudié ou une crainte envers une réponse inattendue.



FigI.26. maillage du domaine expérimental et surface de réponse [12]

Pour améliorer la connaissance du phénomène observé, le formulateur réalise un maillage du domaine expérimental et exécute des essais à chacun des noeuds du maillage. Dans l'exemple (**Figure I.26**), il aura fallu seize essais pour tenter d'avoir une idée sur l'évolution de la réponse observée dans le domaine. Le principe de la méthode des plans d'expériences consiste à n'étudier sélectivement que quelques points du domaine, situés à sa frontière, aux points de variation maximale des facteurs. Dans ce cas, quatre essais suffisent à établir un modèle avec interactions.

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

Pour appliquer la méthode des plans d'expérience et, en particulier, les méthodes s'appuyant sur les régressions linéaires multiples, il faut que les deux conditions suivantes soient réalisées

Les valeurs des facteurs (variables explicatives) sont connues sans erreur. Cette condition semble très restrictive [13]: en effet, peut-on prétendre, dans la préparation d'une gâchée de béton peser exactement la même quantité de ciment lorsqu'on répète

Chapitre I

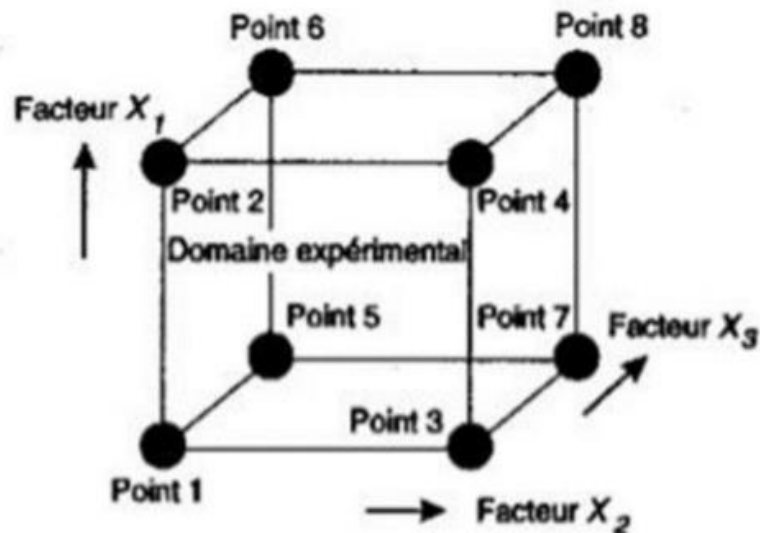
un essai ? Bien évidemment, la réponse est négative. Mais, pour satisfaire cette condition N°1, on supposera que la variation du facteur autour d'un niveau fixé est très petite par rapport à la différence entre deux niveaux consécutifs et a. par conséquent, une incidence négligeable sur la réponse. Par exemple, une erreur de quelques dizaines de grammes (correspondant, généralement, à la précision des balances) sur la pesée du ciment pour une gâchée de laboratoire de quatre-vingt-dix litres, aura une influence négligeable sur les variations des résistances à la compression devant la variation du dosage en ciment lui-même, dont on cherche à analyser l'influence.

La réponse (variable à expliquer) est homoscedastique. Cela signifie que l'aléa de mesure est constant sur l'ensemble du domaine étudié. Il est, en effet, difficile d'accorder une bonne confiance à un modèle établi sur des données dont la précision ne serait pas homogène. Pour résoudre ce problème, il existe (CETAMA (1986). Sanders et Allard, (1992) cité dans la référence [13] des tests de comparaison d'écarts-types deux à deux (test de Fisher), ainsi que des tests de fusion de plusieurs écarts-types (test de Bartlett). Dans tous les cas, si les écarts-types ne sont pas significativement différents, on les fusionnera.

Il existe plusieurs types de plans d'expériences: les plans de mélange, les plans factoriels, les plans hybrides, les plans fractionnaires et les plans de Plackett et Burman. Nous nous contenterons dans ce qui suit, de donner quelques détails concernant les plans factoriels et les plans de mélange.

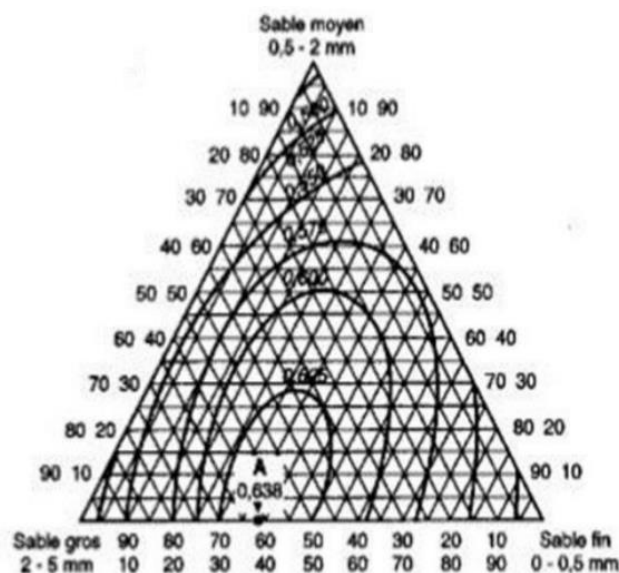
Un plan factoriel est un plan d'expériences comprenant k facteurs, chacun de ces facteurs possédant deux niveaux (un niveau inférieure (-1) et un niveau supérieur (+1)), d'où le terme 2^k. Pour k représentant trois facteurs, et, huit expériences sont à réaliser afin d'établir le modèle (figure I.28) avec les interactions d'ordre 2 et l'interaction d'ordre 3. Le modèle recherché pour une réponse Y sera du type:

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



FigI.27. Domaine expérimental d'un plan factoriel complet [14]

Un plan de mélange est une forme particulière d'un plan factoriel complet. Les propriétés d'un mélange dépendent généralement de sa composition et il est fréquent que l'on veuille traduire les variations d'une propriété en fonction de la concentration des divers constituants. [14] C'est le cas du triangle de Féret (**FigureI.27**) dont on souhaite déterminer la compacité en tout point, caractérisée par les proportions du mélange qu'il représente.



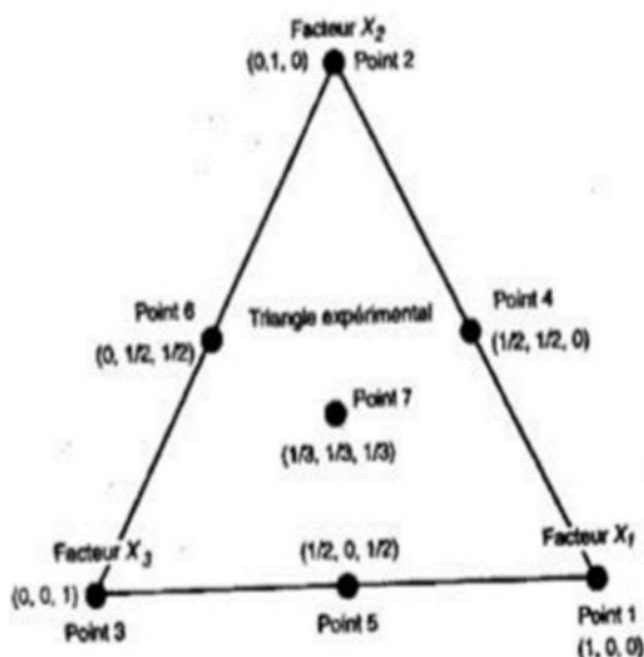
FigI.28. Triangle de féret , 1892

Chapitre I

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

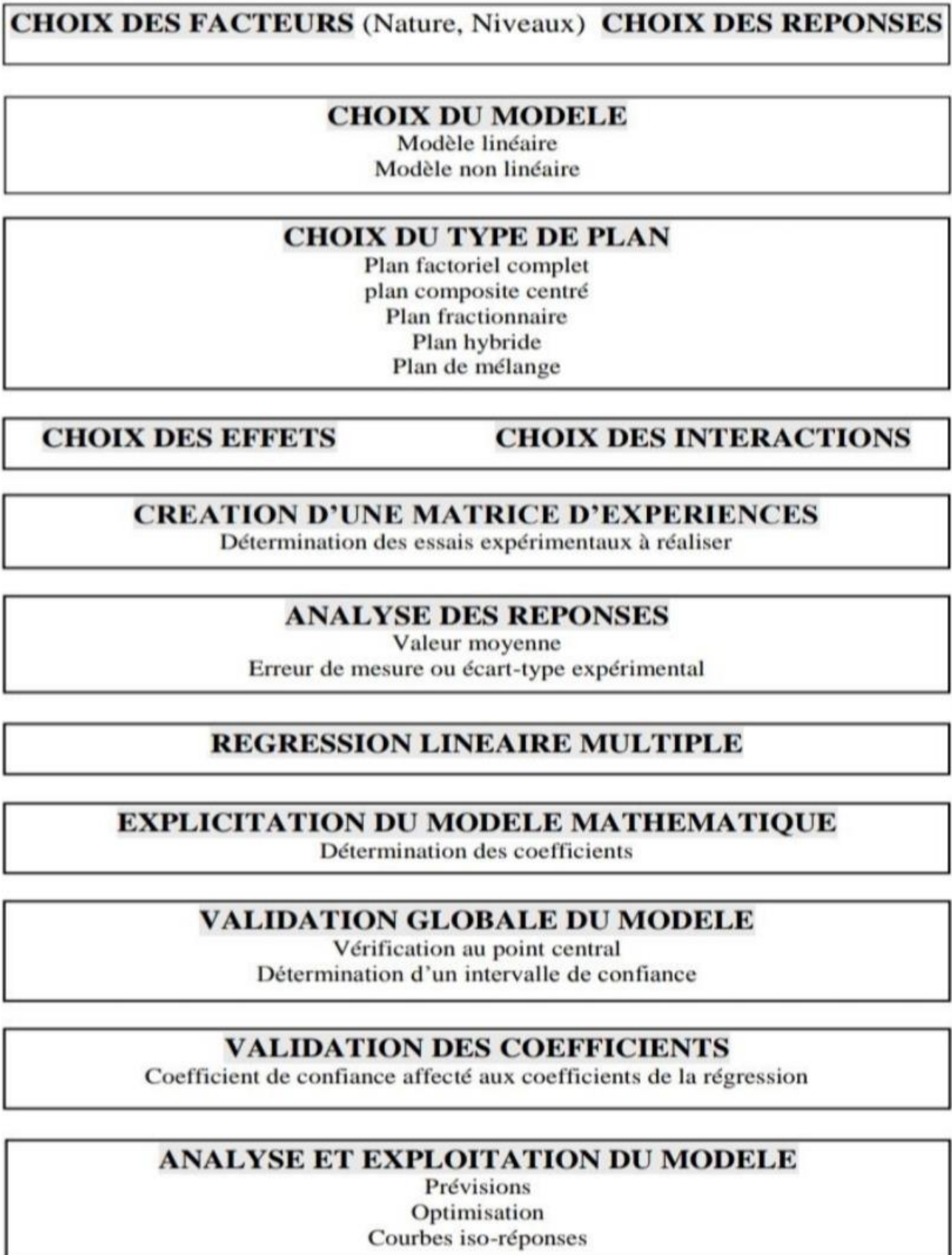
$$\text{type: } Y = BX + B_2X_2 + BX_3 + B_{12}XX_2 + BXX_1 + BX_2X + B_2XXX$$

Ce modèle comprenant trois facteurs avec interactions ne comporte que sept coefficients, donc il nécessite sept points expérimentaux distincts pour être entièrement déterminé (Figure I.29).



FigI.29. 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: B1231.



FigI.30. Organigramme général de traitement des plans d'expériences [15]

I.6. Méthode de taguchi :

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

Gen'ichi Taguchi a su démocratiser et rendre les plans d'expériences utilisables pour des techniciens. Cette méthode se concentre avant tout à minimiser les variations autour de la valeur de consigne. L'objectif est d'obtenir des produits, processus et systèmes aussi robustes et insensibles aux perturbations externes que possible. La méthode Taguchi est appliquée dans le cadre de l'amélioration de la qualité [16]

1.6.1. 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.

Chapitre I

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 [16]

I.7. Conclusion :

L'analyse des résultats de recherche présentés dans la littérature sur la problématique des pneus usagés et des déchets de briques non réutilisables et l'exploitation des sables de dune, notamment leur valorisation sous forme de granulats de construction (béton, mortier), montre que cette pratique est possible et peut réduire le stock de déchets de pneus usagés. Malgré la faible résistance mécanique (en compression et en traction), ce composite offre une capacité de déformation importante avant le site de fissuration.

Chapitre II

Matériaux et procédures expérimentales

Chapitre II

II.1. Introduction :

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

II.2. Matériaux utilisés :

II.2.1. Sables :

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

Le sable alluvionnaire provenant de la sablière Djamaa, de la Willaya d'El Oued (**Voire Figure II.1**). Sa masse volumique apparente est : 1.88 g/cm^3 et sa masse volumique absolue : 2.72 g/cm^3 . Sa granulométrie varie de 0 à 5mm.

Le sable de dune utilisé est un sable provenant de la région d'El oued (**Voire Figure II.2**). Sa masse volumique apparente est : 1.69 g/cm^3 et sa masse volumique absolue: 2.59 g/cm^3 . Sa granulométrie varie de 0 à 0.63 mm.

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



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



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

Chapitre II

II.2.1.1. Caractéristiques physiques :

Les caractéristiques physiques sont comme suit :

II.2.1.1.1. Les masses volumiques :

La masse volumique apparente :

Cet essai est régi par la norme NF P18-554 [17], elle est définie comme étant la masse de l'unité de volume apparente du corps, c'est-à-dire celle du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.

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

Où :

γ : Masse volumique apparente.

M : Masse du matériau.

V : Volume total du matériau.

La masse volumique absolue

Cet essai est régi par la norme NF P18-301 [18], elle est définie comme étant la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains.

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

Où :

γ_s : Masse volumique absolue .

M_s : Masse du matériau.

V_s : Volume total du matériau solide.

Chapitre II

II.2.1.1.2. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux

Respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Cet essai est défini par la norme NF P 18 560. [19]

En utilisant un tamis séquentiel comme indiqué sur **Figure II.3**.



Figure II.3: Tamis d'analyse granulométrique.

II.2.1.1.3. Module de finesse

Les granulats 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 mortier tandis que si le granulat est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un granulat 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 granulats à mortier.

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

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

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

Chapitre II

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

II.2.1.1.4. Equivalent de sable

Cet essai, référencé par la norme NF P18 598 [20], est utilisé pour évaluer la propreté des matériaux entrant dans la composition des mortiers. On lave l'échantillon selon un processus normalisé et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 min, on mesure les éléments suivants (**Figure II.4**).

La hauteur h1 : matériaux propres + éléments fins.

La hauteur h2 : matériaux propres seulement.

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

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

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

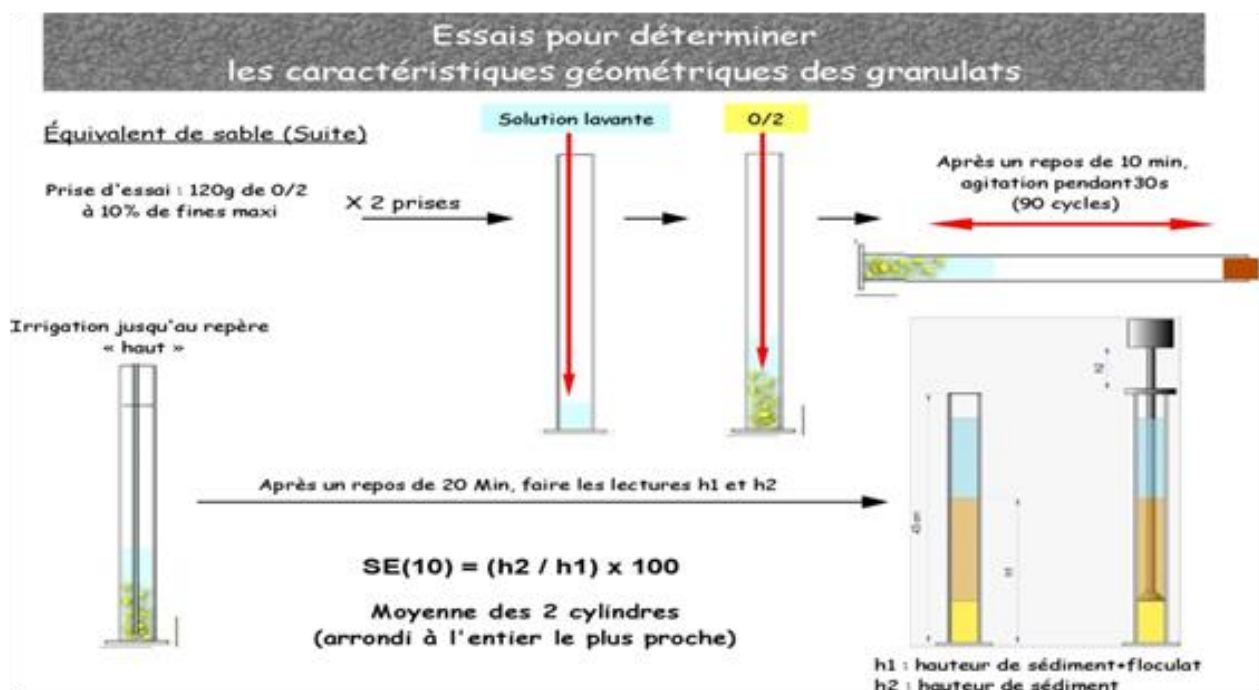


Figure II.4. Schémas de mesure d'équivalent de sable.

Chapitre II

Selon la norme NF P18 598 [20], les préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les mortiers sont indiquées sur le **Tableau II.1** :

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

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. Synthèse des résultats :

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

Caractéristiques	Masse Volumique apparente (g/cm ³)	Masse Volumique absolue (g/cm ³)	Mf	ESV (%)
Sable Alluvionnaire (SA)	1.88	2.72	2.17	73
Sable de Dune (SD)	1.69	2.59	1.18	85

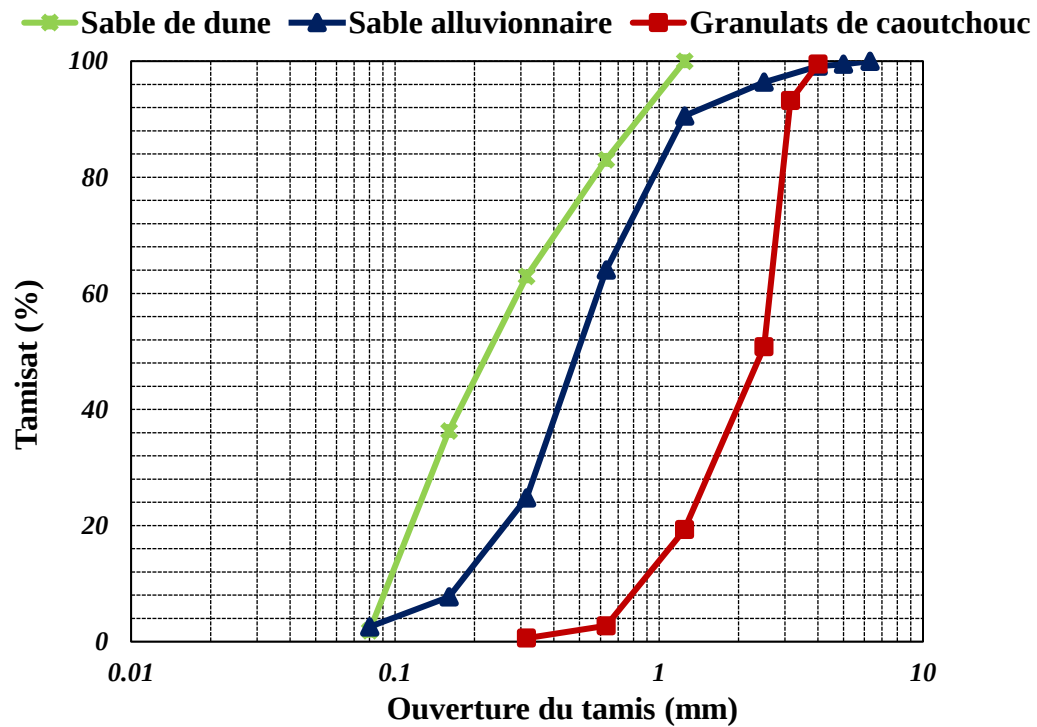


Figure II.5. Courbes granulométriques des sables utilisés et des granulats de caoutchouc.

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 [21], le ciment a été fourni par le Groupe Industriel des Ciments d'Algérie (LAFARGE), Biskra, Algérie (**Figure II.6.**).



Figure II.6. Ciment utilisé.

Chapitre II

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
Teneuren sulfates SO_3 (%)	2.5 ± 0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.7 ± 0.5
Teneur chlorures (%)	$0.02 - 0.05$
Teneur équivalent en alcalins (%)	$0.3 - 0.75$

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

Minéraux	Pourcentage
C_3S	60 ± 3.0
C_2S	15 ± 3.0
C_3A	7.5 ± 1.0
C_4AF	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

Chapitre II

Retrait à 28 jours	< 1000	$\mu\text{m/m}$
Expansion	≤ 0.3	Mm
Masse volumique apparente	975	kg/m^3
Densité spécifique	3080	kg/m^3

II.2.3. Granulats de caoutchouc (GC)

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.

Après l'élimination de leurs parties métalliques et textiles, ils sont déchiquetés et broyés mécaniquement pour obtenir la finesse désirée **Figure II.7**. La classe granulaire des granulats de caoutchouc recyclés utilisés, dans notre composite est de 0 à 4 mm .

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



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

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

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

Chapitre II

II.2.4. Déchets de brique (< 0.63mm)

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

Les propriétés physiques de ceux-ci sont récapitulées dans le **Tableau II.8**. La **Figure II.8** illustre l'analyse granulométriques de ceux-ci.



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

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

Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.42
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.34
Granulométrie	< 0.63 mm

II.2.5. Eau de gâchage

L'eau de gâchage des mélanges des mortiers confectionnés est issue directement du robinet du réseau public d'eau potable.

II.3. Formulations :

II.3.1. Formulations du mortier témoin (0%SD, 0%GC, 0%DB) :

Pour la composition du mortier témoin, nous avons utilisé un dosage en ciment et sable qui correspond à celui d'un mortier normalisé conformément à la norme

Chapitre II

EN 196-1;[22] c'est à dire une part de ciment et trois part de sable. Concernant le dosage en eau nous utiliseront le rapport E/C (0,55).

II.3.2. Formulations du mortier avec SD, GC et DB

Nous avons incorporé des sables de dune (SD) en substitution volumique du sable alluvionnaire (SA) avec trois substitutions volumétriques 07,14, 21 % et une formulation sans substitution (mélange témoin).

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 trois substitutions volumétriques 05, 10,15 % et une formulation sans substitution (mélange témoin).

Nous avons incorporé des déchets de brique ($< 0.63\text{mm}$) issus du recyclage de murs de briques démolis en substitution volumique du sable alluvionnaire (SA) avec trois substitutions volumétriques 03, 06, 09 % et une formulation sans substitution (mélange témoin).

Après des recherches sur littérature, nous fixerons le dosage en ciment ($C=400\text{ kg/m}^3$) et le rapport E/C (0,55).

Chapitre II

II.3.3. Compositions des mortiers :

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

Tableau II.9. Composition des mortiers utilisés.

Désignation du mélange	Ciment (g)	Eau (g)	Sable Alluvionnaire (SA) (g)	Sable De dune (SD) (g)	Granulats de caoutchouc (GC) (g)	Déchets de brique (DB) (g)
Formulation 00 (0%SD, 0%GC et 0%DB)	400	220	1200	00	00	00
Formulation 01 (7%SD, 5%GC et 3%DB)	400	220	1020	80.03	22.65	31.94
Formulation 02 (7%SD, 10%GC et 6%DB)	400	220	924	80.03	45.20	64.13
Formulation 03 (7%SD, 15%GC et 9%DB)	400	220	828	80.03	67.85	96.07
Formulation 04 (14%SD, 5%GC et 6%DB)	400	220	900	160.06	22.65	64.13
Formulation 05 (14%SD, 10%GC et 9%DB)	400	220	804	160.06	45.20	96.07
Formulation 06 (14%SD, 15%GC et 3%DB)	400	220	816	160.06	67.85	31.94
Formulation 07 (21%SD, 5%GC et 9%DB)	400	220	780	239.83	22.65	96.07
Formulation 08 (21%SD, 10%GC et 3%DB)	400	220	792	239.83	45.20	31.94
Formulation 09 (21%SD, 15%GC et 6%DB)	400	220	696	239.83	67.85	64.13

Chapitre II

II.3.4. Procédure expérimentale

II.3.4.1. Fabrication du mortier

II.3.4.1.1. Pesage des composants du mortier

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



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

II.3.4.1.2. Malaxage des composants du mortier :

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



Figure. II.10. Matériaux utilisés secs.

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



Figure. II.11. Mélanger les matières sèches.

Ajouter de l'eau petit à petit tout en mélangeant



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

II.3.4.1.3. Coulage des éprouvettes :

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



Figure. II.13. Moule des éprouvettes utilisés.

II.3.4.1.4. Étapes de coulage des éprouvettes :

Chapitre II

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



Figure. II.14. Lubrifié de moule.

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



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

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



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

Chapitre II

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



Figure. II.17. Remplissage du modèle terminé.

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



Figure. II.18. Ouvrir le éprouvettes.



Figure. II.19. Nettoyage des échantillons.



II.3.4.2. Les essais réalisés

II.3.4.2.1. Essais réalisés à l'état frais

II.3.4.2.1.1. 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.20

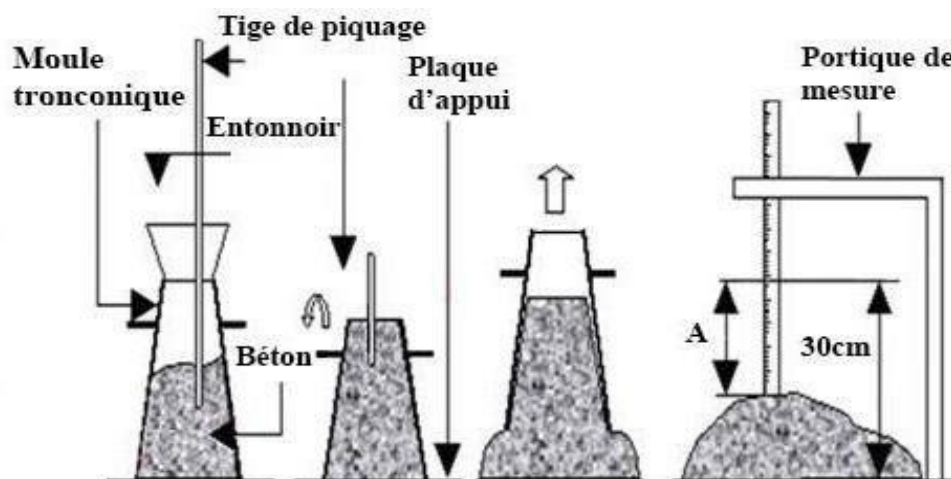


Figure. II.20. Dispositif de mesure d'affaissement au cône d'Abrams

Afin de définir la classe d'affaissement, la norme NF P18 305 [23] définit les classes d'affaissement indiquées sur le **Tableau II.10**.

Tableau II.10. 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 mortier de sable plastique dans ($E/C = 0.55$).

II.3.4.2.2. Essais réalisés à l'état sec :

Les essais sur le mortier 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 influencé par des facteurs externes.



Figure. II.21. Échantillons après leur sortie de l'eau.

II.3.4.2.2.1. Essais de la masse Volumique :

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

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.22. Séchage des échantillons.

II.3.4.2.2.2. 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

Chapitre II

déterminer la résistance à la traction par flexion du mortier étudié. C'est l'essai le plus couramment utilisé. Il consiste à rompre en flexion une éprouvette.

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

Les résistances à la traction du mortier durci ont été évaluées à 28 jours en utilisant une machine de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 20 KN, pourvue d'un dispositif de flexion à 3 points (**Figure II.23**). La valeur de la résistance considérée constitue la moyenne de la contrainte d'écrasement de trois éprouvettes.

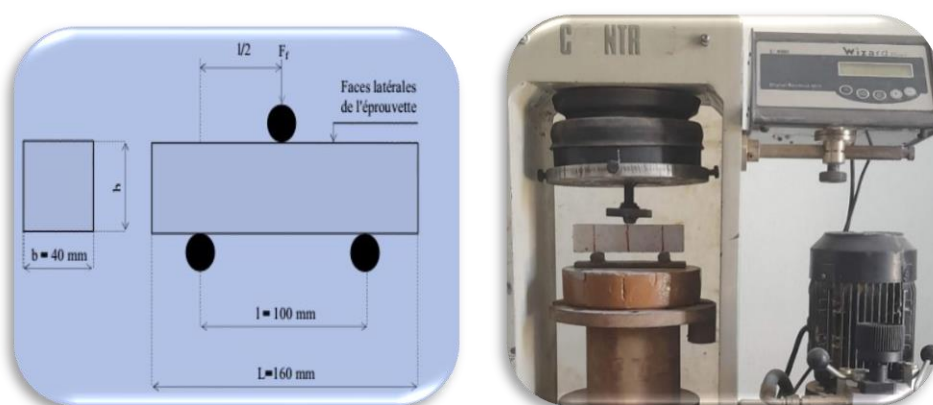


Figure. II.23. Essai de de traction par flexion.

II.3.4.2.2.3. Essai de compression :

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

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

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

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

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

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

Les résistances en compression ont été évaluées à 28 jours en utilisant une machine d'essai en compression hydraulique permettant d'appliquer des charges jusqu'à 1500 KN, pourvue d'un dispositif de compression pour les moules de mortiers

Chapitre II

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

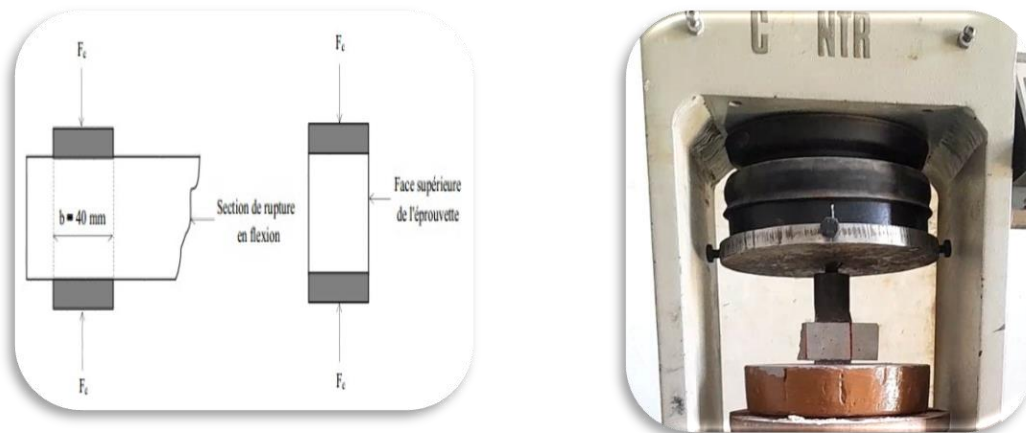


Figure. II.24. Essai de compression.

II.3.4.2.2.4. 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 mortier résulte du temps mis par les ondes pour traverser la pâte de ciment durci et les granulats. Elle dépend énormément du module d'élasticité des granulats et de leur quantité dans le béton et le mortier. Le principe de la méthode des ultra-sons consiste à mesurer le temps de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le mortier. Les principales caractéristiques de tous les appareils disponibles sur le marché comprennent un générateur d'impulsion et un récepteur d'impulsion, comme la montre là (Figure II.25).



Figure. II.25. Essai d'auscultation dynamique.

II.4. Analyse par microscope

Les observations au microscope ont été effectuées sur des surfaces d'échantillons découpés des échantillons d'éprouvette (4×4×16 cm).

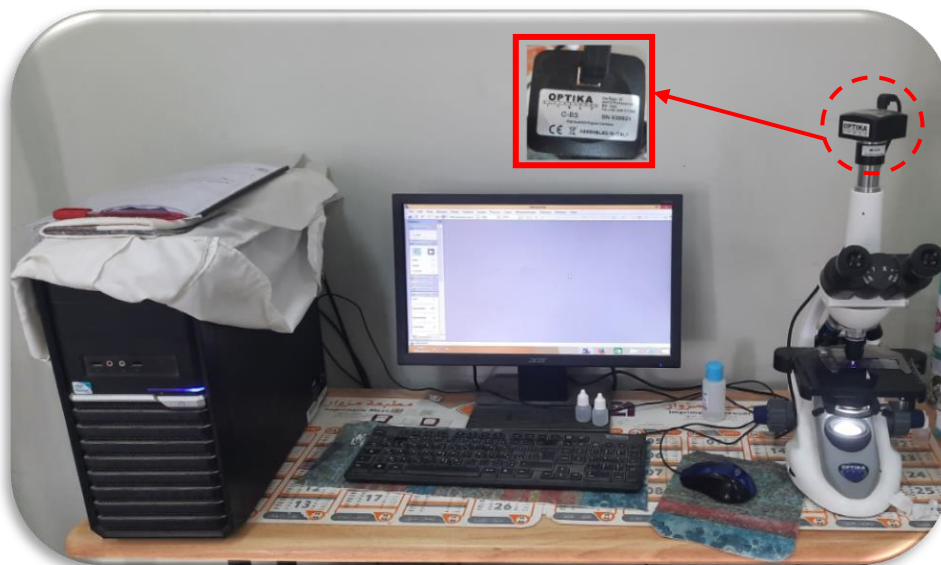


Figure. II.26. Microscope optique.

Des observations au microscope montrent un défaut d'adhérence manifeste et une auréole de transition plus étendue entre la matrice cimentaire et les granulats de caoutchouc. La photographie de la **Figure.II.27** montre cet état qui contribue sans doute aussi à l'augmentation de la porosité globale du composite et à la chute de la résistance en compression.

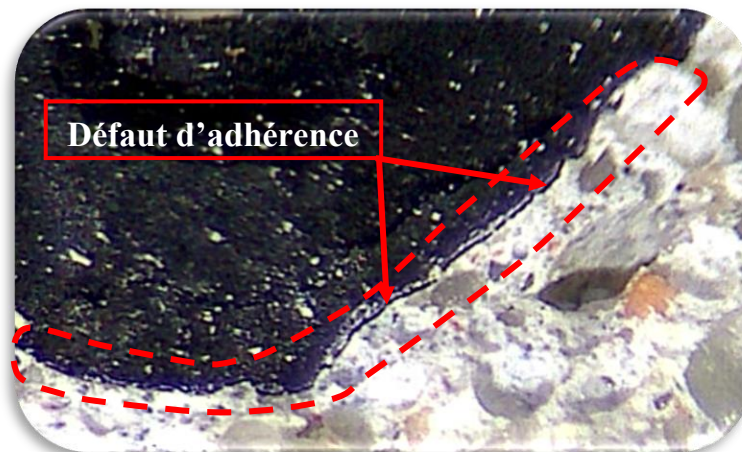


Figure.II.27. Défaut d'adhérence entre le caoutchouc et la matrice cimentaire vu au microscope, pour la formulation 08 (grossissement x100).

Ces résultats sont en accords avec ceux obtenus par certains auteurs, concernant les bétons et/ou mortiers à base de particules de caoutchouc [24]. Pour faire face à cette mauvaise propriété des granulats de caoutchouc GC, nous avons limité le dosage de ceux-ci de 5% à 15% pour maintenir la résistance mécanique dans une fourchette admissible.

Chapitre III

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

Chapitre III

III.1. Facteurs :

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

III.2. Niveaux des facteurs :

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

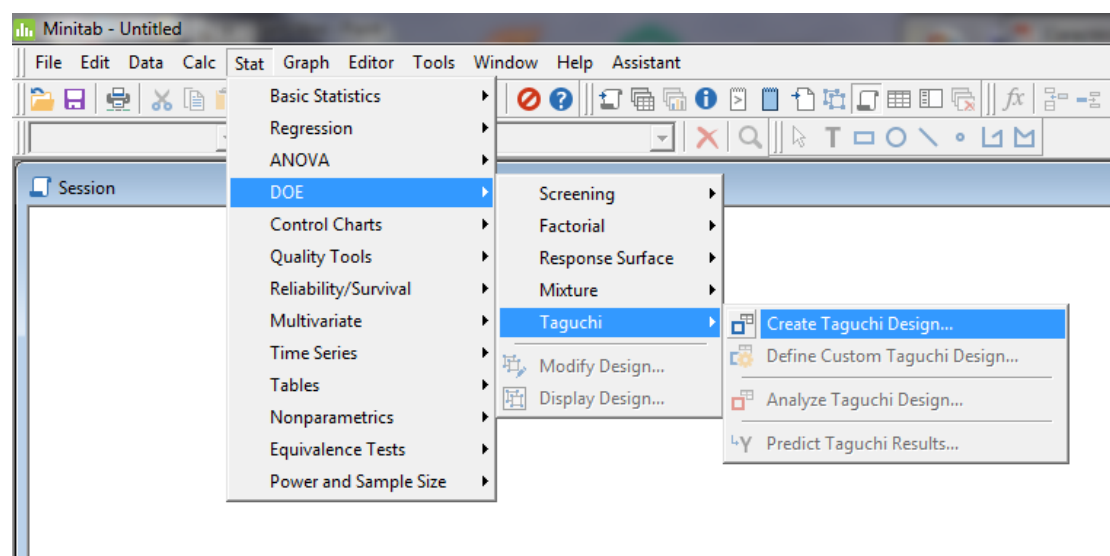
Tableau III.1 : Les facteurs et les niveaux ciblés.

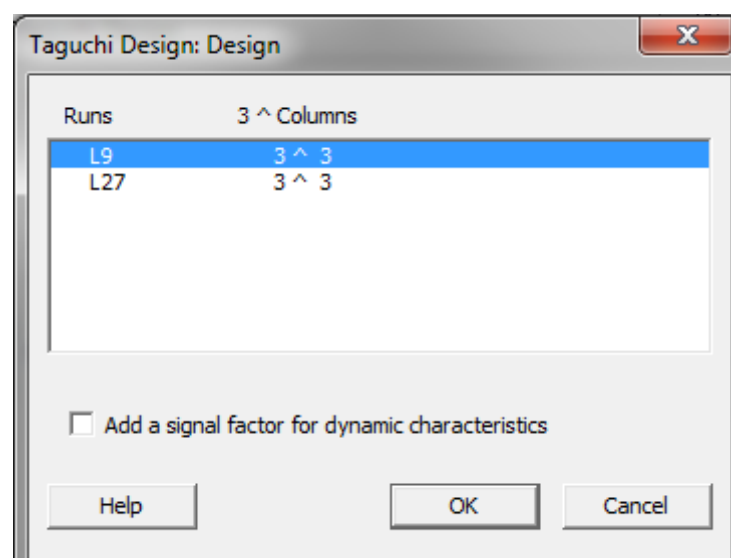
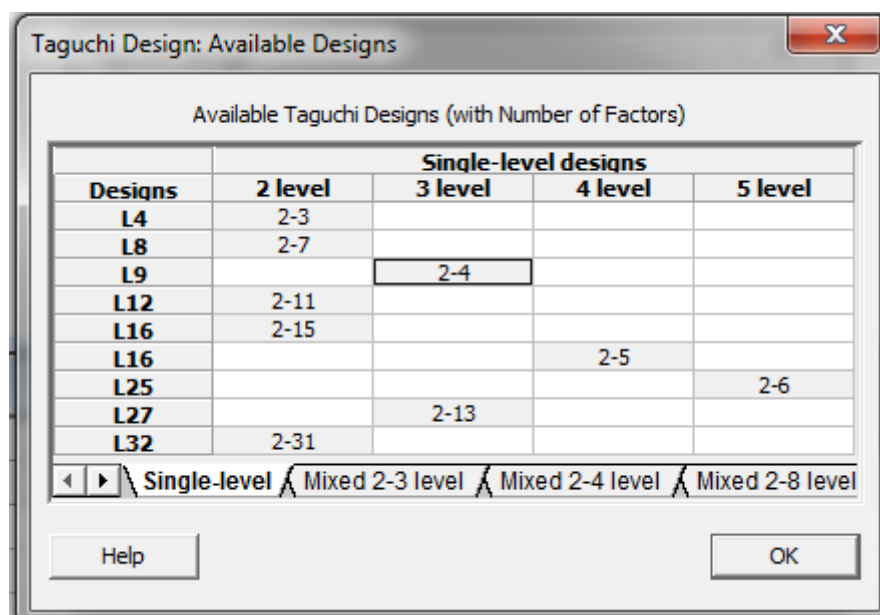
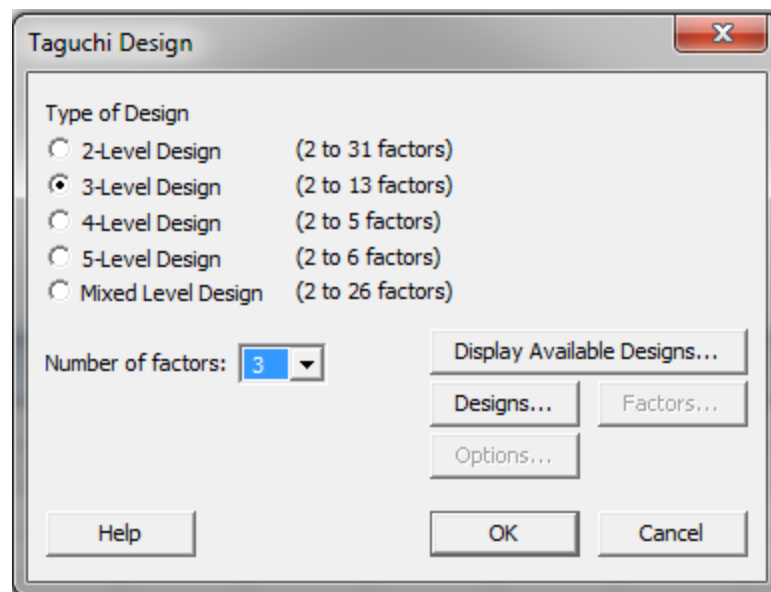
Facteurs	Niveaux		
Teneur en sable de dune (%)	7	14	21
Teneur en caoutchouc (%)	5	10	15
Teneur en déchets de brique (%)	3	6	9

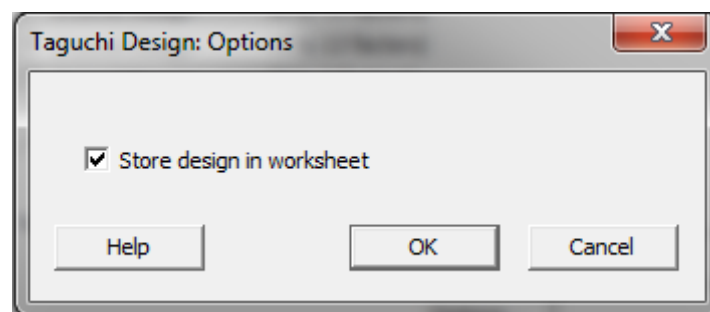
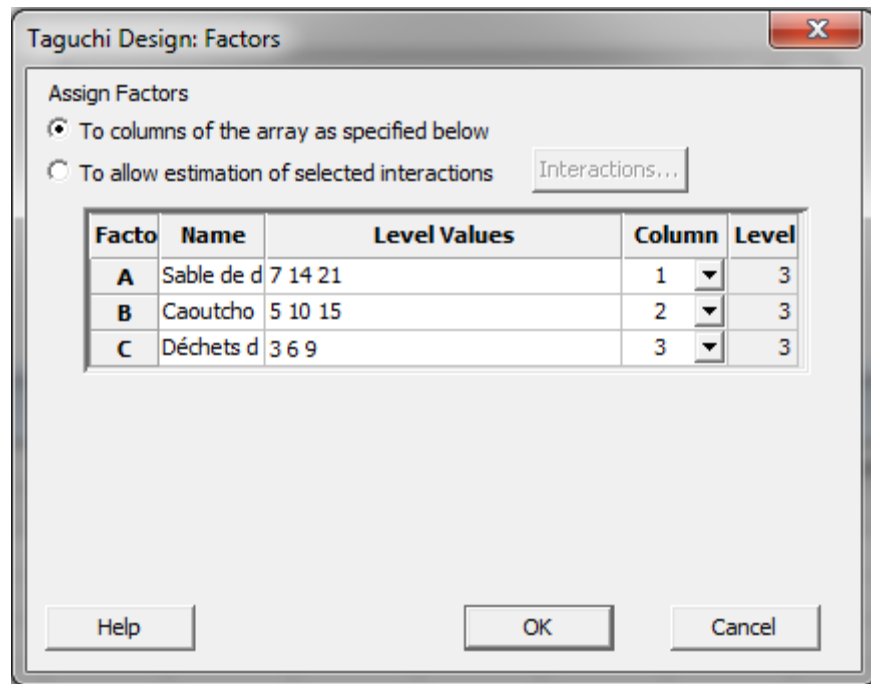
III-3 Choix de la matrice de Taguchi pour notre étude :

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	Teneur en sable de dune (%)	Teneur en caoutchouc (%)	Teneur en déchets de brique (%)
01	7	5	3
02	7	10	6
03	7	15	9
04	14	5	6
05	14	10	9
06	14	15	3
07	21	5	9
08	21	10	3
09	21	15	6

Chapitre III

III.4. La masse volumique à l'état durci :

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

N°	Désignation du mélange	La masse volumique à l'état durci (Kg/m ³)
1	SD7 GC5 DB3	2057.45
2	SD7 GC10 DB6	2034.16
3	SD7 GC15 DB9	2010.83
4	SD14 GC5 DB6	2111.80
5	SD14 GC10 DB9	2072.91
6	SD14 GC15 DB3	2000.52
7	SD21 GC5 DB9	2040.63
8	SD21 GC10 DB3	2075.57
9	SD21 GC15 DB6	2036.40

III.4.1. Détermination du résultat optimal pour chaque facteur :

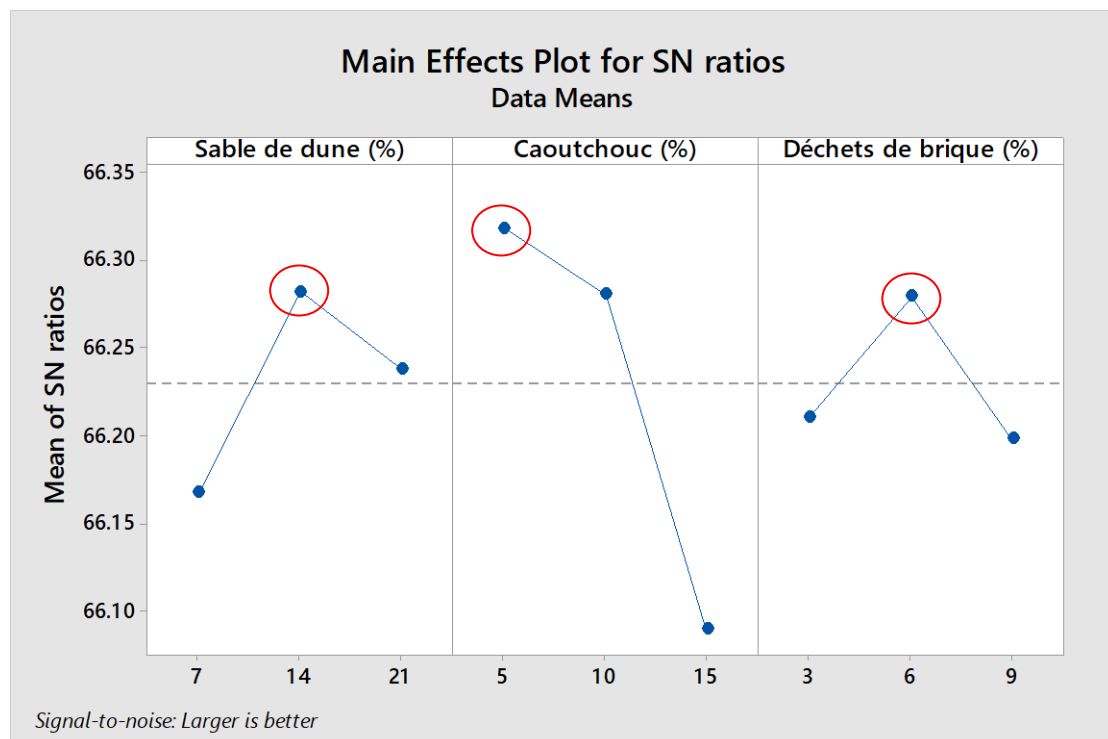


Figure III.1. Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios)

Chapitre III

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 durci sont les suivant : la teneur en sable de dune (14%), la teneur en caoutchouc (5%) et la teneur en déchets de brique (6%).

III.4.2. Détermination des coefficients du modèle :

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

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	2012.7	57.7	34.89	0.001	
Sable de dune (%)	2.59	3.48	0.75	0.534	16.00
Caoutchouc (%)	-20.82	4.87	-4.27	0.051	16.00
Déchets de brique (%)	51.7	18.7	2.77	0.109	84.57
Sable de dune (%)*Caoutchouc (%)	1.206	0.394	3.06	0.092	44.57
Sable de dune (%)*Déchets de brique (%)	-2.440	0.657	-3.71	0.066	44.57
Caoutchouc (%)*Déchets de brique (%)	-1.100	0.920	-1.20	0.355	44.57

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)
14.9125	95.34%	81.37%

Regression Equation

$$\text{Masse volumique (Kg/m}^3\text{)} = 2012.7 + 2.59 \text{ SD} - 20.82 \text{ GC} + 51.7 \text{ DB} + 1.206 \text{ SD*GC} - 2.440 \text{ SD*DB} - 1.100 \text{ GC*DB}$$

III.4.3. Interprétation des résultats:

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

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

Chapitre III

En plus, un pourcentage élevé de granulats de caoutchouc GC dans les mortiers entraîne une réduction de la masse volumique à l'état durci. Cette diminution peut s'expliquer par la faible masse volumique des granulats de caoutchouc utilisés ($M_v=1025 \text{ kg/m}^3$) par rapport à celle du sable remplacé ($M_v=2720 \text{ kg/m}^3$).

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

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

Les résultats obtenus montrent également un accord satisfaisant avec le modèle de Taguchi puisque les valeurs prédites sont statistiquement identiques aux valeurs expérimentales comme la montre la figure III.2.

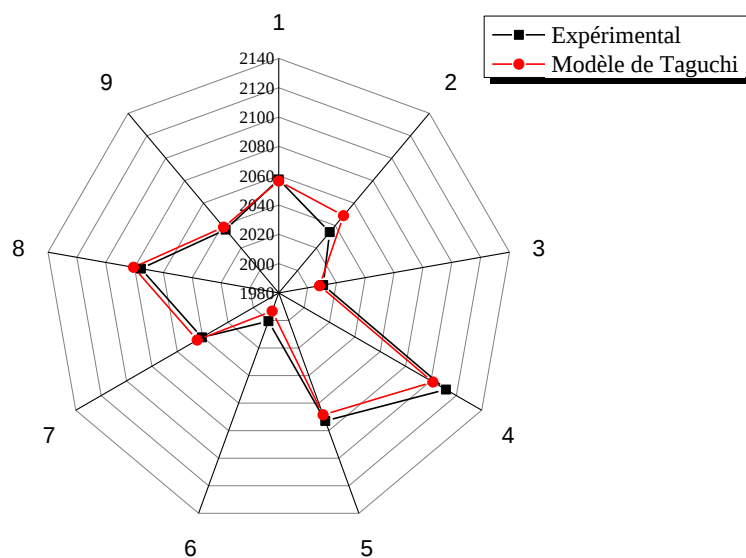
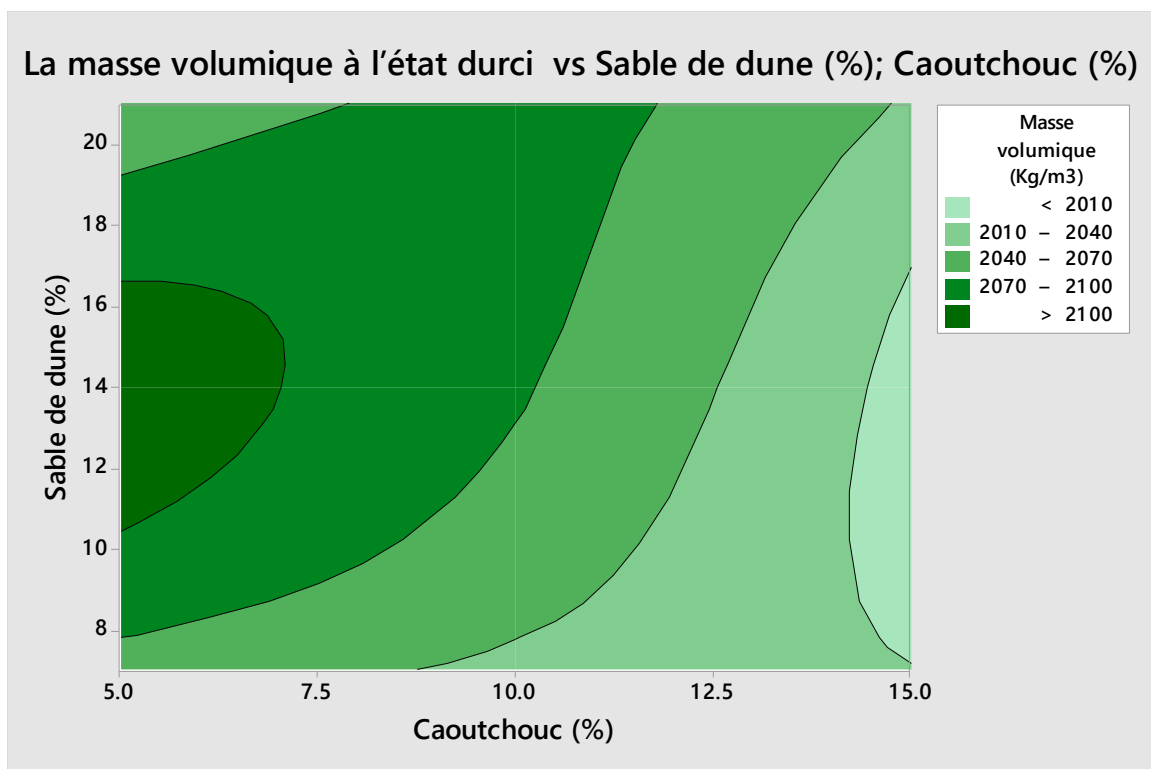
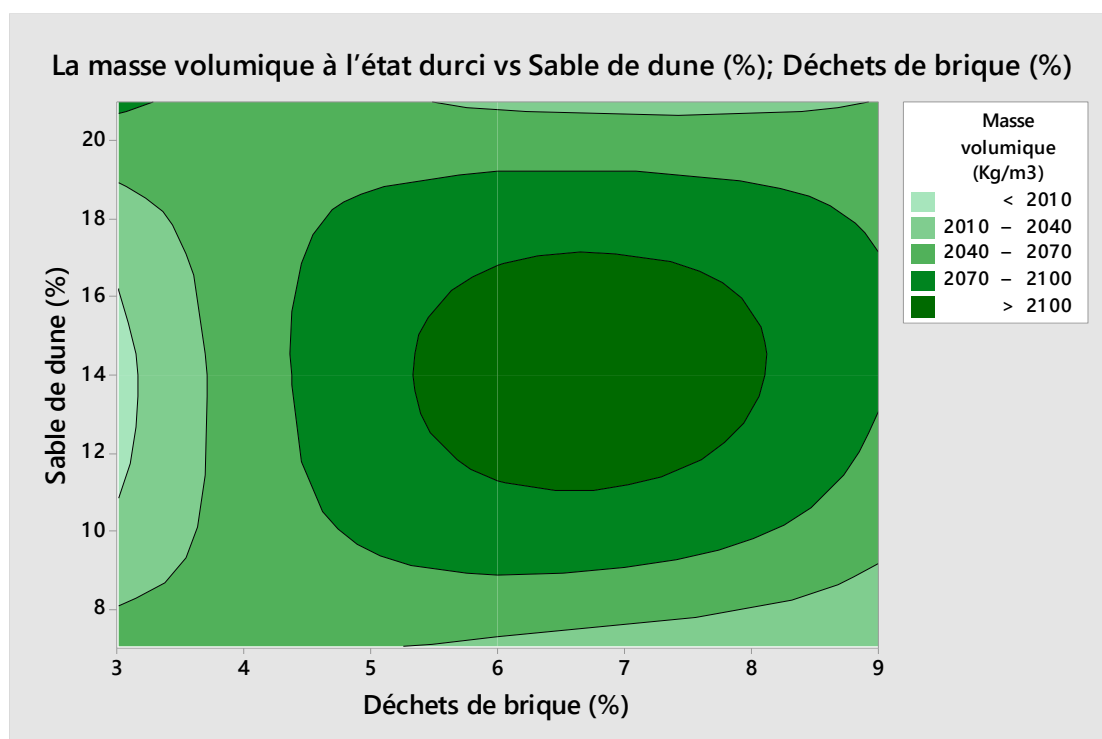


Figure III.2. Comparaison entre les résultats expérimentaux de la masse volumique à l'état durci avec ceux prédits par le modèle de Taguchi.

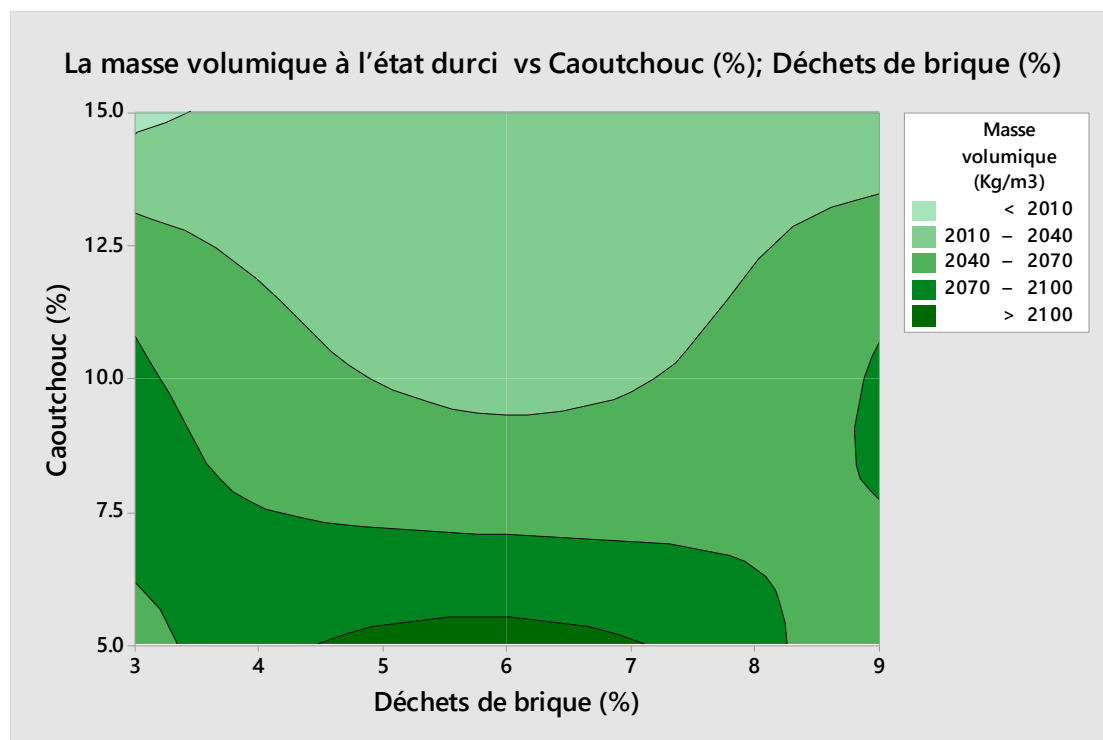
Les courbes obtenues et qui peuvent prédire la masse volumique à l'état durci à partir les facteurs étudiés sont illustrées par les figures III.3, III.4 et III.5.



Figures III.3. la masse volumique à l'état durci en fonction de pourcentage de sable de dune et de granulats de caoutchouc.



Figures III.4. la masse volumique à l'état durci en fonction de pourcentage de sable de dune et de déchets de brique.



Figures III.5. la masse volumique à l'état durci en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de déchets de brique.

Ces figures montrent clairement que la masse volumique à l'état durci peut atteindre 2100 kg/m³ si le pourcentage de sable de dune SD varie entre 11 et 16% avec un pourcentage de granulats de caoutchouc GC entre 5 et 7% et un pourcentage de déchets de brique DB variant entre 5.5 et 7.8%.

III.5. Résistance à la compression :

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

N°	Désignation du mélange	Résistance à la compression Rc28 (MPa)
1	SD7 GC5 DB3	25.60
2	SD7 GC10 DB6	30.40
3	SD7 GC15 DB9	24.20
4	SD14 GC5 DB6	30.46
5	SD14 GC10 DB9	25.37
6	SD14 GC15 DB3	26.10
7	SD21 GC5 DB9	23.70
8	SD21 GC10 DB3	22.43
9	SD21 GC15 DB6	17.63

III.5.1. Détermination du résultat optimal pour chaque facteur (Rc28) :

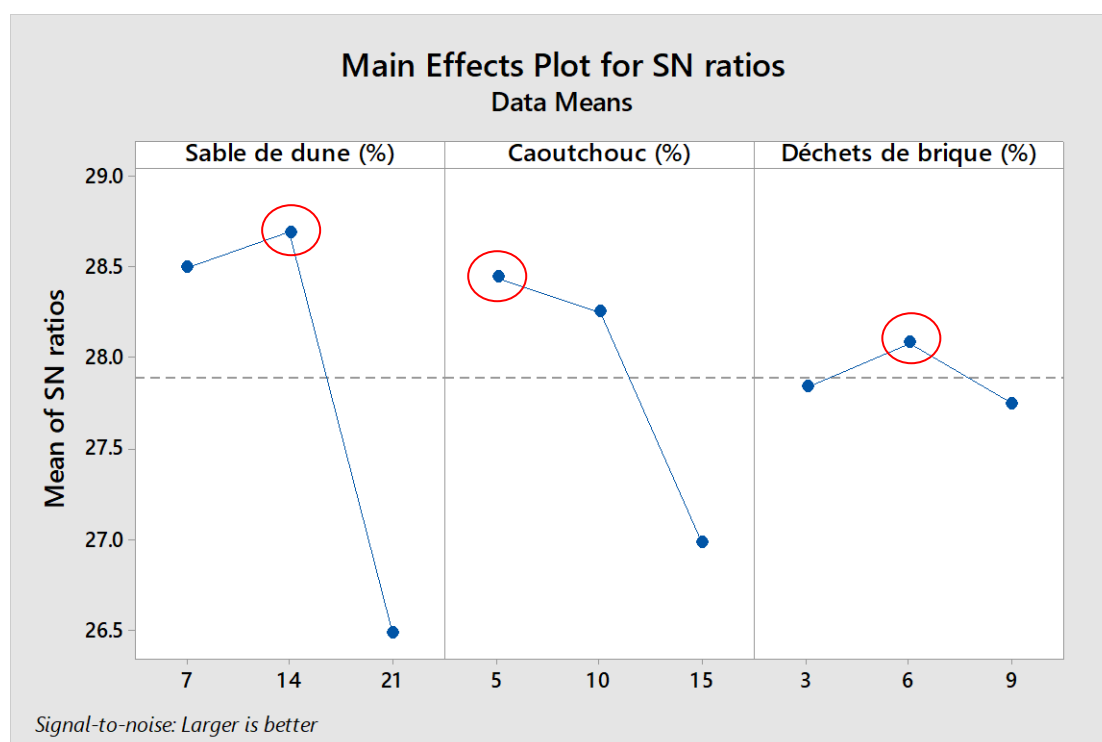


Figure III.6. Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios)

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

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.

Chapitre III

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	9.70	4.28	2.26	0.152	
Sable de dune (%)	-0.138	0.258	-0.53	0.647	16.00
Caoutchouc (%)	0.672	0.362	1.86	0.204	16.00
Déchets de brique (%)	7.35	1.39	5.30	0.034	84.57
Sable de dune (%)*Caoutchouc (%)	0.0623	0.0293	2.13	0.167	44.57
Sable de dune (%)*Déchets de brique (%)	-0.2173	0.0488	-4.45	0.047	44.57
Caoutchouc (%)*Déchets de brique (%)	-0.3990	0.0684	-5.84	0.028	44.57

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)
1.10746	98.02%	92.08%

Regression Equation

$$\text{Rc28. (MPa)} = 9.70 - 0.138 \text{ SD} + 0.672 \text{ GC} + 7.35 \text{ DB} + 0.0623 \text{ SD*GC} - 0.2173 \text{ SD*DB} - 0.3990 \text{ GC*DB}$$

III.5.3. Interprétation des résultats :

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

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

Les résultats obtenus montrent également un accord satisfaisant avec le modèle de Taguchi puisque les valeurs prédites sont statistiquement identiques aux valeurs expérimentales comme la montre la figure III.7.

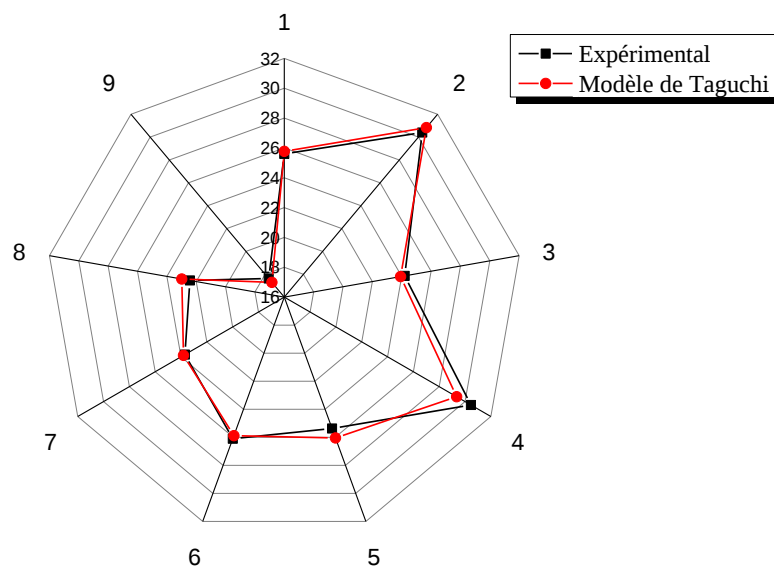
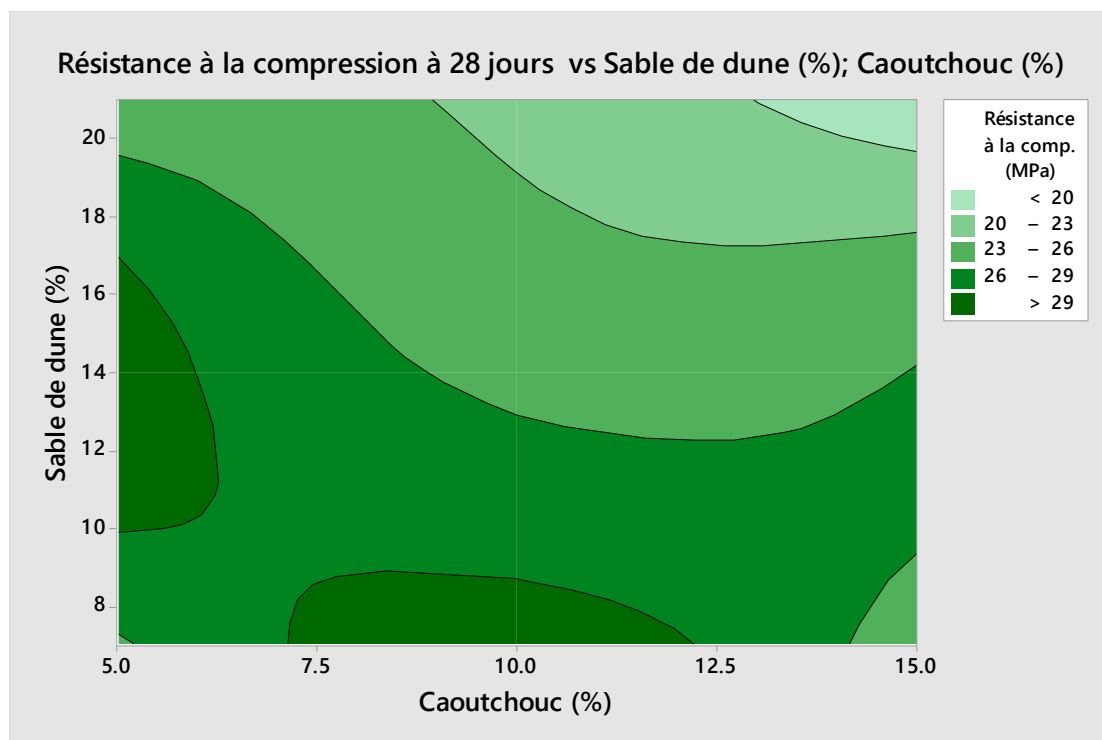
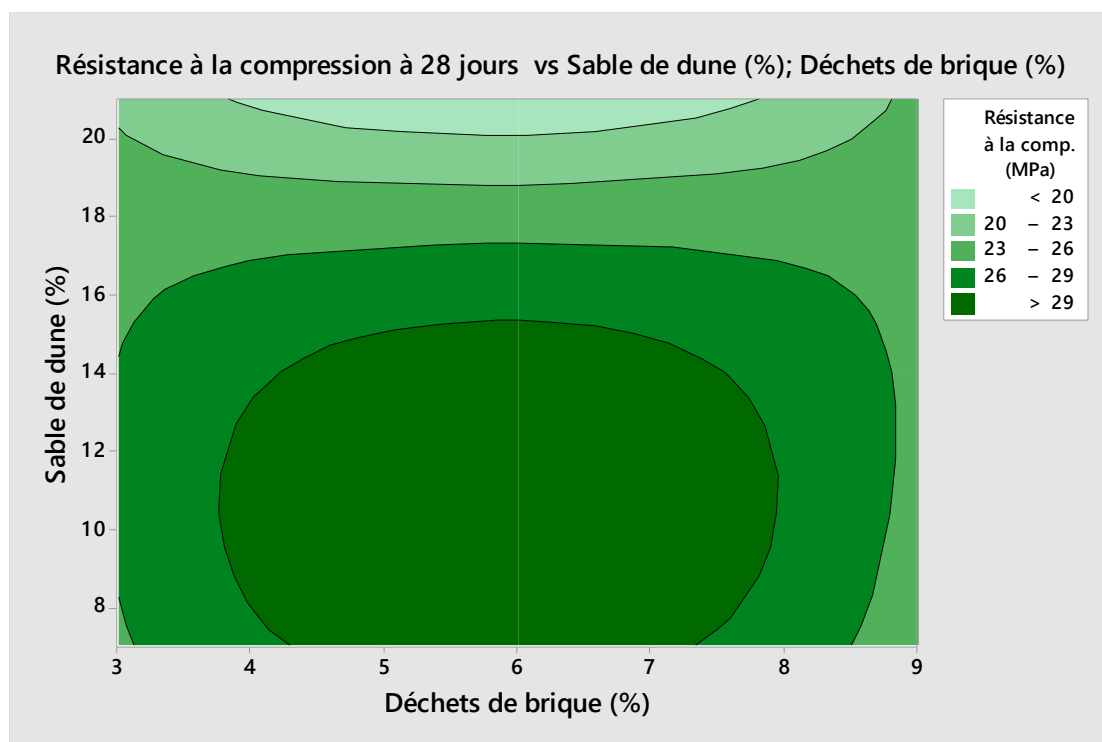


Figure III.7. Comparaison entre les résultats expérimentaux de la résistance à la compression à 28 jours avec ceux prédits par le modèle de Taguchi.

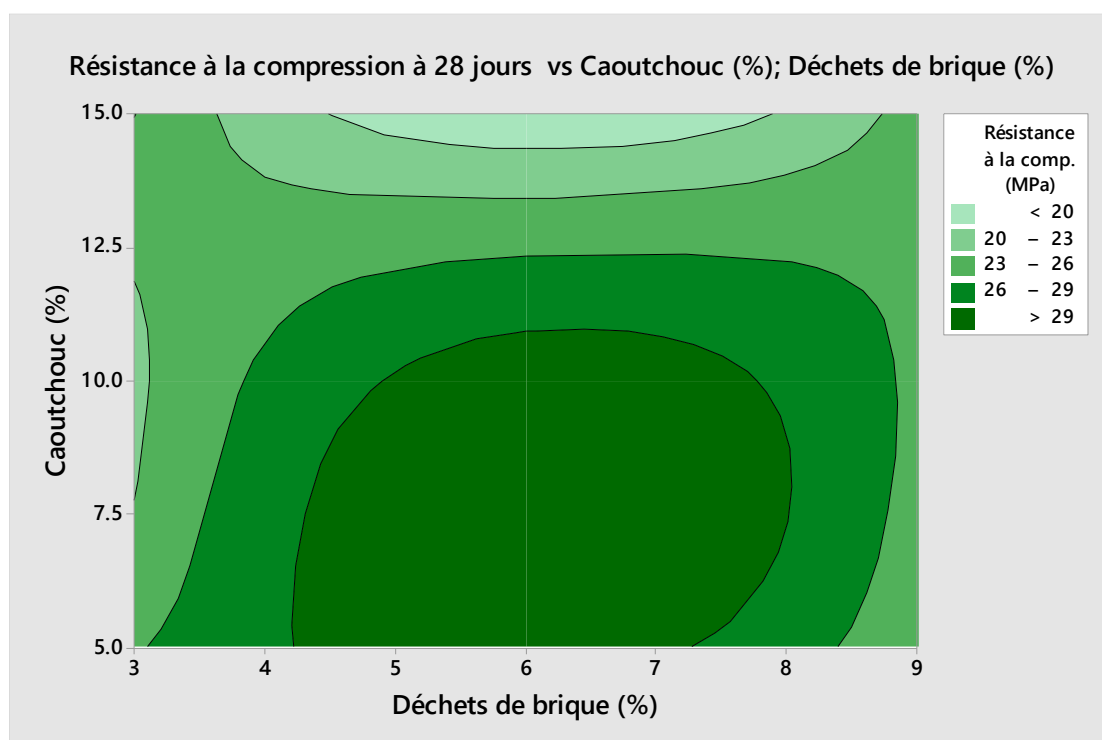
Les courbes obtenues et qui peuvent prédire la résistance mécanique à la compression à 28 jours à partir des paramètres étudiés sont illustrées par les figures III.8, III.9 et III.10.



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



Figures III.9. La résistance mécanique à la compression à 28 jours en fonction de pourcentage de sable de dune et de déchets de brique.



Figures III.10. La résistance mécanique à la compression à 28 jours en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de déchets de brique.

Chapitre III

Ces figures montrent clairement que la résistance mécanique à la compression à 28 jours peut dépasser 29MPa si le pourcentage de sable de dune SD varie entre 7 et 15% avec un pourcentage de granulats de caoutchouc GC entre 5 et 10.5% et un pourcentage de déchets de brique DB variant entre 4.3 et 7.5%.

III.6. Résistance mécanique à la flexion:

Tableau III.5 : Résultats des essais de la résistance mécanique à la traction par flexion à 28 jours.

N°	Désignation du mélange	Résistance à la flexion Rt28 (MPa)
1	SD7 GC5 DB3	6.30
2	SD7 GC10 DB6	5.55
3	SD7 GC15 DB9	7.00
4	SD14 GC5 DB6	5.70
5	SD14 GC10 DB9	5.90
6	SD14 GC15 DB3	5.17
7	SD21 GC5 DB9	8.17
8	SD21 GC10 DB3	6.46
9	SD21 GC15 DB6	5.60

III.6.1. Détermination du résultat optimal pour chaque facteur (Rt28) :

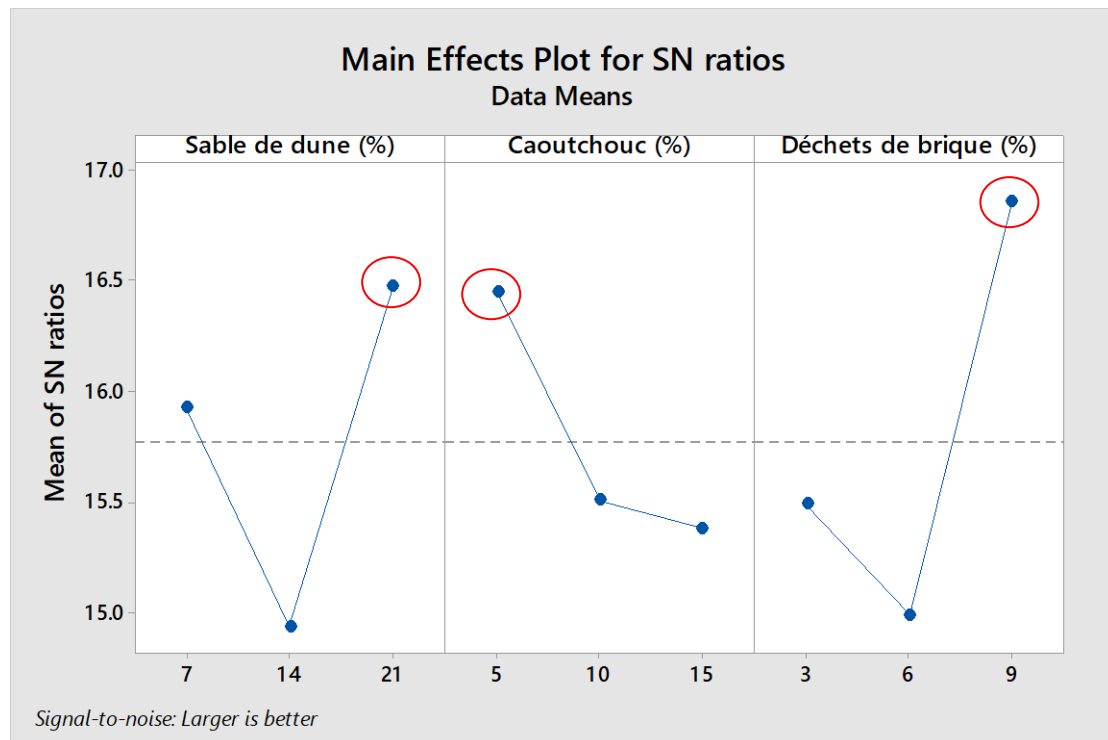


Figure III.11. Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios)

D'après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (*Signal to Noise Ratios*) représentés dans la figure III.11, nous constatons que les résultats optimaux pour chaque facteur afin de donner les meilleurs résultats pour la résistance mécanique à la traction par flexion à 28 jours sont les suivant: la teneur en sable de dune (21%), la teneur en caoutchouc (5%) et la teneur en déchets de brique (9%).

Chapitre III

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	8.14	1.34	6.10	0.026	
Sable de dune (%)	0.2886	0.0805	3.58	0.070	16.00
Caoutchouc (%)	0.158	0.113	1.40	0.296	16.00
Déchets de brique (%)	-1.846	0.432	-4.27	0.051	84.57
Sable de dune (%)*Caoutchouc (%)	-0.04914	0.00913	-5.38	0.033	44.57
Sable de dune (%)*Déchets de brique (%)	0.0562	0.0152	3.69	0.066	44.57
Caoutchouc (%)*Déchets de brique (%)	0.0947	0.0213	4.44	0.047	44.57

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)
0.345076	96.49%	85.95%

Regression Equation

$$\text{Rt28 (MPa)} = 8.14 + 0.2886 \text{ SD} + 0.158 \text{ GC} - 1.846 \text{ DB} - 0.04914 \text{ SD} * \text{GC} + 0.0562 \text{ SD} * \text{DB} + 0.0947 \text{ GC} * \text{DB}$$

III.6.3. 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 de pourcentage de sable de dune SD et de granulats de caoutchouc GC se traduit par une augmentation de la résistance mécanique à la traction par flexion à 28 jours. Par contre, l'augmentation de pourcentage de déchets de brique se traduit par une réduction de la résistance à la flexion.

En plus, les interactions entre le sable de dune et de déchets de brique (SD*DB) et entre les granulats de caoutchouc et de déchets de brique (GC*DB) influent positivement sur la résistance mécanique à la flexion à 28 jours.

Les résultats obtenus montrent également un accord satisfaisant avec le modèle de Taguchi puisque les valeurs prédites sont statistiquement identiques aux valeurs expérimentales comme la montre la figure III.12.

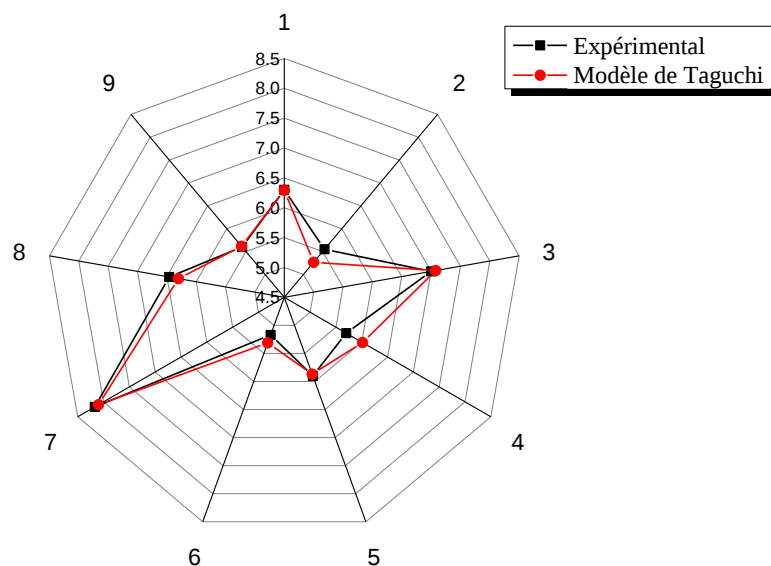
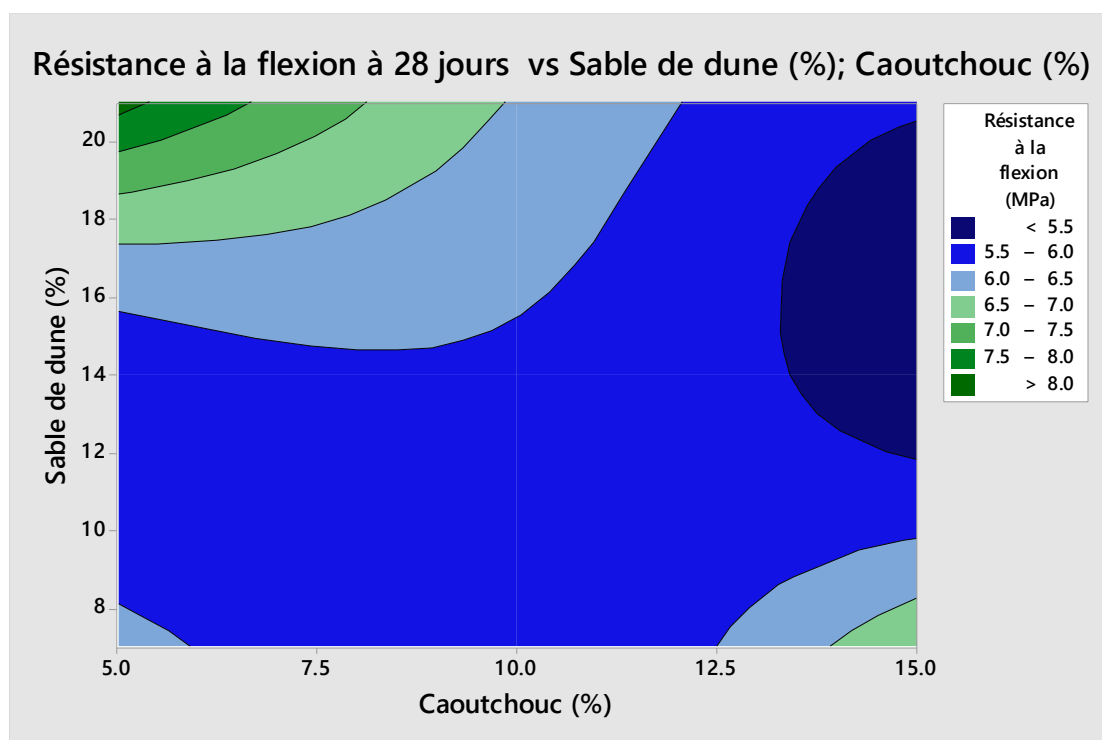
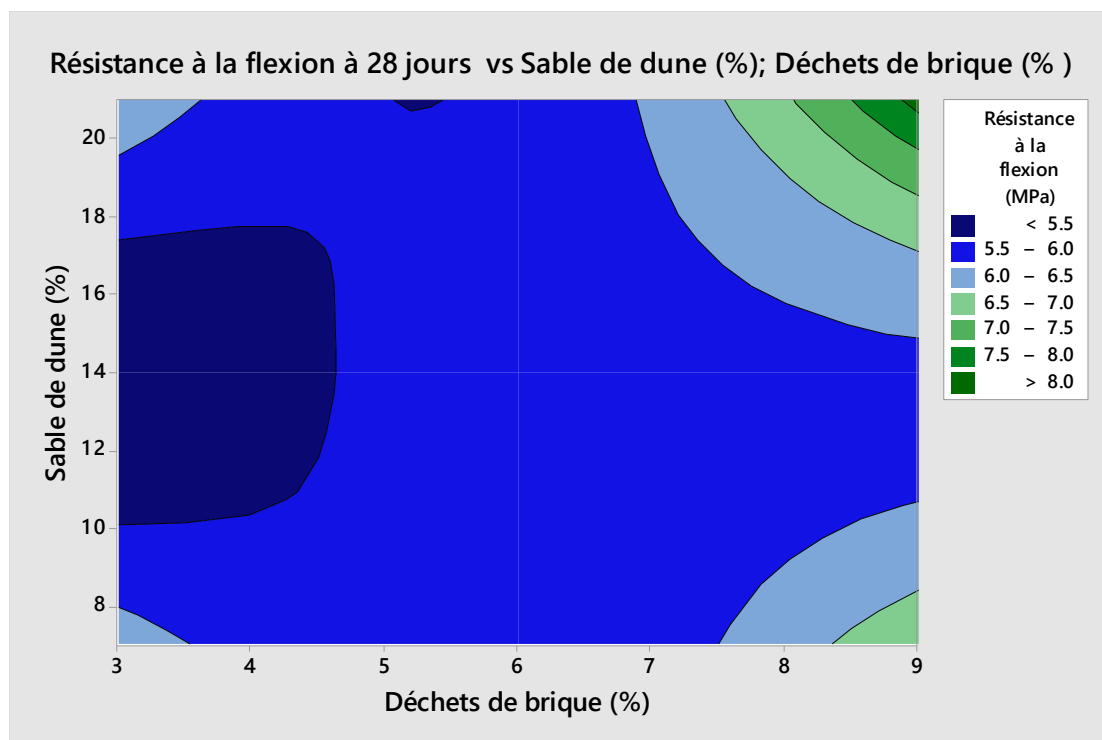


Figure III.12. Comparaison entre les résultats expérimentaux de la résistance à la flexion à 28 jours avec ceux prédits par le modèle de Taguchi.

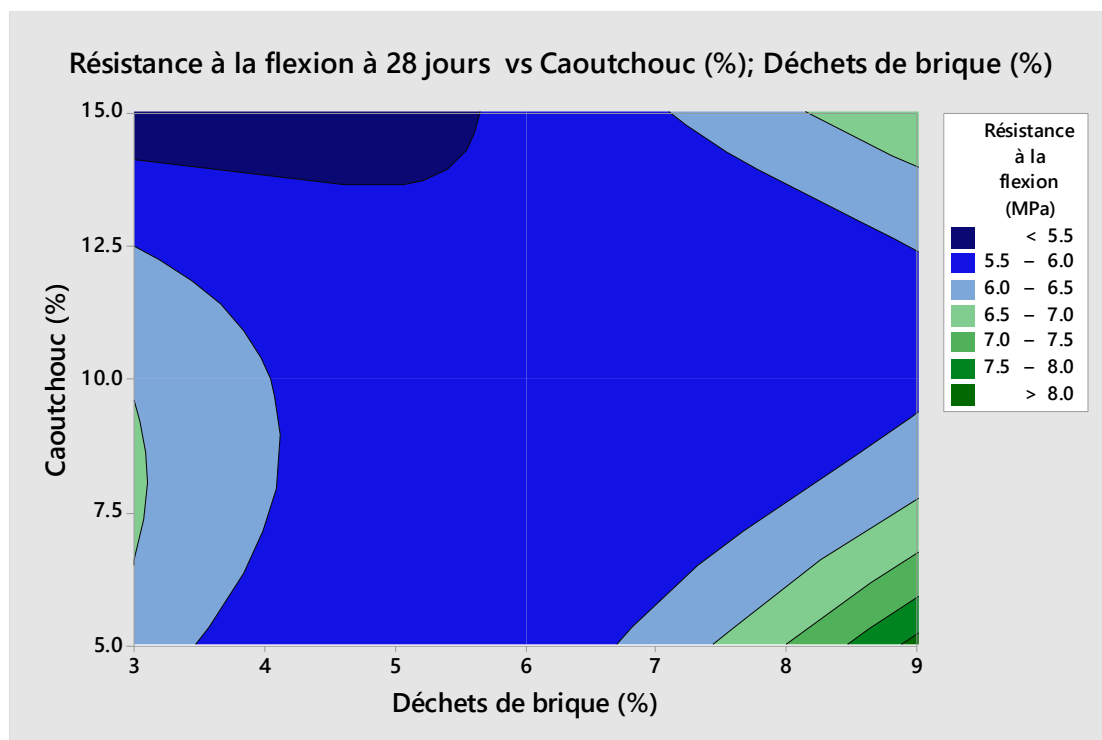
Les courbes obtenues et qui peuvent prédire la résistance mécanique à la traction à 28 jours à partir des paramètres étudiés sont illustrées par les figures III.13, III.14 et III.15.



Figures III.13. La résistance à la flexion à 28 jours en fonction de pourcentage de sable de dune et de granulats de caoutchouc.



Figures III.14. La résistance à la flexion à 28 jours en fonction de pourcentage de sable de dune et de déchets de brique.



Figures III.15. La résistance à la flexion à 28 jours en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de déchets de brique.

Chapitre III

Ces figures montrent clairement que la résistance mécanique à la traction à 28 jours peut dépasser 7 MPa si le pourcentage de sable de dune SD varie entre 17.5 et 21% avec un pourcentage de granulats de caoutchouc GC entre 5 et 7.5% et un pourcentage de déchets de brique DB variant entre 7.5 et 9%.

III.7. Vitesse de propagation d'ultrasons :

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

N°	Désignation du mélange	Vitesse de propagation d'ultrasons (m/s)
1	SD7 GC5 DB3	3842.00
2	SD7 GC10 DB6	3816.55
3	SD7 GC15 DB9	3538.00
4	SD14 GC5 DB6	3985.00
5	SD14 GC10 DB9	3809.50
6	SD14 GC15 DB3	3708.50
7	SD21 GC5 DB9	3912.00
8	SD21 GC10 DB3	3788.00
9	SD21 GC15 DB6	3599.50

III.7.1. Détermination de la résultat optimal pour chaque facteur (Ultrasons):

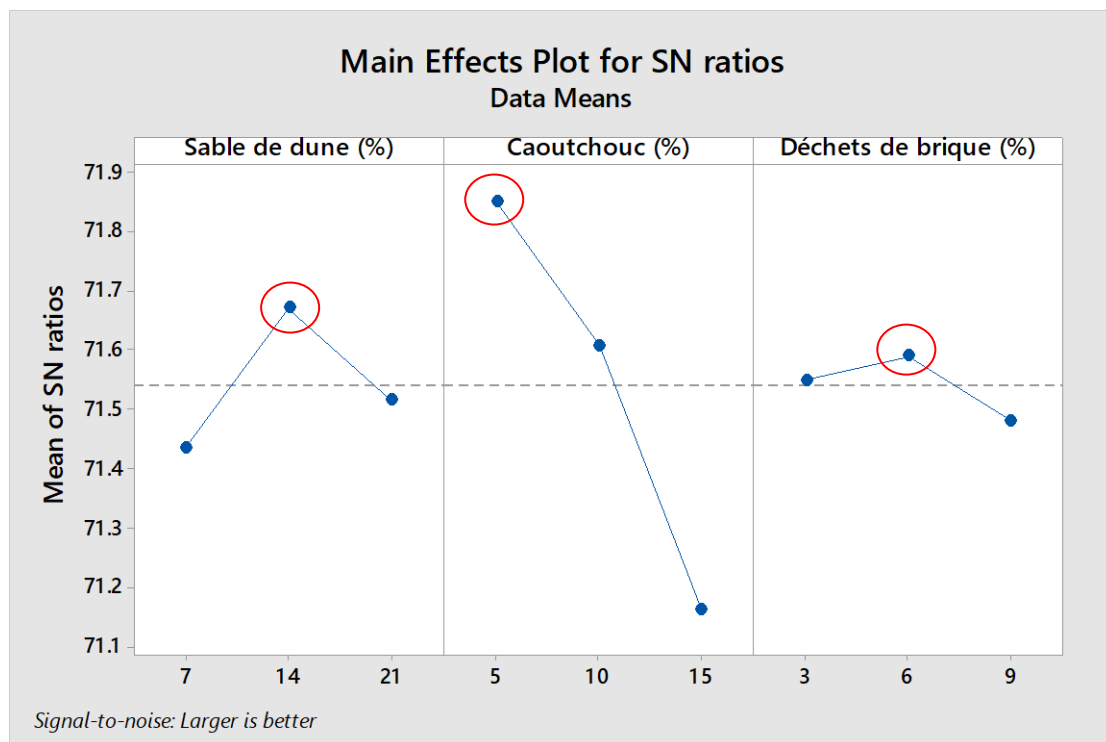


Figure III.16. Les effets principaux pour les rapports signal sur bruit (SN ratios).

Chapitre III

D'après les résultats des effets principaux pour les rapports signal sur bruit (*Signal to Noise Ratios*) représentés dans la figure III.16, nous constatons que les résultats optimaux pour chaque facteur afin de donner les meilleurs résultats pour la vitesse de propagation d'ultrasons, sont les suivant : la teneur en sable de dune (14%), la teneur en caoutchouc (5%) et la teneur en déchets de brique (6%).

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	3574.9	64.1	55.75	0.000	
Sable de dune (%)	-2.49	3.87	-0.64	0.586	16.00
Caoutchouc (%)	-12.32	5.41	-2.28	0.151	16.00
Déchets de brique (%)	169.6	20.7	8.18	0.015	84.57
Sable de dune (%)*Caoutchouc (%)	2.213	0.438	5.05	0.037	44.57
Sable de dune (%)*Déchets de brique (%)	-4.593	0.731	-6.28	0.024	44.57
Caoutchouc (%)*Déchets de brique (%)	-9.68	1.02	-9.46	0.011	44.57

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)
16.5754	99.66%	98.64%

Regression Equation

$$\text{Vitesse de propagation (m/s)} = 3574.9 - 2.49 \text{ SD} - 12.32 \text{ GC} + 169.6 \text{ DB} + 2.213 \text{ SD*GC} - 4.593 \text{ SD*DB} - 9.68 \text{ GC*DB}$$

III.7.3. Interprétation des résultats :

La remarque notée par les résultats de comparaison entre les coefficients du modèle qui sont représentées au-dessus montre que le coefficient de déchets de brique DB est très élevé, ce qui montre l'influence très significative du pourcentage de déchets de brique DB sur les résultats de la vitesse de propagation d'ultrasons.

Les résultats obtenus montrent également un accord satisfaisant avec le modèle de Taguchi puisque les valeurs prédites sont statistiquement identiques aux valeurs expérimentales comme la montre la figure III.17.

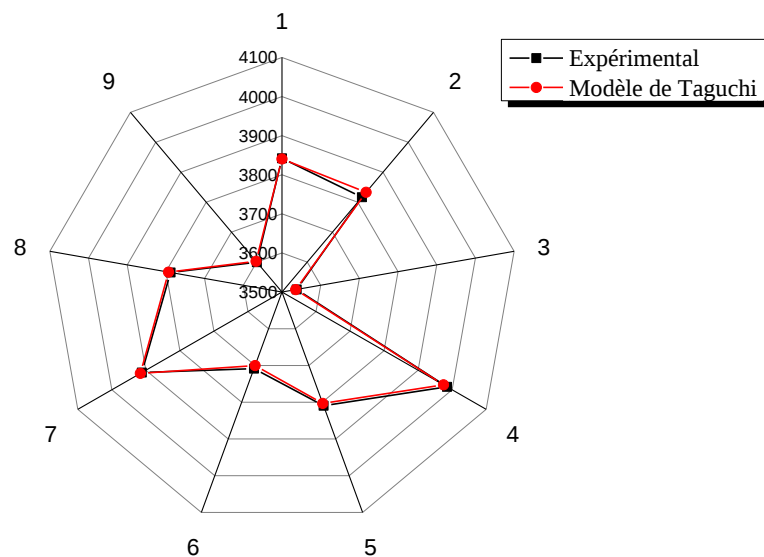
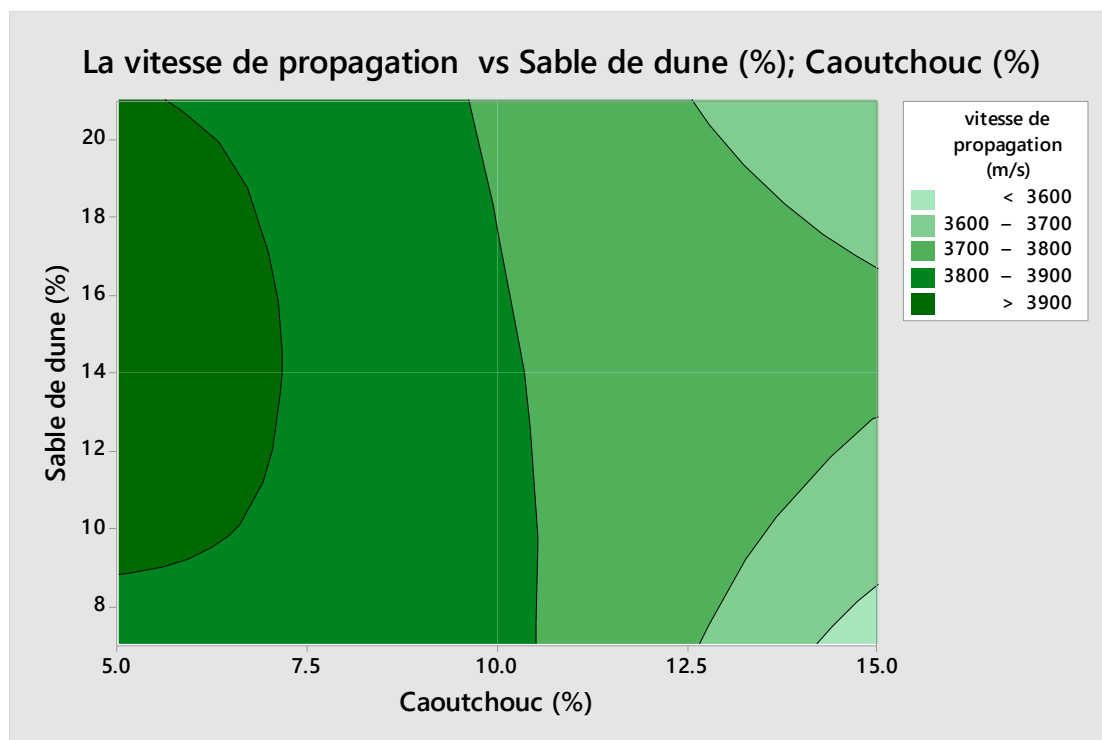
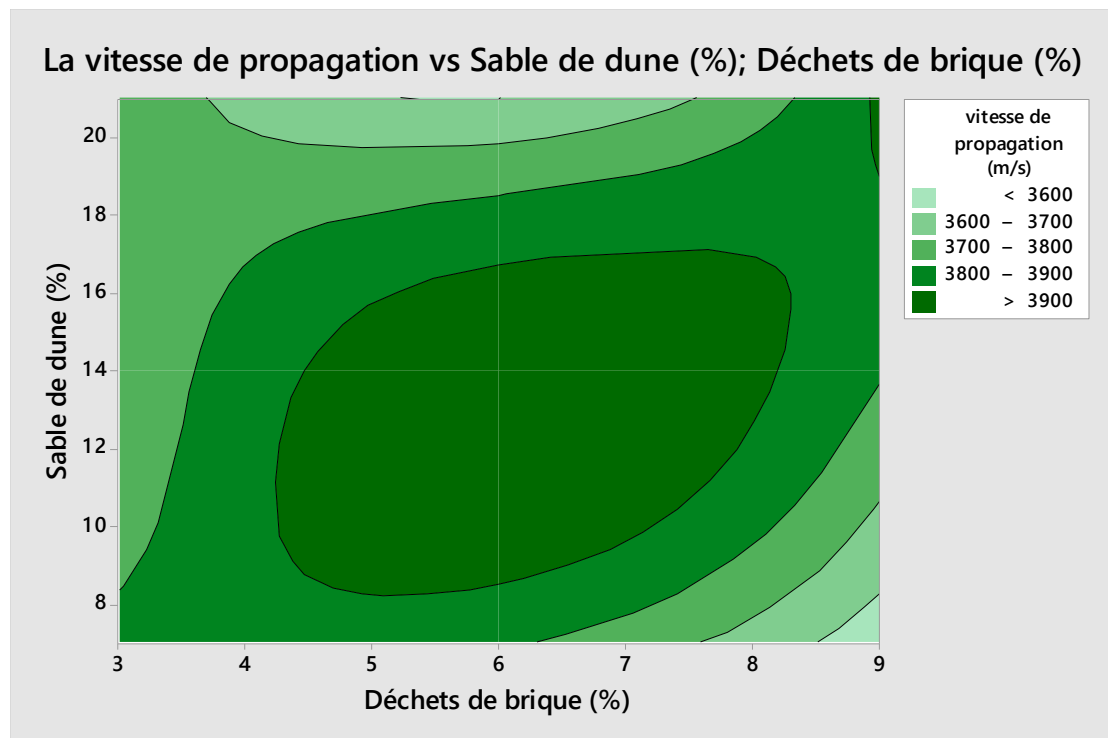


Figure III.17. Comparaison entre les résultats expérimentaux de la vitesse de propagation d’ultrasons à 28 jours avec ceux prédits par le modèle de Taguchi.

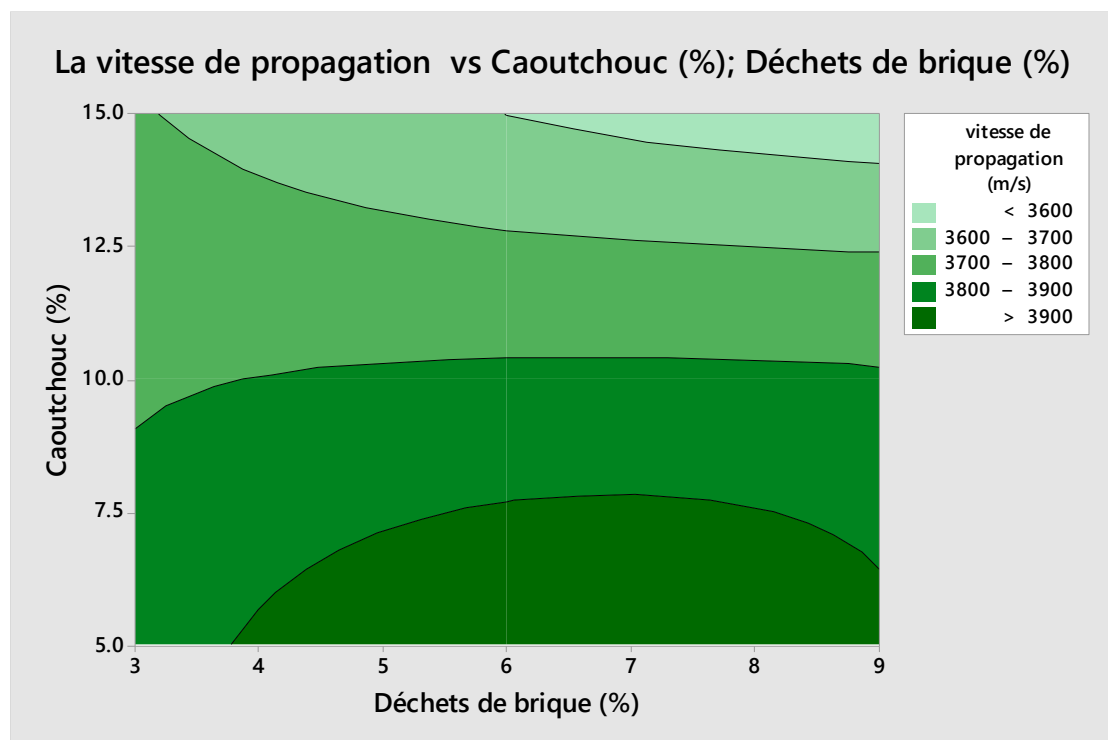
Les courbes obtenues et qui peuvent prédire la vitesse de propagation d’ultrasons à 28 jours à partir les facteurs étudiés sont illustrées par les figures III.18, III.19 et III.20.



Figures III.18. La vitesse de propagation d’ultrasons en fonction de pourcentage de sable de dune et de granulats de caoutchouc.



Figures III.19. La vitesse de propagation d’ultrasons en fonction de pourcentage de sable de dune et de déchets de brique.



Figures III.20: La vitesse de propagation d’ultrasons en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc et de déchets de brique.

Chapitre III

Ces figures montrent clairement que La vitesse de propagation d'ultrasons peut dépasser 3900 m/s si le pourcentage de sable de dune SD varie entre 8.5 et 17% avec un pourcentage de granulats de caoutchouc GC entre 5 et 7% et un pourcentage de déchets de brique DB variant entre 4.25 et 8.25%.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le travail expérimental et numérique présenté s'inscrit dans le cadre de l'application des statistiques 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 (pourcentage de sable de dune SD, pourcentage de granulats de caoutchouc GC et pourcentage de déchets de brique DB) 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 mortier 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 durci, la résistance à la compression, la résistance à la flexion et la vitesse de propagation d'ultrasons à 28 jours. Afin de déterminer les résultats optimaux pour chaque facteur pour donner les meilleurs résultats pour chaque réponse.

Avec les modèles mathématiques sont les suivants:

$$\begin{aligned} \text{Masse volumique (Kg/m}^3\text{)} &= 2012.7 + 2.59 \text{ SD} - 20.82 \text{ GC} + 51.7 \text{ DB} + 1.206 \text{ SD*GC} \\ &\quad - 2.440 \text{ SD*DB} - 1.100 \text{ GC*DB} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Rc28 (MPa)} &= 9.70 - 0.138 \text{ SD} + 0.672 \text{ GC} + 7.35 \text{ DB} + 0.0623 \text{ SD*GC} \\ &\quad - 0.2173 \text{ SD*DB} - 0.3990 \text{ GC*DB} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Rt28 (MPa)} &= 8.14 + 0.2886 \text{ SD} + 0.158 \text{ GC} - 1.846 \text{ DB} - 0.04914 \text{ SD *GC} \\ &\quad + 0.0562 \text{ SD*DB} + 0.0947 \text{ GC*DB} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Vitesse de propagation (m/s)} &= 3574.9 - 2.49 \text{ SD} - 12.32 \text{ GC} + 169.6 \text{ DB} + 2.213 \text{ SD*GC} \\ &\quad - 4.593 \text{ SD*DB} - 9.68 \text{ GC*DB} \end{aligned}$$

Et les résultats optimaux sont les suivants:

- La masse volumique à l'état durci: sable de dune (14%), granulats de caoutchouc (5%) et déchets de brique (6%).
- La résistance à la compression à 28 jours: sable de dune (14%), granulats de caoutchouc (5%) et déchets de brique (6%).
- La résistance à la flexion à 28 jours: sable de dune (21%), granulats de caoutchouc (5%) et déchets de brique (9%).
- La vitesse de propagation d'ultrasons à 28 jours: sable de dune (14%), granulats de caoutchouc (5%) et déchets de brique (6%).

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 durci peut atteindre 2100 kg/m³ si le pourcentage de sable de dune SD varie entre 11 et 16% avec un pourcentage de granulats de caoutchouc GC entre 5 et 7% et un pourcentage de déchets de brique DB variant entre 5.5 et 7.8%. En plus, nous constatons aussi que l'interaction entre le sable de dune et les granulats de caoutchouc (SD*GC) a un effet positive sur la masse volumique. Par contre, les interactions entre le sable de dune et de déchets de brique (SD*DB) et entre les granulats de caoutchouc et de déchets de brique (GC*DB) influent négativement sur la masse volumique à l'état durci.
- la résistance à la compression à 28 jours peut dépasser 29MPa si le pourcentage de sable de dune SD varie entre 7 et 15% avec un pourcentage de granulats de caoutchouc GC entre 5 et 10.5% et un pourcentage de déchets de brique DB variant entre 4.3 et 7.5%. En plus, nous constatons aussi que les interactions entre le sable de dune et de déchets de brique (SD*DB) et entre les granulats de caoutchouc et de déchets de brique (GC*DB) influent négativement sur la résistance mécanique à la compression.
- que la résistance à la flexion à 28 jours peut dépasser 7 MPa si le pourcentage de sable de dune SD varie entre 17.5 et 21% avec un pourcentage de granulats de caoutchouc GC entre 5 et 7.5% et un pourcentage de déchets de brique DB variant entre 7.5 et 9%. En plus, nous constatons aussi que les interactions

entre le sable de dune et de déchets de brique (SD*DB) et entre les granulats de caoutchouc et de déchets de brique (GC*DB) influent positivement sur la résistance mécanique à la flexion à 28 jours.

- La vitesse de propagation d'ultrasons peut dépasser 3900 m/s si le pourcentage de sable de dune SD varie entre 8.5 et 17% avec un pourcentage de granulats de caoutchouc GC entre 5 et 7% et un pourcentage de déchets de brique DB variant entre 4.25 et 8.25%. En plus, nous constatons aussi que le coefficient de déchets de brique DB est très élevé dans le modèle mathématique, ce qui montre l'influence très significative du pourcentage de déchets de brique sur les résultats de la vitesse de propagation.

Références bibliographique

Références bibliographique

CHAPITRE I

[01] : Lac, et al. "Etude de l'effet de l'ajout de granulats de caoutchouc recyclés de pneus usagés sur le comportement de mortier de ciment." (2021).

[02] : Zerrouki .effet de déchet de brique rouge sur la stabilisation des brique de terre crue mémoire de master en génie civil . université mohamed Khider -Biskra .2019.p.p 27_28.

[03] : Aissa Salem. (2016). Effet de l'activation mécanique de l'argile cuite (déchets de briques) sur le comportement mécanique du mortier. Mémoire de master, université Mohamed Boudiaf M'sila, 112p.

[04] : BEN DHIA. M.H (1998): Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière en milieu saharien, bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, P 33- 42.

[05] : Khangaoui .S. (2013): Valorisation du sable de dunes en couche de roulement sable bitume, thèse de Magister en génie civil, Géo - Matériaux.

[06] : GUERMITI. L(2013): Contribution a l'amélioration de certaines caractéristiques du béton de structure à base de Sable de dune corrigé et renforcé par des fibres Métalliques, Mémoire de MAGISTER, Université Kasdi Merbah Ouargla

[07] : د عباس بن عليان الحارثي - قسم الجيولوجيا الهندسية و البيئية كلية علوم الأرض مقرر المخاطر الجيولوجي – جامعة الملك عبد العزيز.

[08] : Gueddouda M.K (2011): Comportement hydromécanique des sols compactés, application à la conception d'une barrière ouvragée sable de dune bentonite. Thèse de Doctorat, Université ABOUBAKR Belkaid - TLEMCEEN.

[09] : AZZOUZ. H. (2009): Etude des bétons à base des sables de dune, thème de Magister, université Mohamed Khider Biskra.

[10] : LCPC, (1994): Guide technique, Conception et dimensionnement des structures de chaussées; LCPC-SETRA.

[11] : OULD SIDA.C., HAVARD H.,VALIN. C. (1995): Terrassements routiers dans les sables de dunes de Mauritanie, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 199, pp 27-34.

- [12] : Pillet, Maurice *Introduction aux plans d'expériences par la méthode Taguchi*. Les Editions d'organisation, 1992.
- [13] : Baron, Jacques. *Les bétons-bases et données pour leur formulation*. 1996.
- [14] : Sado, gilles, and marie-christine sado. *Les plans d'experiences: de l'experimentation a l'assurance qualite*. Afnor, 2000,
- [15] : Hacene, SMA Boukli. *Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen*. Diss. Thèse de Doctorat, Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen, Algérie, 2010.
- [16] : Taguchi, T. "Questions about Nishioka's theory on 700 years climatic change in Japan." *Journal of the Japanese Society of Snow and Ice* 12.2 (1950); 37-4

CHAPITRE II

- [17] : NF P18-554 *Granulats. Mesures des masses volumiques, porosité, coefficient d'absorption et teneur en eau des granulats. (D supérieur ou égal à 4 mm)*. Homologuée décembre 1979.
- [18] : NF P 18-301. Normes française "Granulats" *Granulats naturels pour bétons hydrauliques*. Homologuée décembre 1983.
- [19] : NF P 18-560. Norme française « *Analyse granulométrique* ». septembre 1990.
- [20] : NF P 18-598. Normes française « *Equivalent de sable* ». octobre 1991.
- [21] : NA 442. *Caractérisation physico-mécanique d'un liant hydraulique à base de poudre de verre. Liant hydraulique, Poudre de verre, Ajouts cimentaires, SAYOUD, ACHRAF. Comportement mécanique, Réaction pouzzolanique*. Publisher: Université 8Mai 1945 – Guelma
- [22] : NF EN 196-1. *Méthodes d'essais des ciments, Partie 1: détermination des résistances mécaniques Indice de classement*. Avril .2006.
- [23] : *Contribution a l'étude de la caractérisation du béton renforcé par des déchets de verres*. BOUAKBA, Mustapha. MEFATIH, Azzeddine. ciment. béton. poudre de verre. gravier. sable. Université Kasdi Merbah Ouargla. 2022.
- [24] : Cuong Ho, A. (2010). *Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés : application aux éléments de grande surface (Doctoral dissertation, Toulouse, INSA)*.