

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

Ecole Nationale Polytechnique  
Département génie civil  
Laboratoire construction et environnement

**URIE**

## Thèse de doctorat

Option : Génie civil

Présentée par :

**GHRIEB Abderrahmane**

Ingénieur d'état/Magister en génie civil de l'ENP

Intitulé :

---

### ***Étude de Stabilisation pour la Valorisation des Sables de Dune en Assises de Chaussée – Étude Comparative Entre Trois Sables de la Région de Djelfa (Algérie)***

---

Soutenue publiquement le 20/03/2014 devant le jury :

<i>Président de jury :</i>	<i>Mr. S. BELKACEMI</i>	<i>Professeur à l'ENP d'Alger</i>
<i>Directeur de thèse :</i>	<i>M<sup>me</sup>. R. MITICHE-KETTAB</i>	<i>Professeur à l'ENP d'Alger</i>
<i>Examineurs :</i>	<i>M<sup>me</sup>. Z. DERRICHE</i>	<i>Professeur à l'ENSTP</i>
	<i>M<sup>me</sup>. M. MORSLI</i>	<i>Professeur à l'ENP d'Alger</i>
	<i>Mr. F. KAOUA</i>	<i>Professeur à l'USTHB</i>
	<i>Mr. B. BENCHEIKH</i>	<i>Maitre de conférences (A) à l'U. Djelfa</i>

**ENP 2013/2014**

Ecole Nationale Polytechnique (ENP)  
10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie  
www.enp.edu.dz

# Remerciements

*Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à ma directrice de thèse, madame R. KETTAB ; professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, pour son suivi, ses conseils et orientations qui m'ont été d'une grande utilité ainsi que ses encouragements tout au long de ce travail.*

*Mes sincères remerciements et ma profonde gratitude vont également au professeur S. BELKACEMI, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de soutenance.*

*J'adresse aussi mes vifs remerciements à madame M. MORSLI, professeur à l'ENP d'Alger, madame Z. DERRICHE, professeur à l'ENSTP et monsieur F. KAOUA professeur à l'USTHB et monsieur B. BENCHEIKH maître de conférence à l'université de Djelfa pour l'intérêt qu'ils ont accordé à ce travail et je les remercie pour avoir accepté de l'examiner.*

*Je tiens à remercier sincèrement l'équipe du laboratoire LNHC – SUD (unité de Djelfa), en particulier le chef du laboratoire Mr. S. MANSSOURI, et les techniciens, Mr. M. THLIDJI, Mr. A. ELAIB, Mr. A. BRAIKI, Mr. K. NAOUI, Mr. A. MEBARKI qui n'ont pas hésité d'apporter leur précieuse aide technique.*

*Je voudrais aussi remercier M<sup>lle</sup>. H. Taoussi, M<sup>lle</sup>. A. BEHIH, M<sup>lle</sup>. H. DJABOURI, M<sup>lle</sup>. F. MAACHE, pour leur participation et leur contribution à la réalisation de l'essai de module d'élasticité des mélanges étudiés.*

*Mes remerciements vont à l'adresse des personnels et des techniciens du laboratoire de physique de l'université Amar Telidji de Laghouat, pour son aide à l'analyse minéralogique des sables étudiés.*

*Mes remerciements s'adressent également à monsieur S. Daoued pour son soutien moral et technique.*

*Enfin, que toute personne qui a contribué de près ou de loin à la mise au point de ce travail trouve ici ma profonde gratitude.*

# **DEDICACES**

*Je dédie cette thèse*

*à ma mère et à la mémoire de mon père,*

*à ma femme qui m'a soutenue et pour sa patience,*

*à mon fils Amine et ma fille Aridj El-yassamine,*

*à mes frères, sœurs et toute la famille,*

*à tous mes chers amis et collègues.*

**الملخص:** الهدف من العمل المقدم في هذا المقال هو تمييز الرمل الكثيبي، الموجود بكميات معتبرة في منطقة الجلفة (الجزائر)، قصد استعماله في إنشاء الطرق وخصوصا في أساساتها. اعتمدت في هذا البحث عدة مراحل عمل . تجارب أجريت قصد تحديد الخصائص الفيزيائية والكيميائية للرمل المدروسة و تصنيفها . و تم اقتراح طريقة لصياغة الخلائط، تقوم على تثبيت الرمال المدروسة باستخدام اسمنت صناعي مركب من فئة CEM II/A 42.5 ومصصح حبيبي. من أجل كل خليط تم تحديد قيم البروكتور المثالي وقياس مقاومة الضغط مع الغمر وبدونه، وأيضا معامل المرونة و مقاومة الشد. بعدها تم إجراء تحليل للنتائج قصد دراسة تأثير مصدر الرمل و نسبة عامل التثبيت على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخلائط. بعد هذه المرحلة تم تصنيف الرمال المثبتة وفقا للمعايير المعمول بها، ثم تم اختيار الصيغ المثلى، حيث أجريت عليها اختبارات إضافية. و في الأخير أظهرت النتائج المتحصل عليها أن أداء الصيغ المختارة يعتبر كافيا لاستخدامها في أساسات الطرق.

**الكلمات المفتاحية:** الرمل الكثيبي , مصصح حبيبي, رابط هيدروليكي, تثبيت, الخصائص الميكانيكية, تمييز, مواد الطرق

**Résumé :** Le travail de cette thèse s'inscrit dans le cadre de la valorisation des sables de dune présents en quantité considérable à Djelfa. Cette étude s'intéresse plus particulièrement à la valorisation de ces sables dans le domaine de la construction routière, plus précisément en corps de chaussée. Pour ce faire, l'étude se déroule en plusieurs étapes. Une caractérisation physique, chimique et minéralogique a été faite, dans le but de classer les sables étudiés. Une méthode de formulation a été proposée se basant sur le traitement des sables étudiés par un ciment CPJ 42,5 et un sable fillérisé. Pour chaque mélange, les caractéristiques Proctor normal, la résistance en compression, la résistance en traction, le module d'élasticité et la tenue à l'immersion ont été déterminées. Une analyse des résultats a été faite afin d'examiner l'influence de la provenance du sable et le dosage des agents de traitement sur les caractéristiques physiques et mécaniques des mélanges, et d'apprécier la signification des relations qui existent entre ces caractéristiques des mélanges étudiés. Les sables stabilisés ont été classés selon les règlements et les normes en vigueur, les formulations optimales sont ensuite choisies. Sur ces dernières, des essais supplémentaires ont été effectués. Les résultats obtenus montrent que les formulations retenues ont des performances physiques et mécaniques suffisantes pour valoriser les sables de dunes traités en couches d'assise de chaussée.

**Mots-clés:** Sable de dune, correcteur granulaire, liant hydraulique, stabilisation, performances mécaniques, valorisation, matériau routier.

**Abstract:** The aim of the work presented in this thesis is the valorisation of dune sand, which is abundant in Djelfa (Algeria). This study consists of valorizing a local material in road foundation layers. Several stages will be considered in this investigation. A physical-chemical characterization has been carried out to classify the different sand types studied. A method for the formulation of the mixtures is proposed, which is based on the stabilization of the dune sand studied using a Portland composite cement (CEM II/A 42.5 class) and a filled sand. For each mixture, the optimum Proctor, the compressive strength with and without immersion, the tensile strength and the modulus of elasticity have been determined. Subsequently, an analysis of the results was made in order to examine the influence of the sand origin and the stabilization agent proportioning on the physical and mechanical characteristics of mixtures. A correlation between the mechanical properties of the stabilized dune sand and the maximum dry density was proposed. The stabilized sand was classified according to current standards, and the optimal formulation was then selected, on which additional tests were carried out. The results obtained show that the formulations selected have sufficient performances to be used in road foundation layers.

**Keywords:** dune sand; granular corrector; hydraulic binder; stabilization; mechanical performances; valorisation; road material

**TABLE DES MATIERES**

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1
<b>CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
1.1. Introduction.....	4
1.2. Les sables.....	4
1.2.1. Définition.....	4
1.2.2. Origine des sables.....	4
1.2.3. Différents types de sable.....	4
1.2.3.1. Les sables artificiels.....	5
1.2.3.2. Les sables naturels.....	5
1.2.3.2.a. Les sables marins.....	5
1.2.3.2.b. Les sables fluviatiles.....	5
1.2.3.2.c. Les sables éoliens.....	5
1.2.3.2.d. Les sables du Sahara.....	5
1.2.3.2.d.1. Sables alluvionnaires.....	5
1.2.3.2.d.2. Sables de dunes.....	6
1.2.3.2.d.3. Sables de regs.....	6
1.2.4. Classification des sables.....	6
1.2.4.1. Classification selon la granulométrie.....	7
1.2.4.1.a. Sable grossier.....	7
1.2.4.1.b. Sable moyen.....	7
1.2.4.1.c. Sable fin.....	7
1.2.4.2. Classification selon la propreté.....	7
1.2.5. Critères d'acceptabilité des sables pour leur emploi en construction.....	8
1.2.5.1. La granulométrie.....	8
1.2.5.2. Le module de finesse.....	8
1.2.5.3. La propreté.....	8
1.2.5.4. La dureté.....	8
1.2.5.5. L'angularité.....	9
1.2.5.6. La forme.....	9
1.2.5.7. L'aspect de surface.....	9
1.2.5.8. L'analyse chimique.....	9
1.2.6. Utilisation de sable de dune.....	9
1.2.7. Identification des sables de dunes du Sahara.....	10
1.2.7.1. Composition chimique.....	10
1.2.7.2. Granulométrie.....	10
1.2.7.3. Propreté.....	10
1.2.7.4. Comportement mécanique.....	10
1.3. Traitement des sables.....	11
1.3.1. Techniques de traitement des sables.....	12
1.3.2. Domaine d'utilisation des sables traités.....	13
1.3.3. Agents de traitement.....	13
1.4. Rappel sur la constitution d'une chaussée.....	16

1.4.1. Rôle des différentes couches de chaussée.....	16
1.4.2. Familles d'assise de chaussées.....	17
1.5. Méthodologie de classification et d'utilisation des matériaux en technique routière.....	17
1.5.1. Classification des matériaux en technique routière.....	17
1.5.1.a. Paramètres de nature .....	18
1.5.1.b Paramètres d'état.....	18
1.5.1.c Paramètres de comportement mécanique.....	18
1.5.1. Critères d'utilisation des matériaux en couche d'assise de chaussée.....	19
1.5.1.a. Critère de résistance en traction .....	19
1.5.1.b. Critère de l'IPI .....	20
1.5.1.c. Performances mécaniques à long terme .....	20
1.6. Travaux réalisés sur le traitement et la valorisation des sables en technique routière.....	21
1.6.1. Traitement des sables de Landes .....	21
1.6.2. Sable traité au ciment et sédiments traités NOVOSOL .....	27
1.6.3. Traitement de sable de dragage au sable et ciment (ou ciment et chaux) .....	29
1.6.4. Traitement du mélange tuf-sable de dune au ciment et à la chaux.....	31
1.7. Conclusion.....	32
<b>CHAPITRE II: CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES</b>	
2.1. Introduction.....	33
2.2. Sables.....	33
2.2.1. Site de prélèvement.....	33
2.2.2. Analyse des propriétés physiques.....	34
2.2.2.1. Teneur en eau naturelle.....	34
2.2.2.2. Masse volumique.....	34
2.2.2.3. Compacité et porosité.....	35
2.2.2.4. Analyse granulométrique.....	35
2.2.2.5. Equivalent de sable.....	37
2.2.3. Analyse des propriétés chimiques.....	38
2.2.3.1. Nature des sables utilisés.....	38
2.2.3.2. Valeur au bleu de méthylène.....	38
2.2.3.3. Teneur en matières organiques.....	39
2.2.3.4. Teneur en sulfates.....	39
2.2.3.5. Teneur en chlorures.....	40
2.2.4. Nature minéralogique des sables étudiés.....	40
2.2.5. Caractérisation de compactage.....	43
2.2.6. Classification des sables étudiés selon le GTR.....	43
2.2.7. Coût.....	44
2.3. Agents de stabilisation.....	44
2.3.1. Correcteur granulaire.....	44
2.3.1.1. Origine.....	45
2.3.1.2. Analyse des propriétés physiques .....	45
2.3.1.3 Analyse chimique .....	46
2.3.1.4 Coût.....	47
2.3.2. Ciment.....	47

2.3.2.1. Analyse chimique et minéralogique du ciment .....	47
2.3.2.2. Caractéristiques physiques.....	47
2.3.2.3. Surface spécifique.....	48
2.3.2.4. Consistance normale et temps de prise du ciment.....	48
2.3.2.5. Caractéristiques mécaniques du ciment .....	49
2.4. Eau de gâchage.....	49
2.5. Conclusion.....	49
<b>CHAPITRE III: FORMULATION ET PARAMETRES DE COMPACTAGE</b>	
3.1. Introduction .....	50
3.2. Formulation .....	50
3.2.1. Choix du liant et des dosages.....	51
3.2.2. Choix de correcteur granulaire et des dosages.....	51
3.2.3. Méthode de formulation des mélanges.....	51
3.3. Détermination des paramètres de compactage.....	52
3.3.1. Essai Proctor Normal.....	53
3.3.1.a. Protocole de l'essai.....	53
3.3.1.b. Détermination de l'OPN des mélanges .....	54
3.3.1.c. Résultats.....	54
3.3.1.d. Interprétations.....	58
3.3.1.d.1. Evolution de la densité sèche maximale (formulation avec ajouts ciment et SF).....	58
3.3.1.d.2. Evolution de la teneur en eau optimale .....	59
3.3.1.d.3. Influence de la teneur en agent de stabilisation sur les courbes de compactage.....	60
3.3.1.d.4. La Relation entre la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale.....	66
3.4. Conclusion.....	68
<b>CHAPITRE IV: PERFORMANCES MECANIQUES DES SABLES DE DUNE STABILISES</b>	
4.1. Introduction.....	70
4.2. Confection et conservation des éprouvettes compactées.....	70
4.2.1. Préparation des mélanges.....	70
4.2.2. Matériel nécessaire pour la confection.....	72
4.2.3. Remplissage du moule.....	73
4.2.4. Compactage de l'éprouvette.....	73
4.2.5. Démoulage de l'éprouvette.....	74
4.2.6. Conservation normale des éprouvettes.....	74
4.3. Répartition des éprouvettes en fonction des essais.....	74
4.4. Etude des performances mécaniques .....	74
4.4.1. Résistance en compression .....	74
4.4.1.1. Résultats.....	75
4.4.1.2. Interprétations des résultats obtenus.....	77
4.4.1.2.1. Effet de la provenance du sable sur la résistance en compression .....	77
4.4.1.2.2. Effet de ciment sur la résistance en compression.....	77
4.4.1.2.3. Effet du correcteur granulaire sur la résistance en compression.....	78
4.4.1.2.4. Evolution de la résistance en compression.....	79
4.4.1.2.5. Relation entre la résistance en compression et la densité sèche maximale.....	80

4.4.2. Résistance en traction .....	85
4.4.2.1. Résultats.....	85
4.4.2.2. Interprétations des résultats obtenus.....	87
4.4.2.2.1. Effet de la provenance du sable sur la résistance à la traction .....	87
4.4.2.2.2. Effet du ciment sur la résistance en traction.....	87
4.4.2.2.3. Effet de correcteur granulaire sur la résistance en traction.....	88
4.4.2.2.4. Evolution de la résistance en traction.....	89
4.4.2.2.5. Relation entre la résistance en traction et la densité sèche maximale.....	92
4.4.3. Module d'élasticité .....	97
4.4.3.1. Résultats.....	99
4.4.3.2. Interprétation des résultats.....	101
4.4.3.2.1. Effet de la provenance du sable sur le module d'élasticité.....	101
4.4.3.2.2. Effet du ciment sur le module d'élasticité.....	101
4.4.3.2.3. Effet de la correction granulométrique sur le module d'élasticité.....	102
4.4.3.2.4. Evolution du module d'élasticité.....	103
4.4.3.2.5. Relation entre le module d'élasticité et la densité sèche maximale.....	104
4.4.4. Tenue à l'immersion.....	109
4.4.4.1. Résultats.....	109
4.4.4.2. Interprétations des résultats obtenus.....	110
4.4.4.2.1. Effet de la provenance du sable sur la tenue à l'immersion .....	110
4.4.4.2.2. Effet de ciment sur la tenue à l'immersion .....	111
4.4.4.2.3. Effet de correcteur granulaire sur la tenue à l'immersion .....	112
4.4.4.2.4. Evolution de la tenue à l'immersion.....	112
4.5. Conclusion.....	115
<b>CHAPITRE V: CLASSIFICATION ET VALORISATION DE SABLE DE DUNE STABILISE EN ASSISES DE CHAUSSEES</b>	
5.1. Introduction.....	118
5.2. Classification des mélanges et choix des formulations optimales .....	118
5.2.1. Détermination du module d'élasticité.....	118
5.2.2. Détermination de la résistance en traction.....	120
5.2.3. Classification des mélanges selon la norme NF EN 14227-1 .....	121
5.2.4. Choix des formulations optimales.....	124
5.3. Performances mécaniques des formulations optimales.....	124
5.3.1. Indice portant Immédiat (IPI).....	124
5.3.2. Indice CBR après immersion.....	127
5.3.3. Tenue à l'immersion.....	129
5.4. Conclusion.....	130
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>131</b>

## LISTE DES FIGURES

### **CHAPITRE I: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

Figure 1.1. Courbes granulométriques de sables de dunes de diverses régions du Sahara.....	6
Figure I.2. Courbes granulométriques de trois sables de dune de grand Sahara.....	10
Figure I.3. Effet de la matière ajoutée sur la densité sèche.....	12
Figure 1.4. Schéma d'une structure de chaussée type.....	16
Figure 1.5. Classification des matériaux selon le GTR .....	19
Figure 1.6. Classification de matériaux traités aux liants hydrauliques.....	21
Figure 1.7. Amélioration par incorporation de fines calcaires du sable-laitier .....	22
Figure 1.8. Evolution de la résistance de sable - laitier en fonction du temps .....	23
Figure 1.9. Structure de chaussée de l'application de môle d'escale de La Pallice .....	24
Figure 1.10. Structure de chaussée de l'application de Port autonome de Bordeaux .....	25
Figure 1.11. Comparaison de l'évolution des résistances.....	26
Figure 1.12. Classement des sables traités aux liants hydrauliques.....	28
Figure 1.13.a. D1 - Formulation: 1 .....	29
Figure 1.13.b. D1 - Formulation: 2 .....	30
Figure 1.13.c. D1 - Formulation: 1' .....	30
Figure 1.13.d. D1 - Formulation: 2' .....	31

### **CHAPITRE II: CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES**

Figure 2.1. Localisation des sables étudiés.....	33
Figure 2.2. Courbes granulométriques des sables étudiés.....	36
Figure 2.3. Propreté des sables étudiés.....	39
Figure 2.4. Agressivité des sables étudiés.....	40
Figure 2.5. Diffractomètre utilisé.....	41
Figure 2.6. Analyse diffractométrique du sable SM.....	41
Figure 2.7. Analyse diffractométrique du sable SZ.....	42
Figure 2.8. Analyse diffractométrique du Sable SA.....	42
Figure 2.9. Courbes Proctor des sables étudiés.....	43
Figure 2.10. Classification des sables étudiés (GTR 2000).....	44
Figure 2.11. Localisation de sable fillérisé.....	45
Figure 2.12. Courbe granulométrique du Sable Fillérisé.....	46

### **CHAPITRE III: FORMULATION ET PARAMETRES DE COMPACTAGE**

Figure 3.1. Cycles de compactage pour un essai Proctor normal.....	53
Figure 3.2.a. Moule et dame Proctor utilisés.....	54
Figure 3.2.b. Pesée du poids humide.....	54
Figure 3.2.c. Echantillons après étuvage.....	54
Figure 3.2.d. Pesée des tares.....	54
Figure 3.3.a. Evolution de la densité sèche maximale en fonction du pourcentage de ciment pour une teneur en SF donnée.....	58
Figure 3.3.b. Evolution de la densité sèche maximale en fonction du pourcentage de sable SF pour une teneur en ciment fixée.....	59

Figure 3.4.a. Evolution de la teneur en eau optimale en fonction du pourcentage de ciment....	60
Figure 3.4.b. Evolution de la teneur en eau optimale en fonction du pourcentage de sable SF..	60
Figure 3.5.a. Stabilisation de sable SM au sable SF seul.....	61
Figure 3.5.b. Stabilisation de sable SZ au sable SF seul.....	61
Figure 3.5.c. Stabilisation de sable SA au sable SF seul.....	61
Figure 3.6.1. Stabilisation de sable SM au ciment seul.....	62
Figure 3.6.2. Stabilisation de sable SM au ciment à 10% de sable SF.....	62
Figure 3.6.3. Stabilisation de sable SM au ciment à 20% de sable SF .....	62
Figure 3.6.4. Stabilisation de sable SM au ciment à 30% de sable SF.....	63
Figure 3.6.5. Stabilisation de sable SZ au ciment seul.....	63
Figure 3.6.6. Stabilisation de sable SZ au ciment à 10% de sable SF.....	63
Figure 3.6.7. Stabilisation de sable SZ au ciment à 20% de sable SF .....	64
Figure 3.6.8. Stabilisation de sable SZ au ciment à 30% de sable SF.....	64
Figure 3.6.9. Stabilisation de sable SA au ciment seul.....	64
Figure 3.6.10. Stabilisation de sable SA au ciment à 10% de sable SF.....	65
Figure 3.6.11. Stabilisation de sable SA au ciment à 20% de sable SF .....	65
Figure 3.6.12. Stabilisation de sable SA au ciment à 30% de sable SF .....	65
Figure 3.7.a. Relation entre la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale pour la série SM.....	66
Figure 3.7.b. Relation entre la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale pour la série SZ.....	67
Figure 3.7.c. Relation entre la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale pour la série SA.....	67
Figure 3.7.d. Relation entre la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale pour tous les mélanges étudiés.....	68
<b>CHAPITRE IV: PERFORMANCES MECANIQUES DES SABLES DE DUNE STABILISES</b>	
Figure 4.1. Séchage des Matériaux .....	71
Figure 4.2. Pesée des mélanges.....	72
Figure 4.3. Malaxeur utilisé .....	72
Figure 4.4. Matériel pour la confection des éprouvettes .....	72
Figure 4.5. Disposition avant le Remplissage du moule .....	73
Figure 4.6.a. Presse utilisée .....	73
Figure 4.6.b. Compactage statique des éprouvettes.....	73
Figure 4.7. Extraction de l'éprouvette .....	74
Figure 4.8. Conservation des éprouvettes.....	74
Figure 4.9.a. Essai de compression simple .....	75
Figure 4.9.b. Presse utilisée .....	75
Figure 4.10. Effet de la provenance du sable sur la résistance moyenne en compression.....	77
Figure 4.11. Effet de ciment sur la résistance en compression moyenne.....	78
Figure 4.12. Effet de correcteur granulaire sur la résistance en compression moyenne .....	78
Figure 4.13.a. Evolution de la résistance en compression en fonction du pourcentage de ciment pour une teneur en SF donnée.....	79

Figure 4.13.b. Evolution de la résistance en compression en fonction du pourcentage de sable SF pour une teneur en SF fixée.....	79
Figure 4.14.a. Relation entre la résistance en compression et la densité sèche maximale pour une teneur en SF fixée (Série SM).....	81
Figure 4.14.b. Relation entre la résistance en compression et la densité sèche maximale pour une teneur en SF fixée (Série SZ) .....	81
Figure 4.14.c. Relation entre la résistance en compression et la densité sèche maximale pour une teneur en SF fixée (Série SA).....	82
Figure 4.15.a. Relation entre la résistance en compression et la densité sèche maximale pour une teneur en ciment déterminée (Série SM).....	83
Figure 4.15.b. Relation entre la résistance en compression et la densité sèche maximale pour une teneur en ciment déterminée (Série SZ).....	83
Figure 4.15.c. Relation entre la résistance en compression et la densité sèche maximale pour une teneur en ciment déterminée (Série SA).....	84
Figure 4.16. Essai de traction par fendage .....	85
Figure 4.17. Effet de la provenance du sable sur la résistance à la traction moyenne.....	87
Figure 4.18. Effet du ciment sur la résistance à la traction moyenne.....	88
Figure 4.19. Effet de correcteur granulaire sur la résistance à la traction moyenne.....	88
Figure 4.19.a. Evolution de la résistance à la traction en fonction du pourcentage de ciment pour une teneur en SF donnée.....	89
Figure 4.19.b. Evolution de la résistance à la traction en fonction du pourcentage de sable SF pour une teneur en SF fixée.....	90
Figure 4.20.a. Classement des mélanges de la série SM d'après leurs résistances en traction à 90 jours.....	91
Figure 4.20.b. Classement des mélanges de la série SZ d'après leurs résistances en traction à 90 jours.....	91
Figure 4.20.c. Classement des mélanges de la série SA d'après leurs résistances en traction à 90 jours.....	92
Figure 4.21.a. Relation entre la résistance en traction et la densité sèche maximale pour une teneur en SF fixée (Série SM)	93
Figure 4.21.b. Relation entre la résistance en traction et la densité sèche maximale pour une teneur en SF fixée (Série SZ).....	93
Figure 4.21.c. Relation entre la résistance en traction et la densité sèche maximale pour une teneur en SF fixée (Série SA).....	94
Figure 4.22.a. Relation entre la résistance en traction et la densité sèche maximale pour une teneur en ciment déterminée (Série SM).....	95
Figure 4.22.b. Relation entre la résistance en traction et la densité sèche maximale pour une teneur en ciment déterminée (Série SZ).....	95
<b>CHAPITRE V: CLASSIFICATION ET VALORISATION DE SABLE DE DUNE</b>	
<b>STABILISE EN ASSISES DE CHAUSSEES</b>	
Figure 5.1. Dispositif pour la détermination du module d'élasticité $E_t$ .....	118
Figure 5.2. Détermination du module d'élasticité $E_t$ .....	119
Figure 5.3.a. Classification des formulations de la série SM selon la norme NF EN 14227-1...	122
Figure 5.3.b. Classification des formulations de la série SZ selon la norme NF EN 14227-1...	122
Figure 5.3.c. Classification des formulations de la série SA selon la norme NF EN 14227-1...	123
Figure 5.4.a. Courbe de l'essai C.B.R. immédiat pour la formulation SM 70-10-20.....	125
Figure 5.4.b. Courbe de l'essai C.B.R. immédiat pour la formulation SZ 60-10-30 .....	125

Figure5.4.c. Courbe de l'essai C.B.R. immédiat pour la formulation SA 60-10-30 .....	126
Figure5.5: Indice portant immédiat des formulations optimales.....	126
Figure5.6.a. Courbe de l'essai C.B.R. après immersion pour la formulation SM 70-10-20.....	127
Figure5.6.b. Courbe de l'essai C.B.R. après immersion pour la formulation SZ 60-10-30.....	128
Figure5.6.c. Courbe de l'essai C.B.R. après immersion pour la formulation SA 60-10-30 .....	128
Figure 5.7. Tenue à l'immersion des formulations optimales.....	129

## LISTE DES TABLEAUX

### **CHAPITRE I: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

Tableau 1.1. Performances recommandées en couche de fondation et en couche de base.....	20
Tableau 1.2. Coefficients empiriques en fonction de la nature de liant utilisé.....	20
Tableau.1.3. Formulation et caractéristiques.....	24
Tableau.1.4. Formulation et caractéristiques .....	25
Tableau 1.5. Structure de chaussée .....	27
Tableau 1.6. Formulation et caractéristiques .....	27
Tableau 1.7. Composition granulaire des sables traités au liant hydraulique .....	28
Tableau.1.8. Formulations étudiées.....	29
Tableau 1.9. Valeurs de Rc du tuf + 25% de sable de dune stabilisé à 2% de ciment.....	32
Tableau 1.10. Valeurs de Rc du tuf + 25% de sable de dune stabilisé à 2% de chaux.....	32

### **CHAPITRE II: CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES**

Tableau 2.1. Teneurs en eau naturelles des sables étudiés.....	34
Tableau 2.2. Masses volumiques apparentes des sables étudiés.....	34
Tableau 2.3. Masses volumiques absolues des sables étudiés.....	35
Tableau 2.4. Porosités et compacités des sables étudiés.....	35
Tableau 2.5. Granularité des sables étudiés.....	37
Tableau 2.6. Modules de finesse des sables étudiés.....	37
Tableau 2.7. Propreté des sables étudiés.....	38
Tableau 2.8. Teneurs en silice.....	38
Tableau 2.9. Valeurs au bleu des sables étudiés.....	38
Tableau 2.10. Teneurs en matières organiques.....	39
Tableau 2.11. Teneurs en sulfates .....	40
Tableau 2.12. Teneurs en chlorures.....	40
Tableau 2.13. Résultats de l'essai Proctor.....	43
Tableau 2.14. Composition chimique du sable fillérisé.....	46
Tableau 2.15. Analyse chimique du ciment utilisé.....	47
Tableau 2.16. Composition minéralogique du ciment.....	47
Tableau 2.17. Caractéristiques physiques du ciment utilisé.....	47
Tableau 2.18. Temps de début et de fin de prise du ciment utilisé.....	48
Tableau 2.19. Caractéristiques mécaniques du ciment.....	49

### **CHAPITRE III: FORMULATION ET PARAMETRES DE COMPACTAGE**

Tableau 3.1. Proportions des mélanges .....	52
Tableau 3.2. Résultats de L'essai Proctor Normal pour la série SM .....	55
Tableau 3.3. Résultats de L'essai Proctor Normal pour la série SZ.....	56
Tableau 3.4. Résultats de L'essai Proctor Normal pour la série SA.....	57

### **CHAPITRE IV: PERFORMANCES MECANQUES DES SABLES DE DUNE STABILISES**

Tableau 4.1. Résultats de L'essai de compression simple pour les séries SM, SZ et SA .....	76
Tableau 4.2. Résultats de L'essai de traction pour les séries SM, SZ et SA.....	86

Tableau 4.3. Performances recommandées en couche de fondation et en couche de base.....	90
Tableau 4.4. Modules d'élasticité longitudinaux des séries SM, SZ et SA.....	100
Tableau 4.5. Tenue à l'immersion pour les séries SM, SZ et SA.....	110
Tableau 4.6. Valeurs de la tenue à l'immersion recommandées en couche de fondation et en couche de base .....	114
<b>CHAPITRE V: CLASSIFICATION ET VALORISATION DE SABLE DE DUNE</b>	
<b>STABILISE EN ASSISES DE CHAUSSEES</b>	
Tableau 5.1. Modules d'élasticité obtenus.....	120
Tableau 5.2. Résistances en traction obtenues.....	121
Tableau 5.3. Valeurs de $R_t$ et $E_t$ estimées.....	121
Tableau 5.4. Formulations optimales choisies.....	124
Tableau 5.5. Tenue à l'immersion des formulations optimales.....	129

---

# ***Introduction générale***

---

## Introduction générale

En technique routière, l'un des principes de base est l'utilisation maximale des matériaux locaux. Ce principe est fondé surtout sur des considérations économiques. En effet, les travaux routiers faisant appel à des tonnages importants de matériaux, on a intérêt à réduire autant que possible leur transport qui arrive à représenter une part importante du prix de revient de l'ouvrage, lorsque l'on a recours à des gisements éloignés du chantier d'application. Notons au passage que le coût des transports n'est pas seulement représenté par les sommes payées au transporteur, et qui interviennent directement dans le coût de l'ouvrage, mais que s'y ajoute celui de la dégradation du réseau routier, qui est d'autant plus importante lorsque la des camions [1].

La stabilisation des sols aux liants hydrauliques, et plus particulièrement aux ciments, est connue depuis plus de soixante-dix ans. Elle a été pratiquée notamment aux U.S.A. puis en structure de l'itinéraire est faible et les tonnages à l'essieu élevés, ce qui est en général le cas Grande-Bretagne et en Allemagne sous le nom de sol ciment plusieurs années avant de faire son apparition en France [2]. Les méthodes de stabilisation utilisées ont en effet donné lieu à des critiques, intéressant tant la durabilité des réalisations que les prix de revient d'application des sols ciment [3]. Avant de les admettre au rang de technique routière d'intérêt général, les ingénieurs français ont donc multiplié les études théoriques, les essais de laboratoire, les chantiers expérimentaux. Ces recherches ont abouti à la mise au point de techniques mieux adaptées aux conditions économiques et naturelles. On s'est orienté sur des méthodes utilisant des dosages de liants nettement plus faibles que les méthodes antérieures. Ces méthodes, qu'on peut nommer techniques des sols traités ou améliorés aux liants hydrauliques, connaissent maintenant un essor spectaculaire et il n'est plus permis à quiconque s'intéressant aux problèmes d'équipement routier de les ignorer en raison des services qu'elles peuvent rendre [4].

Le terme « stabilisation » désigne un ensemble de procédés visant à améliorer les caractéristiques d'un sol, en particulier sa résistance mécanique, à diminuer sa sensibilité à l'eau, à réduire le gonflement et à augmenter la résistance à l'usure [5].

Dans la région de Djelfa, nous pouvons constater une présence abondante en granulats nobles. Cependant leur utilisation abusive peut causer un problème à long terme. Pour cela, nous avons pensé à utiliser d'autres matériaux locaux en substitution tels les sables de dunes, afin de préserver les ressources de la région et éviter un surcroît de pollution, ainsi qu'un impact négatif sur l'environnement.

Les sables de dunes sont considérés comme des matériaux de qualité médiocre (porosité élevée, portance faible, granulométrie homométrique), donnant des performances mécaniques insuffisantes [6, 7]; leur stabilisation devient par conséquent indispensable.

Dans notre étude, le traitement des sables étudiés a été fait par une stabilisation:

- Mécanique: réduction des vides par l'opération de compactage.
- Physique: correction de la mauvaise granulométrie des sables étudiés par addition de correcteur granulaire (sable fillérisé).
- Chimique: agglomération des particules inertes (grains de sable) par l'addition du ciment (CPJ 42,5).

Le choix du liant est essentiellement conditionné par deux critères:

- Technique: en fonction de la nature et des propriétés du matériau à stabiliser, on choisit des liants qui sont, à priori, « adaptés » au type de sol et aux performances requises. Dans le cas

de traitement de sable de dune, l'utilisation de ciment comme rigidifiant est généralement recommandée [1] (cas de traitement par un calage et une rigidification).

- Géographique et économique: le coût de transport d'un liant entre son lieu de production et de mise en oeuvre a de fortes répercussions sur le budget global d'un chantier. Cela n'est pas le cas des ciments de classe CPJ, qui sont produits dans toutes les cimenteries Algériennes.

Le choix de sable fillérisé (SF) en tant que correcteur granulaire est intéressant en raison de son prix très compétitif, il est de l'ordre de 100 DA/m<sup>3</sup> (hors coût du transport). Il est de plus disponible dans la région de Djelfa (coût de transport moindre). Le sable SF contient une forte proportion de fines ; ce qui nous donne la possibilité de l'utiliser directement sans aucun broyage additionnel.

Notre travail a pour objectif ;

- La caractérisation physique, chimique et minéralogique des sables qui existent dans la région de Djelfa (sables étudiés), et la classification de ces derniers selon le Guide des Terrassements Routiers.

- L'étude de l'influence de la provenance du sable et du dosage d'agent de stabilisation sur les caractéristiques physiques (teneur en eau optimale et densité sèche maximale) et mécaniques des mélanges (résistance en compression et celle en traction, la tenue à l'immersion et le module d'élasticité).

- L'analyse des différentes relations qui lient la densité sèche maximale avec les performances mécaniques des mélanges (la résistance en compression, en traction et le module d'élasticité), par l'évaluation de la signification de ces relations et la définition des équations mathématiques qui les gèrent.

- La classification des mélanges de sables de dune stabilisés d'après leurs résistances en compression, en traction et leurs modules d'élasticité selon les normes en vigueur ainsi que l'étude de l'aptitude de leur valorisation en assise de chaussée.

Notre travail comprend deux parties principales : la partie théorique et la partie expérimentale et s'articule autour cinq chapitres.

La première partie (théorique) est consacré à la synthèse sur l'état actuel de connaissances sur les sables (définition, différents types, classement, caractéristiques physiques et mécaniques,...etc.). Cette partie s'intéresse aux propriétés des sables de dune, au traitement des sables aux liants hydrauliques, aux performances recommandées et aux critères permettant l'utilisation de matériaux en technique routière.

La seconde partie (expérimentale) comporte quatre chapitres.

- Le chapitre II s'intéresse à la caractérisation physique, chimique, minéralogique et géotechnique des sables de dunes étudiés, la classification de ces derniers selon le Guide des Terrassements Routiers, et l'identification des agents de stabilisation (liant hydraulique et correcteur granulaire).

- Le chapitre III intitulé : formulation et paramètres Proctor, est consacré à la proposition d'une méthode de formulation des mélanges basée sur la stabilisation des sables étudiés au ciment et au correcteur granulaire, et la détermination des paramètres de compactage des mélanges. Cette étude géotechnique vise à optimiser les différents mélanges (stabilisés et non stabilisés) c'est-à-dire définir leur Optimum Proctor Normal (OPN) afin de l'utiliser dans la confection des éprouvettes qui seront testées dans notre étude.

- Le chapitre IV intitulé performances mécaniques des mélanges stabilisés, consiste à déterminer les différentes performances mécaniques des mélanges de sables de dune stabilisés

(la résistance en compression, en traction, le module d'élasticité et la tenue à l'immersion). Ces grandeurs sont les paramètres d'entrée pour le classement et la valorisation d'un matériau en technique routière. Pour cela, les essais mécaniques sont d'abord décrits. Ensuite, l'évolution des propriétés mécaniques des mélanges durcis en fonction des teneurs en agents de stabilisation est présentée. Et l'influence de la densité sèche maximale des mélanges sur les performances mécaniques est analysée.

- Le chapitre V intitulé valorisation en assise de chaussée, s'intéresse au classement des mélanges selon les normes en vigueur, le choix des formulations optimales et l'aptitude de ces dernières à être valorisés en couche d'assise de chaussée.

Une conclusion générale a été faite et des recommandations sont données et qui nous semblent très utiles pour d'éventuelles futures recherches.

*Chapitre I*

---

# ***Synthèse bibliographique***

---

## 1.1. Introduction

Ce chapitre bibliographique nous amènera, tout d'abord, à donner une description générale sur les sables (définition, différents types, classement, caractéristiques physiques et mécaniques,...etc.), en se basant surtout sur les propriétés des sables de dune. Ensuite, seront présentés le traitement des sables aux liants hydrauliques, les travaux réalisés sur le traitement et la valorisation des sables en technique routière, les performances recommandées et les critères permettant l'utilisation de matériaux en technique routière.

## 1.2. Les sables

### 1.2.1. Définition

Le sable est un matériau granulaire constitué de petites particules minérales provenant de la désagrégation des roches dont la dimension est comprise entre 2 mm et 0,2 mm pour les sables grossiers (système international), et entre 200  $\mu\text{m}$  et 50  $\mu\text{m}$  pour les sables fins. Les sables diffèrent selon leur origine, tant géologique que géographique ou en fonction de leurs caractéristiques physiques.

### 1.2.2. Origine des sables

Les sables rencontrés sont le résultat d'une décomposition chimique ou d'une désintégration mécanique des roches suivies par un processus de transport qui est à l'origine de leurs caractéristiques physico-chimiques [9].

Les sables ainsi disponibles sont le résultat d'un processus souvent complexe d'érosion et de sédimentation. Il comporte, à des degrés divers, une décomposition sur place des différentes roches suivie d'un transport fluvial et parfois éolien. Les différents processus qui conduisent de la roche massive aux sables sont suffisamment agressifs vis-à-vis des minéraux pour que seuls subsistent les plus résistants; c'est ainsi que la plus grande partie des formations sableuses est constituée de quartz qui devient de plus en plus abondant à mesure que la taille des grains décroît. La fraction comprise entre 0,2 mm et 0,5 mm est le plus souvent constituée de quartz à plus de 75%.

Selon l'importance et la nature de leur transport, ces grains de sable peuvent présenter un aspect différent [9]:

- Grains émoussés et luisants (usure due au déplacement par l'eau);
- Grains ronds et mats (déplacement par le vent);
- Grains non usés.

Selon leur histoire géologique, les sables se distinguent les uns des autres par une multitude d'aspects: granulométrie, nature et caractéristiques des fines, composition chimique, et minéralogique, forme des grains, dureté, présence de matières humiques...etc.

Tous ces aspects sont d'inégale importance dans l'optique d'un usage routier et les classifications fonctionnelles reprendront les aspects les plus utiles [6].

### 1.2.3. Différents types de sable

Indépendamment de leur origine minéralogique, les sables se différencient par un grand nombre de paramètres, on distingue deux catégories de sables :

- Les sables naturels.
- Les sables artificiels (issus d'une chaîne d'élaboration).

### 1.2.3.1. Les sables artificiels

Ce sont des matériaux produits dans une chaîne d'élaboration de granulats, et qui peuvent être soit:

- Des sables roulés de dessablage qui résultent du criblage primaire d'un tout-venant.
- Des sables de concassage obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Ils présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres: origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage, ...etc. Les sables concassés sont de plus en plus utilisés en technique routière.

### 1.2.3.2. Les sables naturels

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

#### 1.2.3.2.a. Les sables marins

Les sables marins sont caractérisés:

- Par leur composition minéralogique ; matériaux silicatés ou carbonatés (sables siliceux ou calcaires) ;
- Par leur origine; matériaux provenant de l'érosion de roches cristallines ou sédimentaires (sables terrigènes), et
- Les matériaux issus de la fragmentation et du remaniement d'organismes après leur mort (sables biogènes ou coquilliers).

Les sables marins se caractérisent par leur petite taille de forme anguleuse [10].

#### 1.2.3.2.b. Les sables fluviatiles

On les trouve dans les fleuves et les rivières et éventuellement sur leurs côtes. Ce sont des restes d'altération transportés par ces cours d'eau et déposés avant d'atteindre la mer. En raison de la courte distance de transport, les grains de ces sables sont plus grossiers, mal concassés et présentent une forme anguleuse et un aspect très rugueux [6].

#### 1.2.3.2.c. Les sables éoliens

Ils sont constitués de grains de sable d'origine quelconque et se trouvent dans plusieurs régions du désert sous forme de dunes qui occupent de vastes surfaces (exemple de sud algérien). Leur origine est très différente ; ils sont pris et déposés par le vent. Ils se caractérisent par une granulométrie uniforme de taille moyenne (inférieure à 5 mm), de grains arrondis et dépolis à cause de nombreux chocs entre eux. La vitesse du vent, son pouvoir portant ainsi que les distances de transport sont les seuls facteurs qui déterminent la taille des grains [9, 6].

#### 1.2.3.2.d. Les sables du Sahara

Le sable est l'un des matériaux les plus abondants au Sahara et parfois le seul dans de vastes zones. Les sables sahariens les plus rencontrés et les plus connus sont [11, 12]:

##### 1.2.3.2.d.1. Sables alluvionnaires

Les sables de rivière rencontrés se trouvent soit dans des oueds à écoulement fréquent de la bordure de l'Atlas (Oued de Messaâd à Djelfa), soit dans des lits d'anciens oueds dont

l'écoulement remonte à des époques géologiques antérieures. Les principaux types retenus pour les usages routiers sont les suivants:

- Sable graveleux ou non à granulométrie assez étalée et avec fines (15 à 30 %).
- Gros sable de préférence graveleux à granulométrie étalée pour enrobés.

#### 1.2.3.2.d.2. Sables de dunes

On les trouve dans les dunes mouvantes ; ils sont composés de particules siliceuses pratiquement de même taille et de petites dimensions. La Figure 1 présente les courbes granulométriques de sables de dunes de différentes origines comparées à celle d'un grave alluvionnaire provenant aussi du Sahara. Ces sables sont accumulés sous forme de dunes mouvantes de hauteur très variable. Les dunes sont constituées de sable plus ou moins fin, à granulométrie serrée ou très serrée [11].

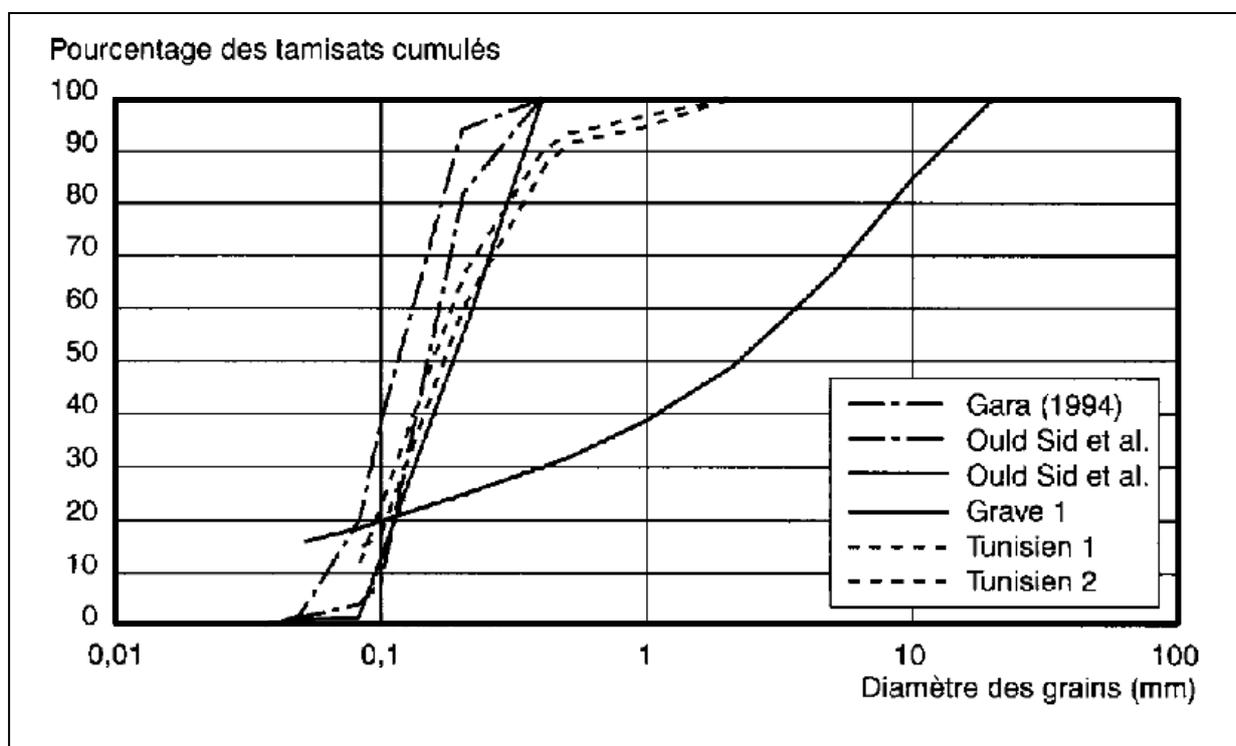


Figure 1.1. Courbes granulométriques de sables de dunes de diverses régions du Sahara [11].

#### 1.2.3.2.d.3. Sables de regs

Le reg est une formation de surface qui recouvre de vastes zones plates ou à relief très mou. L'action du vent a balayé le sable fin et enrichi la surface d'éléments plus gros tels les cailloux, gravier, gros sable, qui se trouvent disposés d'une manière régulière [6].

#### 1.2.4. Classification des sables

L'intérêt de la classification est de regrouper en familles les matériaux qui présentent des points communs soit dès leur genèse, soit dans leur comportement lié à un usage précis. Il est utile de classer les sables, afin de pouvoir préciser à priori et pour un sable donné, les divers procédés de traitement qui conviennent mieux à son utilisation dans un domaine et selon ses spécifications. On conçoit de ces conditions qu'il n'y a pas une classification, mais des classifications selon l'usage envisagé, chacune répondant à une fonction. Il existe de ce fait des classifications géologiques et géotechniques [9].

En ce qui concerne l'usage des sables en construction routière, sont plus particulièrement importants [9, 6]:

- Les terrassements, couche de forme, et assises non traitées.
- Les assises de chaussées traitées au liant.

#### **1.2.4.1. Classification selon la granulométrie**

On distingue trois catégories de sable [9]:

##### **1.2.4.1.a. Sable grossier**

Plus de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80  $\mu\text{m}$  sont compris entre 0,5 et 5 mm. Ces sables ont des propriétés qui se rapprochent des graves.

##### **1.2.4.1.b. Sable moyen**

Moins de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80 $\mu\text{m}$  sont compris entre 0,2 et 2 mm.

##### **1.2.4.1.c. Sable fin**

Plus de 75% des éléments supérieurs à 80  $\mu\text{m}$ , sont inférieurs à 0,5 mm. Ces sables doivent être notablement corrigés pour acquérir des propriétés comparables à celles des graves.

#### **1.2.4.2. Classification selon la propreté**

La propreté d'un sable est une caractéristique déterminante ; elle est appréciée soit par l'essai d'équivalent de sable (généralement utilisé pour les sables destinés au béton), soit par la valeur au bleu de méthylène (souvent utilisé pour les sables incorporés dans les enrobés ou pour les sables présents dans les graves).

L'essai d'équivalent de sable, désigné par le symbole ES a pour but d'évaluer la proportion relative d'éléments fins contenus dans le sol. L'essai au Bleu noté par VBS, représente la quantité de Bleu de méthylène pouvant s'absorber sur les surfaces externes et internes des particules argileuses contenues dans la fraction du sol considéré.

Selon le GTR 2000 [8] et en fonction de la valeur au bleu de méthylène trouvée, les sols peuvent être classés comme suit :

- $VBS \leq 0,2$  : Sols sableux.
- $0,2 < VBS \leq 2,5$  : Sols limoneux
- $2,5 < VBS \leq 6$ : Sols limoneux argileux
- $6 < VBS \leq 8$  : Sols argileux
- $VBS > 8$  : Sols très argileux

Les sables peuvent être classé également selon d'autres critères qui font intervenir des paramètres ayant prouvé leur influence sur le comportement des mélanges à base de sable notamment les sables stabilisés. On cite:

- La teneur en fines.
- La nature minéralogique (sable calcaire, siliceux...etc.).
- La teneur en matière organique et sa nature.

### 1.2.5. Critères d'acceptabilité des sables pour leur emploi en construction

Le choix d'un matériau de construction de base, tel que le sable qui rentre dans la confection des mélanges composés (bétons, mortiers, ...etc.), doit être dicté par un certain nombre de considérations afin d'atteindre les objectifs recherchés (résistance, durabilité,...etc.). Selon le domaine d'utilisation du sable, ces critères sont plus ou moins sévères.

#### 1.2.5.1. La granulométrie

C'est la caractéristique physique la plus importante. Sa détermination est primordiale dans toute étude et quel que soit le domaine de la construction. Dans le secteur des travaux routiers, pour une classification des matériaux, la granulométrie constitue le premier paramètre d'entrée dans les tables de classification [8]; les spécifications routières s'intéressent principalement à déterminer le fuseau granulométrique pour chaque emploi.

#### 1.2.5.2. Le module de finesse

Le module de finesse est déduit de l'étude granulométrique du sable; il représente le centième de la somme des refus, exprimés en pourcentages sur les différents tamis de la série suivante:

0.160 – 0.315 – 0.630 – 1.250 – 2.5 – 5 – 10 – 20 – 40 – 80 mm

Le module de finesse est plus particulièrement appliqué aux sables dont il est une caractéristique importante. Un module de finesse est d'autant plus faible que le sable est riche en éléments fins. Les normes préconisent pour un bon sable à béton, un module de finesse de l'ordre de 2,2 à 2,8.

#### 1.2.5.3. La propreté

La propreté est définie comme étant l'absence d'éléments fins ayant un diamètre inférieur à 80 $\mu$ m (absence de fraction limoneuse et argileuse). Ces éléments se trouvent dans les sables naturels, soit de la présence originelle des matériaux argileux, soit suite à une contamination par les matériaux organiques d'origine végétale ou biologique [8, 9].

Dans le cas d'un sable artificiel, les fines sont le résultat du concassage. Le mode de concassage détermine le pourcentage de ces fines, alors que la nature des roches constitutives détermine leur caractère plus ou moins nocif. Cependant, la présence des éléments fins peut jouer un rôle positif. Les éléments fins remplissent les vides entre les granulats et augmentent de ce fait la compacité et par conséquent conduisent à un meilleur comportement du matériau; leur excès provoque une réduction de la perméabilité et une augmentation de la capillarité. C'est pourquoi les sables pollués présentent une sensibilité à l'eau, une difficulté de mise en place, une stabilité médiocre et une résistance mécanique faible. Afin de donner une indication sur la présence des fines et leur pourcentage on se réfère à l'essai normalisé équivalent de sable [6,9].

#### 1.2.5.4. La dureté

La résistance des matériaux de construction aux différents efforts destructifs est directement liée à la dureté. La dureté du matériau lui procure une bonne résistance à la fragmentation, à l'attrition, à l'usure et au polissage sous des efforts statiques ou dynamiques. Il est constaté que cette dureté est liée à la nature minéralogique du matériau. Un sable d'origine calcaire est plus friable qu'un sable siliceux; les sables calcaires évoluent pendant le compactage ce qui entraîne la création d'éléments fins [6, 9].

Notons aussi que les sables durs sont peu sensibles à l'eau, moins sensibles au gel ce qui est favorable à la résistance et à la durabilité du matériau. Afin d'apprécier cette dureté, on utilise l'essai de friabilité des sables.

### **1.2.5.5. L'angularité**

Caractéristique importante pour la stabilité du matériau, elle confère au sable un angle de frottement interne plus élevé, capable de résister aux différents déplacements. Les sables artificiels de concassage présentent des formes plus anguleuses, et par suite leur stabilité est améliorée, mais leur inconvénient majeur est que leur compactage est difficile. Pour cette raison ces sables présentent des densités nettement plus faibles que celles des sables roulés d'une même granulométrie ; Ils sont par conséquent plus maniables. Le pourcentage d'éléments concassés est un critère d'importance pour les couches de roulement où le problème de glissance se pose [6, 9].

### **1.2.5.6. La forme**

La longueur, la largeur et l'épaisseur du grain définissent sa bonne ou sa mauvaise forme. La forme des grains de sable est essentielle pour des propriétés telles que la compacité du mélange, l'angle de frottement interne, la maniabilité des mortiers, la résistance au broyage, à l'attrition ou à la fragmentation par écrasement. Cette forme bien que moins visible à l'oeil nu, a autant d'importance pour les sables de béton soit hydraulique soit hydrocarboné. Ce sont les grains de sable naturel ayant subi une attrition leur donnant une forme arrondie, qui présentent la meilleure forme au point de vue de la régularité du volume occupé par un poids donné, de résistance à la fragmentation, de la meilleure maniabilité dans les mortiers de ciment et la moindre tendance de ces derniers à la fissuration. La nature de la roche d'origine influe beaucoup sur la forme des grains pour un mode de concassage donné dans le cas des sables artificiels [6, 9].

### **1.2.5.7. L'aspect de surface**

Les grains à surface plus émoussée avec des arêtes vives sont plus favorables pour la stabilité du matériau ; leur angle de frottement interne est élevé et l'adhésion du liant à de telles surfaces est meilleure. Le mode de transport et la nature minéralogique des sables ont une influence sur l'aspect de surface des grains [6, 9].

### **1.2.5.8. L'analyse chimique**

Elle concerne la détermination des proportions de matières organiques (sulfates, sulfures, chlorures et d'autres éléments chimiques) contenues dans les sables étudiés. Ces éléments présentent, au-delà d'un certain seuil, un caractère nuisible pour les propriétés des bétons ainsi réalisés [6, 9].

En plus de ces études effectuées sur les sables, d'autres paramètres physiques ne manquent pas d'importance et doivent être définis, car ils vont servir comme données de base à la formulation, en particulier la masse volumique et le poids spécifique.

## **1.2.6. Utilisation de sable de dune**

L'utilisation des sables de dune en techniques routières n'est pas nouvelle. Beaucoup d'études et de réalisations ont été faites et un guide pratique d'utilisation routière des sables a été publié [9]. Cependant, les sables de dunes constituent un cas particulier pour lequel les directives et recommandations ne peuvent pas être appliquées sans études spécifiques. L'utilisation du sable de dune seul ne peut être envisagée malgré la facilité qu'il présente au reprofilage, car sa stabilité de surface est souvent incertaine, ce qui augmente la résistance au roulement et provoque parfois des enlissements [13]. Mais il pourrait être mélangé avec d'autres matériaux.

## 1.2.7. Identification des sables de dunes du Sahara

### 1.2.7.1. 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.

### 1.2.7.2. 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 0,04 mm. Le coefficient d'uniformité ( $C_u = D_{60}/D_{10}$ ) est de l'ordre de 1,8 (inférieur à 2 ; granulométrie serrée), le coefficient de courbure ( $C_c = D_{30}^2/[D_{10}.D_{60}]$ ) est de l'ordre de 10 (mal gradué). Il s'agit donc d'un sable très fin mal gradué. La Figure I.3 montre trois courbes granulométriques de sables de dunes prélevés dans trois zones sahariennes différentes en Tunisie, en Mauritanie [11] et en Algérie [7].

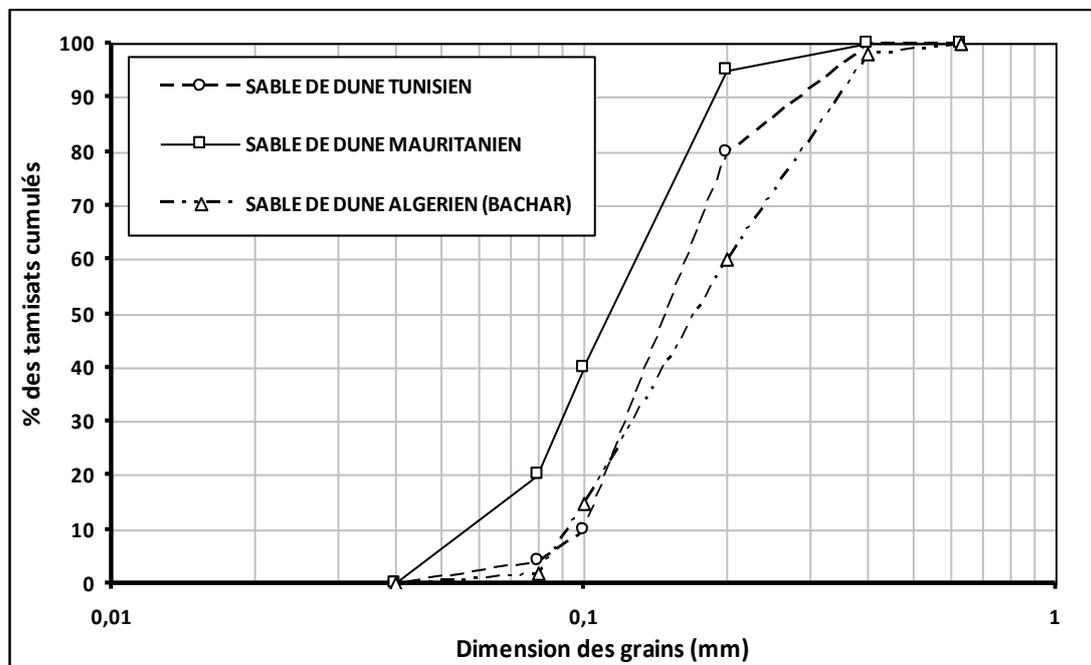


Figure I.2. Courbes granulométriques de trois sables de dune de grand Sahara [7, 11]

### 1.2.7.3. Propreté

Le sable de dune ne contient pratiquement pas de traces d'argile. Il a une limite de liquidité  $w_L$  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 de méthylène est de l'ordre de 0,1 [11].

### 1.2.7.4. Comportement mécanique

Des essais de compactage puis de cisaillement direct ont été réalisés sur des sables de dune, par OULD SID A. C, HAVARD H., VALIN C. [14]. 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 5 KPa.
- L'angle de frottement interne varie de 30 à 35°, selon la densité du sable.

L'indice portant CBR de ces sables, au poids volumique et à la teneur en eau de l'optimum Proctor modifié, est relativement faible. Il 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 [11].

### 1.3. Traitement des sables

La stabilisation des sols aux liants hydrauliques, et plus particulièrement aux ciments, est connue depuis plus de soixante-dix ans. Elle a été pratiquée notamment aux U.S.A. puis en Grande-Bretagne et en Allemagne sous le nom de sol-ciment plusieurs années avant de faire son apparition en France [2].

Les sables n'ont pas de caractéristiques mécaniques satisfaisantes aussi bien pour les structures que pour la réalisation des différentes couches de chaussées permettant ainsi de reprendre les sollicitations dues à la circulation. Ils sont pratiquement non compactables et leurs portances sont très faibles [8, 9, 6]. Même après compactage, les résistances mécaniques des sables restent faibles, ceci est dû [6, 15]:

- Au pourcentage élevé des vides (granulométrie serrée) qui entraîne une grande déformabilité et laisse peser une incertitude sur sa stabilité à long terme.
- À la finesse des grains de sable qui forment un corps moins rigide, nécessitant l'ajout de grains à angularité en vue d'augmenter la cohésion entre ses grains. Il est nécessaire d'incorporer des fines d'apport lorsque les fines naturelles du sable n'atteignent pas un pourcentage de l'ordre de 5% du mélange. La meilleure solution pour atteindre cet objectif consiste à incorporer au sable naturel un sable concassé ou broyé à raison 10 à 15% du mélange, qui apporte, outre les fines nécessaires, une certaine angularité et une correction granulométrique favorable à la stabilité.
- Au manque de stabilité qui fait suite au manque de cohésion. Le traitement des sables devient indispensable dans la plupart des structures; il a pour but d'améliorer leurs performances mécaniques en leur conférant des caractéristiques mécaniques et de stabilité suffisantes leur permettant de résister aux sollicitations imposées.

Suivant la proportion d'éléments fins (supérieure ou inférieure à 25%), et l'indice de plasticité (supérieure ou inférieure à 12), le traitement des sables aux liants hydrauliques peut être réalisé :

- Soit par amélioration du sable.
- Soit par stabilisation du sable.

L'amélioration des sables concernera les sables les plus riches en éléments fins et pour lesquels l'indice de plasticité est supérieur à 12. Il s'agira d'améliorer la tenue à l'immersion. Les liants utilisés pour ce mode sont la chaux hydraulique (sol-chaux) ou le ciment (sol-ciment). Le processus de traitement ne modifie pas le comportement mécanique du sable qui reste celui du matériau naturel [9]. Ces comportements seront caractérisés par mesure de portance (essai CBR). Le traitement des sables s'effectue généralement en place, et avec des dosages restant inférieurs à 4%.

Au contraire, stabiliser un sable par un liant hydraulique modifie son comportement. Il ne sera plus celui d'un matériau naturel, mais celui d'un matériau semi-rigide ou rigide. Il sera caractérisé par sa résistance en traction et son module d'élasticité. On parlera alors selon le cas de sable-ciment, de sable-laitier, de sable-centres volantes ou de sable-pouzzolane.

### 1.3.1. Techniques de traitement des sables

D'après H. CAPDESSUS et J. J. CHAUVIN [1], la stabilisation des sables peut être obtenue par un « blocage » des grains les uns par rapport aux autres. La qualité de ce blocage est variable :

#### • Traitement par simple calage des grains

Il s'effectue par incorporation d'une substance plus fine que le sable qui vient combler les vides de celui-ci. Les produits utilisables pour une telle opération sont, par exemple, les cendres volantes ou les boues de papeterie.

Tant que le produit ajouté comble les vides du sable, la densité du mélange augmente ; lorsque les vides sont comblés, un apport supplémentaire de produit a un effet inverse, il écarte les grains de sable les uns des autres et la densité chute (Figure I.3) [1].

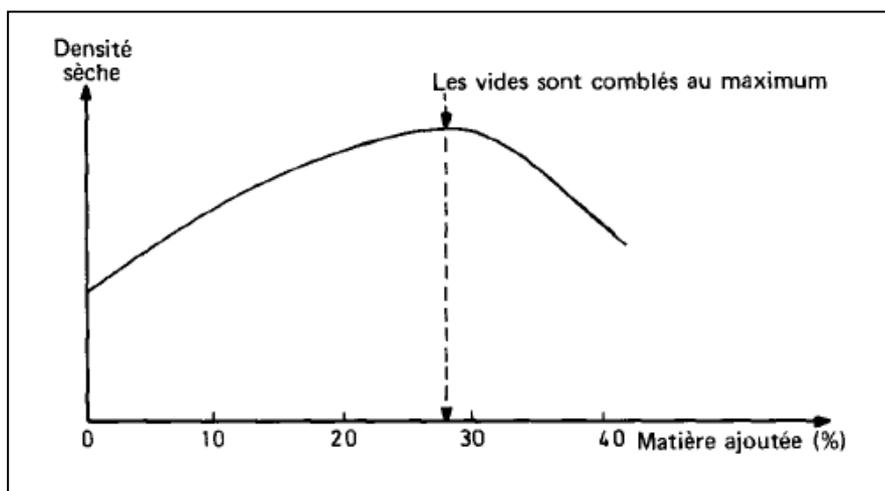


Figure I.3. Effet de la matière ajoutée sur la densité sèche [1]

Le traitement par simple calage est rarement employé, car il ne confère pas de rigidité à la couche ; il est tout au plus envisageable pour la stabilisation d'une couche de forme en sable, à laquelle il peut donner la cohésion nécessaire à une circulation de chantier [1].

#### • Traitement par un calage et une rigidification

Deux cas sont possibles :

— Soit que l'on ajoute dans le mélange, en plus du produit de calage précédemment mentionné, un rigidifiant, en général du ciment, dont les techniques ont pour noms, sable - boues de papeterie - ciment et sable - cendres volantes – ciment [1].

— Soit que le produit de calage soit en lui-même un rigidifiant, en général association matériau pouzzolanique - chaux grasse. La technique est appelée sable - cendres volantes – chaux [1].

#### • Traitement par une simple rigidification

Deux cas sont possibles :

- *Rigidification par prise hydraulique*

Le blocage est assuré par un « pontage » cristallin entre grains, ainsi que par un enchevêtrement grains - cristaux. Un tel résultat ne peut être obtenu qu'en présence d'une

quantité importante de liant ; pour cette raison (à la fois technique et économique), le ciment convient mal [1].

Le laitier par contre est utilisable. Il est à noter que le laitier (de granularité 0/4) ne cale pas les grains comme le feraient les cendres volantes ou les boues ; tout au plus, joue-t-il un rôle de correcteur granulométrique en étalant légèrement la courbe du mélange par rapport à celle du sable brut. La technique est appelée sable-laitier [1].

#### *- Rigidification par prise thermique*

Le blocage est assuré par une « colle » qui enrobe les grains de sable et les lie les uns aux autres : le bitume constitue un produit utilisable, l'enrobage s'effectue à chaud et en refroidissant, les liaisons entre grains durcissent. Le sable-bitume est le nom donné à cette technique [1].

### **1.3.2. Domaine d'utilisation des sables traités**

Les sables améliorés ou stabilisés au ciment sont utilisables en chaussées neuves en couche de base pour des trafics faibles à modérés : inférieurs à 1000 véhicules par jour pour les sables améliorés et à 6000 véhicules par jour pour les sables stabilisés [9].

Leur utilisation est envisageable pour des trafics supérieurs mais uniquement en couche de fondation, ce qui constitue dans bien des cas la meilleure façon d'employer ces matériaux lorsque leurs caractéristiques ne permettent pas de les employer à l'état naturel.

La limitation d'emploi pour les trafics importants tient à la difficulté d'accrocher parfaitement la couche de roulement sur la surface du sable ; ceci étant d'autant plus vrai que le sable est fin.

Selon le niveau de trafic et la nature de la plateforme, les épaisseurs employées pour couche terminée se situent entre 15 cm et 25 cm. 15 cm est un minimum technique, 25 cm est l'épaisseur maximale au-delà de laquelle il est difficile de compacter un matériau de façon homogène sur toute son épaisseur (pour une épaisseur supérieure, il est préférable de passer en deux couches) [9].

### **1.3.3. Agents de traitement**

#### **a. Le ciment**

Le ciment, bien connu pour sa grande capacité d'agglomération des particules inertes, est essentiel dans le domaine du Génie Civil ; il est l'élément principal dans la fabrication des bétons. Il est aussi utilisé dans les formulations de matériaux traités pour le domaine routier, mais dans des proportions moins importantes.

L'hydratation du ciment peut se dérouler, si la quantité d'eau est suffisante [16] ; l'hydratation s'opère par dissolution des phases solides suivie d'une précipitation des hydrates qui conduit à un durcissement de la pâte de ciment et à la constitution d'une structure solide poreuse

Le ciment le plus courant est le ciment Portland artificiel (CPA), que l'on nomme CEM I, issu d'un mélange de calcaire et d'argile. Il est constitué principalement de 50 à 65 % de silicate tricalcique ( $\text{SiO}_2$ ,  $3\text{CaO}$  ou  $\text{C}_3\text{S}$ ), de 10 à 20 % de silicate bicalcique ( $\text{SiO}_2$ ,  $2\text{CaO}$  ou  $\text{C}_2\text{S}$ ), de 1 à 15 % d'aluminate tricalcique ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $3\text{CaO}$  ou  $\text{C}_3\text{A}$ ), de 5 à 10 % d'alumino-ferrite tétracalcique ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $4\text{CaO}$  ou  $\text{C}_4\text{AF}$ ). On trouve aussi, en très faibles quantités de la chaux libre ( $\text{CaO}$ ) et des sulfates de sodium et de potassium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) [16].

Le processus de l'hydratation est lié directement à la cinétique d'hydratation des différents minéraux. Le  $\text{C}_3\text{S}$  et le  $\text{C}_3\text{A}$  s'hydratent rapidement ; à 28 jours l'hydratation est

pratiquement terminée, et l'essentiel étant déjà réalisé à 7 jours, ce sont eux qui conditionneront la prise immédiate du ciment. Le  $C_2S$  et le  $C_4AF$  s'hydratent plus lentement, ce sont eux qui seront responsables de l'évolution de la résistance au-delà de 28 jours [9, 17].

Un ciment riche en  $C_2S$  aura donc des résistances initiales moins fortes qu'un ciment contenant davantage de  $C_3S$  ou  $C_3A$ . Le  $C_2S$  peut être un élément favorable vis-à-vis en particulier des phénomènes de retrait [9, 18].

La présence de ces différents constituants n'influe pas seulement sur la vitesse de prise et de durcissement. Elle peut également avoir une influence sur la sensibilité du mélange après prise à l'action de certains agents chimiques en particulier les sulfates (eaux séléniteuses) qui détruisent les hydrates formés à partir de  $C_3A$  ou  $C_4AF$  pour donner en particulier de l'ettringite. Ce phénomène s'accompagne d'un gonflement et généralement d'une chute de la résistance par ruptures des liaisons formées. Pour cette raison, il existe des ciments dits ciments résistants aux sulfates (CRS) dont la particularité est de ne pas contenir (ou contenir très peu) de  $C_3A$ . Il convient de noter que les sulfates contenus dans le matériau sont sans danger dans la mesure où leur teneur n'est pas excessive ( $\% SO_4^- \leq 0.24$ ), Selon la norme NF P 18-011 [19]. Ce qui est dangereux, c'est l'ettringite qui se forme après la prise et le durcissement du mélange [17].

Au contact de l'eau, le clinker Portland s'hydrate selon les réactions de dissolution et de précipitation pour donner des hydrates: les silicates de calcium hydratés, la portlandite, l'ettringite et/ou monosulfoaluminates de calcium ou bien aluminate de calcium hydraté [20]:

- $C_3S (C_2S) + H_2O \rightarrow C-S-H$  (*silicate de calcium hydraté*) +  $Ca(OH)_2$  (*portlandite*)
- $C_3A + CaSO_4 \cdot 2H_2O + H_2O \rightarrow C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$  (*ettringite*)  
 et/ou  $\rightarrow C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$  (*monosulfo-aluminate de calcium hydraté*)  
 et/ou  $C_3A + H_2O \rightarrow C_3A \cdot 6H_2O$  (*aluminate de calcium hydraté*)
- $C_4AF + CaSO_4 \cdot 2H_2O + H_2O \rightarrow C_3(A,F) \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$  et/ou  $C_3(A,F) \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$
- et/ou  $C_3A + H_2O \rightarrow C_3(A,F) \cdot 6H_2O$

Les différents types de ciments sont référencés dans la norme NF EN 197-1, dans lesquels on retrouve des composants issus de procédés industriels tels que les laitiers de haut fourneau, les cendres volantes [16].

### **b. Laitier de haut fourneau**

Les laitiers de haut fourneau sont des co-produits formés lors de l'élaboration de la fonte à partir de minerai de fer. Selon le processus de refroidissement du laitier en fusion, on distingue deux familles :

- Le laitier vitrifié obtenu par un refroidissement brutal à l'eau, lui confère une structure vitreuse. Cela lui permet de développer des propriétés hydrauliques. Ce laitier refroidi à l'eau est appelé 'laitier granulé'
- Le laitier cristallisé, obtenu par un refroidissement lent à l'air, est une roche dure artificielle et chimiquement stable.

Le fer provient du minerai de fer, composé d'une gangue (parties non métalliques) et d'oxydes de fer. Ce minerai, combiné à du coke comme combustible et à de la chaux comme fondant, alimente un haut fourneau, four vertical à la base duquel est soufflé de l'air chaud. Ce processus est continu. Le fer extrait du minerai par fusion s'accumule au fond du haut

fourneau sous forme de fonte par gravité. Il est recouvert par une couche de résidus (gangue, et chaux) plus légère : le laitier.

Le laitier de haut-fourneau, est une roche liquide composée des parties non métalliques des minerais ainsi que d'un certain nombre de produits minéraux d'ajout. Après séparation d'avec la fonte, plus lourde, le laitier est conduit vers des fosses où il va refroidir à l'air et cristalliser sous forme de roche.

Les laitiers HF contiennent essentiellement quatre éléments dont l'expression conventionnelle en oxydes représente 95 à 97 % des constituants du laitier : chaux (CaO), silice (SiO<sub>2</sub>), alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), magnésie (MgO). Les autres constituants sont des oxydes secondaires tels que FeO et MnO ainsi que des composés sulfurés. Ils ne contiennent généralement ni argile et matière organique.

D'un point de vue minéralogique, les constituants des laitiers de haut fourneau sont essentiellement des silicates ou des silico-aluminates de chaux. Il s'agit d'une forme minéralogique stable.

Le pouvoir de prise hydraulique d'un laitier granulé est caractérisé par son coefficient  $\alpha$ . Ce coefficient est en corrélation directe avec les résistances obtenues à 60 j en laboratoire sur des éprouvettes de sable ou de grave-laitier. Ce coefficient associe l'aptitude du laitier à faire des fines (friabilité) à la dimension de ces fines (traduite par la surface Blaine).

$$\alpha = \frac{P.S}{10^3} \quad \text{où P. est la friabilité et S. la surface Blaine}$$

Au jeune âge, dans une couche traitée au laitier, plus le laitier aura de fines et plus la dimension moyenne de celles-ci sera faible, plus la résistance sera importante, ces deux variations allant dans le sens d'une augmentation du coefficient  $\alpha$  ; finalement, plus le coefficient  $\alpha$  sera important, plus les résistances initiales seront fortes [1].

Les laitiers sont réparties en quatre classes [1]:

- Classe I             $\alpha < 20$  (inemployé)
- Classe II            $20 < \alpha < 40$
- Classe III           $40 < \alpha < 60$
- Classe IV           $\alpha > 60$

### c. Les cendres volantes

Les cendres volantes de centrale thermique se présentent sous la forme d'une poudre fine (0,5 et 315 microns) constituée principalement de particules vitreuses sphériques, issues de la combustion de charbon pulvérisé en présence ou non de co-combustibles. La norme NF EN 197-1 distingue deux types de cendres volantes (siliceuses ; calciques), suivant, en particulier leur teneur en chaux. Les cendres calciques (aussi appelées « silico-calciques ») sont issues des centrales à lit fluidisé circulant. Elles ont des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques. Elles sont essentiellement constituées d'oxyde de calcium (CaO) réactif, d'oxydes silices (SiO<sub>2</sub>) et d'oxyde d'aluminium (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Les cendres siliceuses (aussi appelées « silico-alumineuses ») peuvent provenir de centrales à lit fluidisé circulant comme de centrales à flamme. Elles ont des propriétés pouzzolaniques, et sont essentiellement constituées de dioxyde de silice réactive (SiO<sub>2</sub> ≥ 25%) et d'oxyde d'aluminium.

## 1.4. Rappel sur la constitution d'une chaussée

Les chaussées sont constituées d'une superposition de couches, chacune ayant des caractéristiques distinctes pour remplir un rôle bien précis, en vue de résister aux différents chargements appliqués.

### 1.4.1. Rôle des différentes couches de chaussée

Généralement, dans une structure de chaussée, on distingue trois niveaux de couches principales (Figure I.4):

- La plate-forme support de chaussée
- Les couches d'assise
- Les couches de surface

#### • La plate-forme

Les structures de chaussée reposent sur un ensemble dénommé « plate-forme support de chaussée », constituée d'un sol naturel terrassé éventuellement traité, surmontée en cas de besoin d'une couche de forme.

Bien qu'elle ne fasse pas partie intégrante de la chaussée proprement dite, elle contribue fortement à sa réalisation. Dans une structure routière, la couche de forme peut être inexistante si les matériaux constituant le remblai ou le sol en place ont les qualités requises. Si les propriétés du sol ne sont pas adaptées, on a alors recours à des matériaux d'apport.

La couche de forme est donc souvent constituée avec le sol en place, un sol traité à la chaux ou au liant hydraulique ou des graves non traitées. Son rôle est d'assurer la protection de la couche située en dessous d'elle, constituée par le sol support ainsi que son homogénéisation.

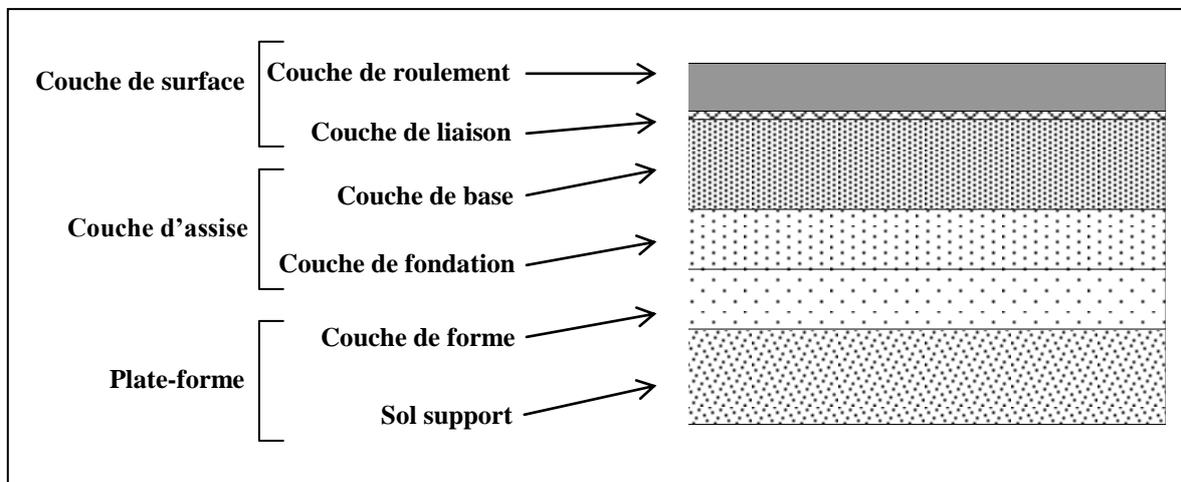


Figure 1.4. Schéma d'une structure de chaussée type

#### • Les couches d'assise

Elles sont généralement constituées de deux couches : celle de base et celle de fondation. Le choix de la double couche se fait en fonction du trafic : s'il est important et que l'épaisseur à réaliser en une seule fois est trop conséquente (la limite technologique ne permettant pas de dépasser plus de 18 cm), alors l'assise comportera les deux couches. Généralement, celle de base est plus épaisse que celle de fondation.

Lors de la construction de la chaussée, les couches d'assise doivent être bien nivelées et constituer ainsi un support pour permettre provisoirement le trafic des engins. Une fois la chaussée construite, elles doivent assurer une résistance mécanique vis-à-vis des charges verticales dues au trafic routier et répartir les efforts. Elles sont souvent réalisées avec des matériaux traités aux liants hydrauliques (ciment, laitier, cendre volante) ou bitumineux.

#### • La couche de surface

Elle est souvent constituée d'une structure bicouche : les couches de roulement et de liaison.

- *La couche de roulement* est en contact direct avec les véhicules. Elle contribue à la résistance mécanique et assure l'adhérence. Elle constitue également la couche d'usure.

- *La couche de liaison*, dont l'apport structurel est secondaire, sert notamment, en cas de trafic important, à faciliter la reprise des efforts superficiels. Elle permet de faire la liaison entre la couche de base et de roulement et est souvent réalisée avec une émulsion de bitume.

#### 1.4.2. Familles d'assise de chaussées

On peut distinguer six grandes familles de chaussée [21]:

- Les chaussées souples : les matériaux ne sont pas traités au liant hydraulique.

- Les chaussées semi-rigides : les matériaux sont traités avec un liant hydraulique.

- Les chaussées rigides : elles sont réalisées en béton hydraulique (béton de ciment).

- Les chaussées bitumineuses épaisses : les matériaux sont traités au liant hydrocarboné (bitume).

- Les chaussées à structure mixte : elles combinent une couche traitée au liant hydraulique et une couche au liant hydrocarboné.

- Les chaussées à structure inverse : elles combinent une couche traitée au liant hydraulique, une couche au liant hydrocarboné et une couche non traitée.

Le choix du type de chaussée se fait principalement en fonction de l'usage futur. A titre d'exemple, les chaussées souples à assise non traitée se déforment verticalement de l'ordre de 1 à 3 mm alors que les chaussées rigides à assise traitée ne se déforment verticalement que de 0 à 0,5 mm. Dans les deux cas, lors du passage de la charge, le sol se déforme mais pour les chaussées rigides à assise traitée, la charge sur le sol est mieux répartie et les effets plus limités. Les chaussées souples sont donc plutôt adaptées aux routes peu circulées par les poids lourds contrairement aux chaussées rigides à assise traitée [22].

### 1.5. Méthodologie de classification et d'utilisation des matériaux en technique routière

#### 1.5.1. Classification des matériaux en technique routière

Pour utiliser un matériau en technique routière, il est nécessaire de bien connaître ses propriétés physiques, afin de le classer parmi les différents matériaux-types déjà répertoriés et de connaître le protocole d'utilisation de ce matériau.

La norme NF P 11-300 [23] propose une classification des matériaux utilisable dans la construction des remblais et des couches de formes d'infrastructure routière.

Ils permettent ainsi de définir la classe du matériau à partir des résultats de plusieurs types d'essais. On distingue trois catégories d'essais :

- Les essais d'identification ou de nature.

- Les essais d'état.

- Les essais de comportement mécanique.

Ces essais seront choisis en fonction de la classe du matériau.

### **1.5.1.a. Paramètres de nature**

Ce sont des paramètres qui ne varient pas ou peu ni dans le temps, ni au cours des manipulations. Ce sont:

- La granularité.
- L'indice de plasticité.
- La valeur au bleu de méthylène.

#### **o La granularité**

##### - Dmax

Dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol.

##### - Tamisat à 80 mm (ou pourcentage de fines)

Ce paramètre permet de distinguer les sols riches en fines des sols sableux et graveleux.

##### - Tamisat à 2 mm

Permet la distinction entre les sols à tendance sableuse et les sols à tendance graveleuse.

#### **o L'indice de plasticité**

Ce paramètre caractérise l'argilosité des sols.

#### **o La valeur de bleu de méthylène**

Il s'agit d'un autre paramètre permettant de caractériser l'argilosité (ou la propreté) du sol.

### **1.5.1.b. Paramètres d'état**

Il s'agit des paramètres qui ne sont pas propres au sol mais fonction de l'environnement dans lequel il se trouve.

Pour les sols meubles sensibles à l'eau, le seul paramètre d'état considéré dans la classification est l'état hydrique ; son importance est capitale vis-à-vis de tous les problèmes de sol support de la chaussée.

### **1.5.1.c. Paramètres de comportement mécanique**

Les paramètres de comportement mécanique à prendre en compte dans la classification des sols sont la valeur LOS ANGELES (LA), et la valeur MICRO DEVAL en présence d'eau (MDE), ou la valeur de FRIABILITE DES SABLES (FS) pour les sols sableux.

En fonction de ces paramètres, des procédures d'utilisation sont proposées. Si le matériau ne remplit pas certains de ces critères, il peut être envisagé une étude spécifique permettant d'établir des protocoles de mise en place [24].

La Figure 1.5, extrait du GTR [8], donne la classification des sols répartie entre quatre classes :

- Classe A : sols fins.
- Classe B : sols sableux et graveleux avec fines.
- Classe C : sols comportant des fines et des gros éléments.
- Classe D : sols insensibles à l'eau.

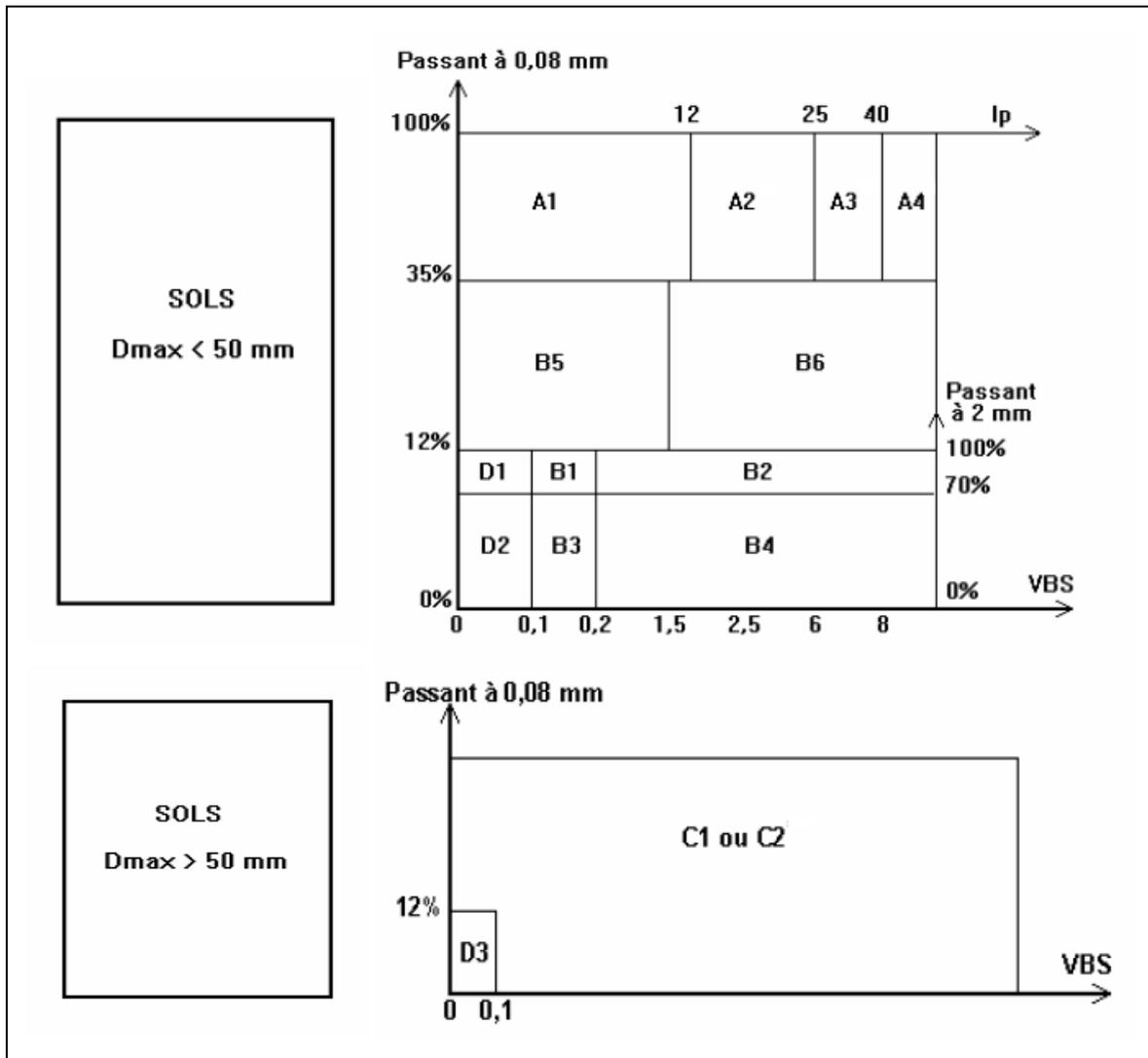


Figure 1.5. Classification des matériaux selon le GTR [8]

### 1.5.2. Critères d'utilisation des matériaux en couche d'assise de chaussée

Pour être valorisés en technique routière, les matériaux à valoriser doivent satisfaire plusieurs critères. Sur le plan mécanique, la résistance en traction ( $R_t$ ), l'Indice Portant Immédiat (IPI) et le module d'élasticité ( $E_s$ ) sont les principaux paramètres qui permettent de déterminer l'adéquation du matériau pour une utilisation en assise de chaussée pour des matériaux traités au liant [9, 25, 26].

#### 1.5.2.a. Critère de résistance en traction

Les performances mécaniques à long terme peuvent être appréciées par l'essai de traction. Les mesures sont faites à 90 jours ou 180 jours suivant le liant utilisé (90 jours pour les sables traités au ciment et 180 jours pour les sables traités au laitier). Les performances recommandées pour les sables traités aux liants hydrauliques en couche de fondation et en couche de base sont présentées dans le tableau 1.1;

**Tableau 1.1.** Performances recommandées en couche de fondation et en couche de base [9]

	Couche de fondation		Couche de base	
	T < 3000 Véhicules/j	T > 3000 Véhicules/j	100 < T < 1000 Véhicules/j	1000 < T < 6000 Véhicules/j
Minimum de résistance en traction par fendage à 90 jours en (MPa)	<b>0,25</b>		<b>0,50</b>	

**1.5.2.b. Critère de l'IPI**

La stabilité immédiate est nécessaire pour permettre de réaliser, dans de bonnes conditions, les opérations de mise en œuvre et pour limiter les déformations au jeune âge sous le trafic de chantier et sous la circulation. Elle est appréciée par l'Indice Portant Immédiat (IPI).

Selon les recommandations de la norme française NF P 98 115, afin d'assurer la circulation normale des machines sur le chantier, les valeurs souhaitables de l'IPI ne doivent pas être inférieures à 35% pour la couche de fondation et 45% pour la couche de base. Toutefois, cette norme définit également des valeurs limites inférieures de 25% et 35% respectivement pour les mêmes couches.

**1.5.2.c. Performances mécaniques à long terme**

Pour les couches d'assise (couche de fondation et couche de base), il est nécessaire de connaître le comportement du matériau sous les sollicitations du trafic. Ainsi, les résistances à la compression diamétrale (essai de traction par fendage) ( $R_t$ ) et les modules d'élasticité ( $E_t$ ) sont mesurés sur des éprouvettes de matériau dont la dimension est fonction de la dimension du plus gros granulat.

En effet, le passage d'un véhicule sur les couches de matériaux entraînent une sollicitation de type charge - décharge. Le matériau doit donc avoir une résistance minimale en traction, et être capable de se déformer sans se casser [25].

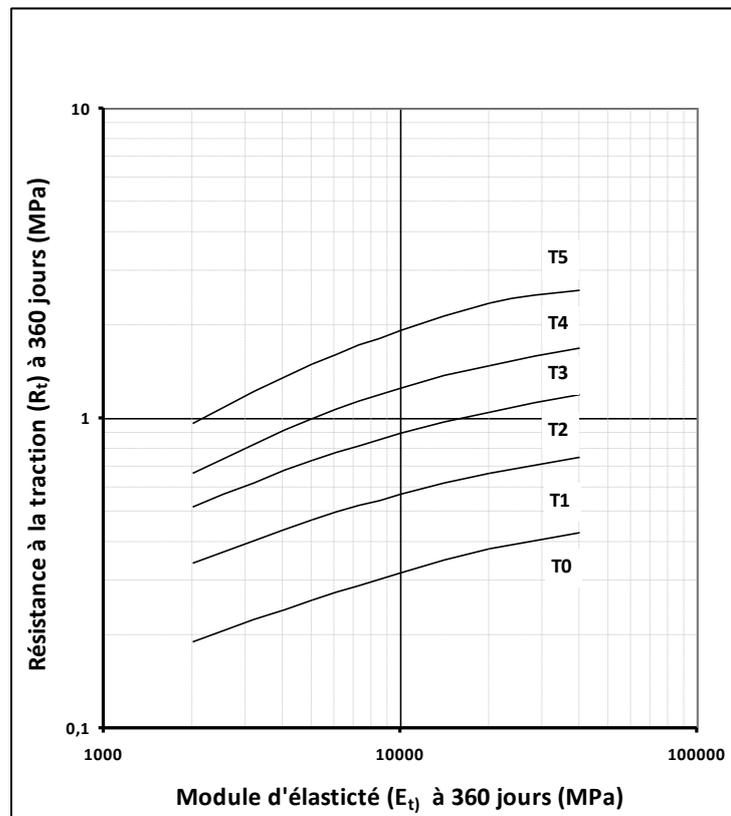
Traditionnellement, les essais en laboratoire sont réalisés à des échéances réduites de 28, 60 et 90 jours selon le type de liant utilisé. On affecte alors aux résultats, un coefficient d'estimation permettant d'estimer les résistances mécaniques à 360 jours. Le tableau I.2 donne les différents coefficients d'estimation en fonction de la nature du liant utilisé [26].

**Tableau 1.2.** Coefficients empiriques en fonction de la nature de liant utilisé [26]

Liant utilisé	Age (jours)	Coefficients d'estimation	
		$R_t/R_{t360}$	$E/E_{360}$
Laitier vitrifié brut ou pré broyé activé (seul)	90	$R_{t90}/R_{t360} = 0,70$	$E_{90}/E_{360} = 0,75$
Ciment normalisé (seul)	28	$R_{t28}/R_{t360} = 0,60$	$E_{28}/E_{360} = 0,65$
Liant spécial routier (seul)	60	$R_{t60}/R_{t360} = 0,65$	$E_{60}/E_{360} = 0,70$
Cendres volantes-chaux (seules)	90	$R_{t90}/R_{t360} = 0,65$	$E_{90}/E_{360} = 0,75$
Mélange de liants	90	$R_{t90}/R_{t360} = 0,70$	$E_{90}/E_{360} = 0,75$

Pour les matériaux traités aux liants hydrauliques, le module d'élasticité et la résistance en traction sont mesurés grâce respectivement à l'essai de compression et celui à la traction par fendage. Ces valeurs sont ensuite reportées sur le diagramme de classification afin d'évaluer

la stabilité du matériau. La norme NF EN 14227-1 [26] a cité les 6 classes de T0 à T5 (Figure 1.6). Elle a également recommandé que les matériaux de classe inférieure à S2 ne soient pas utilisables en couche d'assise de chaussée.



**Figure 1.6.** Classification de matériaux traités aux liants hydrauliques [26]

## 1.6. Travaux réalisés sur le traitement et la valorisation des sables en technique routière

### 1.6.1. Traitement des sables de Landes [CAPDESSUS et CHAUVIN, 1973]

Des études ont été faites par CAPDESSUS H. et CHAUVIN J. J. [1]. Elles portent sur le traitement des sables des Landes caractérisés par une granularité très serrée ; ce qui entraîne un certain nombre de conséquences telles que, la porosité élevée et l'absence totale de cohésion. Pour utiliser de tels sables, il faut donc leur conférer un traitement approprié, une stabilité en relation avec l'emploi envisagé.

Dans cette recherche quatre produits ont été utilisés pour le traitement des sables :

- Le laitier,
- Les cendres volantes,
- Le bitume,
- Les boues carbonatées.

#### a. Traitement des sables de Landes au laitier (sable - laitier)

##### a.1. Formulation de sable – laitier

Le problème de la formulation des sables-laitier se présente sous deux aspects ; paramètres influant sur la stabilité immédiate et paramètre influant sur les performances à long terme.

### • Paramètres influant sur la stabilité immédiate

#### *Coefficient $\alpha$ du laitier*

Plus le coefficient  $\alpha$  est fort, plus sous un compactage donné, le laitier libérera des fines. Ces fines auront une double action : l'amélioration de la cohésion immédiate et l'accélération de la prise [1].

#### *Intensité du compactage*

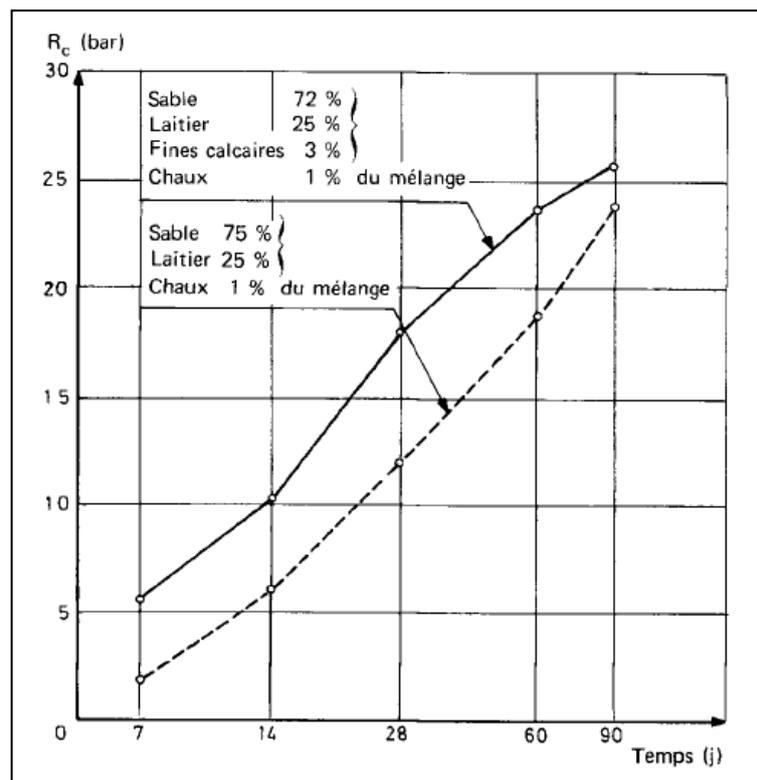
Pour un laitier de coefficient  $\alpha$  donné, plus le compactage sera intense, plus ce laitier libérera de fines, celles-ci ayant le même rôle que précédemment.

#### *Température ambiante*

Il a été constaté en laboratoire et confirmé sur chantier [27], que la température ambiante à la mise en œuvre avait une très grande influence sur la rapidité de la prise.

#### *Addition de substances diverses*

L'addition des Fines calcaires a permis, avec le sable utilisé, d'améliorer de façon substantielle la stabilité immédiate. La figure 1.7 traduit l'amélioration des performances mécaniques. L'ajout de silicate de sodium (ou de potassium) accélère la prise à court terme et améliore la cohésion en provoquant un certain collage des grains [1].



**Figure 1.7.** Amélioration par incorporation de fines calcaires du sable-laitier [1]

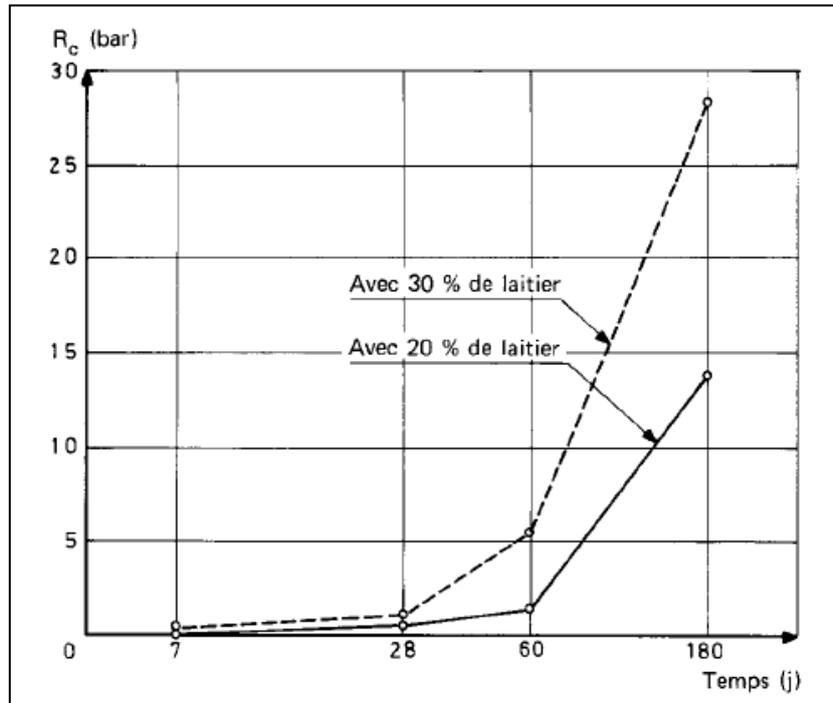
### • Paramètres influant sur les performances à long terme (six mois et plus)

#### *Dosage en laitier*

L'étude de l'évolution de la résistance en compression en fonction du temps confirme que la résistance augmente avec le dosage en laitier (fig.1.8).

### Teneur en matières organiques

Les directives du SETRA fixent un taux maximum de matières organiques dans le mélange ; si la teneur venait à dépasser cette limite, il pourrait en effet y avoir arrêt complet et définitif de la prise [1].



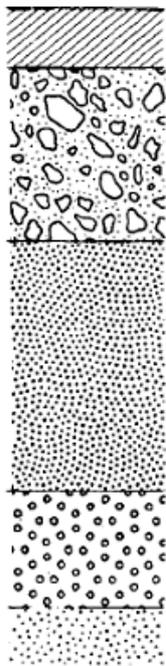
**Figure 1.8.** Evolution de la résistance de sable - laitier en fonction du temps [1]

### a.2. Exemples de réalisation

La technique sable-laitier a fait l'objet d'un certain nombre d'applications. Son utilisation a été déterminée par la présence de sable en abondance et l'incidence du transport non excessive sur le coût du laitier. C'est cette deuxième raison qui fait que, pratiquement, toutes les réalisations ont été faites en zone portuaire, notamment au port autonome de Bordeaux et à La Pallice.

#### Exemple de réalisation : môle d'escale de La Pallice

La figure 1.9 présente la structure de chaussée de l'application de môle d'escale de La Pallice, Le tableau 1.3 donne la formulation et les caractéristiques du mélange sable – laitier.



Nature de la couche	Epaisseur de la couche (cm)	Rôle de la couche
béton bitumineux	5	roulement
grave-laitier	15	base
sable-laitier	20	fondation
0/40 dioritique primaire	10	forme
sable naturel	—	remblai

Figure 1.9. Structure de chaussée de l'application de môle d'escale de La Pallice [1]

Tableau.1.3. Formulation et caractéristiques [1]

Produits	Dosage	Caractéristiques
Sable	80%	- 91% < ES < 95% - 0,05% < matière organiques < 0,07%
Laitier de Gand	20%	- 29 < $\alpha$ < 66 - 0,8% < inertes < 1,5% - 15 % < teneur en eau < 18 %
Chaux grasse	1% du mélange	- Conforme aux spécifications SETRA
Silice de sodium	0,3% du mélange	- Accélérateur de prise
Caractéristiques mécaniques		Résistance à la compression : 1,8 bar à 7 jours et 3,6 bar à 28 jours
Caractéristiques Proctor		- Teneur en eau : 12,5% - Densité sèche : 1,65

### Exemple de réalisation : Port autonome de Bordeaux

La figure 1.10 présente la structure de chaussée de l'application de môle d'escale de La Pallice, le tableau 1.4 donne la formulation et les caractéristiques du mélange sable – laitier.

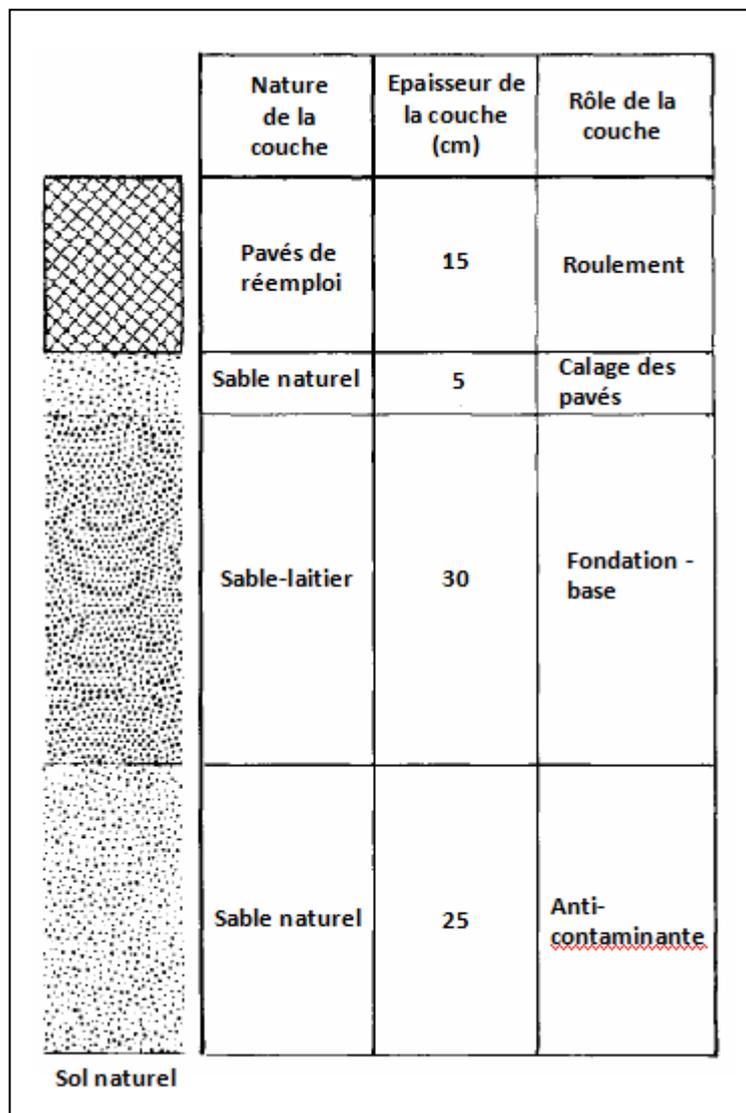


Figure 1.10. Structure de chaussée de l'application de Port autonome de Bordeaux [1]

Tableau.1.4. Formulation et caractéristiques [1]

Produits	Dosages	Caractéristiques
Sable	75%	- Es = 90% - Matières organiques : 0,12%
Laitier	25%	- $40 < \alpha < 100$ - $2\% < \text{inertes} < 10\%$ - Teneur en eau moyenne : 25%
Chaux grasse	1% du mélange	- Conforme aux directives SETRA

## b. Traitement des sables de Landes aux cendres volantes et ciment (ou chaux)

### • Traitement au ciment

La formule retenue est composée de 80% de sable, 20% de cendres volantes et 4% de ciment (du mélange granulaire). La résistance en compression du sable – cendres volantes – ciment augmente avec le temps d'une façon approximativement linéaire (figure 1.11).

### • Traitement à la chaux

L'étude a été réalisée avec une formule composée de 80% de sable, 20% de liant (16% de cendres volantes et 4% de chaux). La résistance en compression du sable – cendres volantes – chaux présente une accélération aux environs de 28 jours (figure 1.11).

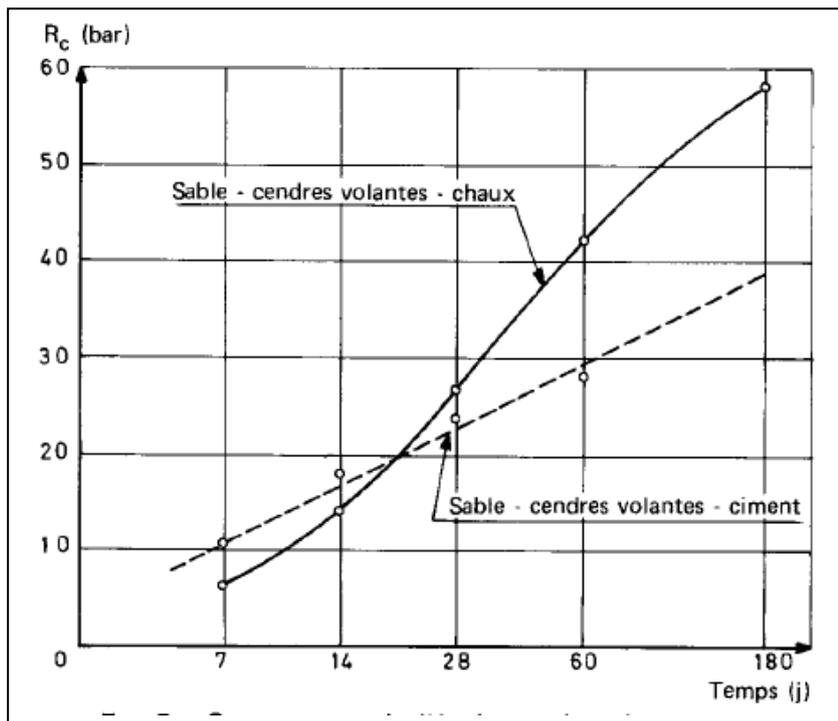


Figure 1.11. Comparaison de l'évolution des résistances [1]

### • Exemple de réalisation : la route touristique de Montalivet - Le Gurp

Le tableau 1.5 présente la structure de chaussée de l'application. Le tableau 1.6 donne la formulation et les caractéristiques du mélange sable – cendres volantes - ciment.

**Tableau 1.5.** Structure de chaussée [1]

Nature de la couche	Epaisseur de la couche (cm)	Rôle de la couche
Enrobés denses à chaud	5	Roulement
Sable – cendres volantes – ciment	15	Base
Grave naturelle	20	Fondation
Limites d'Atterberg $I_p$ inférieur à 12%		

**Tableau 1.6.** Formulation et caractéristiques [1]

Produits	Dosages	Caractéristiques Proctor
Sable de Soulac Cendres volantes	- 80% - 20%	Teneur en eau optimum 9%
Mélange granulaire		
Ciment	- 4% par rapport au mélange granulaire	Densité sèche optimum 1,80

### 1.6.2. Sable traité au ciment et sédiments traités NOVOSOL [NGUYEN, 2008]

L'objectif de travail réalisé par *NGUYEN T. B.* [20] (université de Toulouse) est d'étudier la valorisation de sédiments issus du dragage de cours d'eau en technique routière. Les sédiments de dragage ont été utilisés comme agents de stabilisation pour le traitement d'un sable de classe 0/4.

Les sédiments constituent un dépôt formé par la précipitation de substances d'origine minérale (érosion de sols et des roches), biologique ou organique (décomposition de matières végétales-). Le devenir des sédiments après leur dragage est une problématique actuelle compte tenu de leur volume important et surtout du risque environnemental que présente leur éventuelle contamination [20].

Les sables traités aux liants hydrauliques sont constitués par un sable 0/4, un liant Rolac 425 dosé à 7% et des sédiments traités NOVOSOL. Cinq mélanges de sable traité au liant hydraulique (STLH) ont été étudiés :

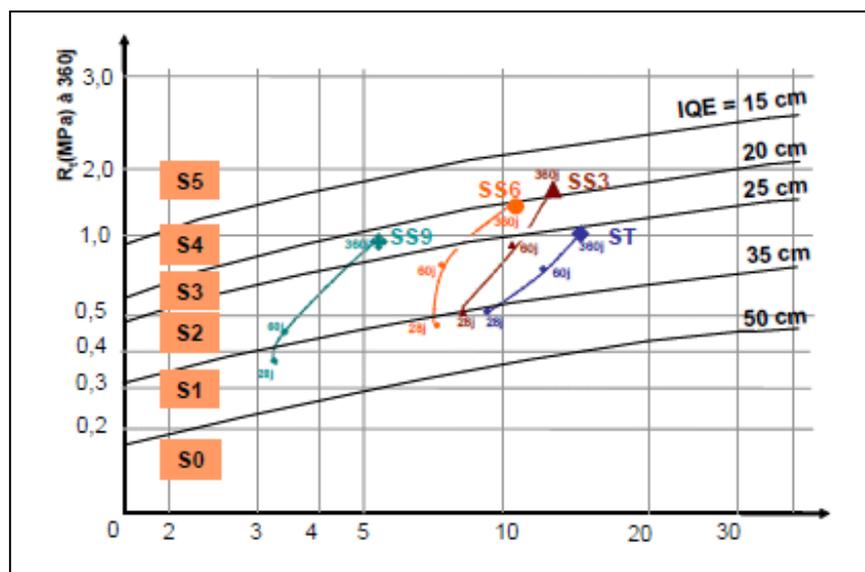
- Un mélange témoin (ST) ne contenant que le sable 0/4 (93%) et le liant Rolac 425 (7%) ;
- Trois mélanges incorporant des sédiments NOVOSOL dans lesquels 30%, 60%, 93% en masse du matériau ont été remplacés par des sédiments NOVOSOL pour former respectivement les mélanges SS3, SS6, SS9 ;

- Un mélange (SS3C) contenant du sable 0/4, 30% de sédiments NOVOSOL et de la chaux éteinte (7%) en remplacement du liant hydraulique. Le tableau 1.7 donne les compositions granulaires des sables traités au liant hydraulique.

**Tableau 1.7.** Composition granulaire des sables traités au liant hydraulique [20]

Constituants	Sables traités aux liants hydrauliques				
	Témoins ST	Matériaux incorporant des sédiments			
		SS3	SS6	SS9	SS3C
Sable 0/4	93%	63%	33%	-	63%
Sédiments traités NOVOSOL	-	30%	60%	93%	30%
Liant ROLAC 425	7%	7%	7%	7%	7%
Chaux éteinte CL 90					7%

Nguyen T. B. a trouvé qu'à 360 jours, le sable témoin (ST) appartient à la classe S2 (figure 1.12) alors que l'ensemble des compositions avec des sédiments traités NOVOSOL appartiennent à des classes supérieures : le sable (SS3) à la classe S4, les sables (SS6) et (SS9) à la classe S3. Nguyen T. B. a conclu que ceci est essentiellement dû aux valeurs de résistance en traction plus élevées pour les sables SS3 et SS6, alors que le module d'élasticité plus faible du SS9 fait que ce matériau est mieux classé que le témoin ST. Le fait d'avoir un matériau de faible rigidité présente un intérêt certain pour le travail des chaussées en STLH [20].



**Figure 1.12.** Classement des sables traités aux liants hydrauliques [20]

Au niveau de l'exigence relative à l'emploi concernant les performances mécaniques, les classes S2 et supérieures des STLH (ST, SS3, SS6, SS9) sont satisfaisantes pour être utilisées en couche d'assise de chaussée [28].

### 1.6.3. Traitement de sable de dragage au sable et ciment (ou ciment et chaux) [DUBOIS, 2008]

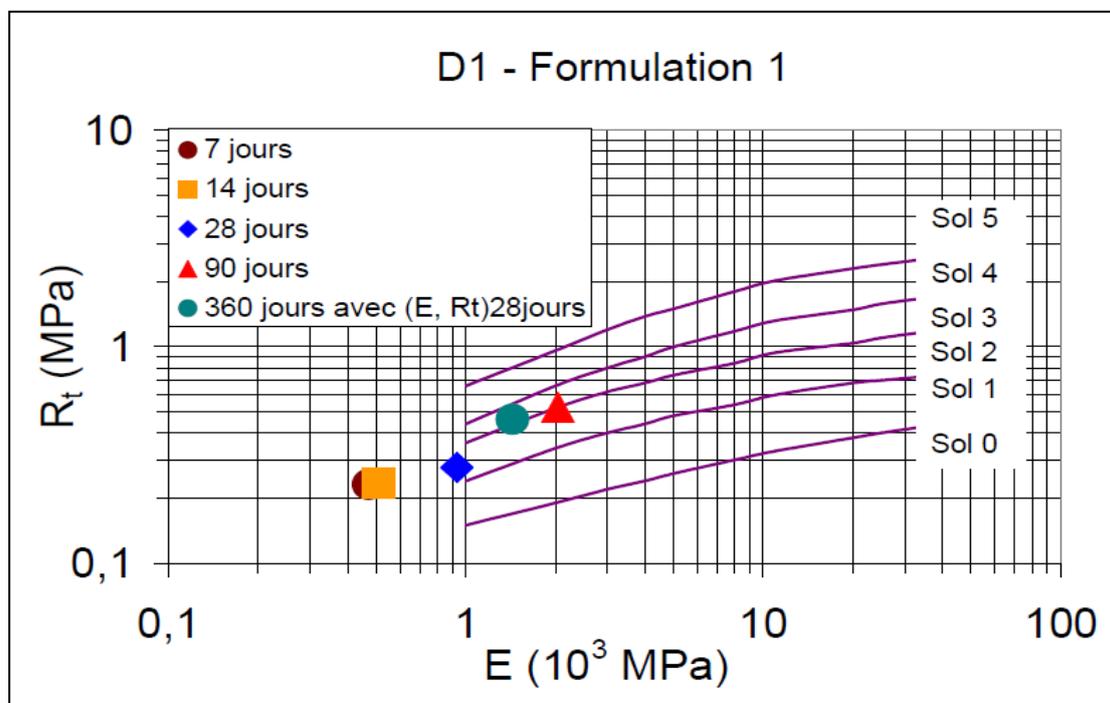
L'objectif de l'étude effectuée par Vincent DUBOIS [25] était de caractériser, sur le plan physique, mécanique, et environnemental, les sables de dragage (SD) des ports de Dunkerque (D1) et de Gravelines (G1), et d'utiliser ces sédiments pour mettre au point un matériau de couche d'assise de chaussée, en s'appuyant sur une démarche de valorisation.

Le traitement consiste en l'ajout d'un sable des carrières du Boulonnais (SB) de classe 0/4 mm et de 6% de ciment CEM I 42.5, ou de 6% de ciment CEM I 42.5 et de 2% de chaux. Ces dosages correspondent à ce qui est habituellement utilisé en technique routière pour le traitement des sols [25]. Le tableau 1.8 représente les formulations étudiées.

**Tableau.1.8.** Formulations étudiées [25]

Formulation	Sédiments	SB	SD	Chaux	Ciment
1	33%	40,9%	20,4%	0%	5,7%
2	33%	0%	61,3%	0%	5,7%
1'	32,4%	40,1%	20,1%	1,85%	5,55%
2'	32,4%	0%	60,2%	1,85%	5,55%

Après l'étude mécanique des matériaux formulés, Vincent DUBOIS a trouvé que les formulations se classent à de bons niveaux d'utilisation, car il est recommandé une classe minimale S2, pour l'utilisation des sols traités en couches d'assises, d'après le guide d'utilisation des matériaux routiers, ce qui est respecté pour toutes les formulations (figure 1.13).



**Figure 1.13.a.** D1 - Formulation: 1 [25]

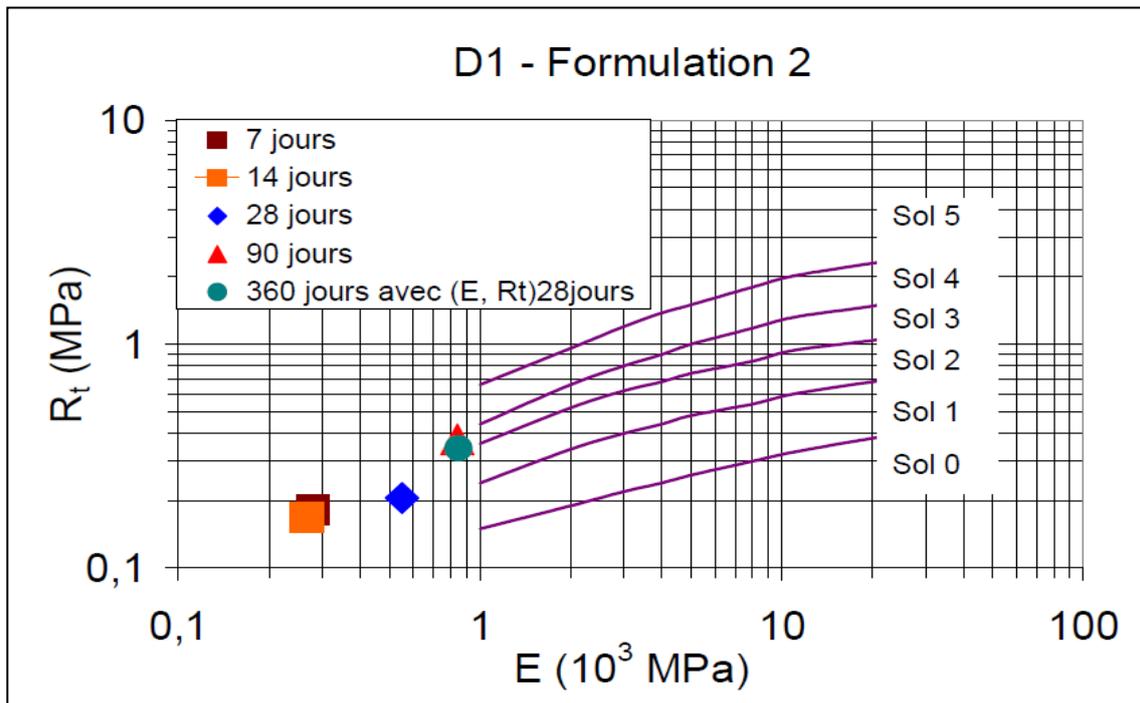


Figure 1.13.b. D1 - Formulation: 2 [25]

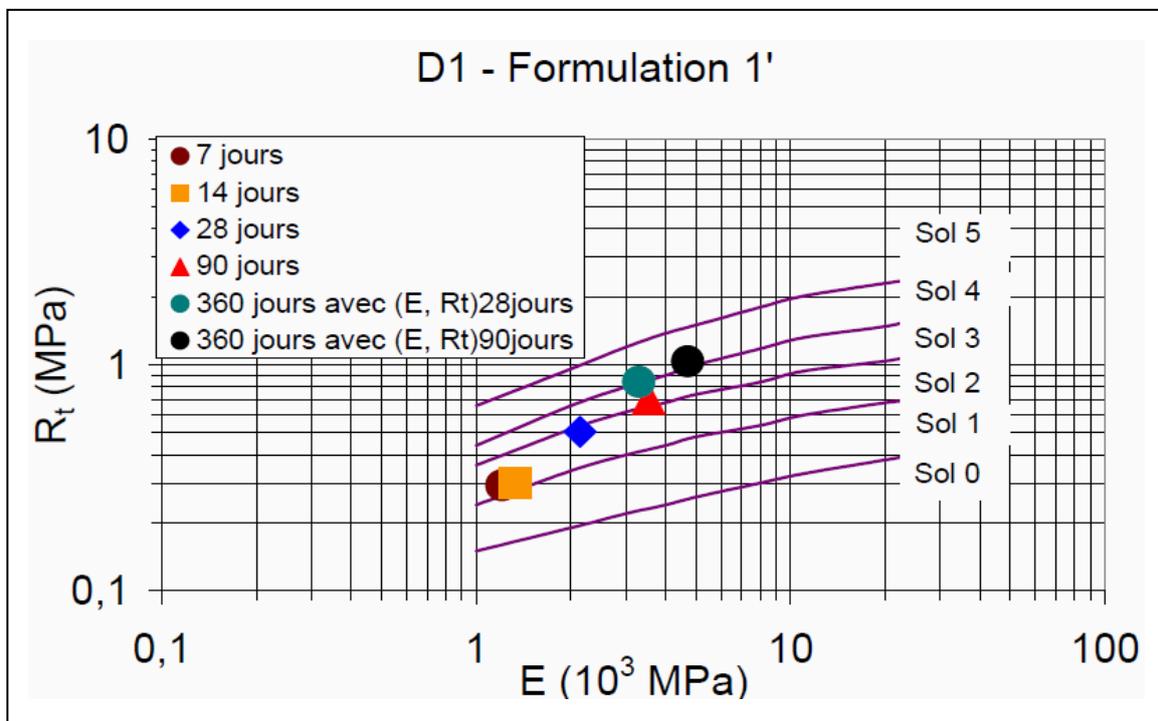


Figure 1.13.c. D1 - Formulation: 1' [25]

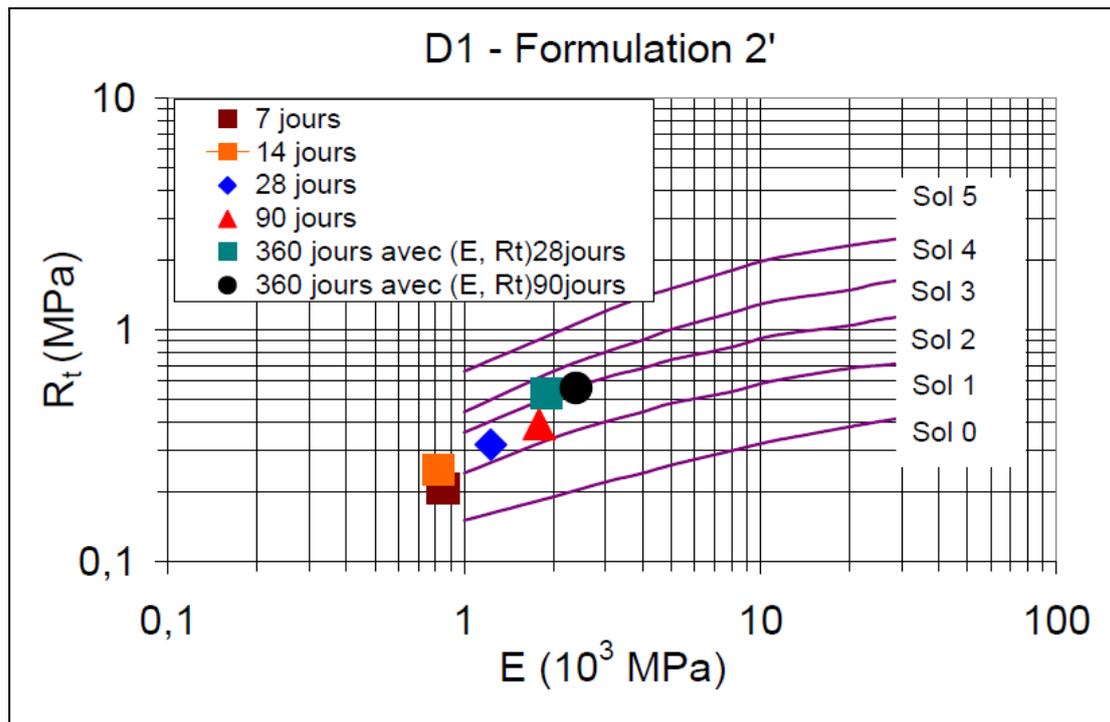


Figure 1.13.d. D1 - Formulation: 2' [25]

#### 1.6.4. Traitement du mélange tuf-sable de dune au ciment et à la chaux [Boulkhiout, 2003]

L'objectif de l'étude réalisée par Boulkhiout [29] (école nationale polytechnique d'Alger) était d'analyser l'effet de l'addition du sable de dune au tuf, dans le souci d'élargir la gamme de matériaux locaux utilisés dans la construction routière. L'étude a porté sur le cas du tuf de la région de Bechar et du sable de dune de Ouargla.

Le sable de dune est incorporé à des dosages en poids variables de 5%, 15%, 25% et 35%. Les différents mélanges tuf – sable de dune ont été soumis aux essais de laboratoires suivants :

- Essai Proctor modifié.
- Essai CBR immergé.
- Essai de compression simple.

Après l'analyse des résultats obtenus, Boulkhiout [29] a conclu que le sable de dune peut être inclus dans le tuf jusqu'à un pourcentage de 25 %, sans affecter ses caractéristiques géotechniques initiales. Elle a constaté que pour ce pourcentage la portance du mélange atteint une valeur maximale ( I. CBR immergé = 30 ) supérieure à celle du tuf seul.

Les traitements du tuf de Bechar mélangé à 25 % de sable de dune d'Ouargla, avec 2% de ciment, ont conduit à une amélioration des performances du mélange traité dépassant 25 bars (tableau 1.9). Le matériau obtenu peut être utilisé en couche de base pour une chaussée à faible trafic de type lourd [29].

**Tableau 1.9.** Valeurs de Rc du tuf + 25% de sable de dune stabilisé à 2% de ciment [29]

Durée de conservation (jours)	Résistance en compression (bars)
04 jours	20,38
14 jours	20,74
28 jours	22,15
60 jours	25,64

Le traitement du mélange tuf – sable de dune avec la chaux aérienne donne des résultats moins importants par rapport au ciment (tableau 1.10), mais toujours, il est possible de l'utiliser comme stabilisant en couche de fondation (Rc supérieure à 15 bars) surtout en considérant les aspects économiques qu'elle présente [28].

**Tableau 1.10.** Valeurs de Rc du tuf + 25% de sable de dune stabilisé à 2% de chaux [29]

Durée de conservation (jours)	Résistance en compression (bars)
04 jours	14,29
14 jours	14,95
28 jours	15,36
60 jours	16,19

## 1.7. Conclusion

Les sables n'ont pas des caractéristiques mécaniques satisfaisantes pour la réalisation des différentes couches de chaussées permettant ainsi de reprendre les sollicitations dues à la circulation. Ils sont pratiquement non compactables et leurs portances sont très faibles, Même après compactage, les résistances mécaniques des sables restent faibles, ceci est dû ;

- Au pourcentage élevé des vides (granulométrie serrée).
- À la finesse des grains.
- Au manque de stabilité suite au manque de cohésion.

Le traitement des sables devient indispensable; il a pour but d'améliorer leurs performances mécaniques en leur conférant des caractéristiques mécaniques et de stabilité suffisantes, leur permettant de résister aux sollicitations imposées.

*Chapitre II*

---

***Caractérisation des matériaux  
utilisés***

---

## 2.1. Introduction

Ce premier chapitre de notre étude expérimentale est consacré à l'identification des matériaux utilisés, d'un point de vue physique, chimique, minéralogique et géotechnique. Ces connaissances permettraient de classer les matériaux étudiés (les sables) selon le Guide des Terrassements Routiers, ainsi que d'identifier des solutions de stabilisation pour les valoriser en technique routière.

## 2.2. Sables

Dans ce travail de recherche, l'expérimentation a été entreprise sur trois sables de dunes de la région de Djelfa: le sable d'El-Masrane (commune de Hassi Bahbah), de Zaafrane et d'El-Amra (commune de Aïn El-Ibil).

### 2.2.1. Site de prélèvement

Le sable d'El-Masrane (symbolisé par SM) est issu de la région d'El-Masrane (commune de Hassi Bahbah) située à environ 35 Kilomètres au nord du chef lieu de la wilaya de Djelfa.

Le sable de Zaafrane (symbolisé par SZ) provient de la commune de Zaafrane située à environ 57 Kilomètres au nord-ouest du chef lieu de la wilaya de Djelfa.

Le sable Aïn El-Ibil (symbolisé par SA) a été prélevé à la proximité du village El-Amra (commune de Aïn El-Ibil) situé à environ 40 Kilomètres au sud-ouest du chef lieu de la wilaya de Djelfa. La figure 2.1 donne la localisation des sables étudiés.

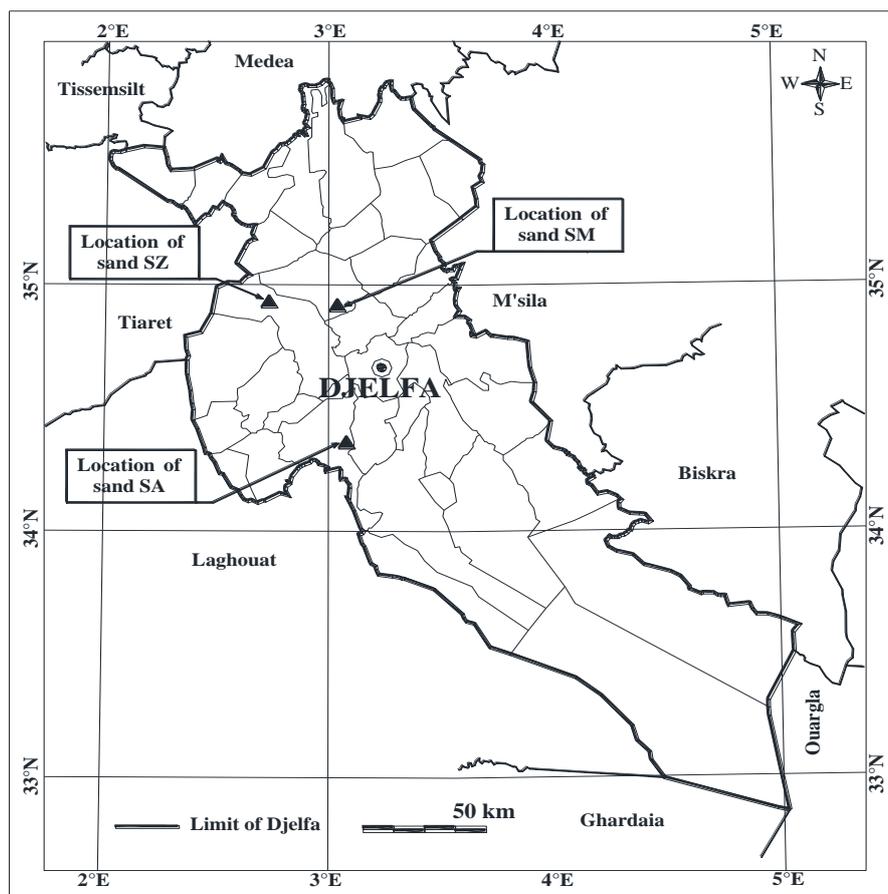


Figure 2.1. Localisation des sables étudiés

### 2.2.2. Analyse des propriétés physiques

Il s'agit ici de déterminer les caractéristiques physiques des sables étudiés. C'est une étape nécessaire avant toute tentative de valorisation de ces matériaux comme constituant des chaussées. Les paramètres retenus sont ceux définis dans le guide GTR 2000 [8]; teneur en eau, granulométrie, masse volumique apparente et absolue, équivalent de sable, module de finesse.

#### 2.2.2.1. Teneur en eau naturelle

Nous avons évalué la teneur en eau naturelle  $w_N$  des sables utilisés par étuvage à 105°C en respectant un temps de séchage de 24h. Pour chacun des essais, trois échantillons de 100 grammes ont été prélevés ; la précision de la balance utilisée est de 0.001 g. Le tableau 2.1. présente les résultats moyennés.

**Tableau 2.1.** Teneurs en eau naturelles des sables étudiés

Région	Date de prélèvement	Teneur en eau naturelle (%)
Sable SM	08/09/2009	2.8
Sable SZ	02/09/2010	1.2
Sable SA	08/11/2010	0.9

#### 2.2.2.2. Masse volumique

##### a. Masse volumique apparente

Nous avons mesuré la masse volumique apparente des sables de dunes étudiés, par la détermination de la masse d'un remplissage d'une mesure de un litre, qui doit être effectué sans aucun tassement. 3 essais ont été effectués. La précision de la balance utilisée est de 0.1 grammes. Les valeurs moyennes obtenues sont représentées sur le tableau 2.2:

**Tableau 2.2.** Masses volumiques apparentes des sables étudiés

Région	Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )
Sable SM	1.40
Sable SZ	1.44
Sable SA	1.42

##### b. Masse volumique absolue

La masse volumique absolue des sables étudiés a été mesurée à l'aide du densimètre de Le Châtelier. Connaissant la masse du densimètre rempli d'eau jusqu'au trait repère soit ( $M_1$ ), on introduit l'échantillon étudié, jusqu'à ce que le niveau de l'eau soit dans la partie de la graduation supérieure. On le pèse soit ( $M_2$ ) et on note le volume soit ( $V$ ).

$$\text{D'où la masse volumique: } MV_{abs} = \frac{M_2 - M_1}{V}$$

La mesure a été effectuée sur 3 échantillons de 60 grammes chacun. La précision de la lecture de volume d'eau est de 0.1 cm<sup>3</sup>, la précision de la balance utilisée est de 0,01 grammes. Nous avons obtenu une valeur moyenne sur les 3 échantillons.

**Tableau 2.3.** Masses volumiques absolues des sables étudiés.

Région	Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )
Sable SM	2.58
Sable SZ	2.56
Sable SA	2.60

### 2.2.2.3. Compacité et porosité

La connaissance de la compacité et de la porosité des sables étudiés est indispensable, car ces caractéristiques influent fortement sur la résistance mécanique de matériau projeté. Des matériaux ayant une compacité maximale et par conséquent une porosité minimale sont recherchés.

La détermination de la porosité et de la compacité des sables utilisés peut être introduite de la masse volumique apparente et absolue en utilisant les formules suivantes:

$$P(\%) = \left( 1 - \frac{MV_{app}}{MV_{abs}} \right) \times 100 \text{ et } C(\%) = 100 - P(\%)$$

**Tableau 2.4.** Porosités et compacités des sables étudiés.

Région	Porosité (%)	Compacité (%)
Sable SM	46	54
Sable SZ	44	56
Sable SA	45	55

Les sables étudiés présentent une forte porosité (de l'ordre de 45 %), et par conséquent leur utilisation directe donne forcément des performances médiocres, ce qui impose l'addition de correcteur granulaire pour corriger leur mauvaise compacité.

### 2.2.2.4. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des fillers (dimension nominale inférieure ou égale à 0.080 mm).

Dans le secteur des travaux routiers, pour une classification des matériaux selon le «Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme» [8], la distribution granulométrique constitue le premier paramètre d'entrée dans les tables de classification. Dans cette étude, les courbes granulométriques des sables étudiés ont été établies à l'aide d'un essai granulométrique par tamisage.

Cet essai normalisé (Norme NFP 94-056) nous permet de déterminer la répartition des grains de sable suivant leurs grosseurs [30]. Cette répartition est traduite par les courbes granulométriques de la figure 2.2.

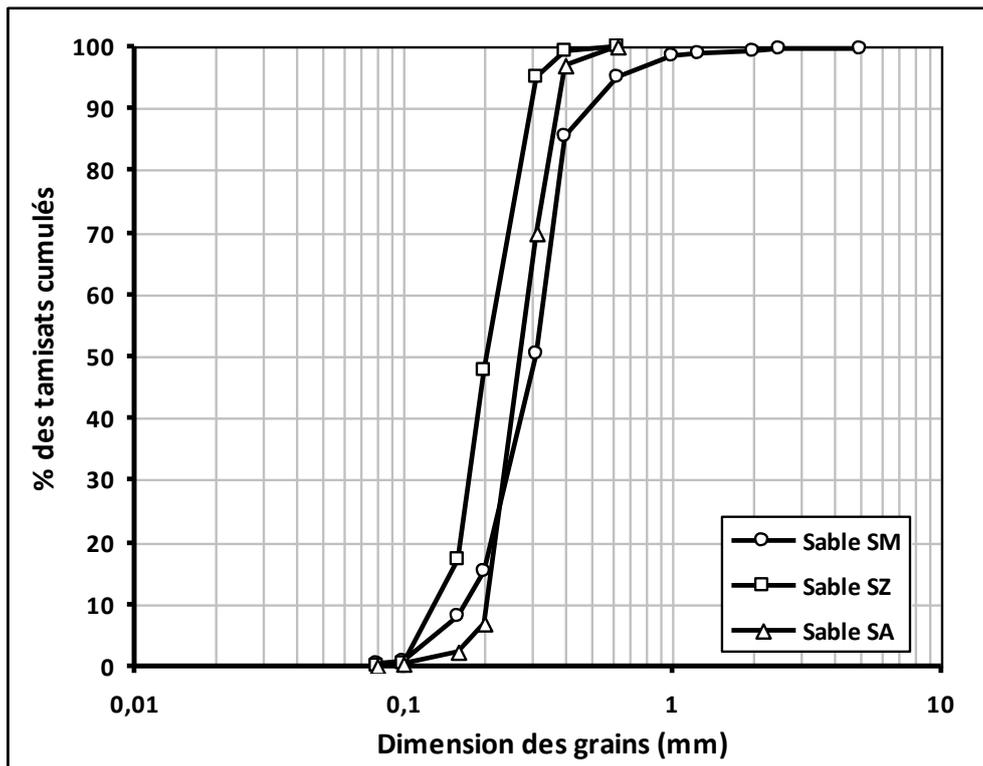


Figure 2.2. Courbes granulométriques des sables étudiés

#### Remarque:

D'après les courbes granulométriques, on remarque que la granulométrie correspondant au sable SM est plus étalée que celles de SZ et SA. Cela nous laisse préjuger que le sable SM pourrait donner des performances mécaniques meilleures que les autres sables.

#### a. Catégorie selon la granularité

On distingue trois catégories de sables [9]:

- Grossier: plus de 20 % des éléments sont supérieurs à 2 mm et plus de 50 % des éléments supérieurs à 80 microns sont compris entre 0.5 et 5 mm.
- Moyen : moins de 20 % des éléments sont supérieurs à 2 mm et plus de 50 % des éléments supérieurs à 80 microns sont compris entre 0.2 et 2 mm.
- Fin : plus de 75 % des éléments supérieurs à 80 Microns sont inférieurs à 0.5 mm.

**Tableau 2.5.** Granularité des sables étudiés.

Région	Sable SM	Sable SZ	Sable SA
Granularité (0/D)	0/0.63 mm	0/0.315 mm	0/0.4 mm
% Passant à 80 µm	5	1	0
% Passant à 2 mm	100	100	100
% sup à 80 µm et inf à < 0.5 mm	95	100	100
Catégorie de sable	Fin	Fin	Fin

L'analyse granulométrique des trois sables montre clairement que 90% d'éléments sont inférieurs à 0,5 mm, ce qui indique que ces sables peuvent être classés d'un point de vue granulaire comme des sables fins.

La granulométrie est très serrée ; près de 90 % des grains ont une dimension comprise entre 0,1 mm et 0,5 mm. Cela nous laisse supposer que le sable seul ne pourra pas avoir une compacité suffisamment grande, et par la suite des performances mécaniques (résistance en compression et en traction, portance...) non adéquates. Un traitement aux liants hydrauliques et l'utilisation d'un correcteur granulaire se révéleront certainement nécessaires [31, 32, 33].

#### b. Module de finesse

Le module de finesse d'un granulat est égal au centième de la somme des refus, exprimés en pourcentages sur les différents tamis de la série suivante: 0.160 – 0.315 – 0.630 – 1.250 – 2.5 – 5 – 10 – 20 – 40 – 80 mm

Le module de finesse est plus particulièrement appliqué aux sables dont il est une caractéristique importante. Un module de finesse est d'autant plus faible que le granulat est riche en éléments fins.

**Tableau 2.6.** Modules de finesse des sables étudiés.

Région	Module de finesse
Sable SM	1.47
Sable SZ	0.88
Sable SA	1.28

Les valeurs de module de finesse des sables étudiés confirment le manque de grains moyens et grossiers. Rappelons que pour un sable à béton traditionnel, le module de finesse est compris entre 2.20 et 2.80.

#### 2.2.2.5. Equivalent de sable

L'équivalent de sable [34] (Norme NF EN 933-8) n'est intéressant que pour caractériser les sols sableux contenant une faible quantité de particules fines. Il est surtout utilisé pour les granulats routiers et les sables pour béton.

L'équivalent de sable est désigné par ESV (visuelle) ou ESP (au piston), selon la méthode de mesure.

**Tableau 2.7.** Propreté des sables étudiés.

Région	ESV	ESP
Sable SM	74 %	71 %
Sable SZ	53 %	44 %
Sable SA	57 %	52 %

A partir des résultats obtenus, on peut conclure que les sables étudiés ne sont pas propres (ES inférieur à 75 %).

### 2.2.3. Analyse des propriétés chimiques

L'analyse chimique [35] (NF EN 1744-1) a été réalisée afin de déterminer le pourcentage de matières organiques, les sulfates et chlorures contenus dans les sables étudiés. Ces éléments peuvent perturber les résultats au-delà des limites admissibles. Cette analyse a été effectuée au sein du laboratoire sud de l'habitat et d'urbanisme, unité de Djelfa.

#### 2.2.3.1. Nature des sables utilisés

La constatation importante à signaler est la présence d'un fort pourcentage en silice qui est supérieur à 90%, et par conséquent, les sables étudiés sont siliceux. Le tableau 2.8 donne la teneur en silice pour chaque sable.

**Tableau 2.8.** Teneurs en silice

Région	Silice (%)
Sable SM	97.63
Sable SZ	97.43
Sable SA	97.14

#### 2.2.3.2. Valeur au bleu de méthylène

Cet essai (norme NF P 94-068) [36] est une mesure indirecte de la surface spécifique des grains solides par adsorption d'une solution de bleu de méthylène jusqu'à saturation.

L'essai consiste à introduire progressivement du bleu de méthylène dans une suspension de matériau maintenue en agitation. On prélève périodiquement, à l'aide d'une baguette de verre, une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre. Dès qu'une auréole bleutée apparaît autour de la tâche, on considère que l'absorption du bleu de méthylène sur les particules d'argiles est terminée.

Le résultat, VBS, s'exprime en grammes de bleu pour 100 g de sable étudié.

**Tableau 2.9.** Valeurs au bleu des sables étudiés.

Région	Valeur au bleu de méthylène
Sable SM	0.09
Sable SZ	0.07
Sable SA	0.06

Selon le GTR 2000 [8] et en fonction de la valeur au bleu de méthylène trouvée, les trois sables sont placés dans le groupe des sols sableux (Figure 2.3).

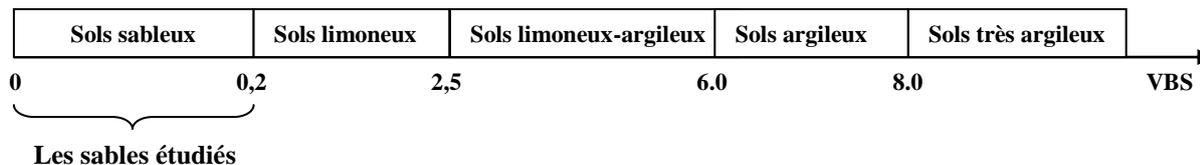


Figure 2.3. Propreté des sables étudiés

### 2.2.3.3. Teneur en matières organiques

L'origine des matières organiques est très diverse; il s'agit soit de débris végétaux soit de micro-organismes. La présence de matières organiques en quantité notable modifie considérablement le comportement des mélanges sable-ciment et remet en cause leur stabilité volumique dans le temps.

La mesure du pourcentage pondéral de matières organiques (MO) se fait par l'analyse chimique (norme NF P 94-055) [37].

Un sol peut être considéré comme organique lorsque la teneur en matières organiques est supérieure à 3 %.

Cette analyse a donné pour nos sables les résultats du tableau 2.10. :

Tableau 2.10. Teneurs en matières organiques

Région	Teneur en matières organiques (%)
Sable SM	1.17
Sable SZ	0.93
Sable SA	0.76

Les sables étudiés présentent des teneurs en matières organiques inférieures à 3%. Ceci nous permet de conclure que ces sables ne sont pas organiques et qu'ils sont parfaitement convenables, de ce point de vue, pour notre étude.

### 2.3.3.4. Teneur en sulfates

Les sulfates généralement rencontrés dans les sols sont les sulfates de magnésium ( $Mg SO_4$ ) et les sulfates de sodium ( $Na_2 SO_4$ ); les plus fréquents encore sont les sulfates de calcium ( $Ca SO_4$ ) rencontrés dans les sols gypseux.

Ces sulfates, s'ils sont présents en quantités non tolérables, peuvent attaquer la pâte du ciment par l'intermédiaire de la réaction chimique avec les aluminates.

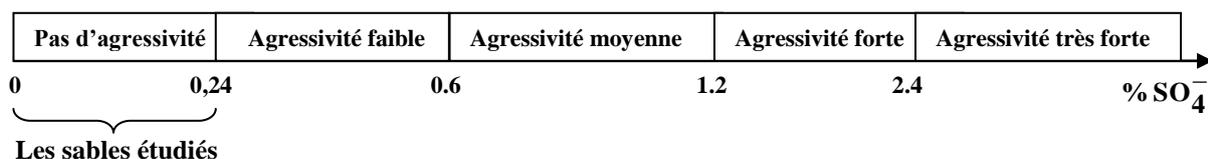


Le produit obtenu (Hydro-sulfo-aluminate de calcium), en se cristallisant provoque des contraintes internes dans la matrice du ciment d'où résulte une destruction progressive de la pâte. La quantité totale des sulfates est déterminée par une analyse chimique selon la norme NF P 18-582.

**Tableau 2.11.** Teneurs en sulfates

Région	Teneur en sulfates (%)
Sable SM	Traces
Sable SZ	Traces
Sable SA	Traces

Selon la norme NF P 18-011 [19], Les trois sables sont placés dans la classe des sols non agressifs (figure 2.4). Ceci nous permettons de recommander pour notre étude, un ciment portland courant comme liant ou agent de stabilisation. Alors le choix d'un ciment de classe CPA ou CPJ est très convenable.

**Figure 2.4.** Agressivité des sables étudiés

### 2.2.3.5. Teneur en chlorures

Les chlorures sont présents dans le sol sous forme de sel (NaCl). Ils modifient la cinétique d'hydratation du ciment. Selon la norme NF P 18-011 [19], Le sable pour béton non armé est considéré comme agressif lorsque la teneur en chlorure dépasse le taux de 1%.

Les taux de chlorures contenus dans les sables étudiés sont déterminés par une analyse chimique selon la norme NF P 18-583.

**Tableau 2.12.** Teneurs en chlorures

Région	Teneur en chlorures (%)
Sable SM	0.85
Sable SZ	0.82
Sable SA	0.78

Les sables étudiés contiennent moins de 1% de chlorures. Ce qui exprime la non agressivité de ces sables.

### 2.2.4. Nature minéralogique des sables étudiés

L'analyse par diffraction des rayons X en utilisant la méthode des poudres, trouve sa principale utilisation dans l'identification des minéraux. Chaque corps cristallin produit un spectre ou diffractogramme X, qui reflète sa structure interne et la nature des minéraux [38]. À cet effet, nous avons analysé par diffraction aux rayons X les sables de dunes étudiés pour mettre en évidence leur nature minéralogique.

L'essai est effectué au laboratoire de physique de l'université Amar Telidj de Laghouat. L'appareil utilisé est un diffractomètre X'PERT PRO (Figure 2.5) couplé à un système informatique, permettant l'exploitation et le tracé des résultats acquis. Les résultats de ces analyses sont présentés dans les figures 2.6, 2.7 et 2.8.



Figure 2.5. Diffractomètre utilisé

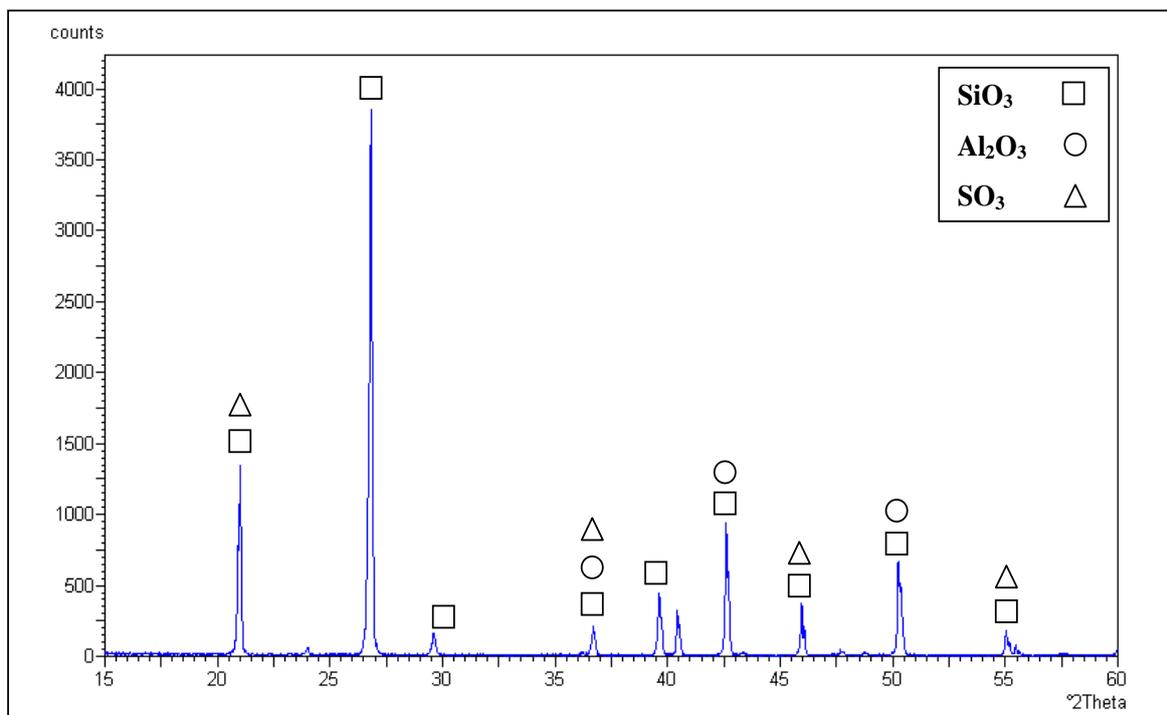
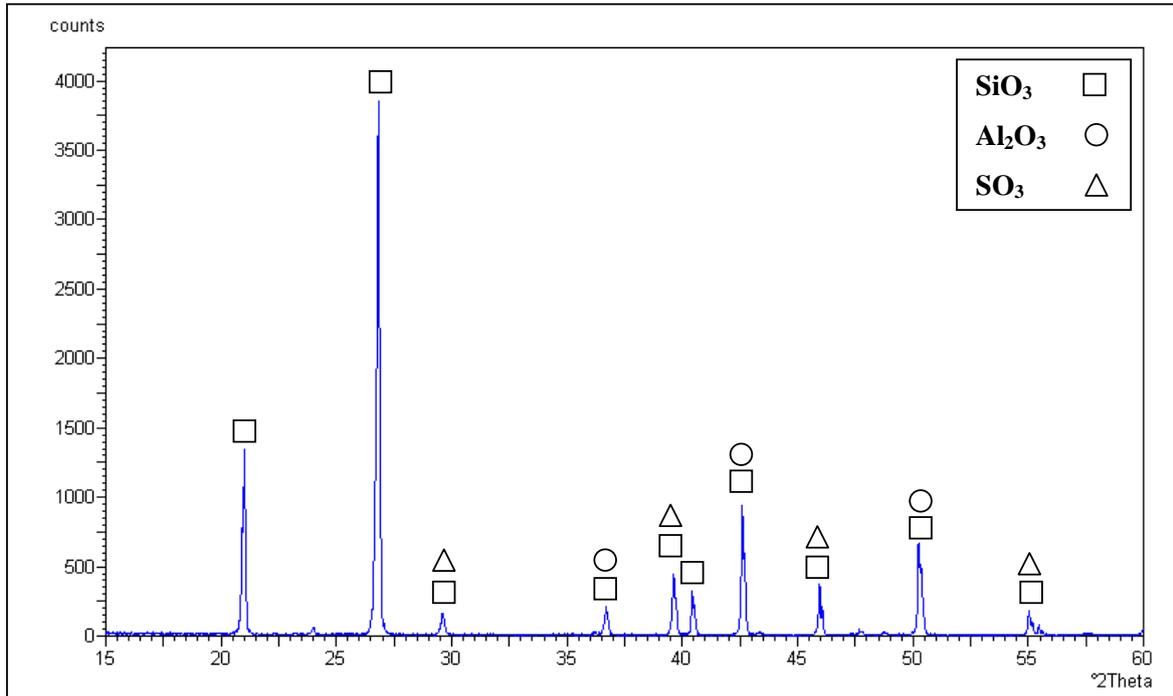
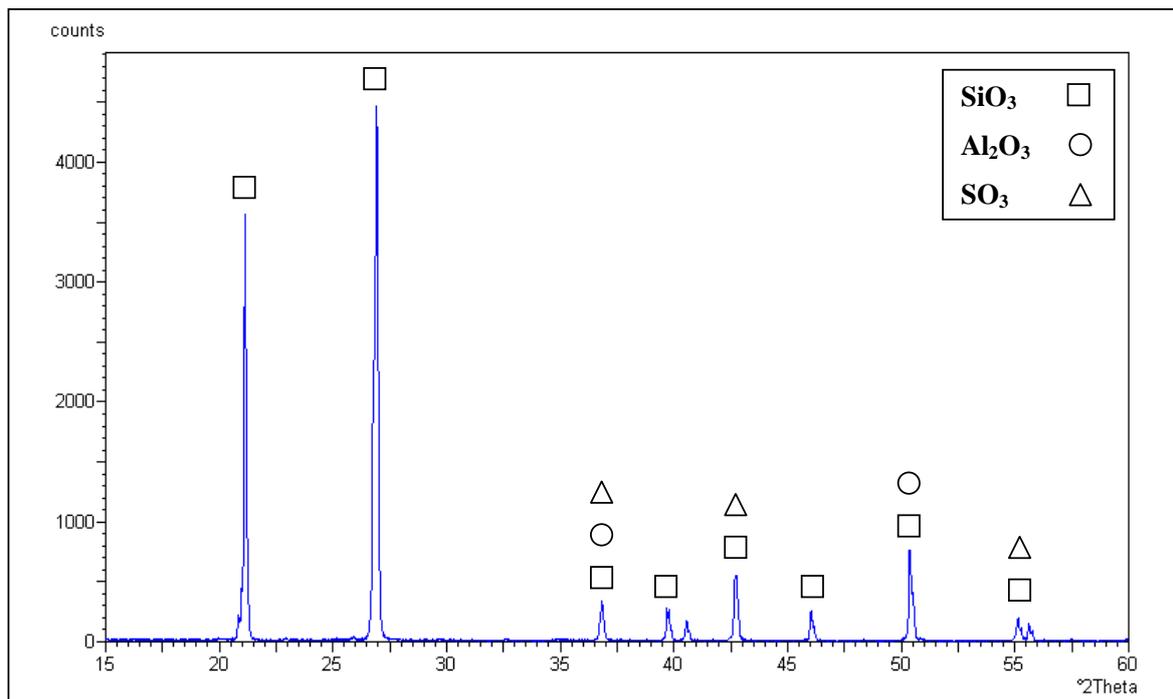


Figure.2.6. Analyse diffractométrique du sable SM



**Figure 2.7.** Analyse diffractométrique du sable SZ



**Figure 2.8.** Analyse diffractométrique du Sable SA

L'analyse minéralogique des sables étudiés révèle la présence d'atomes Si et O, ce qui correspond à la présence de l'espèce  $\text{SiO}_2$  (silice). De plus, le pourcentage atomique important de Si nous indique que  $\text{SiO}_2$  est l'espèce prépondérante. Les autres valeurs de pourcentages atomiques nous permettent d'établir que les sables étudiés contiennent aussi quelques traces, en comparaison avec  $\text{SiO}_2$ , tel que  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{SO}_3$ .

### 2.2.5. Caractérisation de compactage

Les sables étudiés sont compactés à l'énergie Proctor normal selon la norme NF P 94-093 [39]. L'essai consiste à déterminer l'optimum Proctor qui correspond à la portance maximale du sol. L'optimum Proctor est déterminé par le point maximal de la courbe qui donne la teneur en eau optimale pour une densité sèche maximale. La figure 2.9 représente les courbes Proctor des trois sables étudiés.

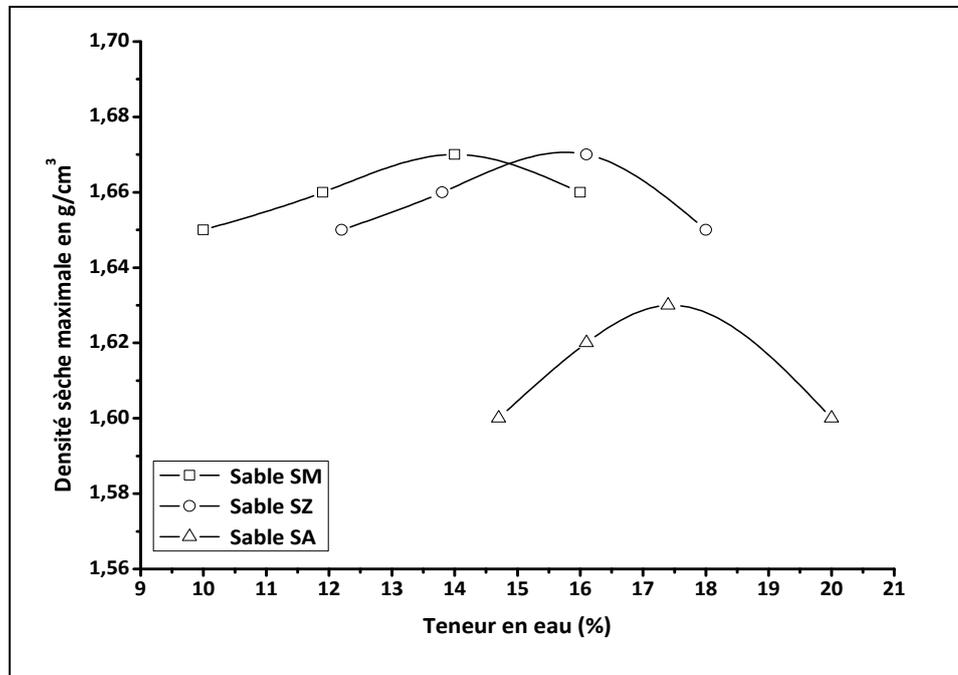


Figure 2.9. Courbes Proctor des sables étudiés

A partir de ces courbes, on peut ressortir les paramètres fondamentaux de cet essai (paramètres de Proctor), qui sont la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale. Les résultats sont regroupés dans le tableau 2.13.

Tableau 2.13. Résultats de l'essai Proctor

Région	Teneur en eau optimale (%)	Densité sèche maximale (g/cm <sup>3</sup> )
Sable SM	14	1,67
Sable SZ	15,9	1,67
Sable SA	17,1	1,63

D'après les courbes Proctor des sables étudiés on constate que, les sables SM et SZ ont une densité sèche maximale ( $\gamma_d = 1.67 \text{ g/cm}^3$ ) supérieure à celle obtenue avec le sable SA ( $\gamma_d = 1.63 \text{ g/cm}^3$ ). La teneur en eau optimale obtenue avec le sable SM est inférieure à celle obtenue avec le sable SZ, celle de sable SA est la plus élevée (tableau 2.13). Cette différence peut être expliquée par la distinction de la granulométrie pour chaque sable.

### 2.2.6. Classification des sables étudiés selon le GTR

Selon le Guide des Terrassements Routiers [8], et du point de vue granulométrique, les trois sables étudiés se classent comme des sols fins, assimilés aux classes D<sub>1</sub>, B<sub>1</sub> ou B<sub>2</sub>, définis comme des matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 50 mm et dont la proportion des fines est inférieure à 12%, et le pourcentage des passants à 2 mm est supérieure à 70 %.

La classe de nos sables est déterminée en fonction de l'activité argileuse (VBS). Avec une valeur de VBS inférieure à 0.1, les sables étudiés appartiennent à la classe D1 (Figure 2.10).

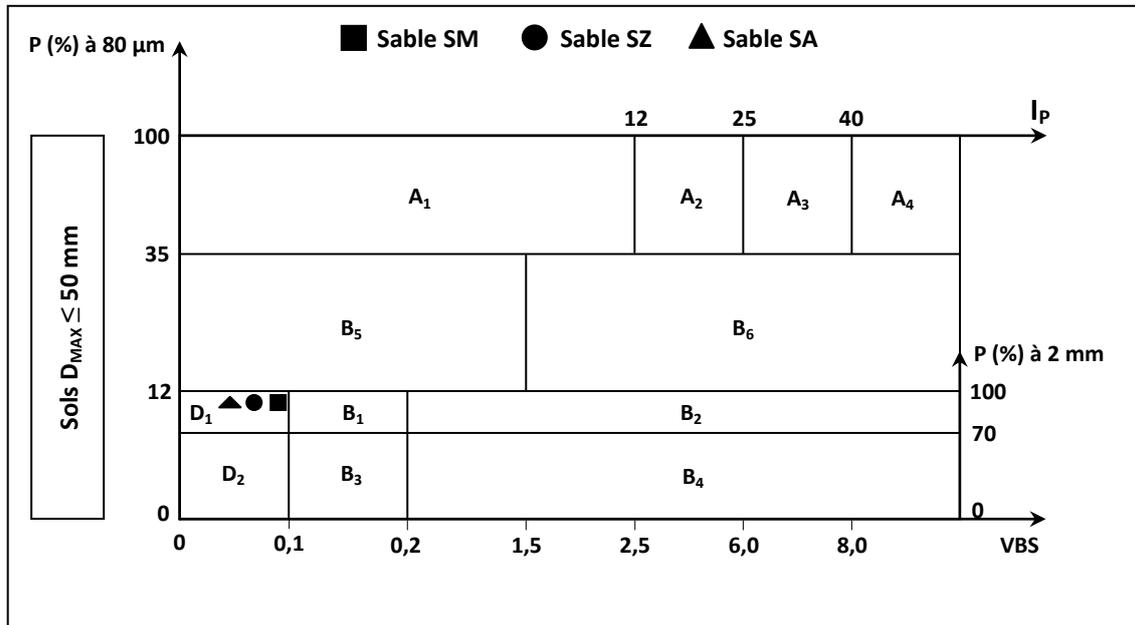


Figure 2.10. Classification des sables étudiés selon le GTR 2000

### 2.2.7. Coût

Le coût des trois sables est très compétitif par rapport aux autres matériaux de construction tel que ; le sable de rivière, gravier concassé, ...etc. Il est obtenu gratuitement, si l'on excepte le prix du chargement et du transport de l'endroit de prélèvement jusqu'au lieu d'expérimentation.

### 2.3. Agents de stabilisation

Comme il a été précisé précédemment; les sables étudiés se caractérisent par une granulométrie mal graduée et de petit calibre. L'utilisation de sable seul ne pourrait pas donner une compacité suffisamment grande, ce qui influe négativement sur les performances mécaniques voulues tel que; la résistance à la compression, la résistance à la traction, la portance, ...etc. Un traitement aux liants hydrauliques et l'utilisation d'un correcteur granulaire se révéleront certainement nécessaires.

Dans notre étude la stabilisation des sables étudiés a été faite par l'addition de deux agents de stabilisation; un sable fillérisé (correcteur granulaire) (symbolisé par SF) et un ciment CPJ 42,5 (liant hydraulique). Cette partie du présent chapitre expose les différentes caractéristiques physiques et chimiques de ces agents de stabilisation.

#### 2.3.1. Correcteur granulaire

La finesse des grains de sables de dune étudiés qui forment un corps moins rigide, nécessitant l'ajout d'un matériau riche en grains anguleux en vue d'augmenter la cohésion entre ses grains [15]. Il est nécessaire aussi d'incorporer des fines d'apport lorsque les fines naturelles du sable n'atteignent pas un pourcentage de l'ordre de 5% du mélange [15]. La meilleure solution pour atteindre cet objectif consiste à incorporer au sable à stabiliser un sable concassé ou broyé [9, 15], qui apporte, outre les fines nécessaires, une certaine angularité et une correction granulométrique favorable à la stabilisation.

Le correcteur granulaire utilisé est un sable concassé riche en éléments fins. L'apport de ce sable consiste à améliorer la granulométrie des sables étudiés (porosité de l'ordre de 45%) afin de réduire ces vides. Cette augmentation de la compacité permet de développer de meilleures performances mécaniques.

### 2.3.1.1. Origine

Ce sable provient du centre de concassage Ben Labiad (commune de Zakkar) situé à environ 40 Kilomètres au sud-est du chef lieu de la wilaya de Djelfa. (Figure 2.11)

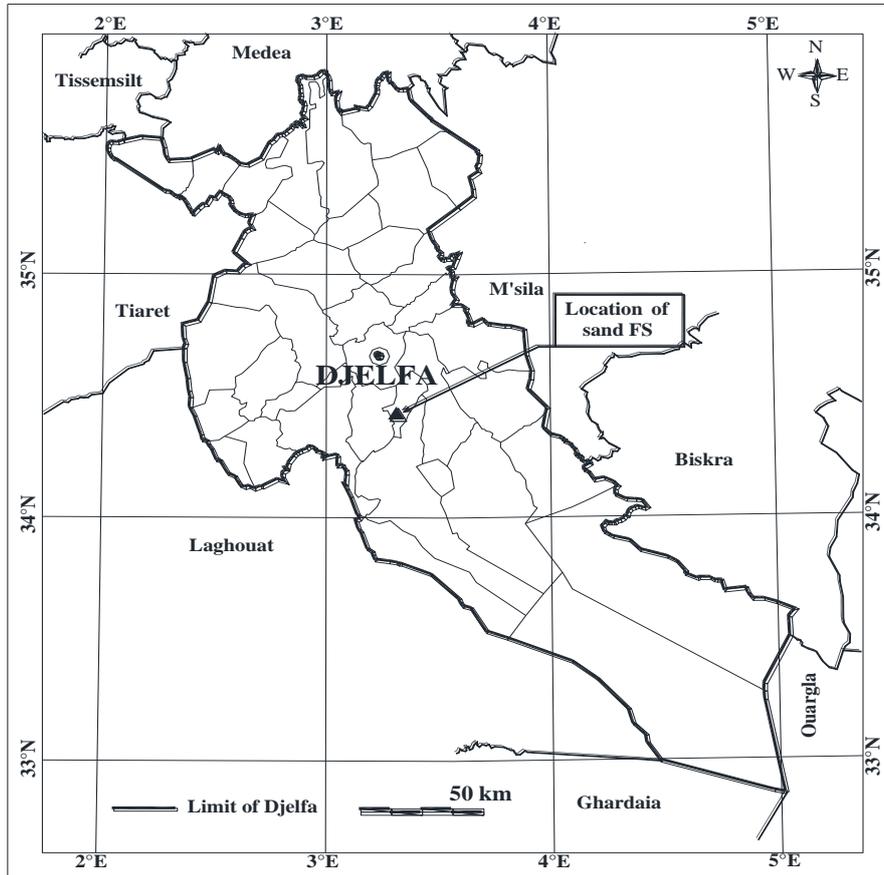


Figure 2.11. Localisation de sable fillérisé

### 2.3.1.2. Analyse des propriétés physiques

#### a. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique de sable fillérisé a été faite par deux voies d'analyse: analyse granulométrique par tamisage (pour la fraction supérieures à 0,080 mm), et analyse granulométrique par sédimentation (pour la fraction inférieure à 0,080 mm). Cet essai a été effectué au laboratoire LNHC –SUD unité de Djelfa.

L'analyse granulométrique par sédimentation s'adresse à des échantillons de sols ne contenant que des éléments de diamètre inférieur à 0.080 mm, c'est-à-dire ce qui est désigné sous l'appellation de fillers (ou fines) [40]

Cet essai complète l'analyse granulométrique par tamisage qui est limitée aux grains de diamètre supérieur à 0.080 mm. Elle permet de tracer la courbe granulométrique des éléments fins jusqu'à un diamètre d'environ 2  $\mu\text{m}$ .

Après tamisage à l'eau, pour séparer la fraction supérieure et inférieure à 0,080 mm, le passant est analysé par la méthode sédimentométrique (norme NF P 94-057) [41], le refus par tamisage standard (norme NFP 94-056). La courbe globale est construite grâce aux pourcentages massiques des deux fractions. La figure 2.12 présente la courbe granulométrique du sable SF

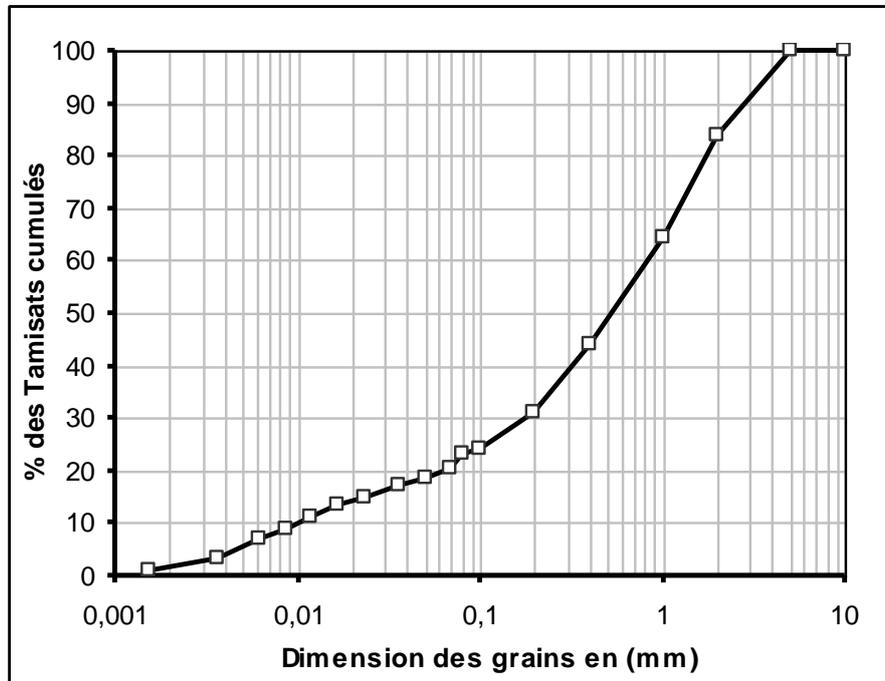


Figure 2.12. Courbe granulométrique du Sable Fillérisé.

### b. Masses volumiques

Les masses volumiques absolue et apparente ont été mesurées avec le même processus de mesure décrit dans au paragraphe 2.2.2.2. Les masses volumiques obtenues sont les suivantes :

- Masse volumique apparente: 1,67 g/cm<sup>3</sup>
- Masse volumique absolue: 2,64 g/cm<sup>3</sup>

### 2.3.1.3 Analyse chimique

La composition chimique du sable SF est présentée dans le tableau 2.14.

Tableau 2.14. Composition chimique du sable fillérisé

Carbonates (CaCO <sub>3</sub> )	Silice (SiO <sub>2</sub> )	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> et Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sulfates (SO <sub>4</sub> )	Chlorures (NaCl)
95.23 %	2,37%	1,41%	Traces	0,23%

On peut constater d'après le tableau 2.14 que notre sable SF est constitué essentiellement de carbonates (CaCO<sub>3</sub>); les éléments nocifs (les sulfates et les chlorures) sont pratiquement inexistantes.

### 2.3.1.4 Coût

Le prix d'un mètre cube de sable SF est de l'ordre de 100 DA (Hors coût du transport). Il est très compétitif par rapport aux autres agents de stabilisation tel que ; le ciment, la chaux, le laitier, ...etc.

### 2.3.2. Ciment

Les sables de dune se caractérisent par leur cohésion très faible (de l'ordre de 5 KPa) [14], ce qui influe négativement sur leur stabilité. Leur traitement au ciment devient indispensable dans la plupart des structures; il a pour but d'améliorer leurs performances mécaniques en leur conférant des caractéristiques mécaniques et de stabilité suffisantes leur permettant de résister aux sollicitations imposées.

Le ciment employé est un ciment Portland composé CPJ CEM II/B 425, disponible sur le marché et provenant de la cimenterie (Algerian Cement Company, ACC) de M'silla.

#### 2.3.2.1. Analyse chimique et minéralogique du ciment

L'analyse chimique par la spectrométrie de fluorescence X (SFX) réalisée au laboratoire de la cimenterie ACC de M'silla a donné les résultats récapitulés dans le tableau 2.15.

**Tableau 2.15.** Analyse chimique du ciment utilisé

Eléments	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CL
(%)	17,49	4,51	3,02	62,78	2,15	2,38	0,05	0,64	0,02

La composition minéralogique du clinker a été déterminée en utilisant la formule de BOGUE qui permet d'estimer la proportion de chaque minéral du ciment à partir de sa composition chimique pondérale.

Les résultats de calcul sont résumés dans le tableau 2.16.

**Tableau 2.16.** Composition minéralogique du ciment

Minéraux	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
(%)	81.18	2.79	6.85	9.18

#### 2.3.2.2. Caractéristiques physiques

Le tableau 2.17 donne les caractéristiques physiques du ciment utilisé.

**Tableau 2.17.** Caractéristiques physiques du ciment utilisé

Caractéristiques physiques	
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,94
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	3,06
Compacité (%)	64
Porosité (%)	36

### 2.3.2.3. Surface spécifique

La surface spécifique (Norme NF P 15 – 442) est caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en (cm<sup>2</sup>/g). Dans les cas courants, elle est de l'ordre de 3500 à 5500 cm<sup>2</sup>/g. Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ses résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes, par contre plus la finesse du ciment est grande, plus le retrait est important. En outre, la finesse de mouture influence la plasticité et la cohésion de la pâte de ciment à l'état frais [40, 42].

La surface massique de ciment étudié n'est pas mesurée directement, mais par comparaison avec un ciment de référence dont la surface massique est connue. Il s'agit de faire passer un volume d'air connu à travers une poudre de ciment. Plus la surface massique de cette poudre est importante, plus le temps mis par l'air pour traverser la poudre est long [40, 42].

L'appareil utilisé pour déterminer la finesse de mouture de ciment est appelé *Perméabilimètre de Blaine*. Il se compose pour l'essentiel d'une cellule dans laquelle est placé le ciment à tester et d'un manomètre constitué d'un tube en verre en forme de U. La surface spécifique de Blaine du ciment utilisé est de 3918 cm<sup>2</sup>/g

### 2.3.2.4. Consistance normale et temps de prise du ciment

#### a. Consistance normale du ciment

L'essai de consistance normale (Norme NF P 15 – 414) permet de déterminer le pourcentage d'eau nécessaire pour fabriquer une pâte dite de consistance normale. Il s'agit de mesurer l'enfoncement d'une sonde normalisée (de diamètre Ø = 10 mm et de masse m = 300 ± 1 g), sous son propre poids dans une pâte préalablement préparée et contenue dans le moule tronconique de l'appareil de Vicat. La pâte est dite de consistance normale lorsque la différence entre la hauteur du moule et l'enfoncement de l'aiguille est égale à 6 ± 1 mm [39].

En faisant varier le rapport E/C pour les différents gâchés, le rapport E/C correspondant à la consistance normale de la pâte de ciment utilisé est de 0,28.

#### b. Prise du ciment

La durée de prise d'un ciment (Norme NF P 15 – 414) est généralement caractérisée par:

- Le temps de début de prise.
- Le temps de la fin de prise

Le début de prise correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte. L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée, l'appareil utilisé est l'appareil de Vicat, équipé d'une aiguille de 1.13 mm de diamètre. Quand, sous l'effet d'une charge de 300 g l'aiguille s'arrête à une distance du fond du moule égale à 4 mm ± 1 mm, On dit que le début de prise est atteint. Ce moment, mesuré à partir du début de malaxage, est appelé « temps de début de prise » [40, 42].

Le « temps de fin de prise » est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que 0.5 mm [40]. Les résultats de l'essai de prise sont regroupés dans le tableau 2.18.

**Tableau 2.18.** Temps de début et de fin de prise du ciment utilisé

Temps de prise	Essai à froid	Essai à chaud
Début de	2h 32 min	27 min
Fin de prise	3h 43 min	1h 10 min

### 2.3.2.5. Caractéristiques mécaniques du ciment

Les essais mécaniques sont réalisés au niveau du laboratoire de la cimenterie ACC de M'sila. Les résultats de la résistance à la compression et celle à la traction du ciment utilisé sont présentés au tableau 2.19.

**Tableau 2.19.** Caractéristiques mécaniques du ciment

<b>Ciment CPJ 42,5</b>	<b>2 jours</b>	<b>7 jours</b>	<b>28 jours</b>
Résistance à la compression (MPa)	22.14	36,28	47.96
Résistance à la traction (MPa)	4.37	5.76	7.44

### 2.4. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée dans tous les essais de notre étude est une eau courante de robinet, donc dépourvue des excès de sels, de sulfates et d'acides.

### 2.5. Conclusion

- L'analyse granulométriques des trois sables montre que 90 % d'éléments sont inférieurs à 0,5 mm, ce qui indique que ces sables peuvent être classés d'un point de vue granulaire comme des sables fins.
- La granulométrie des sables étudiés est très serrée ; près de 90 % des grains ont une dimension comprise entre 0,1 mm et 0,5 mm. Ce qui donne une compacité insuffisante, et par la suite des performances mécaniques (la résistance en compression et en traction, La portance) non adéquates. Un traitement aux liants hydrauliques et l'utilisation d'un correcteur granulaire se révéleront certainement nécessaires.
- Les sables étudiés sont placés dans la classe des sols non agressifs. Ceci nous permet de recommander pour notre étude, un ciment portland courant comme liant ou agent de stabilisation. Alors le choix d'un ciment de classe CPA ou CPJ est très convenable.
- Les sables étudiés présentent des teneurs en matières organiques inférieures à 3%. Ceci nous permet de conclure que ces sables ne sont pas organiques et qu'ils sont parfaitement convenables, de ce point de vue, pour notre étude.
- Selon le guide de terrassements routiers, les sables étudiés appartiennent à la classe D1, ces sables sont insensibles à l'eau, sans cohésion et perméables. Avec leur granulométrie souvent mal graduée et de petit calibre, ils présentent une traficabilité difficile.

*Chapitre III*

---

***Formulation et paramètres de  
compactage***

---

### 3.1. Introduction

Dans ce chapitre, et après avoir donné une présentation générale sur les matériaux utilisés dans le chapitre précédent, nous avons consacré notre étude à deux points importants :

- La proposition d'une méthode de formulation des mélanges basée sur la stabilisation des sables étudiés par calage et rigidification [1].
- La détermination des paramètres de compactage des mélanges: Cette étude géotechnique vise à optimiser les différents mélanges (stabilisé et non stabilisé) c'est-à-dire définir leur Optimum Proctor Normal (OPN) afin de l'utiliser dans la confection des éprouvettes qui seront testées dans notre étude.

Une analyse des résultats a été faite pour voir l'effet de la provenance du sable étudié et le pourcentage des agents de stabilisation sur les paramètres de compactage.

### 3.2. Formulation

Les sables utilisés, dans leur ensemble, sont « homométriques », c'est-à-dire que leur granulométrie est très resserrée. Ce qui va entraîner un certain nombre de conséquences telles que :

- Une porosité importante (de l'ordre de 45 %),
- Une absence totale de cohésion,
- L'impossibilité de les compacter mécaniquement,

Ces sables (sans traitement) sont inutilisables en couches de chaussée. Leur manque total de cohésion les rend en effet très peu portants, et cela bien qu'ils présentent les deux qualités suivantes, très importantes pour des matériaux routiers [1]:

- Insensibilité à l'eau due au fait que le matériau est généralement propre (absence de fines argileuses ou limoneuses) ;
- Dureté du matériau constitué de grains de silice qui résistent bien à l'abrasion en milieu humide.

Pour utiliser les sables de dune de la région de Djelfa en technique routière, il faut leur conférer par une stabilisation. L'acquisition de cette stabilité est toujours obtenue par un « blocage » des grains les uns par rapport aux autres : la qualité de ce blocage est variable. On peut citer [1]:

- Un traitement par un simple calage des grains,
- Un traitement par un calage et une rigidification,
- Un traitement par une simple rigidification.

Le traitement par simple calage, s'effectue par incorporation d'une substance plus fine que le sable qui vient combler les vides. Cette technique ne confère pas de rigidité à la couche chaussée [1], pour cette raison, elle ne convient pas pour la stabilisation des sables étudiés.

La stabilité par simple rigidification, Le blocage est assuré par un « pontage » cristallin entre grains, ainsi que par un enchevêtrement grains – cristaux. Un tel résultat ne peut être obtenu qu'en présence d'une quantité importante de liant ; pour cette raison (à la fois technique et économique), le ciment convient mal [1].

Le traitement par un calage et une rigidification, peut être effectué de deux façons différentes ; par l'ajout dans le mélange, en plus du produit de calage, un rigidifiant (en

général du ciment), ou par l'ajout d'un produit de calage soit en lui-même un rigidifiant (en général, association matériau pouzzolanique - chaux grasse) [1].

Pour des raisons technique, géographique et économique (paragraphes 3.2.1 et 3.2.1) la stabilisation la plus adéquate pour notre étude est celle par un calage et une rigidification, par l'ajout de produit de calage et un rigidifiant.

Le traitement des sables de dune étudiés a été faite par:

- Une stabilisation mécanique: réduction des vides par l'opération de compactage.
- Une stabilisation physique (calage): correction de la mauvaise granulométrie des sables étudiés par addition de correcteur granulaire.
- Une stabilisation chimique (rigidification): agglomération des particules inertes (grains de sable) par l'addition du ciment.

### 3.2.1. Choix du liant et des dosages

Lors d'une étude de stabilisation d'un matériau, le choix du liant est essentiellement conditionné par deux critères:

- *Critère technique*: en fonction de la nature et des propriétés du matériau à stabiliser, on choisit des liants qui sont, à priori, « adaptés » au type de sol et aux performances requises. Dans le cas de traitement de sable de dune, l'utilisation de ciment comme rigidifiant (cas de traitement par un calage et une rigidification) est généralement recommandée [1].
- *Critère géographique et économique*: le coût de transport d'un liant entre son lieu de production et de mise en oeuvre a de fortes répercussions sur le budget global d'un chantier. Cela n'est pas le cas des ciments de classe CPJ, qui sont produits dans toutes les cimenteries algériennes.

La stabilisation d'un sable par un ciment modifie son comportement. Il ne sera plus celui d'un matériau naturel, mais celui d'un matériau semi- rigide. Il sera caractérisé par sa résistance en traction et son module d'élasticité [9].

Dans le cas de stabilisation d'un sable, les dosages en ciment sont supérieurs à ceux utilisés pour améliorer ou traiter un sable [9]. Dans notre étude, on a limité le dosage en ciment à 10% ; au delà de ce pourcentage, on risque de perdre l'avantage économique.

### 3.2.2. Choix de correcteur granulaire et des dosages

L'utilisation de sable fillérisé SF en tant que correcteur granulaire (produit de calage [1]) est intéressante en raison de son prix très compétitif, il est de l'ordre de 100 DA/m<sup>3</sup> (hors coût du transport). Il est de plus disponible dans la région de Djelfa (coût de transport moindre). Le sable SF contient une forte proportion de fines ; ce qui nous donne la possibilité de l'utiliser directement sans aucun broyage additionnel.

Dans notre étude, on a limité le dosage en sable SF à 30 %. Car, et pour des raisons économiques, le pourcentage de l'agent de stabilisation doit rester inférieur au pourcentage du matériau à stabiliser.

### 3.2.3. Méthode de formulation des mélanges

Le dosage de ciment varie de 0 à 10% avec un pas de 2% et celui du sable fillérisé de 0 à 30% avec un pas de 10%. Ce qui nous permet d'étudier l'influence de l'addition d'agents de stabilisation sur les performances physiques et mécaniques de sables stabilisés.

Le nombre de mélanges à examiner pour cette étude est de 72. Les détails des proportions des mélanges sont donnés dans le tableau 3.1.

Les mélanges sont dénommés par SX-PS-PC-PSF ; X représente la provenance de sable, PS le pourcentage de sable, PC le pourcentage de ciment, et PSF représente le pourcentage de sable fillérisé.

**Tableau 3.1.** Proportions des mélanges

Mélanges			% de sable de dune	% de ciment	% de sable SF
Série SM	Série SZ	Série SA			
SM 100-00-00	SZ 100-00-00	SA 100-00-00	100	0	0
SM 98-02-00	SZ 98-02-00	SA 98-02-00	98	2	
SM 96-04-00	SZ 96-04-00	SA 96-04-00	96	4	
SM 94-06-00	SZ 94-06-00	SA 94-06-00	94	6	
SM 92-08-00	SZ 92-08-00	SA 92-08-00	92	8	
SM 90-10-00	SZ 90-10-00	SA 90-10-00	90	10	
SM 90-00-10	SZ 90-00-10	SA 90-00-10	90	0	10
SM 88-02-10	SZ 88-02-10	SA 88-02-10	88	2	
SM 86-04-10	SZ 86-04-10	SA 86-04-10	86	4	
SM 84-06-10	SZ 84-06-10	SA 84-06-10	84	6	
SM 82-08-10	SZ 82-08-10	SA 82-08-10	82	8	
SM 80-10-10	SZ 80-10-10	SA 80-10-10	80	10	
SM 80-00-20	SZ 80-00-20	SA 80-00-20	80	0	20
SM 78-02-20	SZ 78-02-20	SA 78-02-20	78	2	
SM 76-04-20	SZ 76-04-20	SA 76-04-20	76	4	
SM 74-06-20	SZ 74-06-20	SA 74-06-20	74	6	
SM 72-08-20	SZ 72-08-20	SA 72-08-20	72	8	
SM 70-10-20	SZ 70-10-20	SA 70-10-20	70	10	
SM 70-00-30	SZ 70-00-30	SA 70-00-30	70	0	30
SM 68-02-30	SZ 68-02-30	SA 68-02-30	68	2	
SM 66-04-30	SZ 66-04-30	SA 66-04-30	66	4	
SM 64-06-30	SZ 64-06-30	SA 64-06-30	64	6	
SM 62-08-30	SZ 62-08-30	SA 62-08-30	62	8	
SM 60-10-30	SZ 60-10-30	SA 60-10-30	60	10	

### 3.3. Détermination des paramètres de compactage

La densité apparente finale d'un sol compacté dépend de la nature de celui-ci, de la teneur en eau et de l'énergie de compactage. Le compactage permet de resserrer la texture du sol, de réduire ses déformations, d'améliorer sa portance et sa résistance. Pour un sol donné et pour un mode de compactage déterminé, il existe une seule teneur en eau correspondant à la densité maximale. S'il n'y a pas assez d'eau, la lubrification entre les grains n'est pas assurée. S'il y a trop d'eau, les grains solides glissent les uns sur les autres et ne peuvent plus se placer afin d'occuper la place minimale ; de plus, l'eau prend la place des vides et absorbe une partie de l'énergie de compactage [43, 44]. Pour une couche d'assise de chaussée, la teneur en eau optimale et la densité correspondante sont déterminées par l'essai Proctor Normal.

### 3.3.1. Essai Proctor Normal

Pour connaître la teneur en eau permettant d'obtenir le compactage optimal, l'ingénieur américain Proctor a proposé dans les années 30 un essai qui a été rapidement adopté par l'ensemble de la communauté des géotechniciens. En France, elle fait l'objet de la norme NF P94-093 [39]. L'essai consiste à compacter suivant un processus bien précis un sol en plusieurs couches dans un moule puis à mesurer sa teneur en eau  $w$  (%) et sa densité sèche  $\gamma_d$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ). La courbe de compactage [ $\gamma_d = f(w(\%))$ ] présente un maximum qui correspond à la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale ( $w_{\text{opt}}$  et  $\gamma_{d, \text{max}}$ ).

#### 3.3.1.a. Protocole de l'essai

On utilise un moule en acier appelé «moule Proctor». C'est un tube métallique cylindrique, ouvrable en deux demi coquilles, que l'on peut fixer sur une plaque de base, et muni d'une hausse (Figure 3.2.a). Les différentes pièces étant assemblées, le matériau, préalablement malaxé avec une certaine quantité d'eau, est introduit dans le moule en 3 fois. Entre chaque ajout, on procède à un compactage de la couche avec une dame normalisée (51 mm de diamètre, 2490 g de masse avec une hauteur de chute égale à 305 mm) en respectant le protocole suivant :

Six cycles de quatre coups plus un dernier coup au centre, soit 25 coups par couche, comme indiqué la Figure 3.1. À la fin de l'essai, la hausse est retirée et on arase la surface du moule. Connaissant sa masse et son volume (dimensions normalisées : Diamètre de 101.6 mm; hauteur de 117mm), on peut déterminer la masse volumique humide  $\gamma_h$  (Figure 3.2.b) du matériau compacté. La teneur en eau, obtenue par étuvage à  $105^\circ\text{C}$  (Figure 3.2.c et 3.2.d), permet ensuite de calculer sa masse volumique sèche  $\gamma_d$ . En faisant varier les teneurs en eau, on trace la courbe [ $\gamma_d = f(w(\%))$ ] et on détermine l'optimum Proctor normal ( $w_{\text{opt}}$  et  $\gamma_{d, \text{max}}$ ).

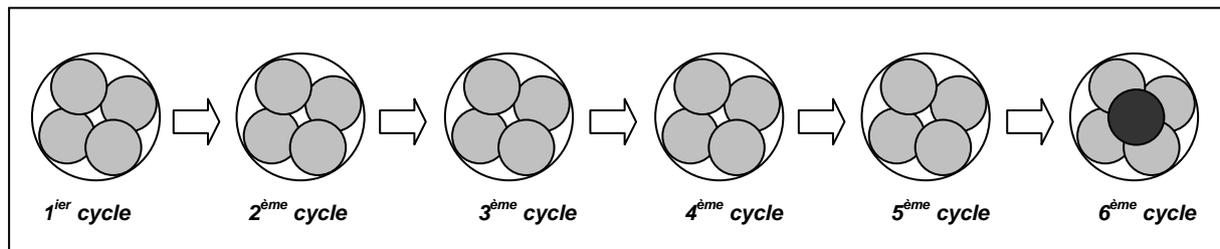


Fig. 3.1. Cycles de compactage pour un essai Proctor normal



Fig.3.2.a. Moule et dame Proctor utilisés

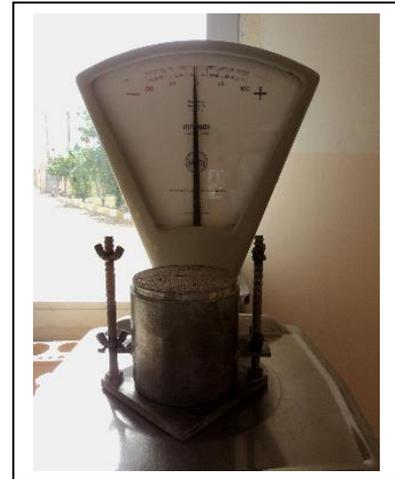
Fig.3.2.b. Pesée du poids humide ( $\gamma_h$ )

Fig.3.2.c. Echantillons après étuvage



Fig.3.2.d. Pesée des tares

### 3.3.1.b. Détermination de l'OPN des mélanges

Ces essais ont été réalisés au Laboratoire National de l'Habitat et de Construction (LNHC - Sud) unité de Djelfa. La détermination de l'OPN des mélanges étudiés a duré trois mois durant lesquels plus de 290 points Proctor ( $w$ ,  $\gamma_d$ ) ont été déterminés.

L'essai a été réalisé juste après malaxage et ne peut donc prendre en compte l'effet de l'hydratation de ciment.

### 3.3.1.c. Résultats

Les valeurs de la teneur en eau optimale et de la densité sèche maximale pour chaque mélange sont regroupées dans les tableaux 3.2, 3.3 et 3.4.

Tableau 3.2. Résultats de L'essai Proctor Normal pour la série SM

Mélanges	Teneur en eau optimale : $W_{opt}$ (%)	Densité sèche maximale : $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
SM 100-00-0	14,0	1,67
SM 90-00-10	13,8	1,72
SM 80-00-20	13,3	1,77
SM 70-00-30	12,0	1,81
SM 98-02-00	13,5	1,7
SM 88-02-10	13,3	1,76
SM 78-02-20	12,8	1,79
SM 68-02-30	10,5	1,83
SM 96-04-00	13,3	1,74
SM 86-04-10	12,2	1,8
SM 76-04-20	11,5	1,83
SM 66-04-30	10,0	1,87
SM 94-06-00	12,4	1,77
SM 84-06-10	11,6	1,82
SM 74-06-20	10,6	1,85
SM 64-06-30	9,8	1,9
SM 92-08-00	12,0	1,79
SM 82-08-10	11,0	1,84
SM 72-08-20	9,7	1,88
SM 62-08-30	9,4	1,93
SM 90-10-00	11,6	1,82
SM 80-10-10	10,5	1,86
SM 70-10-20	9,6	1,91
SM 60-10-30	9,3	1,95

**Tableau 3.3.** Résultats de L'essai Proctor Normal pour la série SZ

Mélanges	Teneur en eau optimale : $W_{opt}$ (%)	Densité sèche maximale : $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
SZ 100-00-0	15,9	1,67
SZ 90-00-10	12,9	1,7
SZ 80-00-20	12,3	1,75
SZ 70-00-30	12	1,79
SZ 98-02-00	15	1,71
SZ 88-02-10	12,3	1,73
SZ 78-02-20	11,8	1,78
SZ 68-02-30	10,2	1,83
SZ 96-04-00	14,2	1,73
SZ 86-04-10	11,7	1,76
SZ 76-04-20	11,4	1,82
SZ 66-04-30	10	1,86
SZ 94-06-00	13,6	1,76
SZ 84-06-10	11,6	1,79
SZ 74-06-20	10,4	1,84
SZ 64-06-30	10	1,9
SZ 92-08-00	11,9	1,79
SZ 82-08-10	11	1,82
SZ 72-08-20	10,1	1,86
SZ 62-08-30	9,8	1,92
SZ 90-10-00	11	1,82
SZ 80-10-10	10,3	1,84
SZ 70-10-20	10	1,89
SZ 60-10-30	9,8	1,94

Tableau 3.4. Résultats de L'essai Proctor Normal pour la série SA

Mélanges	Teneur en eau optimale : $W_{opt}$ (%)	Densité sèche maximale : $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
SA 100-00-0	17,1	1,63
SA 90-00-10	14,2	1,67
SA 80-00-20	13,7	1,7
SA 70-00-30	13,1	1,74
SA 98-02-00	16,3	1,67
SA 88-02-10	13,6	1,7
SA 78-02-20	12,9	1,73
SA 68-02-30	11,6	1,77
SA 96-04-00	15,3	1,69
SA 86-04-10	13,1	1,74
SA 76-04-20	12,3	1,77
SA 66-04-30	11,1	1,8
SA 94-06-00	14,9	1,72
SA 84-06-10	12,8	1,77
SA 74-06-20	11,2	1,8
SA 64-06-30	11	1,84
SA 92-08-00	13,1	1,74
SA 82-08-10	12,2	1,8
SA 72-08-20	11	1,84
SA 62-08-30	10,8	1,87
SA 90-10-00	12,3	1,76
SA 80-10-10	11	1,83
SA 70-10-20	10,8	1,87
SA 60-10-30	10,5	1,9

### 3.3.1.d. Interprétations

#### 3.3.1.d.1. Evolution de la densité sèche maximale (formulation avec ajouts ciment et SF).

La figure 3.3.a. montre que pour un dosage de sable SF constant, l'augmentation de la quantité de ciment ajouté au mélange, influe positivement et d'une façon très significative sur la densité sèche maximale. Cela indique que l'ajout de ciment participe à l'amélioration de la densité sèche maximale du mélange. La même remarque peut être faite concernant l'influence du dosage en sable SF sur la densité sèche maximale (Figure 3.3.b).

La Figure 3.3.a. montre en outre que l'augmentation de la densité sèche maximale pour une teneur en sable SF constante (en raison de l'utilisation du ciment), est également attribuée au poids spécifique plus élevé de ciment par rapport à celui des trois sables étudiés (poids spécifique de ciment est de 3.06, et ceux des sables SM, SZ et SA sont de 2.58, 2.56, 2.60 successivement). De plus, le ciment ajouté en présence d'eau a tendance à lubrifier les particules de sable, ce qui conduit à un empilement dense pendant le processus de compactage. Les particules de ciment ont par conséquent tendance à occuper les vides entre les particules des sables, d'où résulte une matrice de sable dense [45] (le ciment participe à l'amélioration de la compacité du mélange)

L'augmentation de la densité sèche maximale avec ajout de sable SF est attribuée à l'augmentation de la compacité de mélanges (la valeur de la densité des sables étudiés et le sable SF sont proches).

Pour les mélanges non stabilisés (sans additions), la densité sèche maximale varie de 1,67 g/cm<sup>3</sup>, 1,67 g/cm<sup>3</sup> et 1,63 g/cm<sup>3</sup>, respectivement, pour les sables SM, SZ et SA, et elle augmente aux valeurs maximales de 1,95 g/cm<sup>3</sup>, 1,94 g/cm<sup>3</sup> et 1,90 g/cm<sup>3</sup>, respectivement pour une stabilisation avec 10% de ciment et 30% de sable SF.

L'influence de la provenance du sable sur la densité sèche maximale est visible. On constate que pour des teneurs en ciment et sable SF constantes, la densité sèche maximale des mélanges à base de sable SM est supérieure à celle des mélanges à base de SZ, les mélanges à base de SA affichent les densités les plus faibles. Ceci peut être expliqué par la granulométrie distincte de chaque sable.

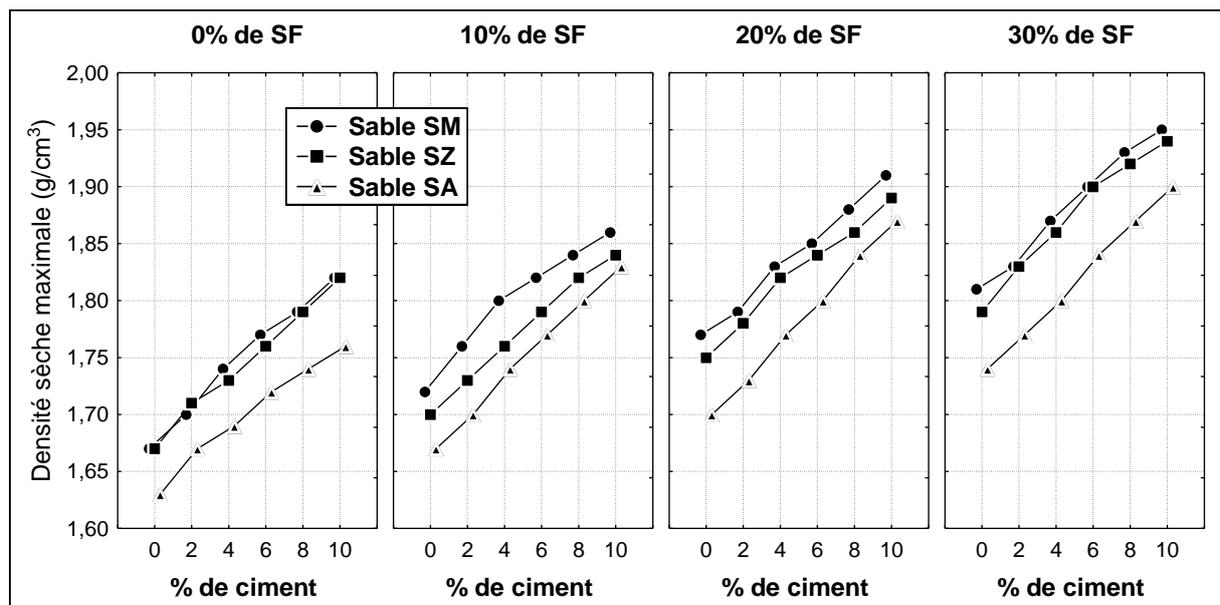
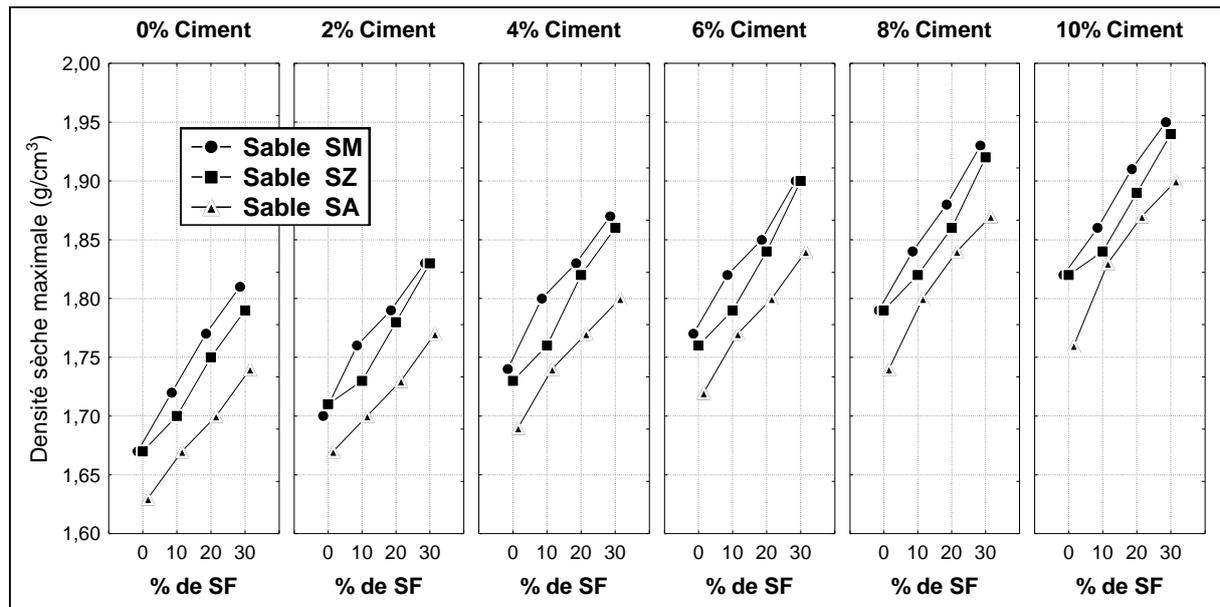


Figure 3.3.a. Evolution de la densité sèche maximale en fonction du pourcentage de ciment pour une teneur en SF donnée.



**Figure 3.3.b.** Evolution de la densité sèche maximale en fonction du pourcentage de sable SF pour une teneur en ciment fixée.

### 3.3.1.d.2. Evolution de la teneur en eau optimale

Les courbes de la Figure 3.4.a représentent l'évolution de la teneur en eau optimale en fonction de la quantité de ciment ajoutée. Nous remarquons que, pour un dosage de sable SF fixe, l'augmentation du pourcentage de ciment conduit à une réduction continue de la teneur en eau optimale. La même remarque peut être notée concernant la variation de la teneur en eau en fonction du pourcentage de sable SF (Figure 3.4.b).

Pour les mélanges non stabilisés (sans additions), la teneur en eau optimale varie de 14%, 15,9% et 17,1% respectivement pour les sables SM, SZ et SA, et diminue aux valeurs minimales, 9,3, 9,8% et 10,5 % respectivement pour une stabilisation avec 10% de ciment et 30% de sable SF.

Il convient également de remarquer que pour des teneurs en sable SF et en ciment constantes, la teneur en eau optimale pour chaque sable est différente. La provenance du sable affecte très sensiblement la teneur en eau optimale des mélanges (Figure 3.4.a et la Figure 3.4.b).

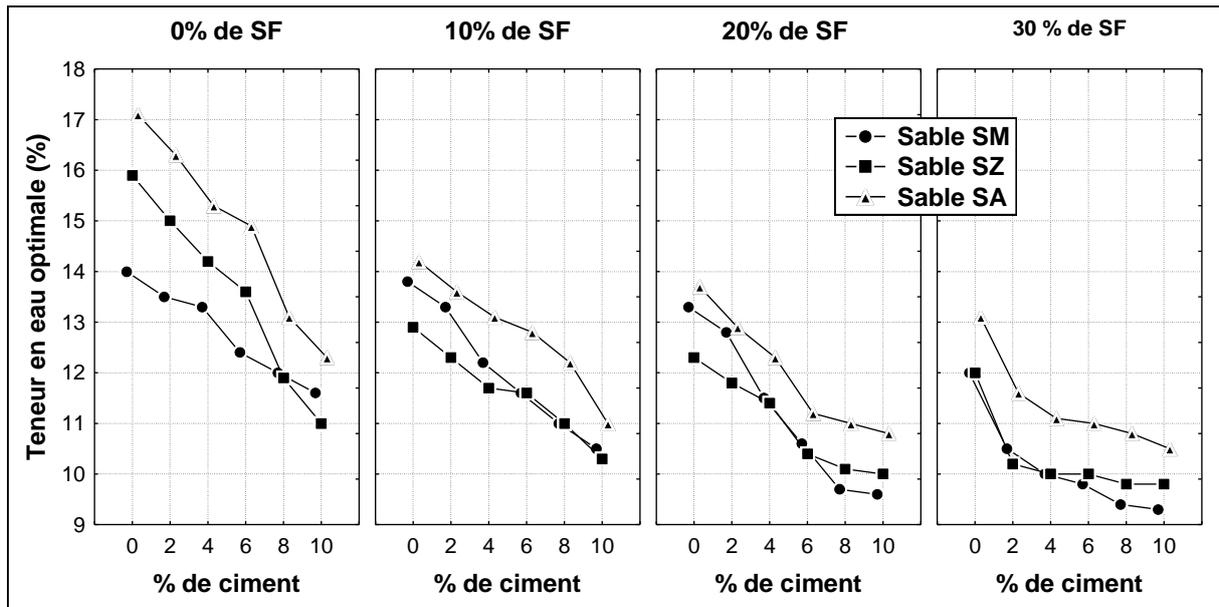


Figure 3.4.a. Evolution de la teneur en eau optimale en fonction du pourcentage de ciment.

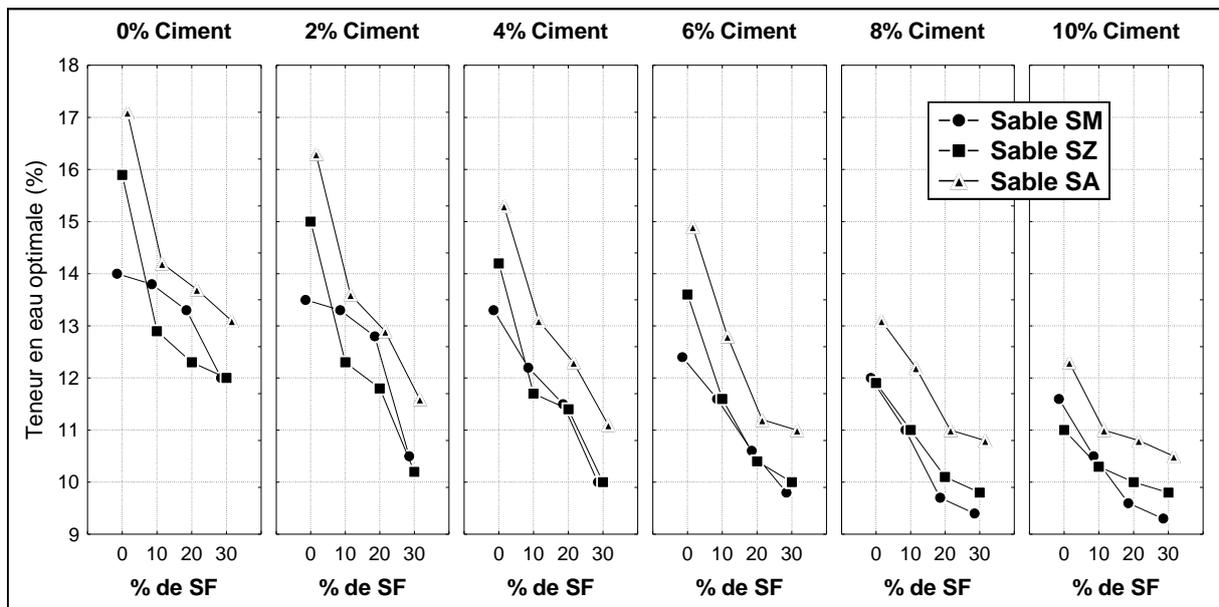


Figure 3.4.b. Evolution de la teneur en eau optimale en fonction du pourcentage de sable SF.

**3.3.1.d.3. Influence de la teneur en agent de stabilisation sur les courbes de compactage**

D'après les figures 3.5.a, b et c, on constate que l'augmentation de la quantité de sable SF ajoutée aux mélanges, fait un décalage clair des courbes Proctor vers le haut et la gauche (Par rapport à la courbe Proctor des trois sables non stabilisés; SM 100-00-00, SZ 100-00-00 et SA 100-00-00).

Dans le cas du ciment, la même remarque que la précédente peut être notée pour les dosages 2%, 4% et 6%. Les courbes Proctor décalent uniquement vers le haut pour les dosages 8% et 10%. C'est-à-dire que la teneur en eau optimale pour ces deux dosages reste presque stable. (Figures 3.6).

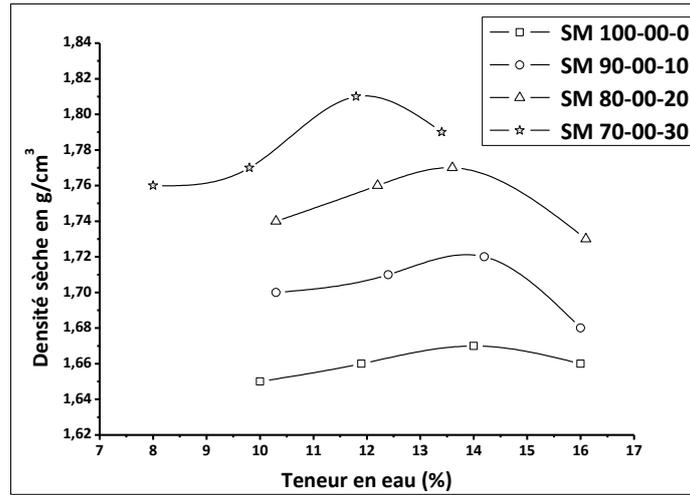


Figure 3.5.a. Stabilisation de sable SM au sable SF seul

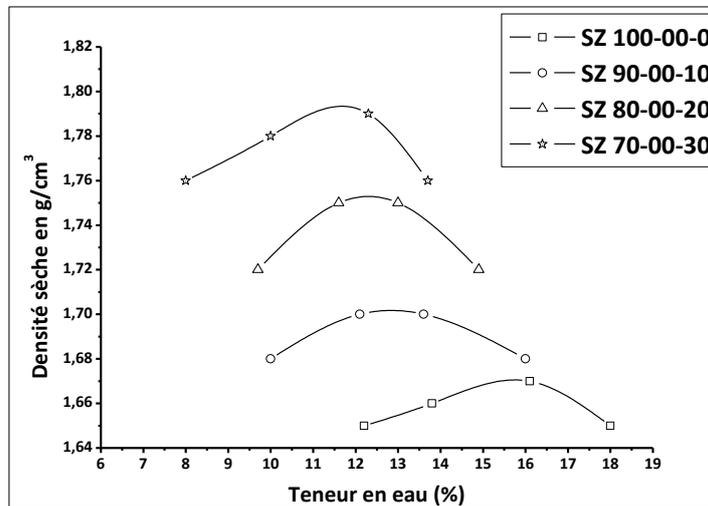


Figure 3.5.b. Stabilisation de sable SZ au sable SF seul

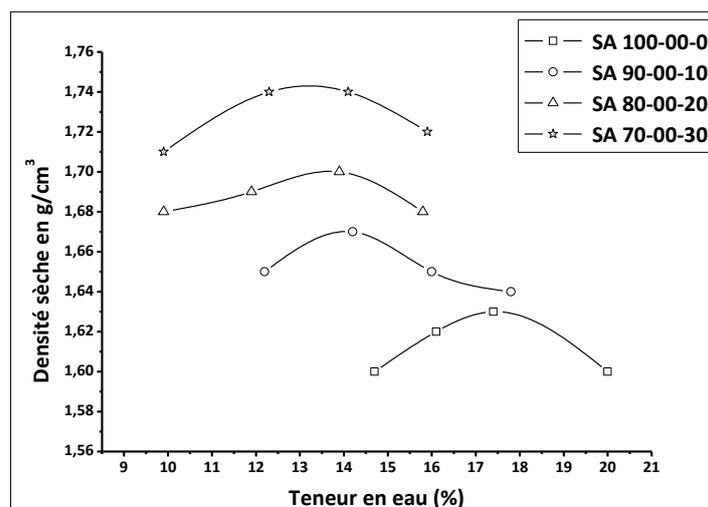


Figure 3.5.c. Stabilisation de sable SA au sable SF seul

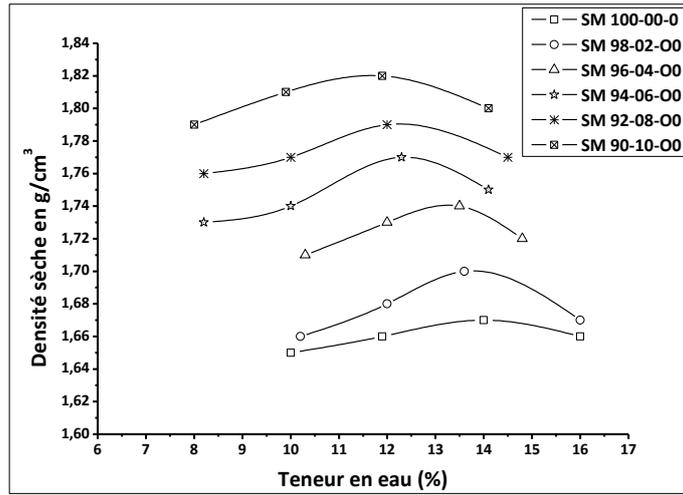


Figure 3.6.1. Stabilisation de sable SM au ciment seul

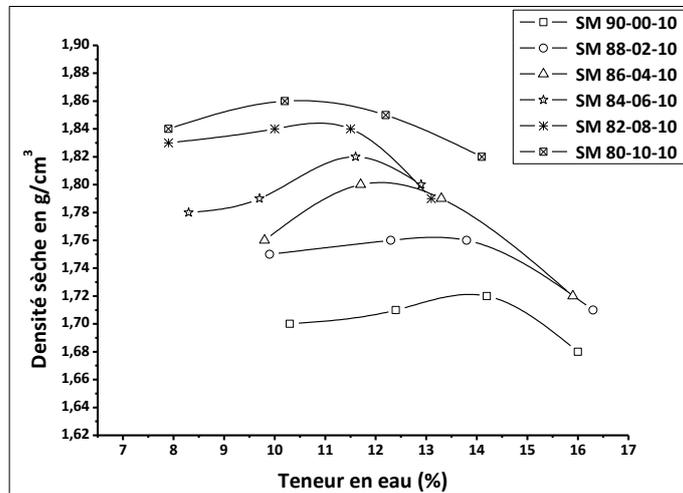


Figure 3.6.2. Stabilisation de sable SM au ciment à 10% de sable SF

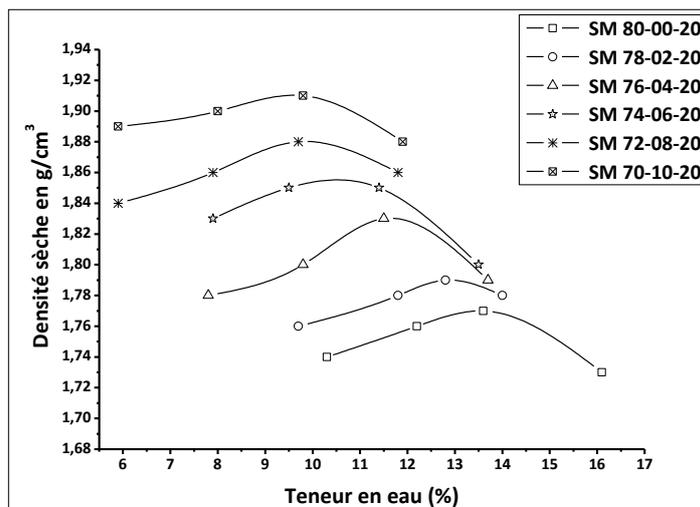


Figure 3.6.3. Stabilisation de sable SM au ciment à 20% de sable SF

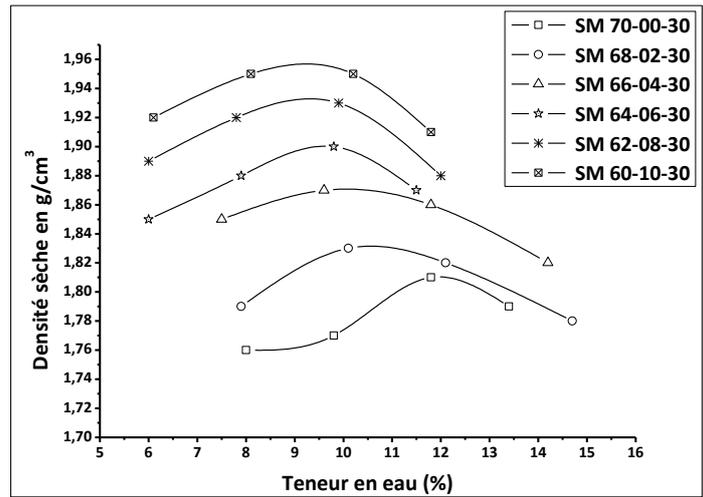


Figure 3.6.4. Stabilisation de sable SM au ciment à 30% de sable SF

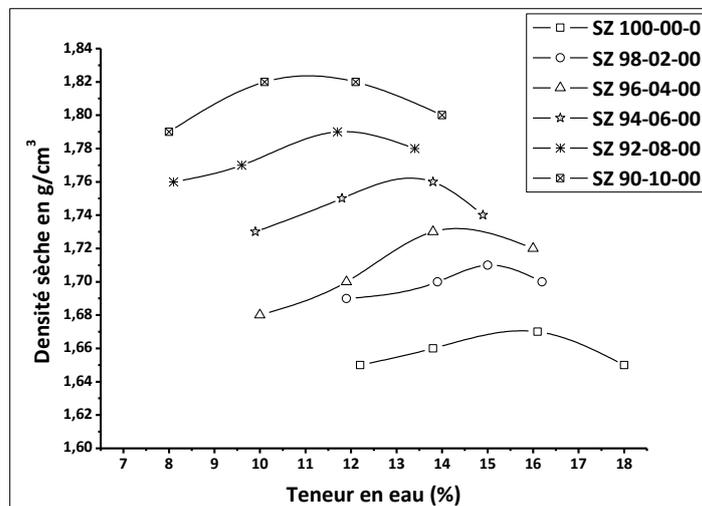


Figure 3.6.5. Stabilisation de sable SZ au ciment seul

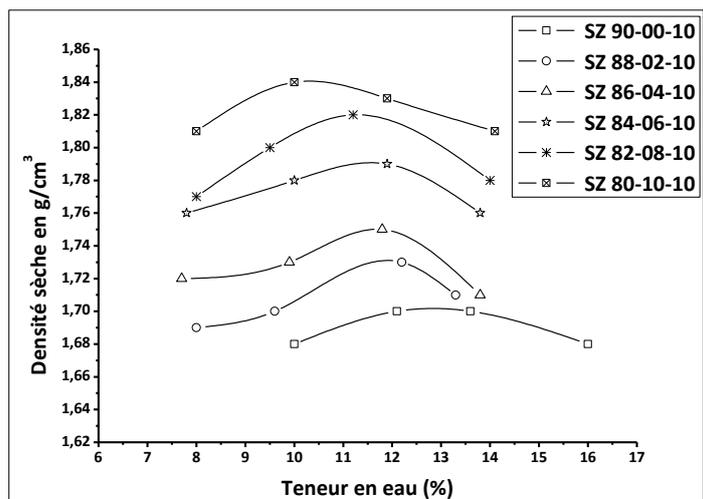


Figure 3.6.6. Stabilisation de sable SZ au ciment à 10% de sable SF

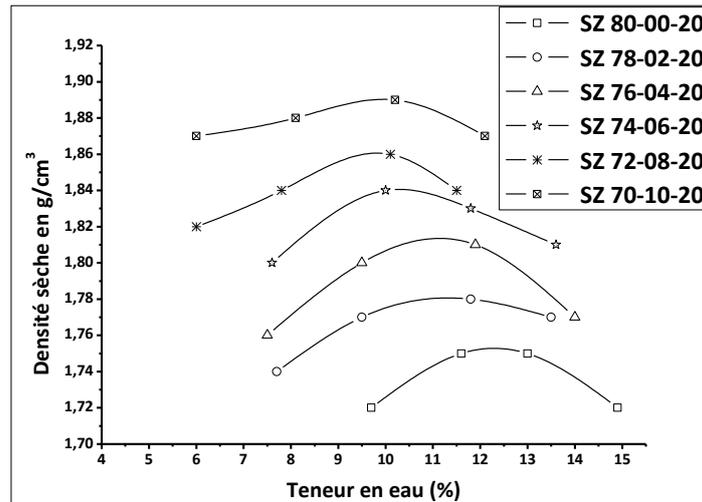


Figure 3.6.7. Stabilisation de sable SZ au ciment à 20% de sable SF

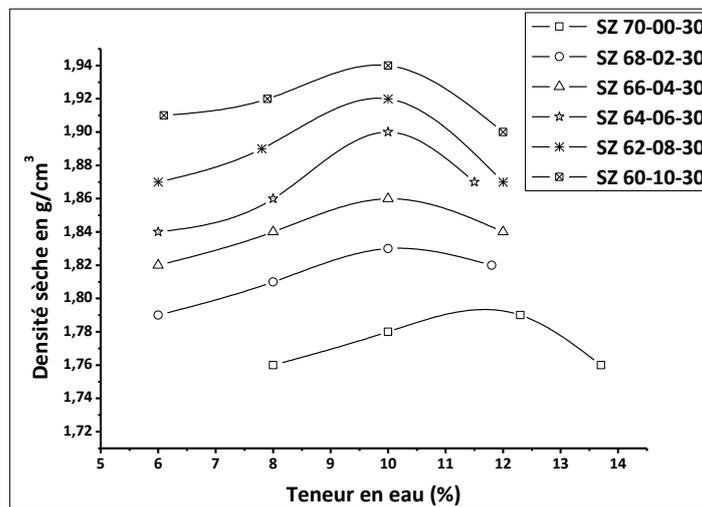


Figure 3.6.8. Stabilisation de sable SZ au ciment à 30% de sable SF

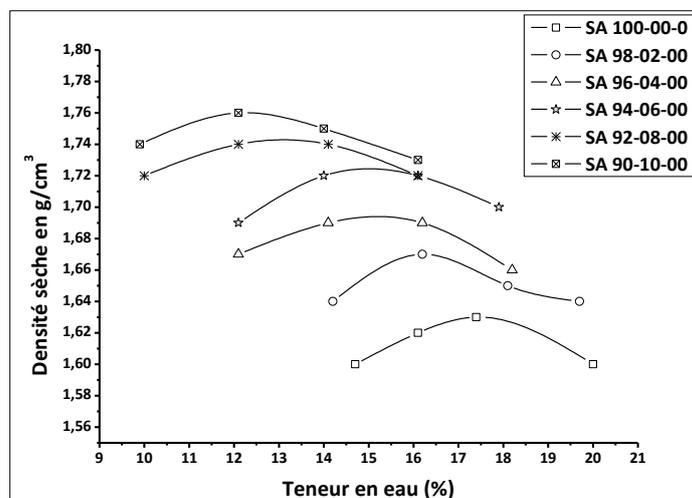


Figure 3.6.9. Stabilisation de sable SA au ciment seul

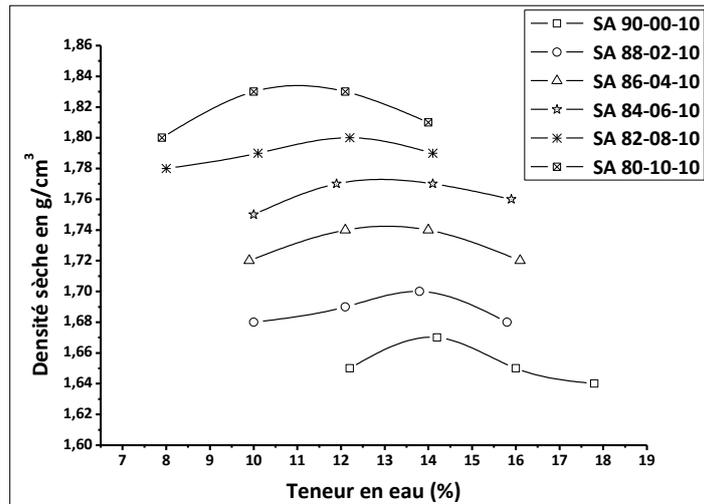


Figure 3.6.10. Stabilisation de sable SA au ciment à 10% de sable SF

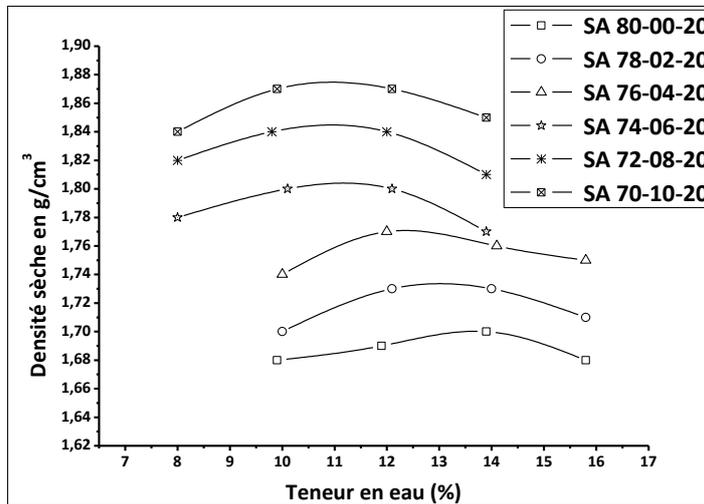


Figure 3.6.11. Stabilisation de sable SA au ciment à 20% de sable SF

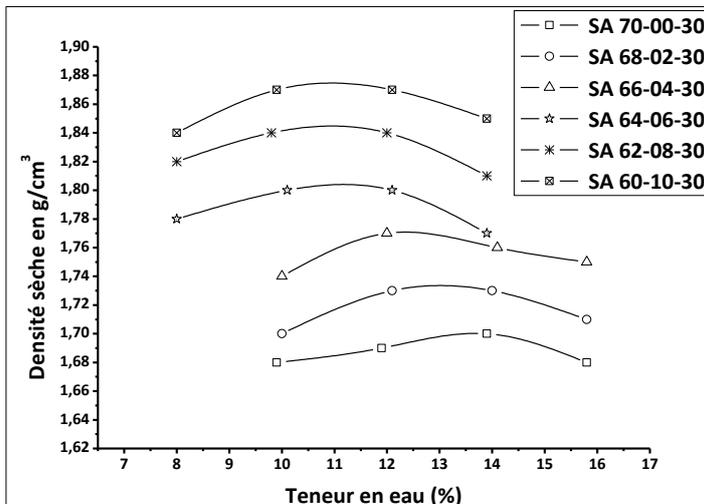


Figure 3.6.12. Stabilisation de sable SA au ciment à 30% de sable SF

### 3.3.1.d.4. La Relation entre la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale

D'après les résultats expérimentaux obtenus, on a trouvé qu'il existe un lien entre la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale. Le but de cette partie de notre travail est l'évaluation de la signification de cette relation (la signification du coefficient de corrélation) et la définition de l'équation mathématique qui gère cette dernière.

Les Figures 3.11 donnent la relation qui lie la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale. Ces graphiques reprennent des données obtenues par les différents mélanges étudiés. Il s'agit de mélanges confectionnés avec différents sables (Sable SM, SZ et SA) ainsi que différentes teneurs en ciment et en sable SF.

Graphiquement, la relation a été établie avec un coefficient de corrélation relativement correct ( $R^2$  supérieur à 0,80) [45], soit pour les mélanges de chaque série (SM, SZ et SA), soit pour tous les mélanges. Elle suit une loi linéaire d'ordre décroissant. Cette relation peut être représentée par les équations (1), (2), (3) et (4):

$$\gamma_d = 0,0452w + 2,3402 \quad R^2 = 0,9276 \quad (3.1) \quad \text{Pour la série SM}$$

$$\gamma_d = 0,0377w + 2,2425 \quad R^2 = 0,8123 \quad (3.2) \quad \text{Pour la série SZ}$$

$$\gamma_d = 0,0360w + 2,2229 \quad R^2 = 0,8521 \quad (3.3) \quad \text{Pour la série SA}$$

$$\gamma_d = 0,0392w + 2,2652 \quad R^2 = 0,8660 \quad (3.4) \quad \text{Pour tous les mélanges}$$

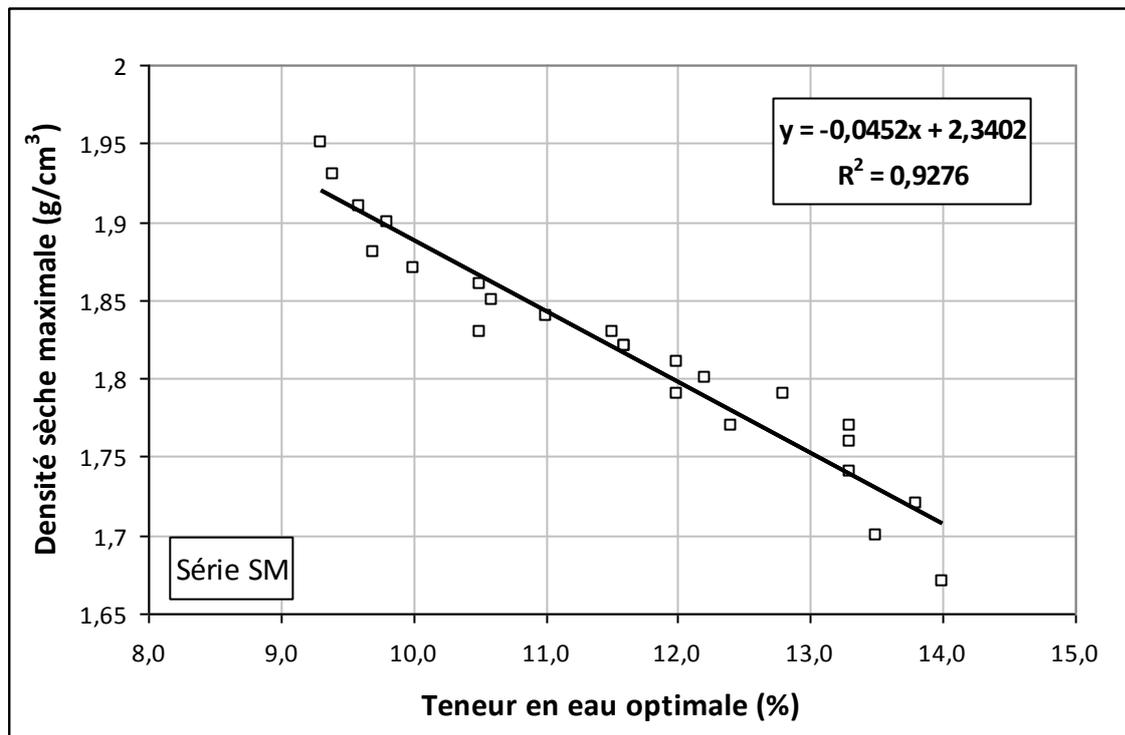


Figure 3.7.a. Relation entre la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale pour la série SM

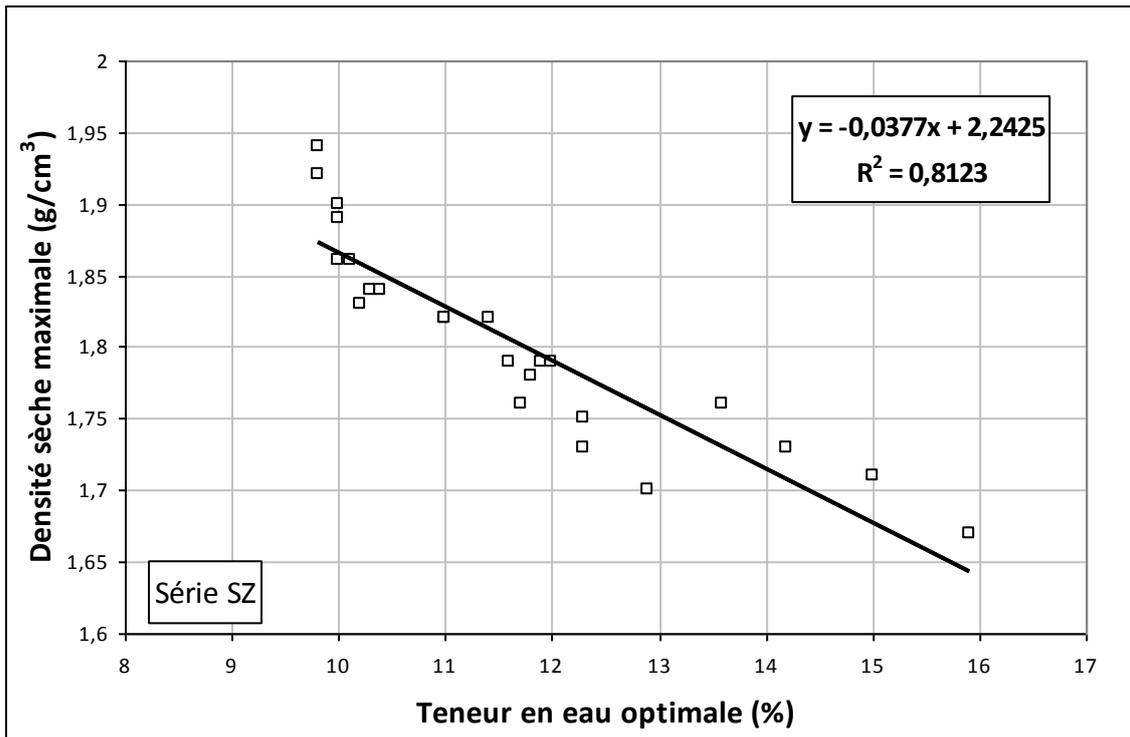


Figure 3.7.b. Relation entre la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale pour la série SZ

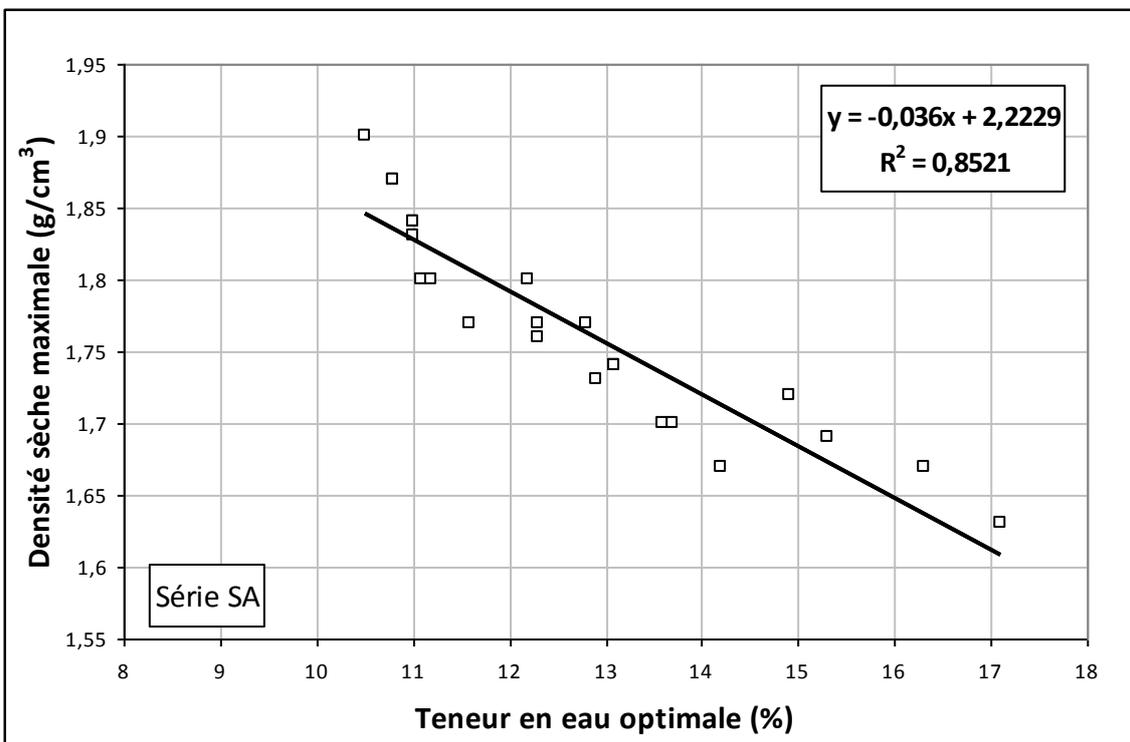
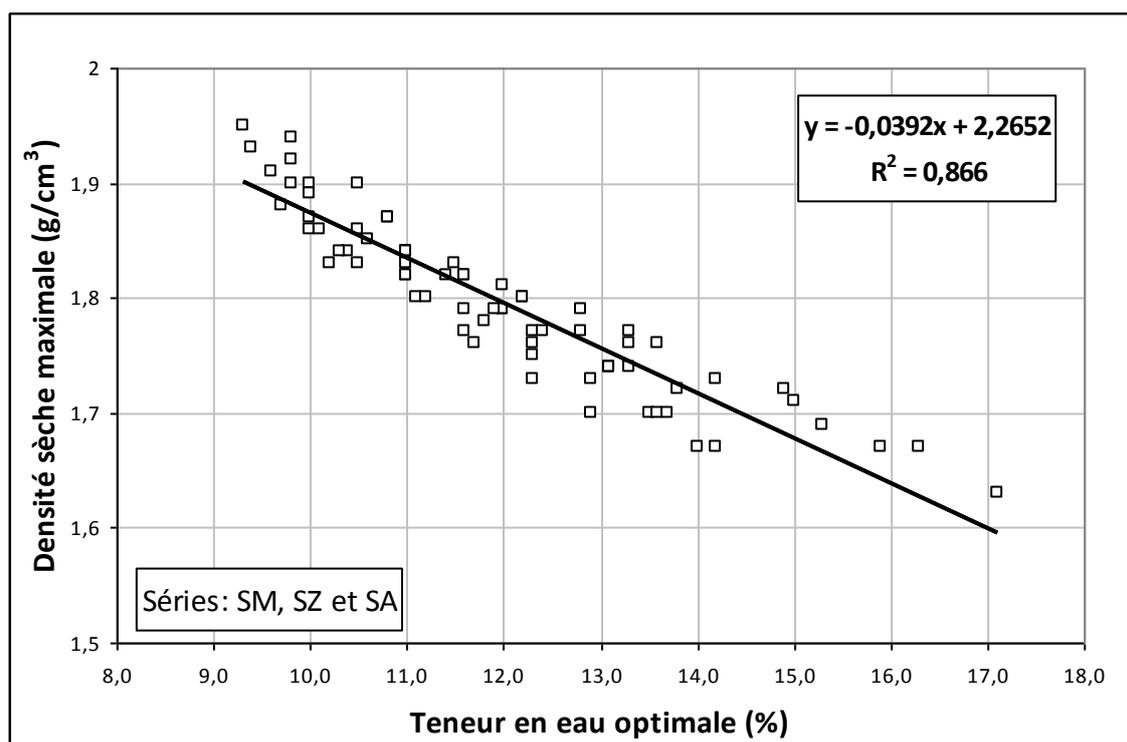


Figure 3.7.c. Relation entre la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale pour la série SA



**Figure 3.7.d.** Relation entre la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale pour tous les mélanges étudiés

### 3.4. Conclusion

Les conclusions qu'on peut retenir à partir de cette partie de notre étude sont les suivantes :

- La méthode de stabilisation des sables de dune étudiés a été proposée dans le but d'améliorer la compacité des mélanges, (par la correction granulométrique et l'opération de compactage) et de rigidifier le matériau stabilisé (par l'addition du ciment)
- L'augmentation des quantités de ciment et de sable SF ajoutées aux mélanges conduit à une augmentation de la densité sèche maximale. Cette augmentation est attribuée essentiellement à l'accroissement de la compacité des mélanges stabilisés. Ce qui va influencer positivement l'évolution des performances mécaniques des matériaux obtenus.
- La provenance du sable influe d'une façon très significative sur la densité sèche maximale. On constate que, pour des teneurs en ciment et en sable SF fixes, la densité sèche maximale des mélanges à base de sable SM est supérieure à celle des mélanges constitué de sable SZ, les mélanges de la série SA donnent la densité la plus faible. Cette différence peut être expliquée par la distinction de la granulométrie pour chaque sable. Ceci nous donne la possibilité de prévoir que les mélanges constitués de sable SM, auront les meilleures performances mécaniques (une conclusion à confirmer dans le chapitre suivant).
- Pour un dosage de sable SF fixe, l'augmentation du pourcentage de ciment conduit à une réduction continue de la teneur en eau optimale. La même remarque peut être notée concernant la variation de la teneur en eau en fonction du pourcentage de sable SF.
- D'après les résultats expérimentaux obtenus, on a trouvé qu'il existe une relation entre la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale avec un coefficient de corrélation relativement correct ( $R^2$  supérieur à 0,80). Cette relation suit une loi linéaire d'ordre décroissant.

Dans le quatrième chapitre, une étude complémentaire des résultats obtenus sera faite, pour analyser les liens qui existent entre les paramètres Proctor et les performances mécaniques qui seront déterminées.

*Chapitre IV*

---

***Performances mécaniques des  
sables de dune stabilisés***

---

#### 4.1. Introduction

L'étude de valorisation des sables de dune de la région de Djelfa en technique routière, comporte quatre étapes principales : identification des composants, proposition d'une méthode de formulation, détermination des paramètres Proctor des différents mélanges et détermination des performances mécaniques des mélanges durcis.

Les trois premiers points ont été traités dans les chapitres précédents. Ce chapitre concernant le dernier point consiste à mesurer la résistance en compression, en traction le module d'élasticité et la tenue à l'immersion des sables de dune stabilisés; ces grandeurs sont les paramètres d'entrée pour le classement et la valorisation d'un matériau en technique routière.

Les essais mécaniques sont d'abord décrits. Ensuite, l'évolution des propriétés mécaniques des mélanges durcis en fonction des teneurs en agents de stabilisation est présentée. Enfin, l'influence de la densité sèche maximale des mélanges sur les performances mécaniques (résistance à la compression, traction, module élastique...) est analysée.

#### 4.2. Confection et conservation des éprouvettes compactées

En raison de la finesse des matériaux utilisés ( $D_{max}$  inférieur à 3 mm) et en accord avec les prescriptions des normes NF EN 13286-41 [46], NF EN 13286-42 [47] et NF EN 13286-43 [48] relatives à l'étude des matériaux traités aux liants hydrauliques, les essais mécaniques peuvent être réalisés sur des éprouvettes cylindriques de 8 cm de diamètre et de 8 cm de longueur. Les modalités de confection de ces éprouvettes sont décrites dans la norme NF EN 13286-53 [49].

L'opération de la confection immédiate avec des éprouvettes d'élanement égal à deux est presque impossible (manque de cohésion suffisante pour la stabilité immédiate des éprouvettes élanées) ; pour ces raisons on a choisit des éprouvettes d'élanement égal à un.

##### 4.2.1. Préparation des mélanges

La méthodologie suivie pour la préparation des mélanges et la confection des éprouvettes repose sur la norme NF EN 13286-53 [49] « Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques Partie 53 » : Méthode de confection par compression axiale des éprouvettes de matériaux traités aux liants hydrauliques.

Après un séchage préalable des matériaux dans l'étuve pendant 24 h à 105°C (Figure 4.1), les quantités respectives des différents constituants (Sable de dune, ciment et sable fillérisé SF) sont pesées en fonction de la méthode de formulation étudiée au troisième chapitre (Figure 4.2) ; la précision de la balance utilisée est de 0.1 g. Le sable de dune, le ciment et le sable SF sont introduits en premier dans le bol du malaxeur (Figure 4.3) qui est ensuite mis en fonctionnement, puis l'eau. A partir du moment où la totalité de l'eau a été incorporée, le malaxage est maintenu pendant 3 minutes (Petite vitesse pendant une minute et deux minutes en grande vitesse), durée suffisante pour obtenir une mouture parfaitement homogène. A la fin du malaxage, le bol est retiré et immédiatement recouvert d'une bâche en plastique afin d'éliminer l'évaporation de l'eau.

Les modalités de confection de ces éprouvettes sont décrites dans la norme NF EN 13286-53 [49]. La confection a été faite aux conditions Proctor normal, afin d'avoir un matériau ayant la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale. La masse de matériau à introduire dans le moule est calculée par la formule 4.1.

$$M_h = V_{ep} \cdot \gamma_d \cdot (1 + w) \quad (4.1)$$

Tel que :

$M_h$  (gr) : Masse de mélange humide à introduire dans le moule.

$V_{epr}$  ( $cm^3$ ) : Volume de l'éprouvette.

$\gamma_d$  ( $gr/cm^3$ ) : Masse volumique apparente imposée ( $\gamma_{d, max}$ ).

$w$  : Teneur en eau imposée ( $w_{opt}$ ).

La formule 4.1 est déduite de la formule 4.2 couramment utilisée pour déterminer la densité sèche dans un essai de compactage.

$$\gamma_d = \frac{(P_{humide} - P_{moule})}{(1 + w) \cdot V_{moule}} \quad (4.2)$$

Tel que :

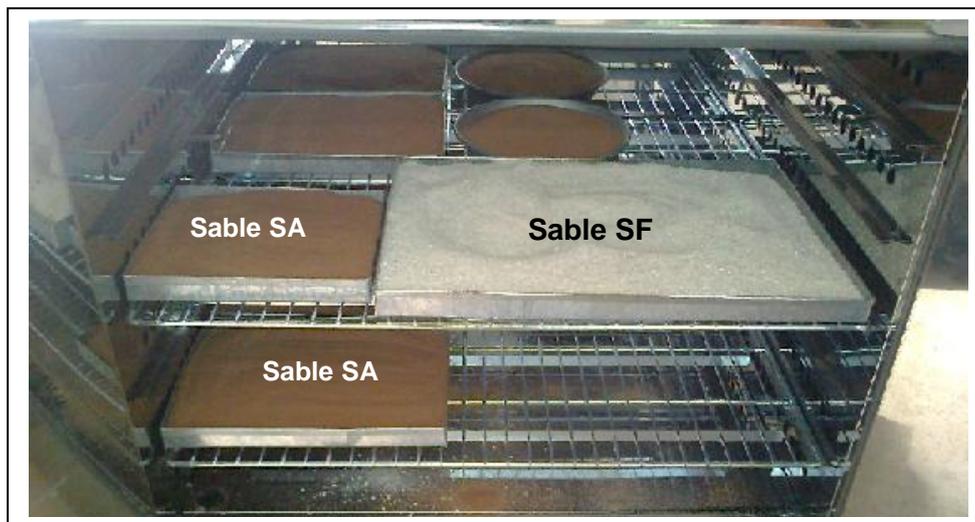
$V_{moule}$  : Volume du moule.

$P_{moule}$  : Poids du moule vide et de son embase.

$P_{humide}$  : Poids du moule plein de matériau.

$w$ : Teneur en eau.

Les quantités respectives des différents matériaux ; Sable de dune, ciment, sable SF et eau sont données en annexe I.



**Fig.4.1.** Séchage des Matériaux



Fig.4.2. Pesée des mélanges



Fig.4.3. Malaxeur utilisé

#### 4.2.2. Matériel nécessaire pour la confection

La confection des éprouvettes se fait par double compression statique afin d'obtenir un compactage le plus homogène possible. Le matériel nécessaire à la confection se compose d'un corps de moule, de deux pistons (supérieur et inférieur), de deux demi-coquilles d'espacement. Pour le démoulage des éprouvettes, on utilise un piston d'extraction ainsi qu'un support de démoulage (Figure 4.4).

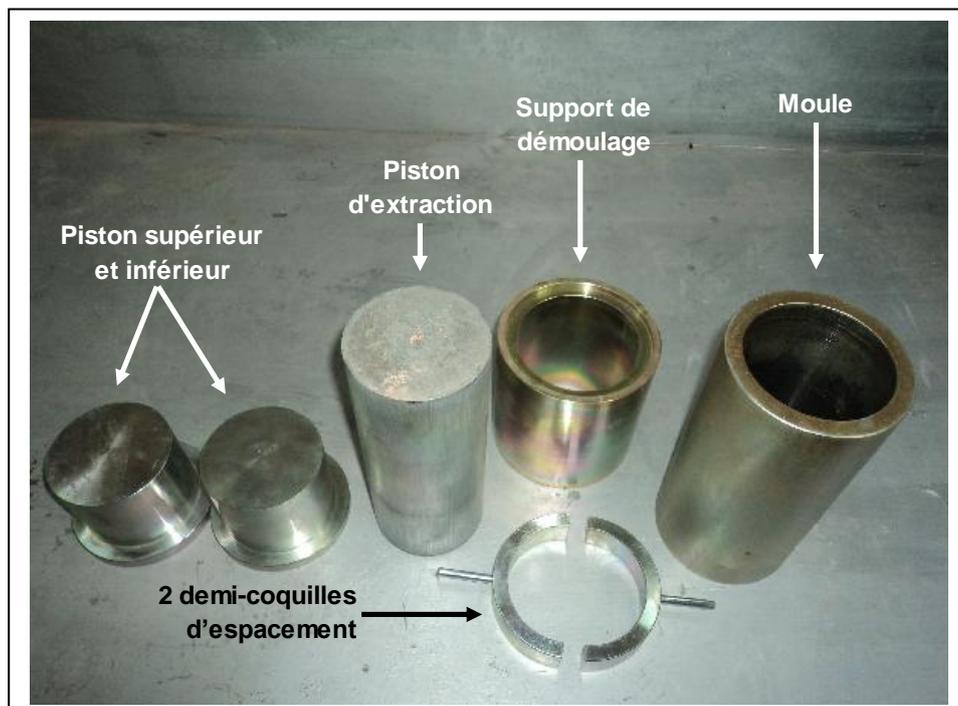


Fig.4.4. Matériel pour la confection des éprouvettes

#### 4.2.3. Remplissage du moule

Les deux demi-coquilles d'espacement ( $h = 25 \text{ mm}$ ) sont disposées entre le corps du moule et l'embase du piston inférieur (Figure 4.5). Le moule est rempli par le haut, en 3 fois, en tassant légèrement le mélange entre chaque couche.



Fig 4.5. Disposition avant le Remplissage du moule

#### 4.2.4. Compactage de l'éprouvette

Une fois le moule rempli, les deux demi-coquilles d'espacement sont retirées et le piston supérieur est mis en place. L'ensemble est disposé sur une presse (presse Controlab, capacité 1500 KN) et on procède au compactage, sans à-coup (Figures 4.6). La durée de l'opération ne doit pas être inférieure à 10 secondes. Une fois les embases en contact avec le corps du moule, la charge est maintenue pendant 10 secondes.



Fig.4.6.a. Presse utilisée



Fig4.6.b. Compactage statique des éprouvettes

#### 4.2.5. Démoulage de l'éprouvette

Après le compactage, les deux pistons sont retirés. Afin d'éviter que l'éprouvette ne se détériore lors du démoulage, elle est extraite du corps du moule par le haut. Pour cela, on dispose la rehausse sur la partie supérieure du moule et on insère le contre piston par le dessous. En appliquant une pression sur la rehausse, l'éprouvette est démoulée (Figure 4.7).



Fig. 4.7. Extraction de l'éprouvette



Fig. 4.8. Conservation des éprouvettes

#### 4.2.6. Conservation normale des éprouvettes

Après démoulage, les éprouvettes sont introduites dans des sachets plastiques fermés (Figure 4.8), et disposées dans une pièce climatisée à  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  pendant le temps de maturation nécessaire (suivant l'essai).

### 4.3. Répartition des éprouvettes en fonction des essais

Pour chaque sable, nous avons 20 mélanges à étudier. Pour chaque mélange, nous avons confectionné 09 éprouvettes (trois éprouvettes pour chaque essai : essai de compression, de traction par fendage, module d'élasticité et tenue à l'immersion). Au total, ce sont donc 720 éprouvettes qui ont été fabriquées pour l'ensemble de cette partie de notre travail expérimental.

### 4.4. Etude des performances mécaniques

#### 4.4.1. Résistance en compression

Suivant le planning précédemment défini, les éprouvettes sont retirées de leur sachet étanche après 28 jours de conservation, et testées en compression simple (Figure 4.9.a) selon la norme NF EN 13286-41 [46], sur une presse d'une capacité de 50 KN. La presse a été équipée d'un anneau dynamométrique d'une capacité de 30 KN, permettant la mesure de la force de rupture de l'éprouvette testée (Figure 4.9.b). La vitesse de déplacement du plateau a été fixée à 2 mm/min. Cet essai a été réalisé au sein de laboratoire LNHC – Djelfa.



**Fig. 4.9.a.** Essai de compression simple



**Fig. 4.9.b.** Presse utilisée

#### 4.4.1.1. Résultats

Les valeurs moyennées de la résistance en compression pour chaque mélange sont regroupées dans le tableau 4.1 (Les détails de ces résultats ont été rassemblés en annexe II).

**Tableau 4.1.** Résultats de L'essai de compression simple pour les séries SM, SZ et SA

Mélanges de la Série SM	R <sub>c28</sub> (MPa)	Mélanges de la Série SZ	R <sub>c28</sub> (MPa)	Mélanges de la Série SA	R <sub>c28</sub> (MPa)
SM 100-00-0	0,00	SZ 100-00-0	0,00	SA 100-00-0	0,00
SM 90-00-10	0,00	SZ 90-00-10	0,00	SA 90-00-10	0,00
SM 80-00-20	0,00	SZ 80-00-20	0,00	SA 80-00-20	0,00
SM 70-00-30	0,00	SZ 70-00-30	0,00	SA 70-00-30	0,00
SM 98-02-00	0,19	SZ 98-02-00	0,16	SA 98-02-00	0,14
SM 88-02-10	0,28	SZ 88-02-10	0,25	SA 88-02-10	0,18
SM 78-02-20	0,34	SZ 78-02-20	0,33	SA 78-02-20	0,27
SM 68-02-30	0,59	SZ 68-02-30	0,52	SA 68-02-30	0,42
SM 96-04-00	0,56	SZ 96-04-00	0,43	SA 96-04-00	0,34
SM 86-04-10	1,02	SZ 86-04-10	0,66	SA 86-04-10	0,54
SM 76-04-20	1,32	SZ 76-04-20	0,84	SA 76-04-20	0,73
SM 66-04-30	1,95	SZ 66-04-30	1,19	SA 66-04-30	1,02
SM 94-06-00	0,96	SZ 94-06-00	0,92	SA 94-06-00	0,83
SM 84-06-10	1,57	SZ 84-06-10	1,24	SA 84-06-10	1,11
SM 74-06-20	2,55	SZ 74-06-20	1,64	SA 74-06-20	1,51
SM 64-06-30	3,42	SZ 64-06-30	2,11	SA 64-06-30	1,96
SM 92-08-00	1,97	SZ 92-08-00	1,98	SA 92-08-00	1,81
SM 82-08-10	2,92	SZ 82-08-10	2,47	SA 82-08-10	2,36
SM 72-08-20	4,44	SZ 72-08-20	2,81	SA 72-08-20	2,75
SM 62-08-30	5,57	SZ 62-08-30	3,85	SA 62-08-30	3,07
SM 90-10-00	3,87	SZ 90-10-00	3,78	SA 90-10-00	3,51
SM 80-10-10	5,59	SZ 80-10-10	4,88	SA 80-10-10	4,62
SM 70-10-20	7,38	SZ 70-10-20	5,73	SA 70-10-20	5,12
SM 60-10-30	8,86	SZ 60-10-30	6,54	SA 60-10-30	5,71

#### 4.4.1.2. Interprétations des résultats obtenus

##### 4.4.1.2.1. Effet de la provenance du sable sur la résistance en compression

D'après la Figure 4.10, on constate que la provenance de sable influe d'une façon très significative sur la résistance à la compression. La résistance moyenne en compression des mélanges à base de sable SM (2,30 MPa) est supérieure à celle des mélanges composés de sable SZ (1,75 MPa). Les mélanges constitués de sable SA donnent la résistance moyenne la plus faible (1,59 MPa). Cette différence peut être expliquée par la distinction de la granulométrie pour chaque sable (La granulométrie de sable SM est la plus étalée; le sable SA est légèrement plus grossier que le sable SZ (Figure 2.2)).

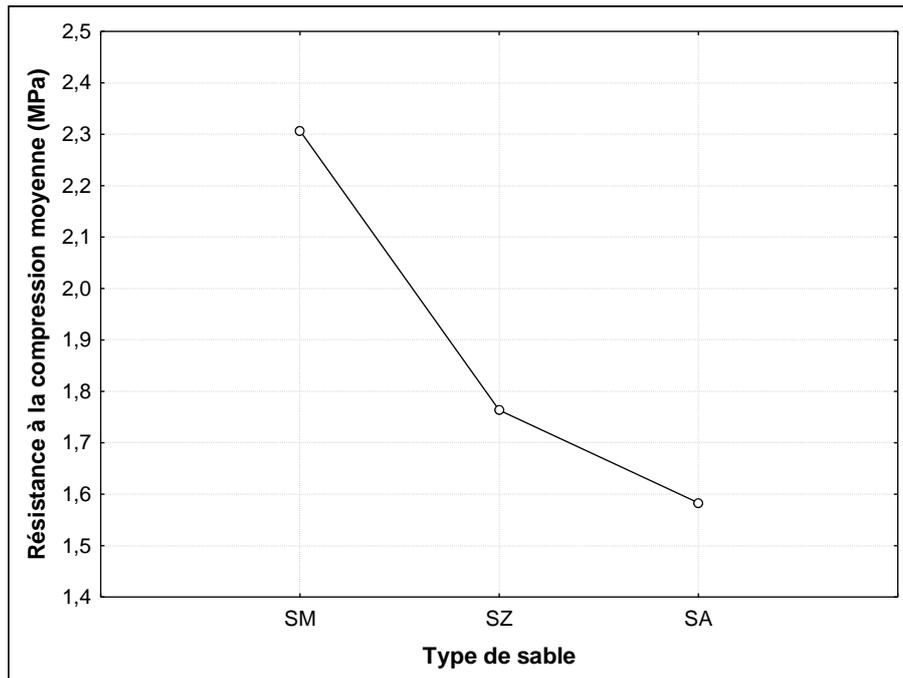


Figure 4.10. Effet de la provenance du sable sur la résistance moyenne en compression

Pour les mélanges à base de sable SM, Les résultats obtenus sont conformes (paragraphe 3.3.1.d.1), en raison de sa granulométrie la plus étalée et leurs densités sèches maximales les plus élevées.

##### 4.4.1.2.2. Effet de ciment sur la résistance en compression

D'après la Figure 4.11, on constate que la relation entre la quantité du ciment ajoutée aux mélanges et la résistance en compression moyenne (moyenne des résistances des mélanges qui ont le même dosage de ciment) est croissante, et suit une fonction parabolique. En outre, on constate que quelle que soit la provenance du sable et la proportion de sable SF, l'augmentation de la quantité de ciment ajoutée au mélange influe d'une façon très significative sur la résistance en compression. Cela est dû principalement au double rôle assuré par le ciment; il assure le rôle de liant et participe à la correction granulométrique des sables étudiés.

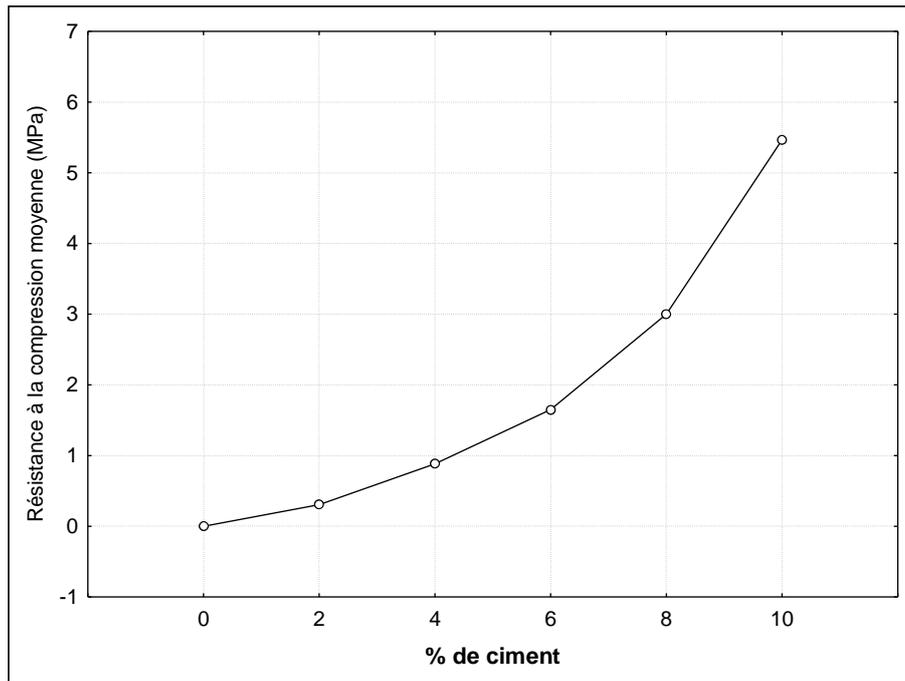


Figure 4.11. Effet de ciment sur la résistance en compression moyenne

#### 4.4.1.2.3. Effet du correcteur granulaire sur la résistance en compression

La Figure 4.12 représente l'évolution de la résistance en compression moyenne (moyenne des résistances des mélanges qui ont le même dosage en sable SF). On remarque que la relation entre la quantité du sable SF ajoutée aux mélanges et la résistance en compression moyenne est croissante, et suit une loi linéaire. On remarque aussi que, quels que soient la provenance du sable et le dosage de ciment, l'augmentation de la quantité de sable SF ajoutée au mélange influe d'une façon très significative sur la résistance en compression. Ce qui explique l'efficacité du correcteur granulaire utilisé à l'amélioration de la compacité des mélanges et par conséquent leurs résistances en compression.

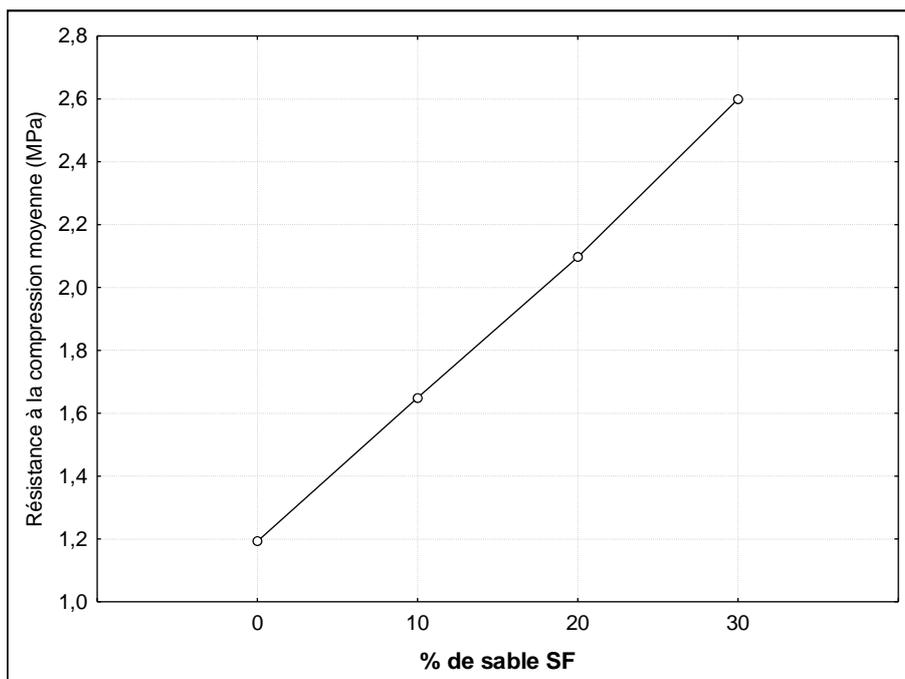


Figure 4.12. Effet de correcteur granulaire sur la résistance en compression moyenne

4.4.1.2.4. Evolution de la résistance en compression

Les courbes de la Figure 4.13.a. représentent l'évolution de la résistance en compression en fonction du pourcentage de ciment pour une teneur en sable SF donnée. On constate que, pour un pourcentage de sable SF déterminé, la résistance en compression augmente d'une façon très significative et suit une fonction parabolique avec l'augmentation de la quantité du ciment. On remarque aussi que pour les dosages 0% et 2% de ciment l'effet de la provenance de sable de dune n'est pas significatif, et qu'au-delà de 4% cet effet devient plus significatif.

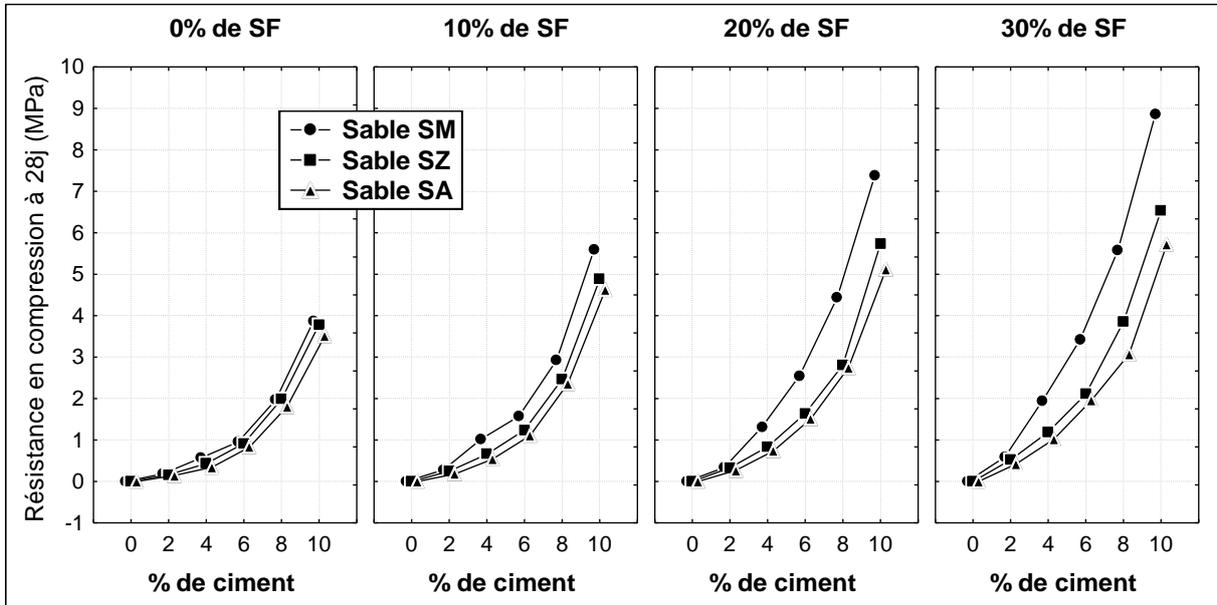


Figure 4.13.a. Evolution de la résistance en compression en fonction du pourcentage de ciment pour une teneur en SF donnée.

Les courbes de la Figure 4.13.b. représentent l'évolution de la résistance en compression en fonction de la teneur en sable SF pour un pourcentage de ciment fixé.

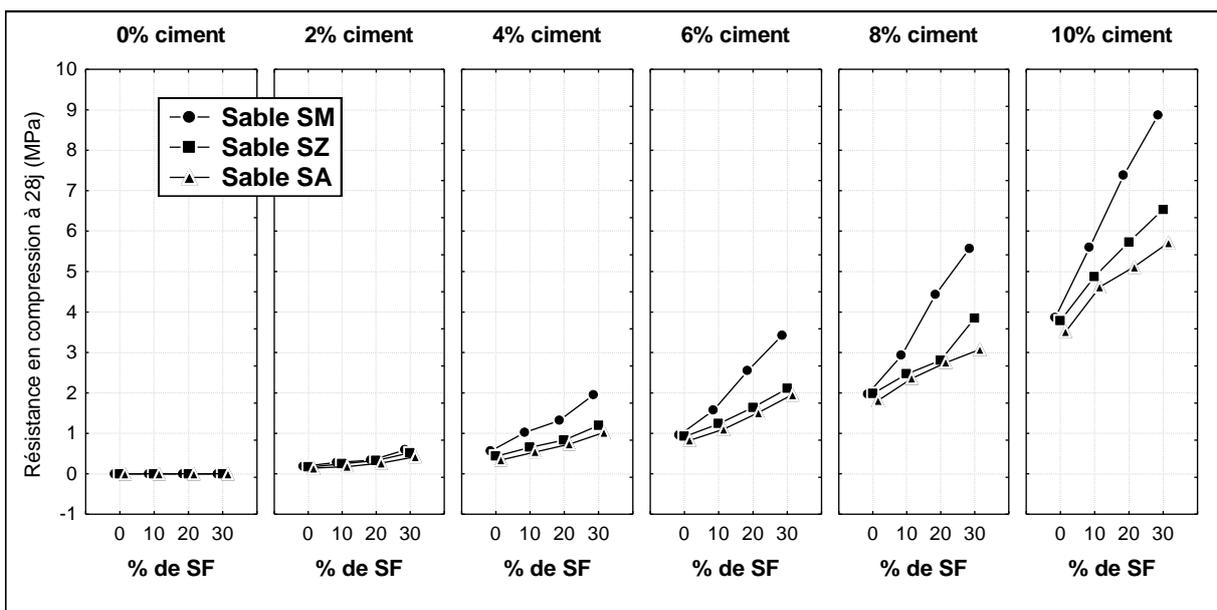


Figure 4.13.b. Evolution de la résistance en compression en fonction du pourcentage de sable SF pour une teneur en SF fixée.

On remarque que, pour une proportion de ciment déterminée, la résistance en compression augmente d'une façon très significative et suit une fonction linéaire avec l'augmentation de la quantité ajoutée de sable SF (Ce qui confirme l'efficacité du sable SF à l'amélioration de la compacité des mélanges et par conséquent leurs résistances en compression). On remarque aussi qu'au-delà de 10% de sable SF, l'effet de la provenance de sable de dune devient significatif, et qu'au-delà de 4% de ciment, l'addition de sable SF aux mélanges devient plus efficace à l'amélioration de la résistance en compression.

Pour une teneur en ciment égale à 10%, la correction granulométrique avec 30% de sable SF peut donner un gain de résistance en compression égal à 128% pour le sable SM, 73% pour le sable SZ et de 63% pour le sable SA. Ces valeurs démontrent clairement l'efficacité de sable SF à amélioration de la résistance en compression des sables stabilisés.

Pour des pourcentages de ciment et de sable SF fixes, les mélanges constitués de sable SM, présentent les meilleures résistances à la compression. Ceci est principalement dû à sa granulométrie qui est relativement meilleure que celle des sables SZ et SA (la granulométrie correspondant au sable SM est plus étalée que celles de SZ et SA (Figure 2.2)).

Conformément à la classification de la norme NF EN 14227-1 (classification selon la résistance à la compression à 28 jours) [26], la stabilisation des sables étudiés au ciment et sable SF peut donner des résistances de classe  $C_{5/6}$  (Résistance à la compression comprise entre 6 et 10 MPa) dans le cas de sable SM et SZ, et de classe  $C_{3/4}$  (résistance à la compression comprise entre 4 et 6 MPa) dans le cas de sable SA (l'éclatement de l'éprouvette testée est pris en compte).

#### **4.4.1.2.5. Relation entre la résistance en compression et la densité sèche maximale**

D'après les résultats obtenus dans cette partie de notre étude expérimentale et la partie précédente (détermination des paramètres Proctor), on a trouvé qu'il existait un lien entre la densité sèche maximale et la résistance en compression. L'objectif de ce paragraphe est l'évaluation de la signification de cette relation (signification du coefficient de corrélation) et la définition des équations mathématiques qui gèrent cette dernière.

Les figures 4.14 et 4.15 présentent les relations entre la résistance en compression à 28 jours de sable stabilisé et la densité sèche maximale. Sur chaque figure, les coefficients de corrélation sont donnés.

Les Figures 4.14 présentent la relation entre la résistance à la compression et la densité sèche maximale pour une teneur en sable SF fixée.

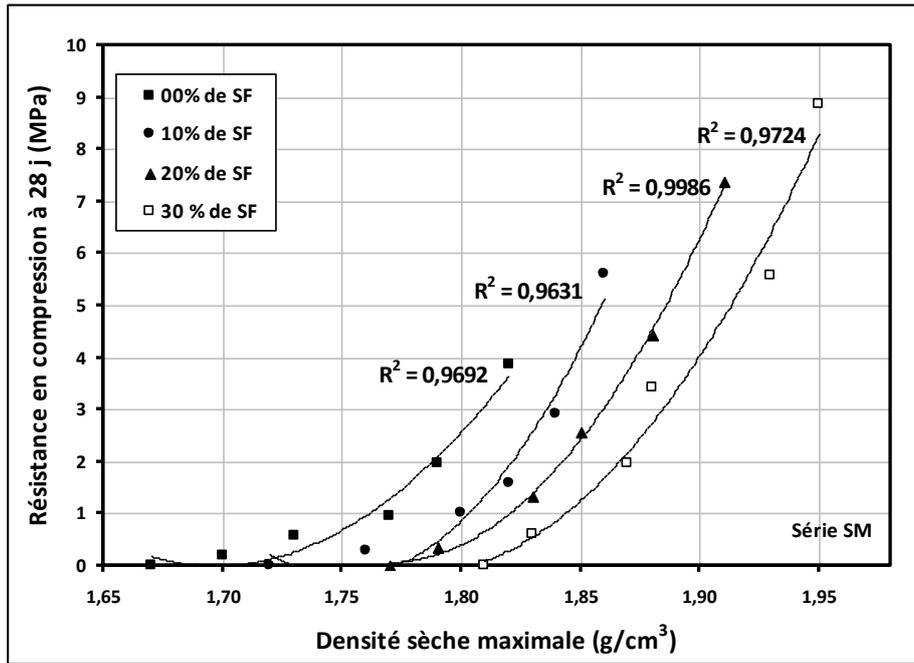


Figure 4.14.a. Relation entre la résistance en compression et la densité sèche maximale pour une teneur en SF fixée (Série SM)

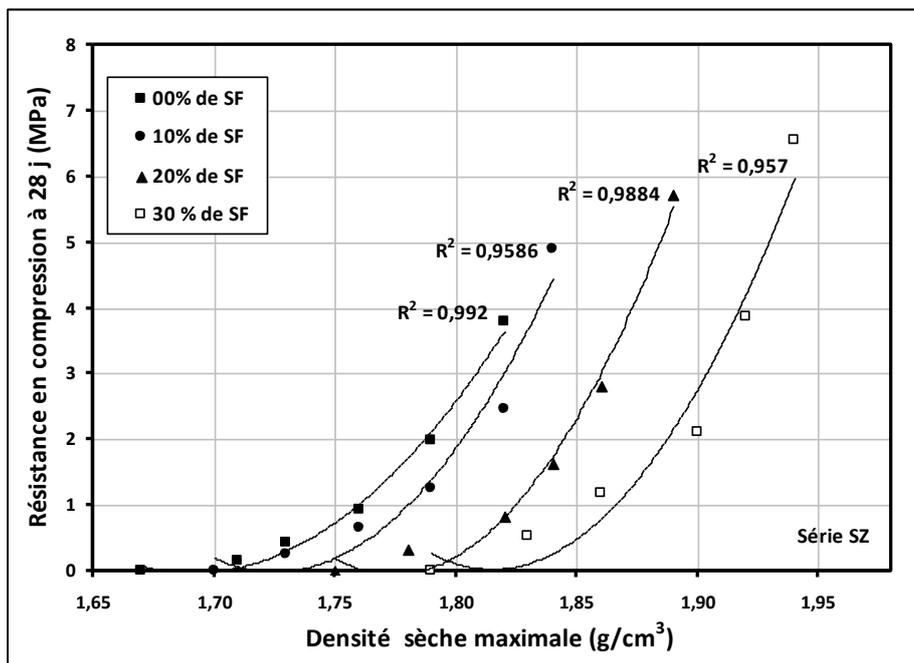


Figure 4.14.b. Relation entre la résistance en compression et la densité sèche maximale pour une teneur en SF fixée (Série SZ)

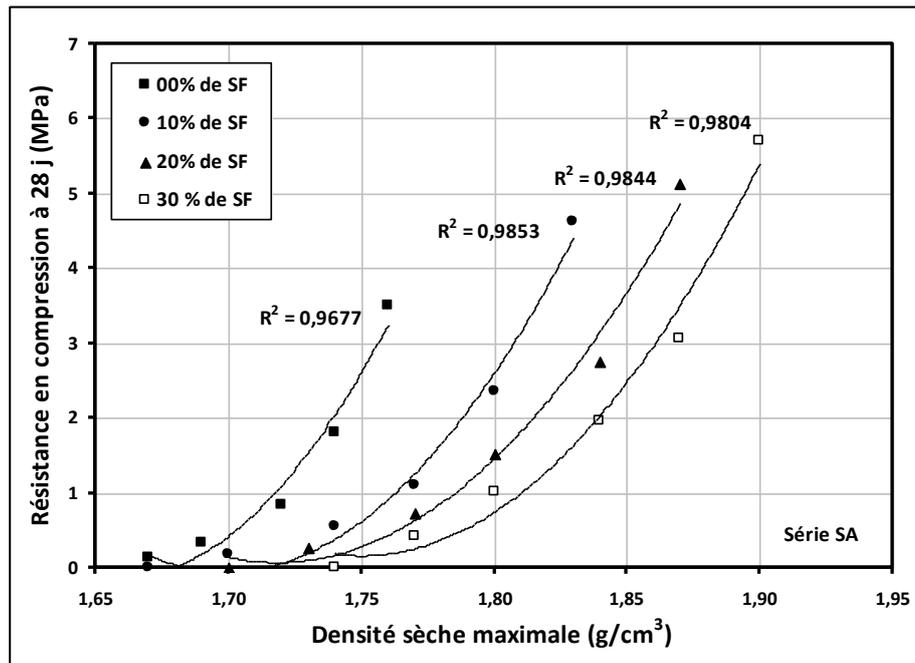


Figure 4.14.c. Relation entre la résistance en compression et la densité sèche maximale pour une teneur en SF fixée (Série SA)

On peut remarquer que pour un dosage de sable SF constant, la résistance à la compression est strictement liée à la densité sèche maximale (coefficients de corrélation très significatifs : supérieurs à 0,95). Cette relation est d'ordre croissant et suit une fonction parabolique. Elle peut être représentée par les équations suivantes:

• **Pour la série SM :**

$$R_{C28} = 242,85 \gamma_d^2 - 824,18 \gamma_d + 699,29 \quad (R^2 = 0,9692) \quad \text{pour } 0 \% \text{ SF} \quad (4.3)$$

$$R_{C28} = 452,58 \gamma_d^2 - 1585 \gamma_d + 1387,5 \quad (R^2 = 0,9631) \quad \text{pour } 10\% \text{ SF} \quad (4.4)$$

$$R_{C28} = 370,08 \gamma_d^2 - 1310,1 \gamma_d + 1159,5 \quad (R^2 = 0,9986) \quad \text{pour } 20\% \text{ SF} \quad (4.5)$$

$$R_{C28} = 296,24 \gamma_d^2 - 1055 \gamma_d + 939,06 \quad (R^2 = 0,9724) \quad \text{pour } 30\% \text{ SF} \quad (4.6)$$

• **Pour la série SZ :**

$$R_{C28} = 223,72 \gamma_d^2 - 756,89 \gamma_d + 640,14 \quad (R^2 = 0,9920) \quad \text{pour } 0 \% \text{ SF} \quad (4.7)$$

$$R_{C28} = 339,66 \gamma_d^2 - 1172,1 \gamma_d + 1011,1 \quad (R^2 = 0,9586) \quad \text{pour } 10\% \text{ SF} \quad (4.8)$$

$$R_{C28} = 419,84 \gamma_d^2 - 1489,9 \gamma_d + 1321,8 \quad (R^2 = 0,9884) \quad \text{pour } 20\% \text{ SF} \quad (4.9)$$

$$R_{C28} = 383,56 \gamma_d^2 - 1392,5 \gamma_d + 1263,9 \quad (R^2 = 0,9570) \quad \text{pour } 30\% \text{ SF} \quad (4.10)$$

• **Pour la série SA :**

$$R_{C28} = 331,22 \gamma_d^2 - 1098,8 \gamma_d + 911,06 \quad (R^2 = 0,9677) \quad \text{pour } 0 \% \text{ SF} \quad (4.11)$$

$$R_{C28} = 262,32 \gamma_d^2 - 891,48 \gamma_d + 757,36 \quad (R^2 = 0,9853) \quad \text{pour } 10\% \text{ SF} \quad (4.12)$$

$$R_{C28} = 209,21 \gamma_d^2 - 719,04 \gamma_d + 617,89 \quad (R^2 = 0,9844) \quad \text{pour } 20\% \text{ SF} \quad (4.13)$$

$$R_{C28} = 234,71 \gamma_d^2 - 821,65 \gamma_d + 719,25 \quad (R^2 = 0,9804) \quad \text{pour } 30\% \text{ SF} \quad (4.14)$$

Tel que ;  $R_{C28}$  en MPa et  $\gamma_d$  en  $\text{g/cm}^3$

Ces équations montrent, qu'il est possible d'estimer la résistance à la compression à 28 jours, lorsque la densité sèche maximale et le dosage de sable SF sont connus.

Les Figures 4.15 présentent la relation entre la résistance à la compression et la densité sèche maximale pour un dosage en ciment fixé.

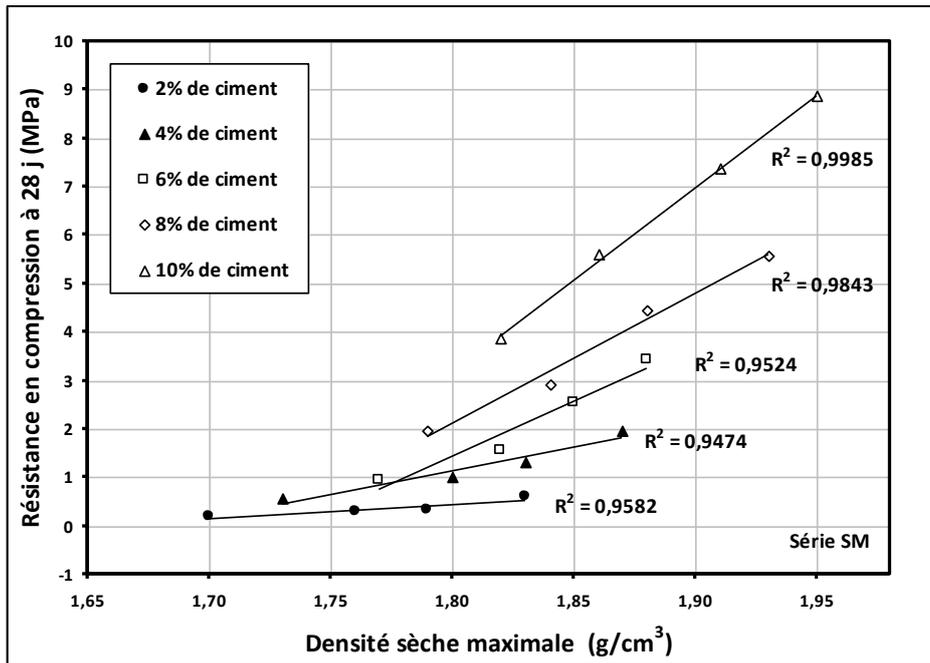


Figure 4.15.a. Relation entre la résistance en compression et la densité sèche maximale pour une teneur en ciment déterminée (Série SM)

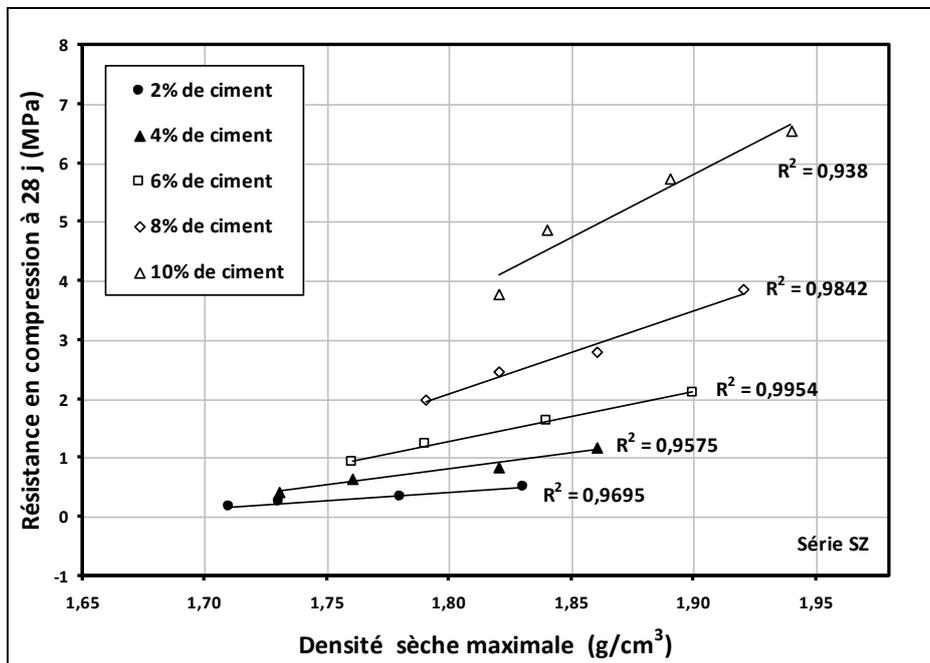


Figure 4.15.b. Relation entre la résistance en compression et la densité sèche maximale pour une teneur en ciment déterminée (Série SZ)

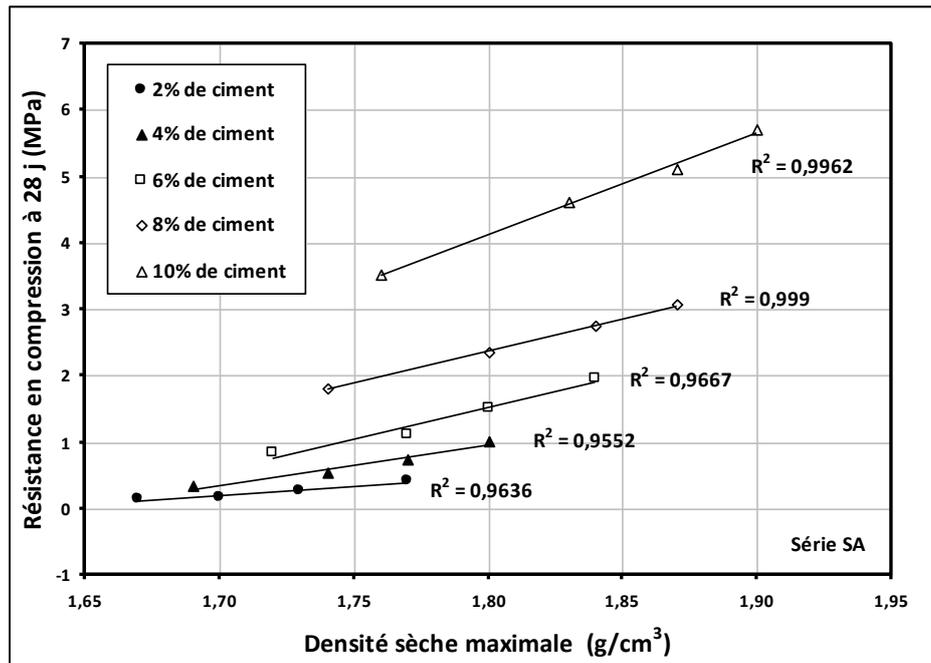


Figure 4.15.c. Relation entre la résistance en compression et la densité sèche maximale pour une teneur en ciment déterminée (Série SA)

On peut remarquer que pour un dosage de ciment constant, la résistance à la compression est strictement liée à la densité sèche maximale (coefficients de corrélation très significatifs : supérieurs à 0,93). Cette relation est d'ordre croissant et suit une fonction linéaire. Elle peut être représentée par les équations suivantes:

• **Pour la série SM :**

$$R_{C28} = 2,9 \gamma_d - 4,783 \quad (R^2 = 0,9582) \quad \text{pour 2\% de ciment} \quad (4.15)$$

$$R_{C28} = 9,5967 \gamma_d - 16,133 \quad (R^2 = 0,9474) \quad \text{pour 4\% de ciment} \quad (4.16)$$

$$R_{C28} = 22,621 \gamma_d - 39,274 \quad (R^2 = 0,9524) \quad \text{pour 6\% de ciment} \quad (4.17)$$

$$R_{C28} = 26,642 \gamma_d - 45,828 \quad (R^2 = 0,9843) \quad \text{pour 8\% de ciment} \quad (4.18)$$

$$R_{C28} = 38,052 \gamma_d - 65,302 \quad (R^2 = 0,9985) \quad \text{pour 10\% de ciment} \quad (4.19)$$

• **Pour la série SZ :**

$$R_{C28} = 2,8069 \gamma_d - 4,6322 \quad (R^2 = 0,9695) \quad \text{pour 2\% de ciment} \quad (4.20)$$

$$R_{C28} = 5,3625 \gamma_d - 8,8323 \quad (R^2 = 0,9575) \quad \text{pour 4\% de ciment} \quad (4.21)$$

$$R_{C28} = 8,3459 \gamma_d - 13,73 \quad (R^2 = 0,9954) \quad \text{pour 6\% de ciment} \quad (4.22)$$

$$R_{C28} = 13,982 \gamma_d - 23,053 \quad (R^2 = 0,9842) \quad \text{pour 8\% de ciment} \quad (4.23)$$

$$R_{C28} = 21,288 \gamma_d - 34,63 \quad (R^2 = 0,9380) \quad \text{pour 10\% de ciment} \quad (4.24)$$

• **Pour la série SA :**

$$R_{C28} = 2,8539 \gamma_d - 4,649 \quad (R^2 = 0,9636) \quad \text{pour 2\% de ciment} \quad (4.25)$$

$$R_{C28} = 6,0303 \gamma_d - 9,8955 \quad (R^2 = 0,9552) \quad \text{pour 4\% de ciment} \quad (4.26)$$

$$R_{C28} = 9,5603 \gamma_d - 15,689 \quad (R^2 = 0,9667) \quad \text{pour 6\% de ciment} \quad (4.27)$$

$$R_{C28} = 9,6491 \gamma_d - 14,991 \quad (R^2 = 0,9990) \quad \text{pour 8\% de ciment} \quad (4.28)$$

$$R_{C28} = 15,382 \gamma_d - 23,563 \quad (R^2 = 0,9962) \quad \text{pour } 10\% \text{ de ciment} \quad (4.29)$$

Tel que ;  $R_{C28}$  en MPa et  $\gamma_d$  en  $\text{g/cm}^3$

Ces équations montrent, qu'il est possible d'estimer la résistance à la compression à 28 jours, lorsque la densité sèche maximale et le dosage de ciment sont connus.

#### 4.4.2. Résistance en traction

Les éprouvettes sont retirées de leurs sachets étanches après 90 jours de conservation, et testées en traction par fendage (Figure 4.16) selon la norme NF EN 13286-42 [47], sur une presse d'une capacité 50 KN. Elle a été équipée d'un anneau dynamométrique d'une capacité de 10 KN permettant la mesure de la force de rupture de l'éprouvette testée.

La vitesse de déplacement du plateau a été fixée à 0,2 mm/min. Cet essai a été réalisé au sein de laboratoire LNHC – Djelfa.

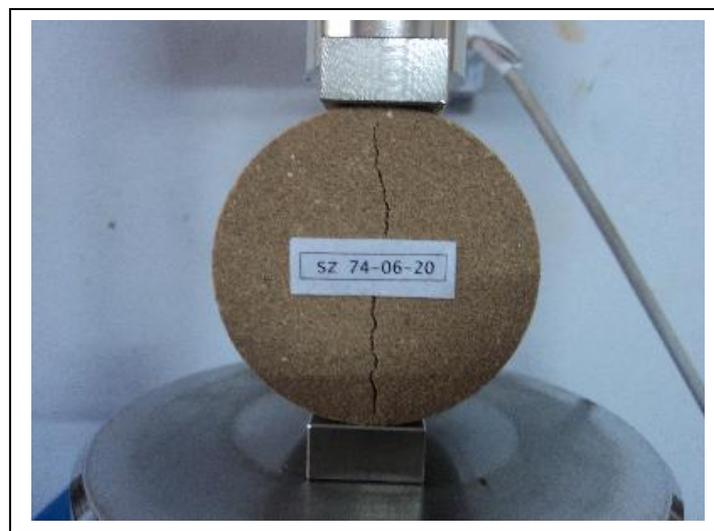


Figure 4.16. Essai de traction par fendage

##### 4.4.2.1. Résultats

Les valeurs moyennées de la résistance à la traction par fendage pour chaque mélange sont regroupées dans le tableau 4.2 (Les détails de ces résultats ont été rassemblés en annexe II).

Tableau 4.2. Résultats de L'essai de traction pour les séries SM, SZ et SA

Mélanges de Série SM	R <sub>t 90</sub> (MPa)	Mélanges de Série SZ	R <sub>t 90</sub> (MPa)	Mélanges de Série SA	R <sub>t 90</sub> (MPa)
SM 100-00-0	0	SZ 100-00-0	0,000	SA 100-00-0	0,000
SM 90-00-10	0	SZ 90-00-10	0,000	SA 90-00-10	0,000
SM 80-00-20	0	SZ 80-00-20	0,000	SA 80-00-20	0,000
SM 70-00-30	0	SZ 70-00-30	0,000	SA 70-00-30	0,000
SM 98-02-00	0,021	SZ 98-02-00	0,012	SA 98-02-00	0,014
SM 88-02-10	0,025	SZ 88-02-10	0,019	SA 88-02-10	0,022
SM 78-02-20	0,035	SZ 78-02-20	0,021	SA 78-02-20	0,026
SM 68-02-30	0,046	SZ 68-02-30	0,032	SA 68-02-30	0,036
SM 96-04-00	0,055	SZ 96-04-00	0,049	SA 96-04-00	0,033
SM 86-04-10	0,084	SZ 86-04-10	0,054	SA 86-04-10	0,047
SM 76-04-20	0,114	SZ 76-04-20	0,067	SA 76-04-20	0,060
SM 66-04-30	0,152	SZ 66-04-30	0,092	SA 66-04-30	0,068
SM 94-06-00	0,097	SZ 94-06-00	0,093	SA 94-06-00	0,072
SM 84-06-10	0,133	SZ 84-06-10	0,119	SA 84-06-10	0,102
SM 74-06-20	0,216	SZ 74-06-20	0,161	SA 74-06-20	0,144
SM 64-06-30	0,298	SZ 64-06-30	0,198	SA 64-06-30	0,178
SM 92-08-00	0,242	SZ 92-08-00	0,219	SA 92-08-00	0,189
SM 82-08-10	0,280	SZ 82-08-10	0,253	SA 82-08-10	0,223
SM 72-08-20	0,361	SZ 72-08-20	0,296	SA 72-08-20	0,260
SM 62-08-30	0,509	SZ 62-08-30	0,348	SA 62-08-30	0,309
SM 90-10-00	0,448	SZ 90-10-00	0,446	SA 90-10-00	0,389
SM 80-10-10	0,600	SZ 80-10-10	0,509	SA 80-10-10	0,485
SM 70-10-20	0,686	SZ 70-10-20	0,575	SA 70-10-20	0,566
SM 60-10-30	0,920	SZ 60-10-30	0,686	SA 60-10-30	0,653

#### 4.4.2.2. Interprétations des résultats obtenus

##### 4.4.2.2.1. Effet de la provenance du sable sur la résistance à la traction

On note les mêmes remarques mentionnées dans le cas de la compression simple ; la provenance de sable influe d'une façon très significative sur la résistance à la traction. La résistance en traction moyenne des mélanges à base de sable SM (0,222 MPa) est supérieure à celle des mélanges composés de sable SZ (0,177 MPa). Les mélanges constitués de sable SA donnent la résistance moyenne la plus faible (0,162 MPa). Cette différence est due à la distinction de la granulométrie pour chaque sable (Figure 4.17).

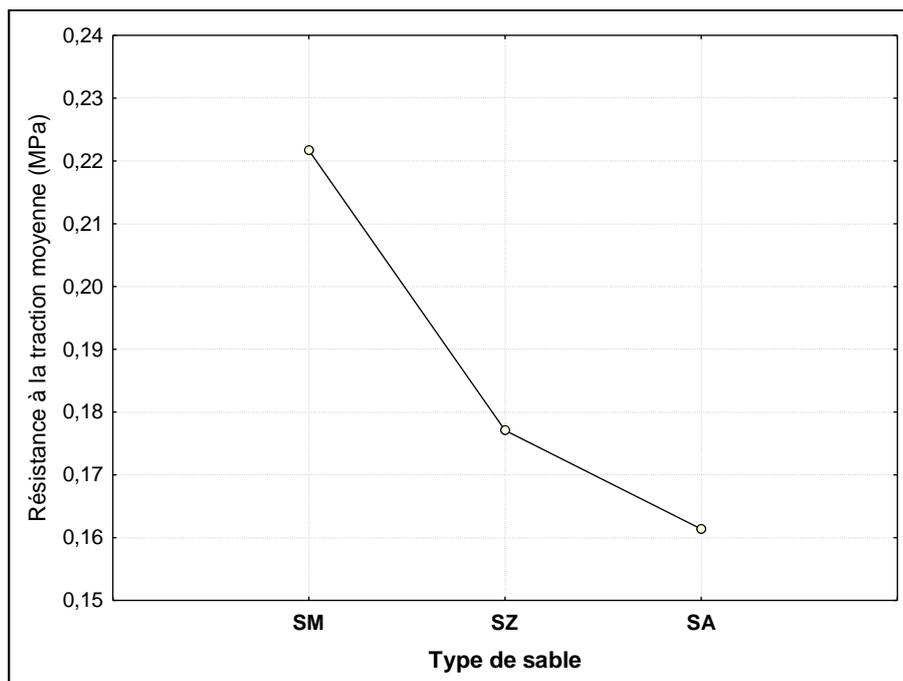


Figure 4.17. Effet de la provenance du sable sur la résistance à la traction moyenne

##### 4.4.2.2.2. Effet du ciment sur la résistance en traction

On note les mêmes remarques qui ont été indiquées dans le cas de la compression simple. La relation entre la quantité de ciment ajoutée aux mélanges et la résistance en traction moyenne (la résistance en traction moyenne est la moyenne des résistances des mélanges qui ont le même dosage de ciment) est croissante, et suit une fonction parabolique. En outre, on constate que, quelle que soit la provenance du sable et la proportion de sable SF, l'augmentation de la quantité de ciment ajoutée au mélange influe d'une façon très significative sur la résistance en traction. Cela est dû principalement au double rôle assuré par le ciment : l'agglomération et la correction granulométrique (Figure 4.18).

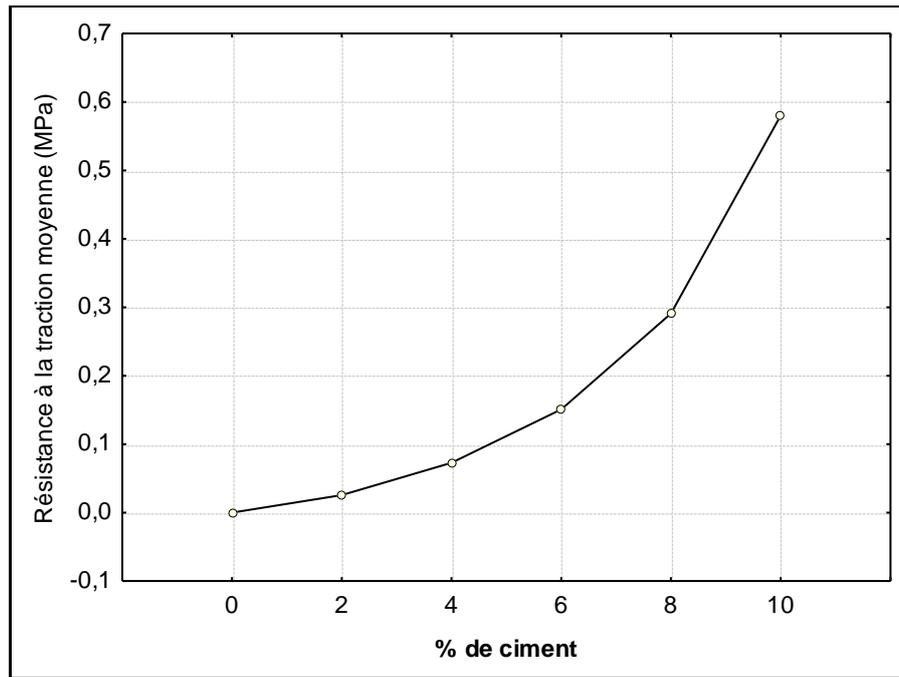


Figure 4.18. Effet du ciment sur la résistance à la traction moyenne

#### 4.4.2.2.3. Effet de correcteur granulaire sur la résistance en traction

On note les mêmes constatations décrites dans le cas de la compression simple. L'évolution de la résistance en traction moyenne (la résistance en traction moyenne est la moyenne des résistances des mélanges qui ont le même dosage en sable SF), fonction de la quantité du sable SF ajoutée aux mélanges suit une loi linéaire. Et on constate aussi que, quels que soient la provenance du sable et le dosage de ciment, l'augmentation de la quantité de sable SF ajoutée au mélange influe d'une façon très significative sur la résistance en compression. Ce qui explique l'efficacité du correcteur granulaire utilisé à l'amélioration de cette caractéristique mécanique (Figure 4.19).

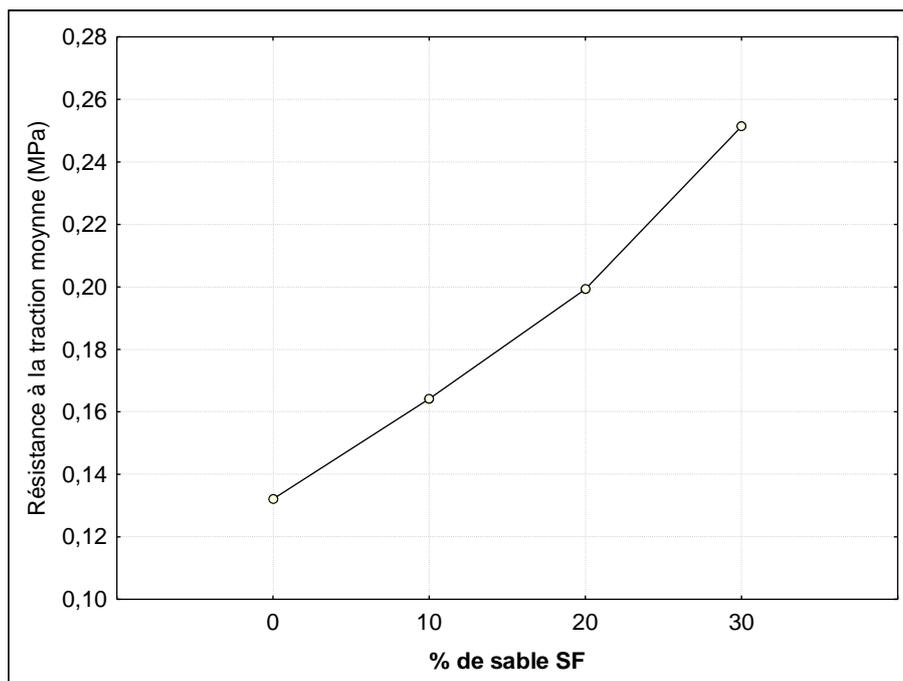
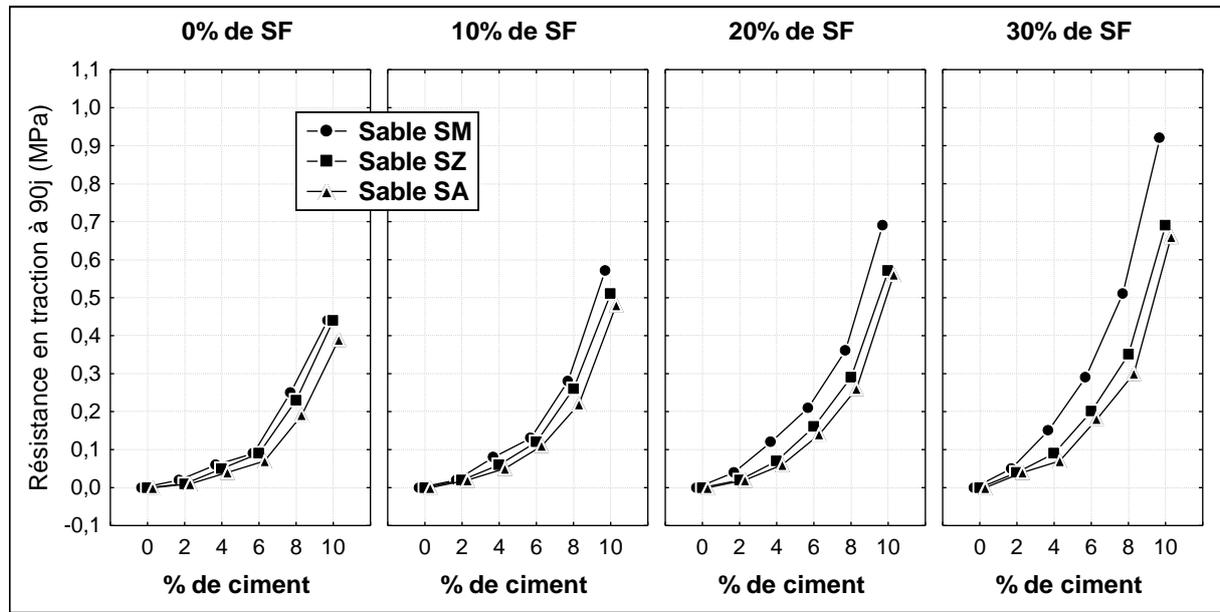


Figure 4.19. Effet de correcteur granulaire sur la résistance à la traction moyenne

#### 4.4.2.2.4. Evolution de la résistance en traction

Les courbes de la Figure 4.19.a. représentent l'évolution de la résistance à la traction en fonction du pourcentage de ciment pour une teneur en sable SF donnée. On constate que, pour un pourcentage de sable SF déterminé, la résistance en compression augmente d'une façon très significative et suit une fonction parabolique avec l'augmentation de la proportion du ciment. On note les mêmes constatations qui ont été décrites dans le cas de la compression simple à savoir ; pour les dosages 0% et 2% de ciment l'effet de la provenance de sable de dune n'est pas significatif, et qu'au-delà de 4% cet effet devient plus significatif.



**Figure 4.19.a.** Evolution de la résistance à la traction en fonction du pourcentage de ciment pour une teneur en SF donnée.

Les courbes de la Figure 4.19.b. représentent l'évolution de la résistance à la traction en fonction de la teneur en sable SF pour un pourcentage de ciment fixée. On remarque que, pour une proportion de ciment déterminée, la résistance à la traction augmente d'une façon très significative et suit une fonction linéaire avec l'augmentation de la quantité ajoutée de sable SF (Ce qui confirme l'efficacité de sable SF à l'amélioration de cette caractéristique mécanique). On remarque aussi qu'au-delà de 4% de ciment, l'addition de sable SF aux mélanges devient plus efficace quant à l'amélioration de la résistance à la traction.

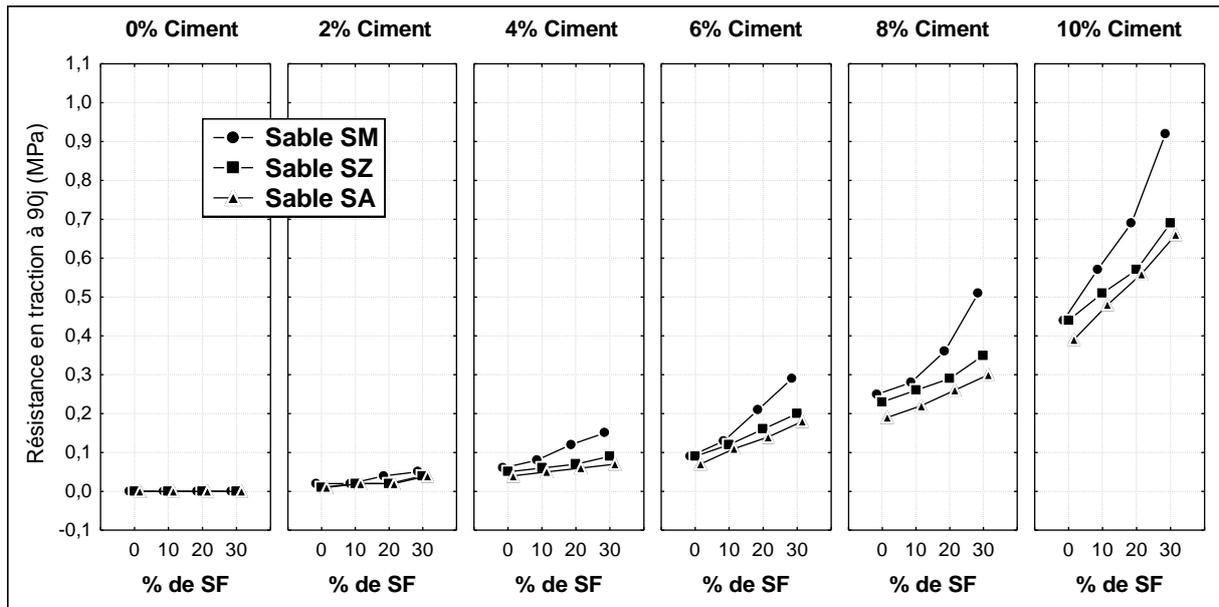


Figure 4.19.b. Evolution de la résistance à la traction en fonction du pourcentage de sable SF pour une teneur en SF fixée.

Pour une teneur en ciment égale à 10%, la correction granulométrique avec 30% de sable SF peut donner un gain de résistance à la traction égal à 108% pour le sable SM, 57% pour le sable SZ et de 67% pour le sable SA. Ces valeurs démontrent clairement l'efficacité de sable SF à l'amélioration de la résistance à la traction des sables stabilisés.

On note la même remarque qui a été mentionnée dans le cas de la compression simple, concernant les mélanges à base de sable SM, qui donnent toujours les meilleures résistances à la traction. Ceci est principalement dû à sa granulométrie qui est relativement meilleure que celle des sables SZ et SA.

Les performances (résistance en traction par fendage) recommandées pour le sable stabilisé au liant hydraulique en couche de fondation ou en couche de base sont indiquées au tableau 4.3.

Tableau 4.3. Performances recommandées en couche de fondation et en couche de base [9]

	Couche de fondation		Couche de base	
	T < 3000 Véhicules/j	T > 3000 Véhicules/j	100 < T < 1000 Véhicules/j	1000 < T < 6000 Véhicules/j
Minimum de résistance en traction par fendage à 90 jours en (MPa)	<b>0,25</b>		<b>0,50</b>	

Les Figures 4.20 montrent que la stabilisation de sable SM avec 8% de ciment et 30% de sable SF est suffisante pour obtenir les performances recommandées pour la couche de base. Pour le sable SZ ces performances ne sont obtenues que pour un dosage minimal de ciment égal à 10% et celui de sable SF égal à 10%, de même pour le sable SA, mais avec une teneur minimale en sable SF égale à 20%.

On peut constater aussi que, la stabilisation de sable SM avec un dosage minimal de ciment égal à 6% et celui de sable SF égal à 30% de sable SF est suffisante pour obtenir les performances recommandées pour la couche de fondation. Pour le sable SZ, ces performances

ne sont obtenues que pour un dosage minimal de ciment égal à 8% et celui de sable SF égal à 10%, de même pour le sable SA, mais avec une teneur minimale en sable SF égale à 20%.

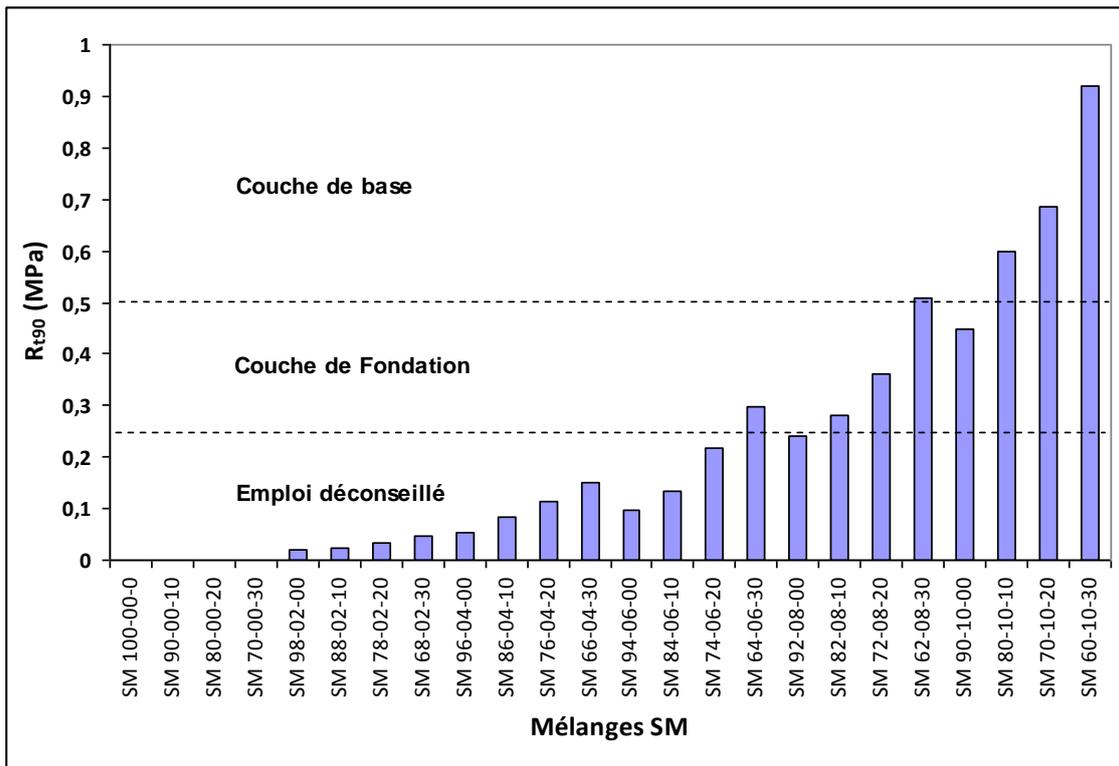


Figure 4.20.a. Classement des mélanges de la série SM d'après leurs résistances en traction à 90 jours

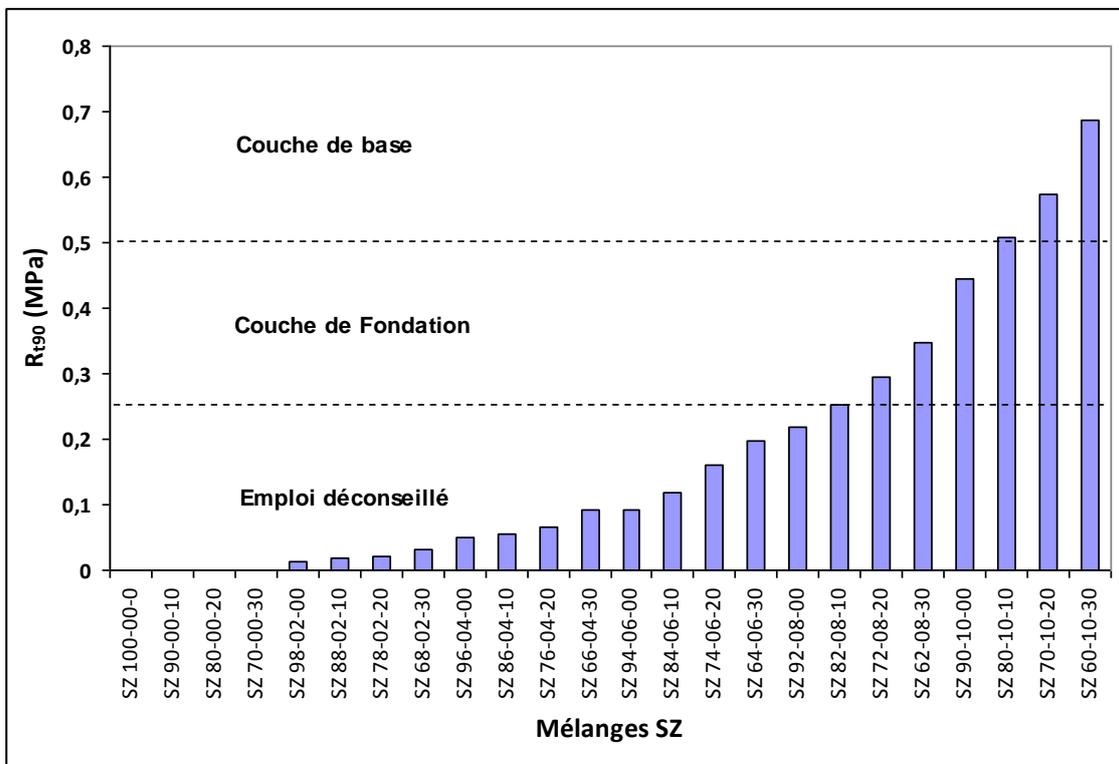
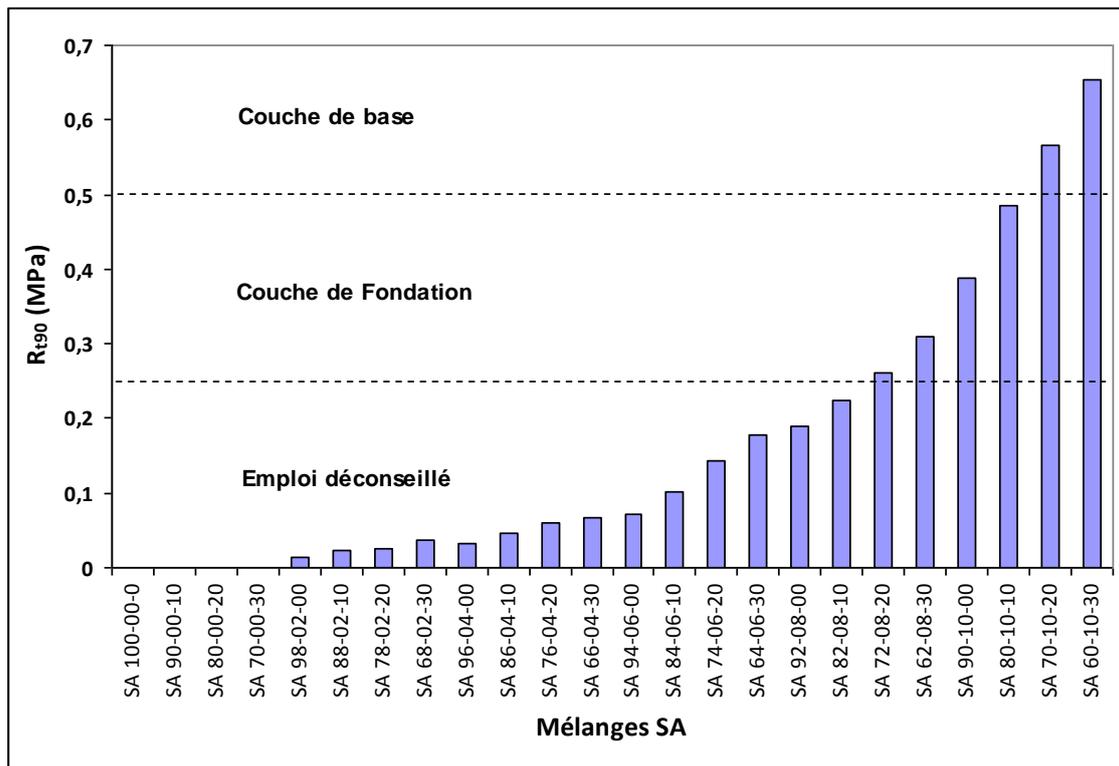


Figure 4.20.b. Classement des mélanges de la série SZ d'après leurs résistances en traction à 90 jours



**Figure 4.20.c.** Classement des mélanges de la série SA d'après leurs résistances en traction à 90 jours

Dans le chapitre suivant (cinquième chapitre), notre étude sera basée sur les mélanges qui ont des résistances en traction à 90 jours supérieures à 0,50 MPa. Ces mélanges seront classés d'après leur module d'élasticité et leur résistance à la traction conformément à la norme NF EN 14227-1 [26].

#### 4.4.2.2.5. Relation entre la résistance en traction et la densité sèche maximale

D'après les résultats obtenus, on a trouvé qu'il existe un lien entre la densité sèche maximale et la résistance en traction. L'objectif de ce paragraphe est l'évaluation de la signification de cette relation et la définition des équations mathématiques qui gèrent cette dernière.

Figures 4.21 et 4.22 présentent les relations entre la résistance en traction à 90 jours de sable stabilisé et la densité sèche maximale. Sur chaque figure, les coefficients de corrélation sont représentés.

Les Figures 4.21 présentent la relation entre la résistance à la traction et la densité sèche maximale pour une teneur en sable SF fixée.

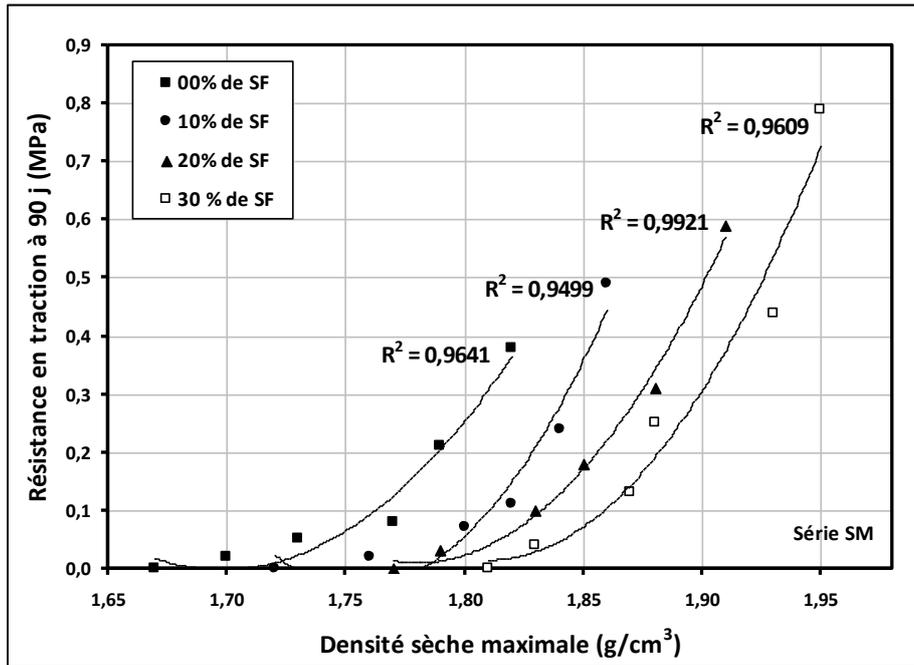


Figure 4.21.a. Relation entre la résistance en traction et la densité sèche maximale pour une teneur en SF fixée (Série SM)

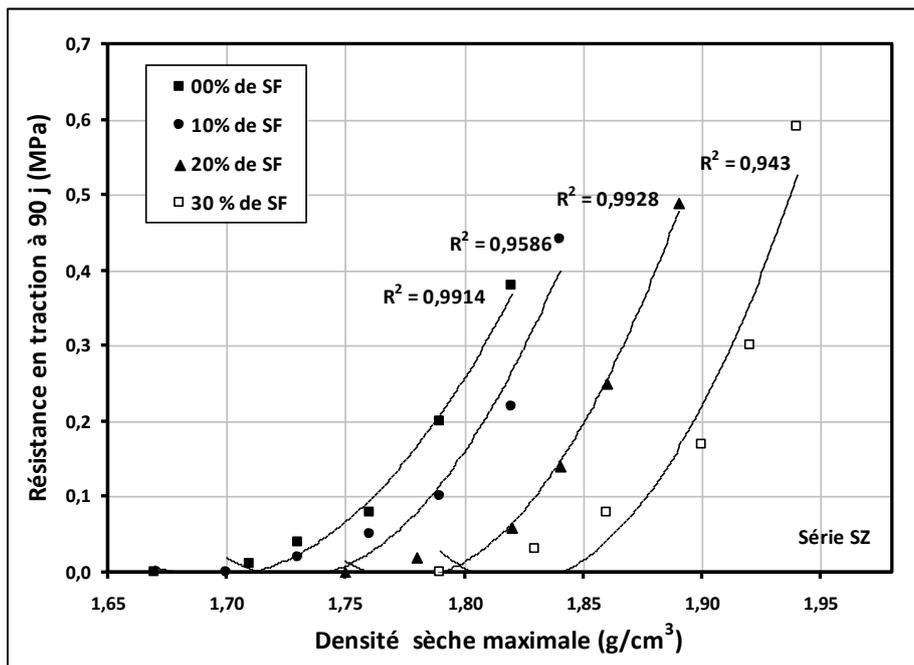


Figure 4.21.b. Relation entre la résistance en traction et la densité sèche maximale pour une teneur en SF fixée (Série SZ)

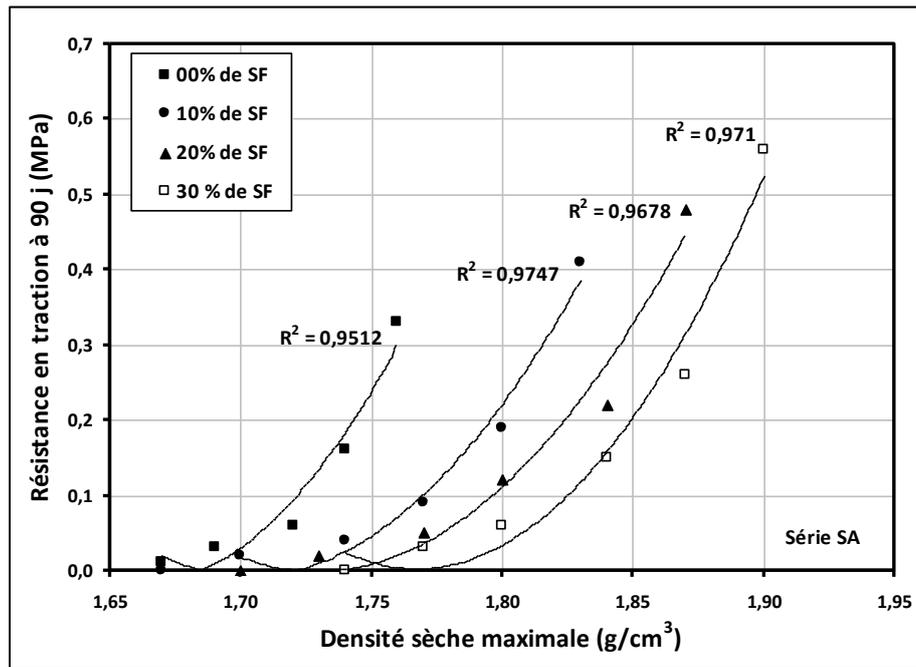


Figure 4.21.c. Relation entre la résistance en traction et la densité sèche maximale pour une teneur en SF fixée (Série SA)

On peut remarquer que pour un dosage de sable SF constant la résistance à la traction est absolument liée à la densité sèche maximale (coefficients de corrélation très significatifs ; supérieurs à 0,94). Cette relation est d'ordre croissant et suit une fonction parabolique. Elle peut être représentée par les équations suivantes:

• **Pour la série SM :**

$$R_{t90} = 24,837 \gamma_d^2 - 84,361 \gamma_d + 71,633 \quad (R^2 = 0,9641) \quad \text{pour } 0 \% \text{ SF} \quad (4.30)$$

$$R_{t90} = 43,616 \gamma_d^2 - 153,12 \gamma_d + 134,36 \quad (R^2 = 0,9499) \quad \text{pour } 10\% \text{ SF} \quad (4.31)$$

$$R_{t90} = 33,58 \gamma_d^2 - 119,58 \gamma_d + 106,46 \quad (R^2 = 0,9921) \quad \text{pour } 20\% \text{ SF} \quad (4.32)$$

$$R_{t90} = 36,764 \gamma_d^2 - 133,14 \gamma_d + 120,55 \quad (R^2 = 0,9609) \quad \text{pour } 30\% \text{ SF} \quad (4.33)$$

• **Pour la série SZ :**

$$R_{t90} = 23,836 \gamma_d^2 - 80,777 \gamma_d + 68,429 \quad (R^2 = 0,9914) \quad \text{pour } 0 \% \text{ SF} \quad (4.34)$$

$$R_{t90} = 32,82 \gamma_d^2 - 113,46 \gamma_d + 98,046 \quad (R^2 = 0,9586) \quad \text{pour } 10\% \text{ SF} \quad (4.35)$$

$$R_{t90} = 37,105 \gamma_d^2 - 131,73 \gamma_d + 116,9 \quad (R^2 = 0,9928) \quad \text{pour } 20\% \text{ SF} \quad (4.36)$$

$$R_{t90} = 38,994 \gamma_d^2 - 142,11 \gamma_d + 129,47 \quad (R^2 = 0,9430) \quad \text{pour } 30\% \text{ SF} \quad (4.37)$$

• **Pour la série SA :**

$$R_{t90} = 32,966 \gamma_d^2 - 109,54 \gamma_d + 90,981 \quad (R^2 = 0,9512) \quad \text{pour } 0 \% \text{ SF} \quad (4.38)$$

$$R_{t90} = 24,643 \gamma_d^2 - 83,951 \gamma_d + 71,491 \quad (R^2 = 0,9747) \quad \text{pour } 10\% \text{ SF} \quad (4.39)$$

$$R_{t90} = 22,65 \gamma_d^2 - 78,339 \gamma_d + 67,735 \quad (R^2 = 0,9678) \quad \text{pour } 20\% \text{ SF} \quad (4.40)$$

$$R_{t90} = 29,854 \gamma_d^2 - 105,55 \gamma_d + 93,289 \quad (R^2 = 0,9710) \quad \text{pour } 30\% \text{ SF} \quad (4.41)$$

Tel que ;  $R_{t90}$  en MPa et  $\gamma_d$  en  $\text{g/cm}^3$

Ces équations montrent, qu'il est possible d'estimer la résistance à la traction à 90 jours, lorsque la densité sèche maximale et le dosage de sable SF sont connus.

Les Figures 4.22 présentent la relation entre la résistance à la traction et la densité sèche maximale pour une proportion de ciment fixée.

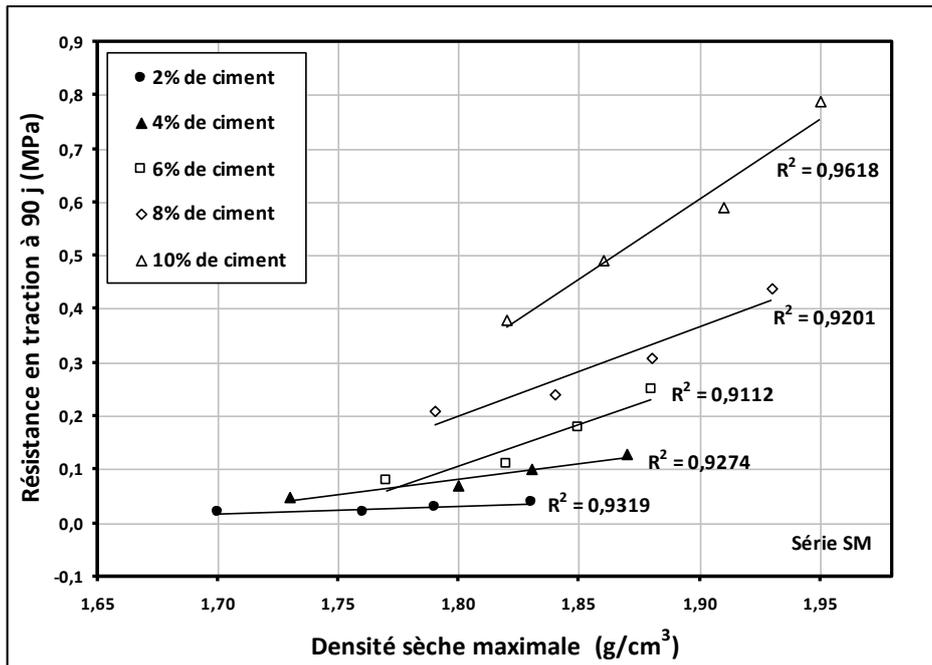


Figure 4.22.a. Relation entre la résistance en traction et la densité sèche maximale pour une teneur en ciment déterminée (Série SM)

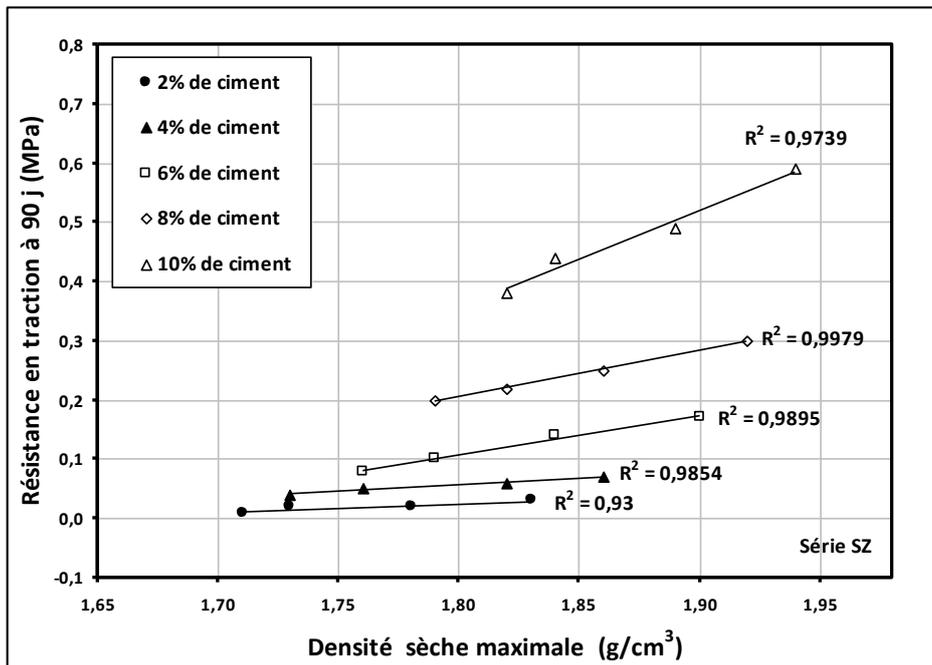


Figure 4.22.b. Relation entre la résistance en traction et la densité sèche maximale pour une teneur en ciment déterminée (Série SZ)

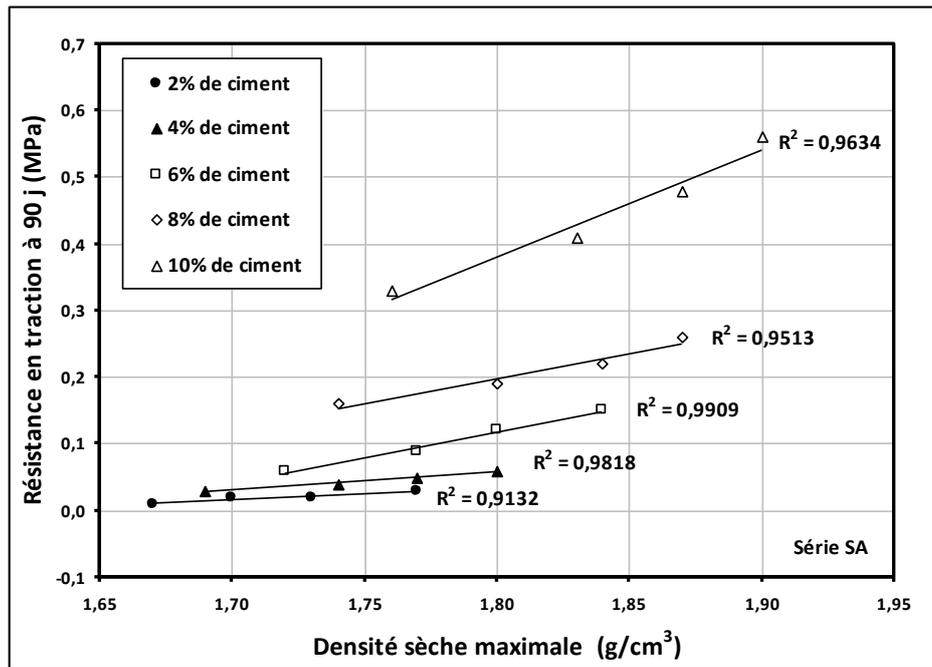


Figure 4.22.c. Relation entre la résistance en traction et la densité sèche maximale pour une teneur en ciment déterminée (Série SA)

On peut remarquer que pour un dosage de ciment constant la résistance à la traction est parfaitement liée à la densité sèche maximale (coefficients de corrélation très significatifs : supérieurs à 0,91). Cette relation est d'ordre croissant et suit une fonction linéaire. Elle peut être représentée par les équations suivantes:

• **Pour la série SM :**

$$R_{t90} = 0,1556 \gamma_d - 0,2478 \quad (R^2 = 0,9319) \quad \text{pour 2\% de ciment} \quad (4.42)$$

$$R_{t90} = 0,5704 \gamma_d - 0,9435 \quad (R^2 = 0,9274) \quad \text{pour 4\% de ciment} \quad (4.43)$$

$$R_{t90} = 1,5455 \gamma_d - 2,6732 \quad (R^2 = 0,9112) \quad \text{pour 6\% de ciment} \quad (4.44)$$

$$R_{t90} = 1,6509 \gamma_d - 2,7708 \quad (R^2 = 0,9201) \quad \text{pour 8\% de ciment} \quad (4.45)$$

$$R_{t90} = 3,0052 \gamma_d - 5,1022 \quad (R^2 = 0,9618) \quad \text{pour 10\% de ciment} \quad (4.46)$$

• **Pour la série SZ :**

$$R_{t90} = 0,1383 \gamma_d - 0,2238 \quad (R^2 = 0,9300) \quad \text{pour 2\% de ciment} \quad (4.47)$$

$$R_{t90} = 0,219 \gamma_d - 0,3375 \quad (R^2 = 0,9854) \quad \text{pour 4\% de ciment} \quad (4.48)$$

$$R_{t90} = 0,6541 \gamma_d - 1,0696 \quad (R^2 = 0,9895) \quad \text{pour 6\% de ciment} \quad (4.49)$$

$$R_{t90} = 0,7731 \gamma_d - 1,1858 \quad (R^2 = 0,9979) \quad \text{pour 8\% de ciment} \quad (4.50)$$

$$R_{t90} = 1,6311 \gamma_d - 2,5793 \quad (R^2 = 0,9739) \quad \text{pour 10\% de ciment} \quad (4.51)$$

• **Pour la série SA :**

$$R_{t90} = 0,1826 \gamma_d - 0,2937 \quad (R^2 = 0,9132) \quad \text{pour 2\% de ciment} \quad (4.52)$$

$$R_{t90} = 0,2727 \gamma_d - 0,4323 \quad (R^2 = 0,9818) \quad \text{pour 4\% de ciment} \quad (4.53)$$

$$R_{t90} = 0,7622 \gamma_d - 1,2536 \quad (R^2 = 0,9909) \quad \text{pour 6\% de ciment} \quad (4.54)$$

$$R_{t90} = 0,7414 \gamma_d - 1,1363 \quad (R^2 = 0,9513) \quad \text{pour 8\% de ciment} \quad (4.55)$$

$$R_{t90} = 1,5909 \gamma_d - 2,4823 \quad (R^2 = 0,9634) \quad \text{pour } 10\% \text{ de ciment} \quad (4.56)$$

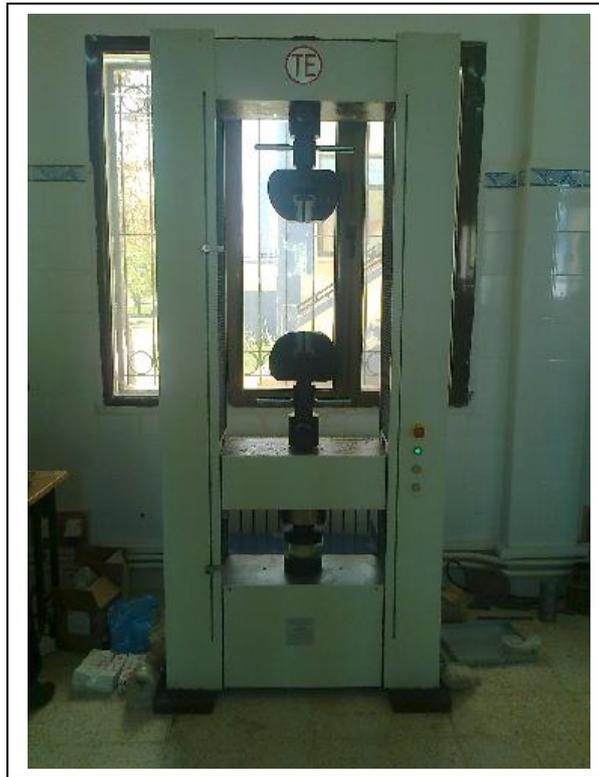
Tel que ;  $R_{t90}$  en MPa et  $\gamma_d$  en  $\text{g/cm}^3$

Ces équations montrent, qu'il est possible d'estimer la résistance à la traction à 90 jours, lorsque la densité sèche maximale et le dosage de ciment sont connus.

#### 4.4.3. Module d'élasticité

Les éprouvettes sont retirées de leur étui de conservation et testées en compression simple sur une presse universelle d'une capacité de 300 KN. Elle est équipée d'un capteur de force et d'un capteur de déplacement reliés à un logiciel d'acquisition (Figure 4.23). Le capteur de force est relié à la traverse supérieure de la presse. La vitesse de déplacement du plateau a été fixée à 0,2 mm/min. Cet essai a été réalisé au sein de laboratoire Matériaux De Construction (Département de Génie Civil) de l'université Ziane Achour – Djelfa. La précision du capteur de force est de 0,01 KN, et celle du capteur de déplacement est de 0,002 mm.

Le module d'élasticité est déterminé dans le domaine élastique linéaire du matériau et correspond à la valeur relative de la contrainte axiale par rapport à la déformation axiale. Graphiquement, le module d'élasticité longitudinal représente la pente de la courbe  $\sigma = f(\epsilon)$  dans le domaine de comportement élastique du matériau.



**Figure 4.23.** Presse universelle utilisée

Après traitement des données, nous avons tracé les courbes contraintes/déformations  $\sigma(\text{MPa}) = f(\epsilon(\frac{\delta}{\delta_0}))$  pour chacune des éprouvettes testées. Des exemples caractéristiques des résultats obtenus sont donnés dans les Figures 4.24. La courbe contraintes/déformations peut être décomposée en 4 phases :

1. Phase initiale: cette étape correspond au rattrapage des défauts de parallélismes du montage. Elle se termine lorsque l'éprouvette testée est parfaitement en contact avec le plateau supérieur (le plateau inférieur de la presse utilisée permet d'obtenir une liaison rotule), et que l'augmentation de la contrainte devient significative.

2. Phase de serrage: le chargement de l'éprouvette débute et la contrainte augmente progressivement. Physiquement, il y a un réarrangement des grains non liés ce qui a pour conséquence de resserrer la matrice solide de l'éprouvette.
3. Phase élastique: la relation entre la contrainte et la déformation devient linéaire. La valeur de la pente est alors égale au module élastique  $E_s$ .
4. Phase plastique: la courbe quitte le domaine linéaire et la contrainte atteint un maximum, correspondant à la résistance en compression de l'éprouvette ( $R_c$ ). La rupture se produit et la courbe décroît.

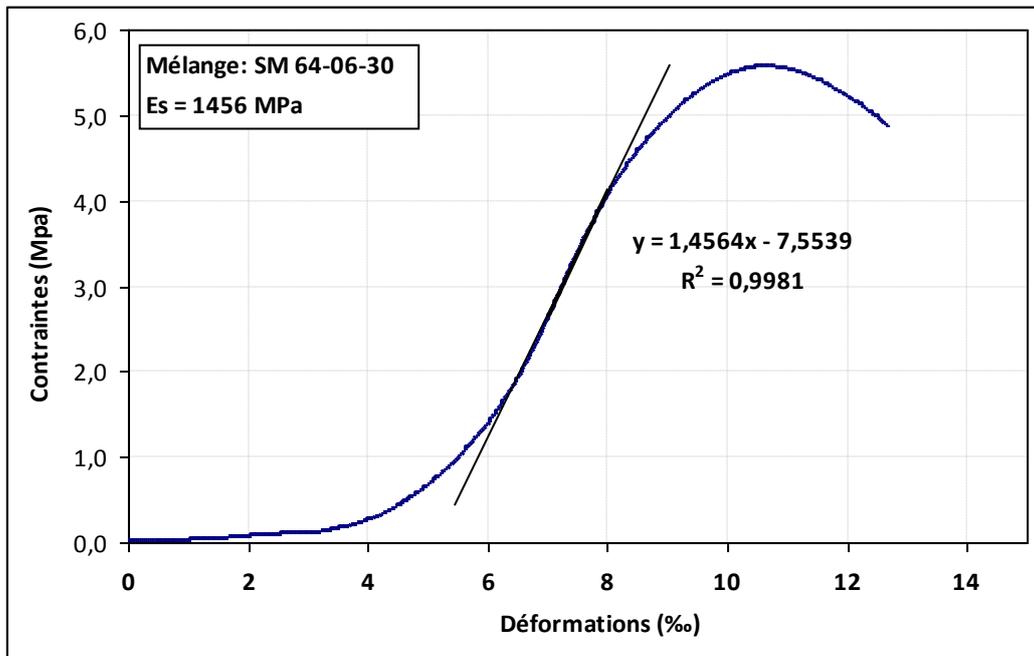


Figure 4.24.a. Exemple de courbe contraintes/déformations du mélange SM 64-06-30

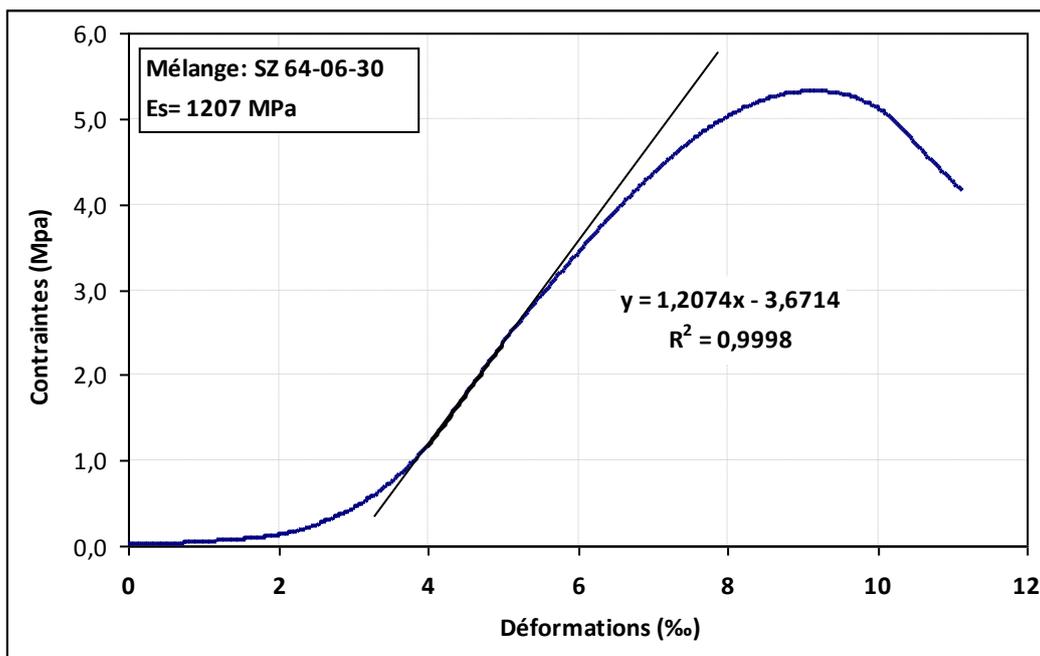


Figure 4. 24.b. Exemple de courbe contraintes/déformations du mélange SZ 64-06-30

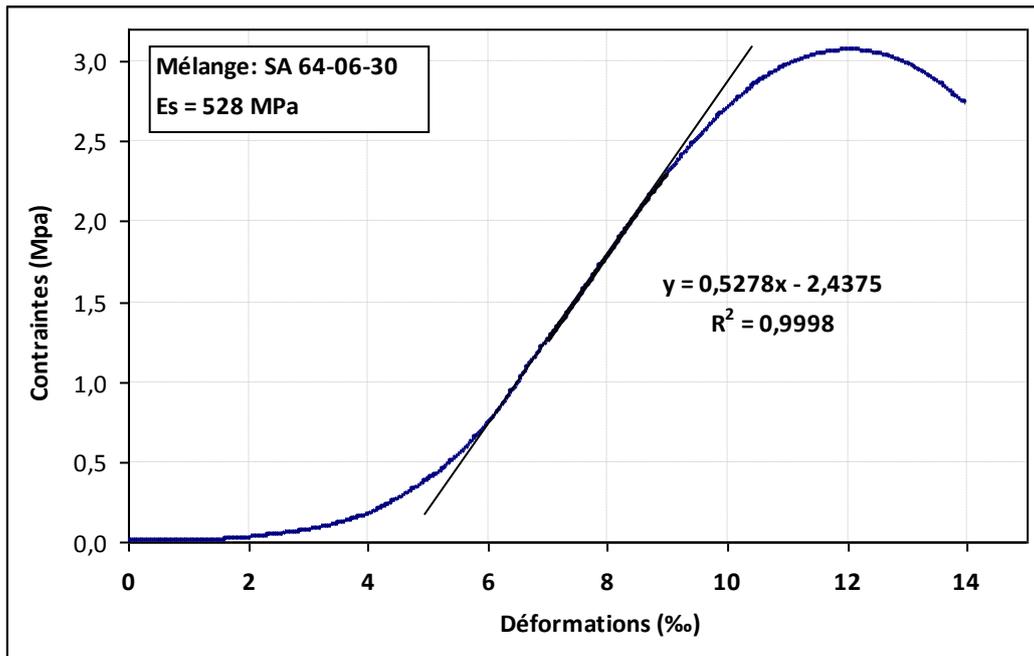


Figure 4. 24.c. Exemple de courbe contraintes/déformations du mélange SA 64-06-30

#### 4.4.3.1. Résultats

Les valeurs de module d'élasticité pour chaque mélange sont regroupées dans le tableau 4.4 :

Tableau 4.4. Modules d'élasticité longitudinaux des séries SM, SZ et SA

Mélanges de Série SM	$E_{S28}$ (MPa)	Mélanges de Série SZ	$E_{S28}$ (MPa)	Mélanges de Série SA	$E_{S28}$ (MPa)
SM 98-02-00	73	SZ 98-02-00	73	SA 98-02-00	73
SM 88-02-10	78	SZ 88-02-10	73	SA 88-02-10	73
SM 78-02-20	110	SZ 78-02-20	73	SA 78-02-20	73
SM 68-02-30	131	SZ 68-02-30	73	SA 68-02-30	73
SM 96-04-00	268	SZ 96-04-00	215	SA 96-04-00	98
SM 86-04-10	276	SZ 86-04-10	288	SA 86-04-10	110
SM 76-04-20	298	SZ 76-04-20	449	SA 76-04-20	150
SM 66-04-30	563	SZ 66-04-30	581	SA 66-04-30	340
SM 94-06-00	481	SZ 94-06-00	330	SA 94-06-00	297
SM 84-06-10	649	SZ 84-06-10	591	SA 84-06-10	277
SM 74-06-20	930	SZ 74-06-20	967	SA 74-06-20	499
SM 64-06-30	1456	SZ 64-06-30	1207	SA 64-06-30	528
SM 92-08-00	730	SZ 92-08-00	685	SA 92-08-00	479
SM 82-08-10	1441	SZ 82-08-10	1116	SA 82-08-10	764
SM 72-08-20	1801	SZ 72-08-20	2169	SA 72-08-20	1307
SM 62-08-30	2635	SZ 62-08-30	2475	SA 62-08-30	1457
SM 90-10-00	1144	SZ 90-10-00	1302	SA 90-10-00	1352
SM 80-10-10	1844	SZ 80-10-10	1807	SA 80-10-10	1627
SM 70-10-20	2512	SZ 70-10-20	2210	SA 70-10-20	1889
SM 60-10-30	3205	SZ 60-10-30	3253	SA 60-10-30	2615

Les valeurs du module d'élasticité obtenues semblent très faibles par rapport à celles d'un béton ordinaire (25000 et 45000 MPa). Ce qui indique que le sable de dune stabilisé est fortement élastique et présente une grande déformabilité (facteur indispensable pour matériau destiné en construction routière). En effet, le passage d'un véhicule sur les couches de matériaux entraîne une sollicitation de type charge-décharge. Le matériau doit donc avoir une résistance minimale en traction, et être capable de se déformer sans se casser.

### 4.4.3.2. Interprétation des résultats

#### 4.4.3.2.1. Effet de la provenance du sable sur le module d'élasticité

On note les mêmes remarques qui ont été mentionnées dans le cas de compression simple et de traction. La provenance du sable influe d'une façon très significative sur le module d'élasticité. Le module d'élasticité moyen des mélanges à base de sable SM (860 MPa) est légèrement supérieur à celui des mélanges composés de sable SZ (830 MPa). Les mélanges constitués de sable SA donnent le module d'élasticité moyen le plus faible (580 MPa). Cette différence serait encore due à la distinction de la granulométrie pour chaque sable (Figure 4.25).

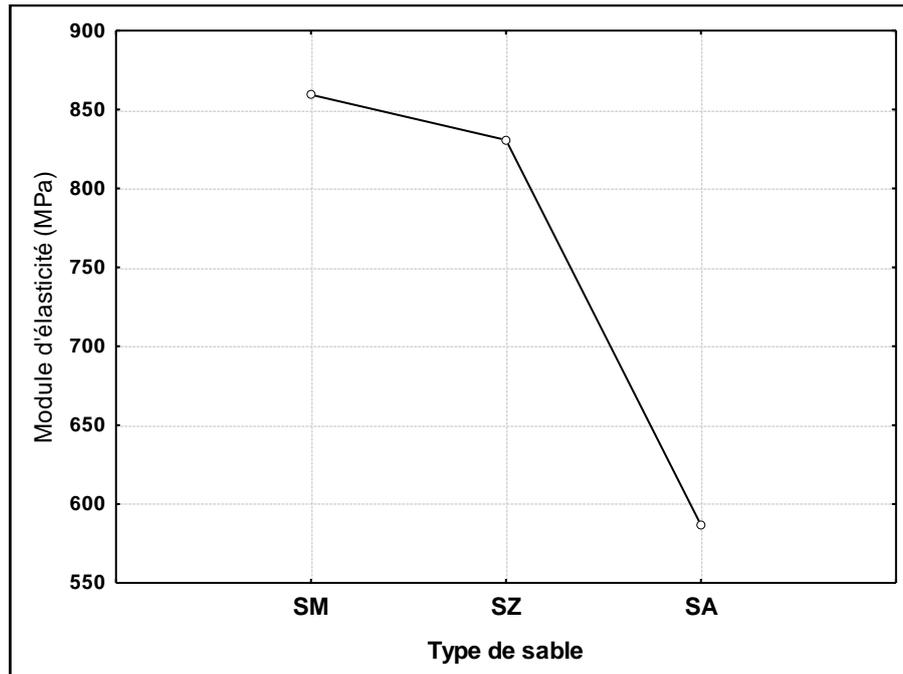


Figure 4. 25. Effet de la provenance du sable sur le module d'élasticité

#### 4.4.3.2.2. Effet du ciment sur le module d'élasticité

On note les mêmes remarques qui ont été indiquées précédemment. La relation entre la quantité du ciment ajoutée aux mélanges et le module d'élasticité moyen (le module d'élasticité moyen est la moyenne des modules d'élasticité des mélanges qui ont le même dosage de ciment) est croissante, et suit une fonction parabolique. En outre, on constate que, quels que soient la provenance du sable et la proportion de sable SF, l'augmentation du pourcentage de ciment participe d'une façon très significative à l'amélioration de la rigidité des mélanges durcis. Cela est dû principalement au double rôle assuré par le ciment à savoir l'agglomération et la correction granulométrique (Figure 4.26).

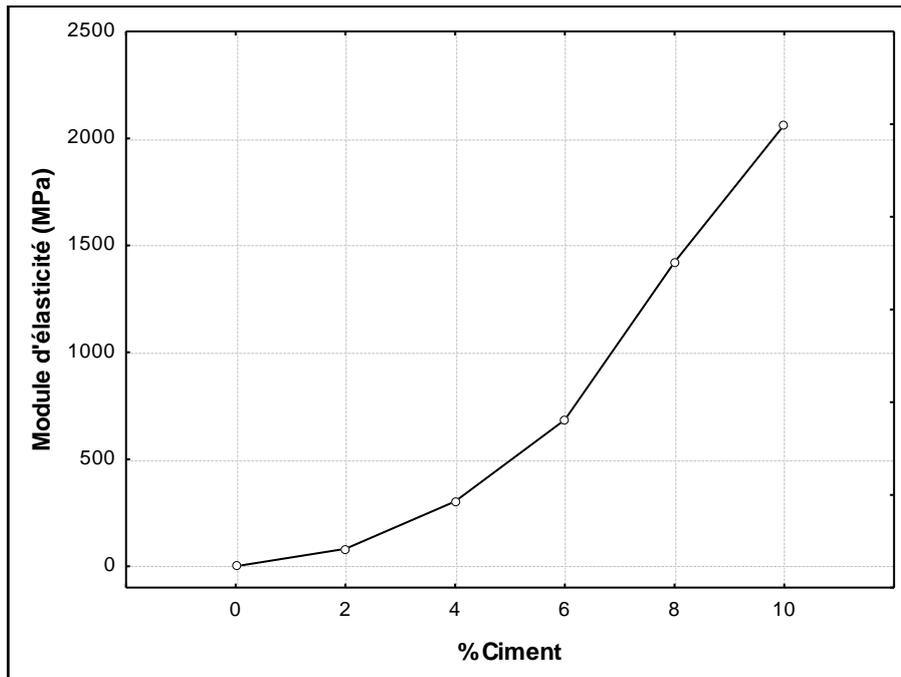


Figure 4.26. Effet du ciment sur le module d'élasticité moyen

#### 4.4.3.2.3. Effet de la correction granulométrique sur le module d'élasticité

De même que pour la compression simple et la traction simple, on constate que la relation entre la quantité du sable SF ajoutée aux mélanges et le module d'élasticité moyen est croissante, et suit une loi linéaire. De plus, quels que soient la provenance du sable et le dosage de ciment, l'augmentation de la quantité de sable SF ajoutée participe d'une façon très significative à l'amélioration de la rigidité des mélanges durcis ; ce qui explique l'efficacité du correcteur granulaire utilisé. (Figure 4.27).

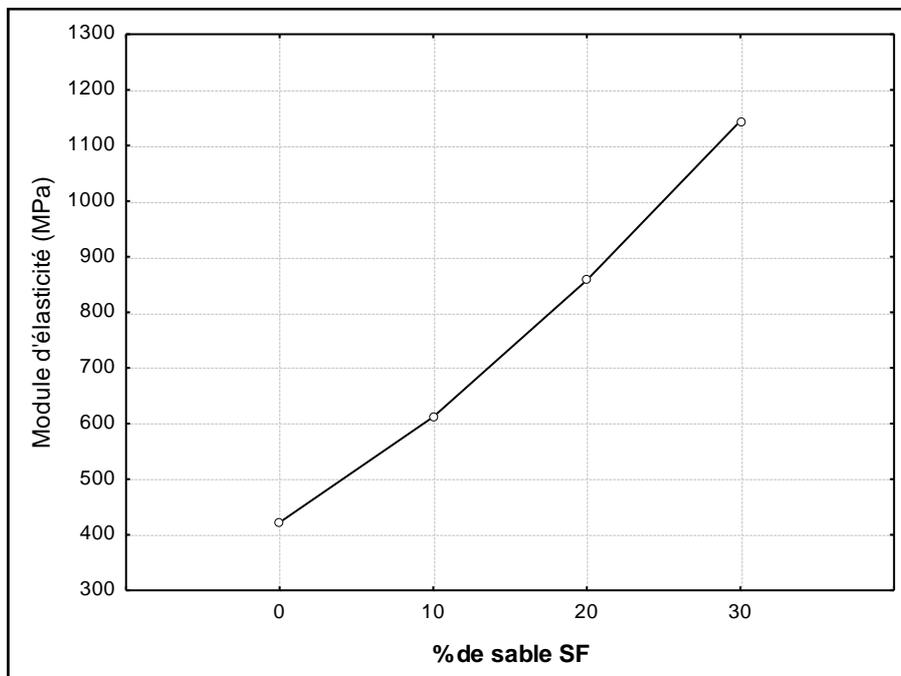
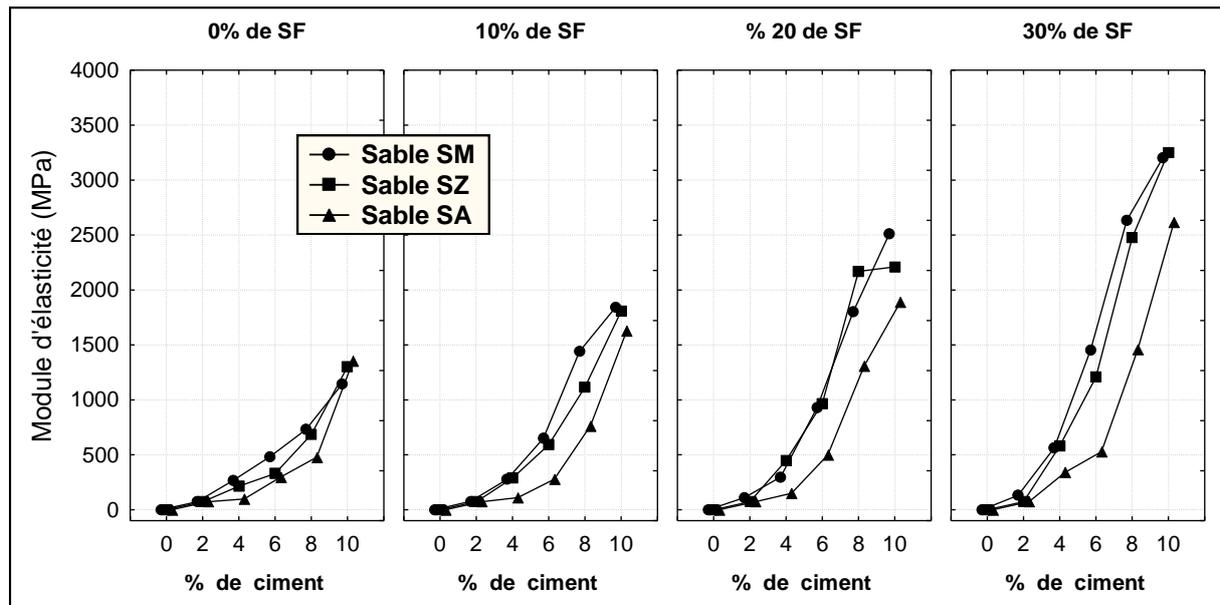


Figure 4.27. Effet du sable SF sur le module d'élasticité moyen

#### 4.4.3.2.4. Evolution du module d'élasticité

Les courbes de la Figure 4.28.a. représentent l'évolution du module d'élasticité en fonction du pourcentage de ciment pour une teneur en sable SF donnée. On constate que, pour un pourcentage de sable SF déterminé, le module d'élasticité augmente d'une manière très significative et suit une fonction parabolique avec l'augmentation de la proportion du ciment. On note les mêmes constatations que celles données dans le cas de la compression simple et de la traction simple. Pour les dosages 0% et 2% de ciment l'effet de la provenance de sable de dune n'est pas significatif, et qu'au-delà de 4% cet effet devient plus significatif.



**Figure 4.28.a.** Evolution du module d'élasticité en fonction du pourcentage de ciment pour une teneur en SF donnée.

Les courbes de la Figure 4.28.b. représentent l'évolution du module d'élasticité en fonction de la teneur en sable SF pour un pourcentage de ciment fixé. On remarque que, pour une proportion de ciment déterminée, le module d'élasticité augmente d'une façon très significative et suit une fonction linéaire avec l'augmentation de la quantité ajoutée de sable SF (Ce qui confirme l'efficacité de sable SF à l'amélioration de cette caractéristique mécanique). On remarque aussi qu'au-delà de 4% de ciment, l'addition de sable SF aux mélanges devient plus efficace quant à l'amélioration de la rigidité des mélanges durcis.

Pour des dosages de ciment et de sable SF fixes, les mélanges à base de sable SM donnent des modules d'élasticité comparables à ceux des mélanges composés de sable SZ, Les mélanges constitués de sable SA donnent les modules d'élasticité les plus faibles.

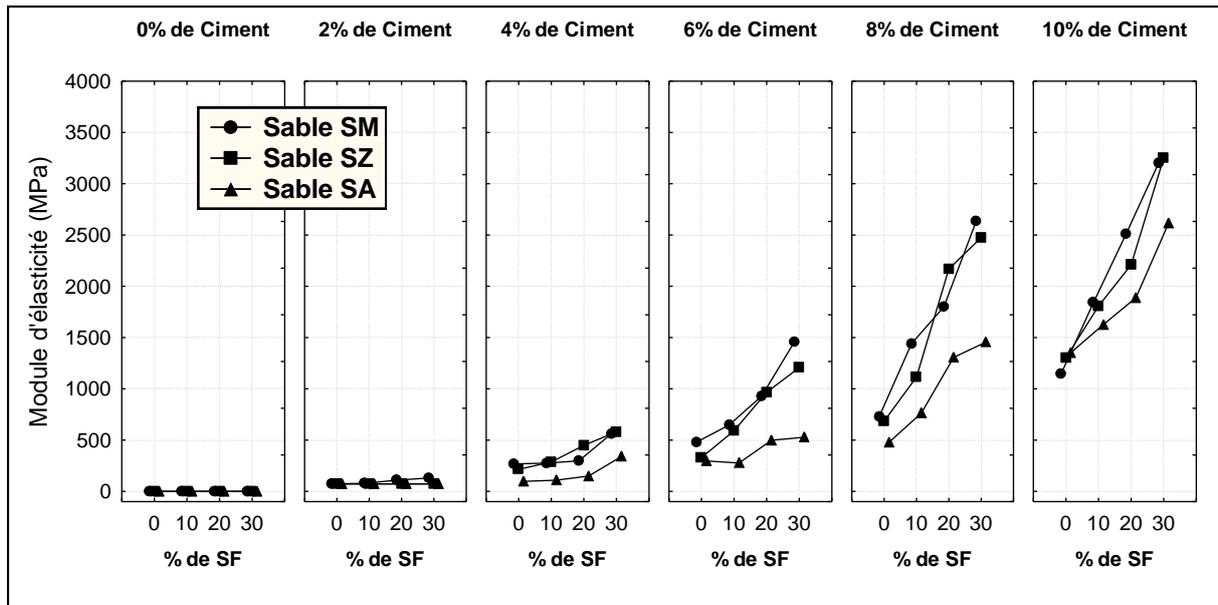


Figure 4.28.b. Evolution du module d'élasticité en fonction du pourcentage de sable SF pour une teneur en ciment donnée.

#### 4.4.3.2.5. Relation entre le module d'élasticité et la densité sèche maximale

D'après les résultats obtenus par la détermination de module d'élasticité pour chaque mélange, on a trouvé qu'il existe un lien entre la densité sèche maximale et le module d'élasticité. L'objectif de ce paragraphe est l'évaluation de la signification de cette relation et la définition des équations mathématiques qui gèrent cette dernière.

Figures 4.29 et 4.30 présentent les relations entre le module d'élasticité à 28 jours de sable stabilisé et la densité sèche maximale. Les coefficients de corrélation sont mentionnés sur chaque figure.

Les Figures 4.29 présentent la relation entre le module d'élasticité et la densité sèche maximale pour une teneur en sable SF fixée.

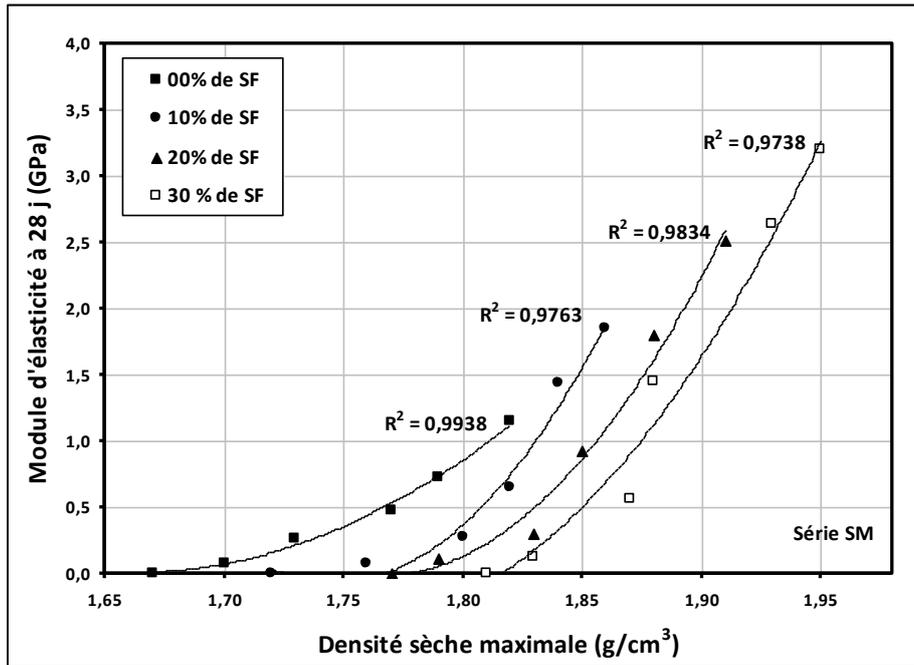


Figure 4.29.a. Relation entre le module d'élasticité et la densité sèche maximale pour une teneur en SF fixée (Série SM)

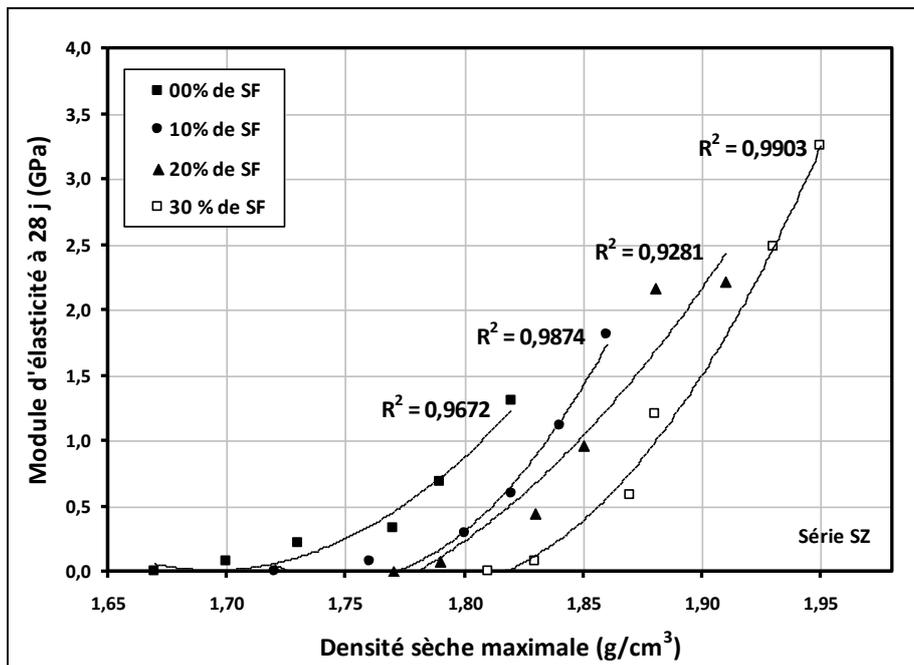


Figure 4.29.b. Relation entre le module d'élasticité et la densité sèche maximale pour une teneur en SF fixée (Série SZ)

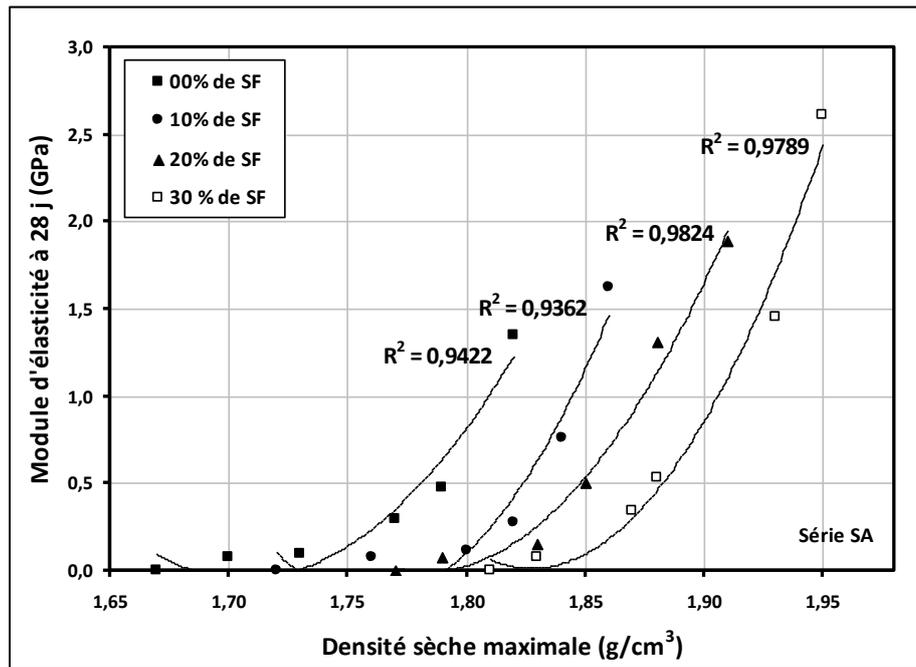


Figure 4.29.c. Relation entre le module d'élasticité et la densité sèche maximale pour une teneur en SF fixée (Série SA)

On peut remarquer que pour un dosage de sable SF constant le module d'élasticité est parfaitement lié à la densité sèche maximale (coefficients de corrélation très significatifs : supérieurs à 0,92). Cette relation est d'ordre croissant et suit une fonction parabolique. Elle peut être représentée par les équations suivantes:

• **Pour la série SM :**

$$E_{S28} = 44,773 \gamma_d^2 - 148,85 \gamma_d + 123,72 \quad (R^2 = 0,9938) \quad \text{pour } 0 \% \text{ SF} \quad (4.56)$$

$$E_{S28} = 151,8 \gamma_d^2 - 530,17 \gamma_d + 462,84 \quad (R^2 = 0,9763) \quad \text{pour } 10\% \text{ SF} \quad (4.57)$$

$$E_{S28} = 126,85 \gamma_d^2 - 448,15 \gamma_d + 395,8 \quad (R^2 = 0,9834) \quad \text{pour } 20\% \text{ SF} \quad (4.58)$$

$$E_{S28} = 96,292 \gamma_d^2 - 338,21 \gamma_d + 296,63 \quad (R^2 = 0,9738) \quad \text{pour } 30\% \text{ SF} \quad (4.59)$$

• **Pour la série SZ :**

$$E_{S28} = 77,917 \gamma_d^2 - 264,06 \gamma_d + 223,73 \quad (R^2 = 0,9672) \quad \text{pour } 0 \% \text{ SF} \quad (4.60)$$

$$E_{S28} = 147,72 \gamma_d^2 - 516,76 \gamma_d + 451,86 \quad (R^2 = 0,9874) \quad \text{pour } 10\% \text{ SF} \quad (4.61)$$

$$E_{S28} = 63,805 \gamma_d^2 - 216,68 \gamma_d + 183,54 \quad (R^2 = 0,9281) \quad \text{pour } 20\% \text{ SF} \quad (4.62)$$

$$E_{S28} = 125,75 \gamma_d^2 - 449,19 \gamma_d + 401,02 \quad (R^2 = 0,9903) \quad \text{pour } 30\% \text{ SF} \quad (4.63)$$

• **Pour la série SA :**

$$E_{S28} = 100,32 \gamma_d^2 - 342,47 \gamma_d + 292,24 \quad (R^2 = 0,9422) \quad \text{pour } 0 \% \text{ SF} \quad (4.64)$$

$$E_{S28} = 162,28 \gamma_d^2 - 571,17 \gamma_d + 502,41 \quad (R^2 = 0,9362) \quad \text{pour } 10\% \text{ SF} \quad (4.65)$$

$$E_{S28} = 122,62 \gamma_d^2 - 437,36 \gamma_d + 389,99 \quad (R^2 = 0,9824) \quad \text{pour } 20\% \text{ SF} \quad (4.66)$$

$$E_{S28} = 162,27 \gamma_d^2 - 593,1 \gamma_d + 541,98 \quad (R^2 = 0,9789) \quad \text{pour } 30\% \text{ SF} \quad (4.67)$$

$E_{S28}$  en MPa et  $\gamma_d$  en  $\text{g/cm}^3$

Ces équations montrent, qu'il est possible d'estimer le module d'élasticité, lorsque la densité sèche maximale et le dosage de sable SF sont connus.

Les Figures 4.30 présentent la relation entre le module d'élasticité et la densité sèche maximale pour une proportion de ciment fixée.

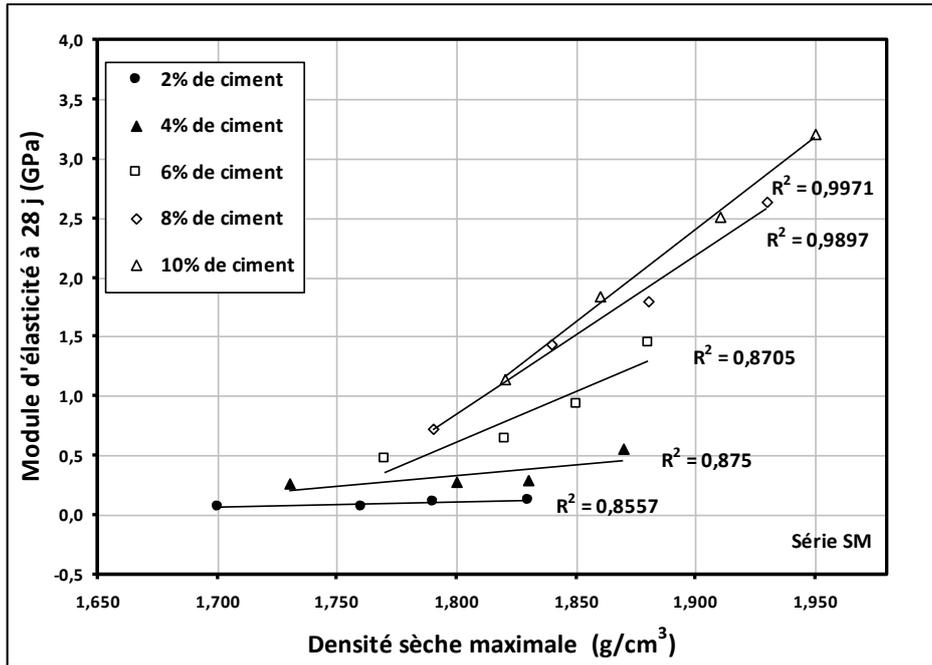


Figure 4.30.a. Relation entre le module d'élasticité et la densité sèche maximale pour une teneur en ciment fixée (Série SM)

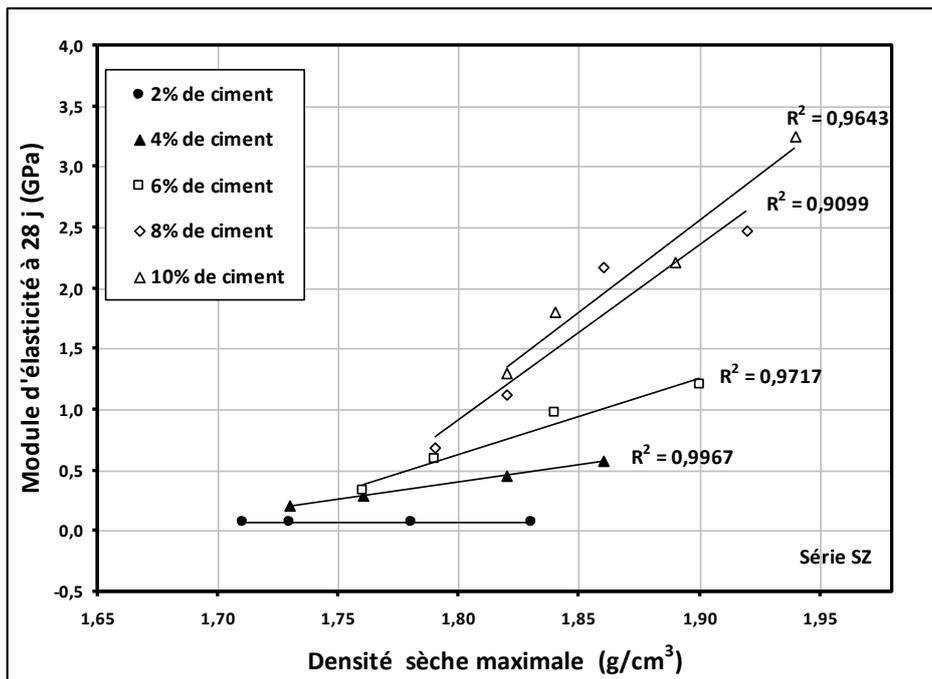
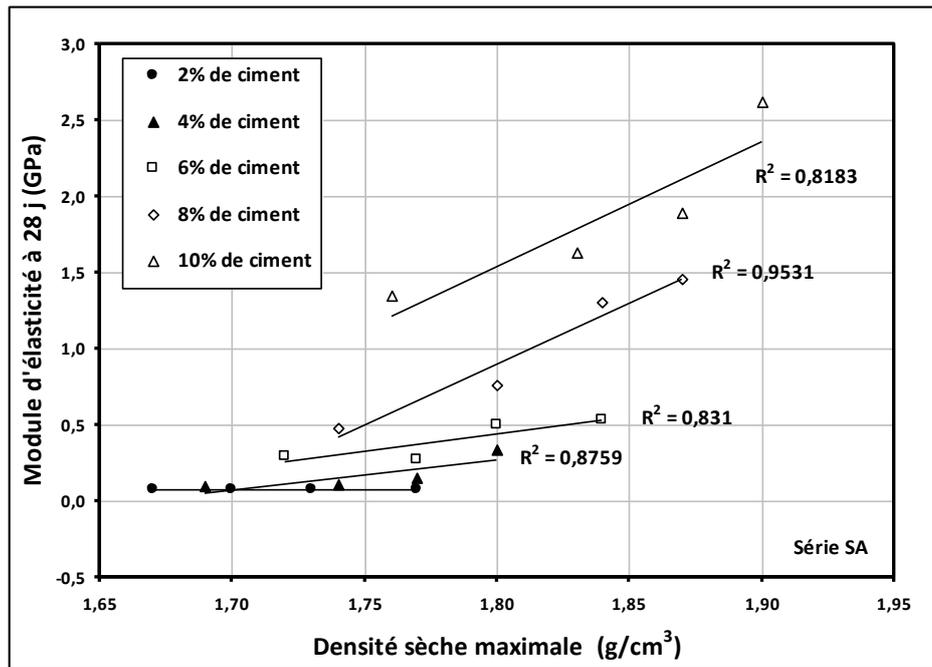


Figure 4.30.b. Relation entre le module d'élasticité et la densité sèche maximale pour une teneur en ciment fixée (Série SZ)



**Figure 4.30.c.** Relation entre le module d'élasticité et la densité sèche maximale pour une teneur en ciment fixée (Série SA)

On peut remarquer que pour un dosage de ciment constant le module d'élasticité est significativement lié à la densité sèche maximale (coefficients de corrélation significatifs supérieurs à 0,83). Cette relation est d'ordre croissant (excepté le cas du dosage de ciment égal à 2% pour les séries SZ et SA, qui est d'ordre constant) et suit une fonction linéaire. Elle peut être représentée par les équations suivantes:

- Pour la série SM :

$$E_{S28} = 0,4633 \gamma_d - 0,7221 \quad (R^2 = 0,8557) \quad \text{pour 2\% de ciment} \quad (4.68)$$

$$E_{S28} = 1,8189 \gamma_d - 2,9363 \quad (R^2 = 0,8750) \quad \text{pour 4\% de ciment} \quad (4.69)$$

$$E_{S28} = 8,4924 \gamma_d - 14,6620 \quad (R^2 = 0,8705) \quad \text{pour 6\% de ciment} \quad (4.70)$$

$$E_{S28} = 13,259 \gamma_d - 23,0110 \quad (R^2 = 0,9897) \quad \text{pour 8\% de ciment} \quad (4.71)$$

$$E_{S28} = 15,532 \gamma_d - 27,1020 \quad (R^2 = 0,9971) \quad \text{pour 10\% de ciment} \quad (4.72)$$

- Pour la série SZ :

$$E_{S28} = 0,073 \quad \text{pour 2\% de ciment} \quad (4.73)$$

$$E_{S28} = 2,7998 \gamma_d - 4,63530 \quad (R^2 = 0,9967) \quad \text{pour 4\% de ciment} \quad (4.74)$$

$$E_{S28} = 6,2645 \gamma_d - 10,6430 \quad (R^2 = 0,9717) \quad \text{pour 6\% de ciment} \quad (4.75)$$

$$E_{S28} = 14,403 \gamma_d - 24,999 \quad (R^2 = 0,9099) \quad \text{pour 8\% de ciment} \quad (4.76)$$

$$E_{S28} = 15,12 \gamma_d - 26,1700 \quad (R^2 = 0,9643) \quad \text{pour 10\% de ciment} \quad (4.77)$$

- Pour la série SA

$$E_{S28} = 0,073 \quad \text{pour 2\% de ciment} \quad (4.78)$$

$$E_{S28} = 1,9727 \gamma_d - 3,2778 \quad (R^2 = 0,8759) \quad \text{pour 4\% de ciment} \quad (4.79)$$

$$E_{S28} = 2,2238 \gamma_d - 3,5636 \quad (R^2 = 0,8310) \quad \text{pour 6\% de ciment} \quad (4.80)$$

$$E_{S28} = 7,9623 \gamma_d - 13,43 \quad (R^2 = 0,9531) \quad \text{pour 8\% de ciment} \quad (4.81)$$

$$E_{S28} = 8,1036 \gamma_d - 13,04 \quad (R^2 = 0,8183) \quad \text{pour } 10\% \text{ de ciment} \quad (4.82)$$

$E_{S28}$  en MPa et  $\gamma_d$  en  $\text{g/cm}^3$

Ces équations montrent, qu'il est possible d'estimer le module d'élasticité, lorsque la densité sèche maximale et le dosage de ciment sont connus.

#### 4.4.4. Tenue à l'immersion

L'objectif de cette partie de notre étude expérimentale est l'appréciation de la tenue (ou la résistance) à l'immersion des mélanges et l'évolution de cette dernière en fonction du dosage de l'agent de stabilisation et la provenance du sable. La tenue à immersion ( $R_{imm}$ ) est estimée par le rapport entre la résistance à la compression avec immersion et celle sans immersion:

$$R_{imm} = \frac{R_{ci}}{R_{c28}} \quad (4.83)$$

$R_{ci}$ : Résistance à la compression avec immersion dans l'eau

$R_{c28}$ : Résistance à la compression sans immersion à 28 jours

Pour la détermination de la tenue à l'immersion, la résistance à la compression obtenue à 28 jours dans des sacs étanches est comparée à celle obtenue en conservant les échantillons à 21 jours dans des sacs étanches, puis à 7 jours en immersion dans l'eau à  $(20 \pm 2)^\circ \text{C}$  [9].



Figure 4.31. Immersion des éprouvettes

##### 4.4.4.1. Résultats

Les valeurs moyennées de la tenue à l'immersion pour chaque mélange sont regroupées dans le tableau 4.5 (Les détails de ces résultats ont été rassemblés en annexe II).

**Tableau 4.5.** Tenue à l'immersion pour les séries SM, SZ et SA

Mélanges de Série SM	$R_{imm}$	Mélanges de Série SZ	$R_{imm}$	Mélanges de Série SA	$R_{imm}$
SM 98-02-00	0,82	SZ 98-02-00	0,79	SA 98-02-00	0,75
SM 88-02-10	0,76	SZ 88-02-10	0,88	SA 88-02-10	0,84
SM 78-02-20	0,78	SZ 78-02-20	0,84	SA 78-02-20	0,87
SM 68-02-30	0,79	SZ 68-02-30	0,85	SA 68-02-30	0,85
SM 96-04-00	0,80	SZ 96-04-00	0,84	SA 96-04-00	0,86
SM 86-04-10	0,82	SZ 86-04-10	0,87	SA 86-04-10	0,85
SM 76-04-20	0,81	SZ 76-04-20	0,87	SA 76-04-20	0,85
SM 66-04-30	0,85	SZ 66-04-30	0,86	SA 66-04-30	0,87
SM 94-06-00	0,84	SZ 94-06-00	0,89	SA 94-06-00	0,90
SM 84-06-10	0,83	SZ 84-06-10	0,89	SA 84-06-10	0,90
SM 74-06-20	0,84	SZ 74-06-20	0,89	SA 74-06-20	0,89
SM 64-06-30	0,84	SZ 64-06-30	0,89	SA 64-06-30	0,89
SM 92-08-00	0,86	SZ 92-08-00	0,91	SA 92-08-00	0,90
SM 82-08-10	0,85	SZ 82-08-10	0,92	SA 82-08-10	0,90
SM 72-08-20	0,85	SZ 72-08-20	0,91	SA 72-08-20	0,90
SM 62-08-30	0,86	SZ 62-08-30	0,91	SA 62-08-30	0,90
SM 90-10-00	0,88	SZ 90-10-00	0,91	SA 90-10-00	0,90
SM 80-10-10	0,89	SZ 80-10-10	0,90	SA 80-10-10	0,91
SM 70-10-20	0,87	SZ 70-10-20	0,90	SA 70-10-20	0,92
SM 60-10-30	0,89	SZ 60-10-30	0,92	SA 60-10-30	0,91

#### 4.4.4.2. Interprétations des résultats obtenus

##### 4.4.4.2.1. Effet de la provenance du sable sur la tenue à l'immersion

La Figure 4.32 présente l'évolution de la tenue à l'immersion moyenne (moyenne des tenues à l'immersion des mélanges de la même série) en fonction de l'origine de sable. On constate que, contrairement aux deux cas précédents (résistance en compression et en traction), la provenance du sable influe très légèrement sur la tenue à l'immersion. On remarque aussi que

les valeurs de la tenue à l'immersion moyenne pour chaque série sont très proches (0.837, 0.882 et 0.878 respectivement pour les séries SM, SZ et SA). Ceci montre que la provenance du sable n'affecte pas d'une façon significative la durabilité à l'eau du sable de dune stabilisé.

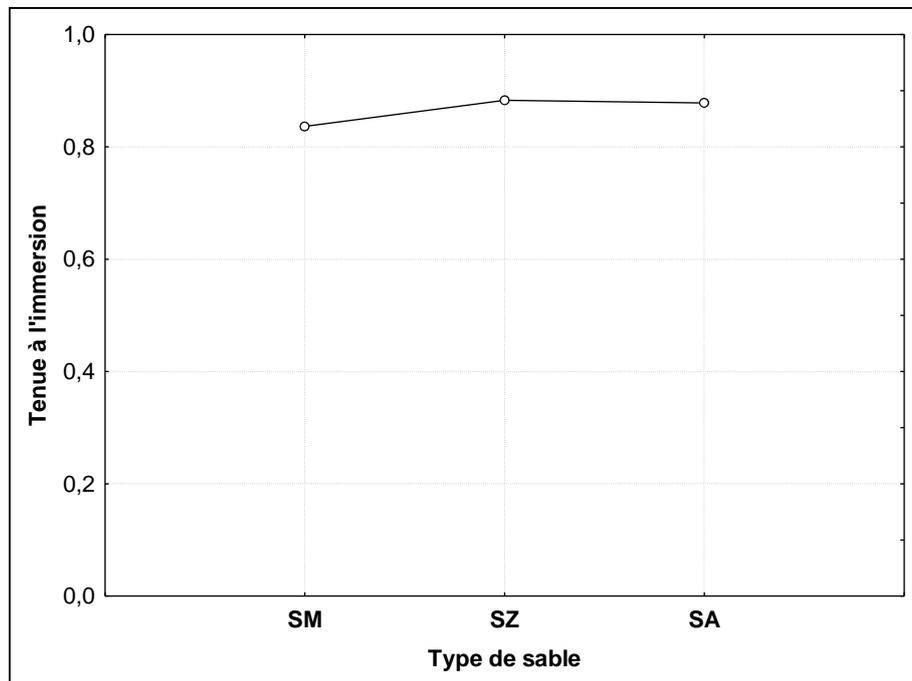


Figure 4.32. Effet de la provenance du sable sur la tenue à l'immersion.

#### 4.4.4.2.2. Effet de ciment sur la tenue à l'immersion

La Figure 4.33 présente l'évolution de la tenue à l'immersion moyenne en fonction du dosage de ciment. On constate que, l'addition du ciment aux mélanges améliore légèrement la tenue à l'immersion. C'est-à-dire que l'effet du dosage de ciment sur la tenue à l'immersion est peu significatif.

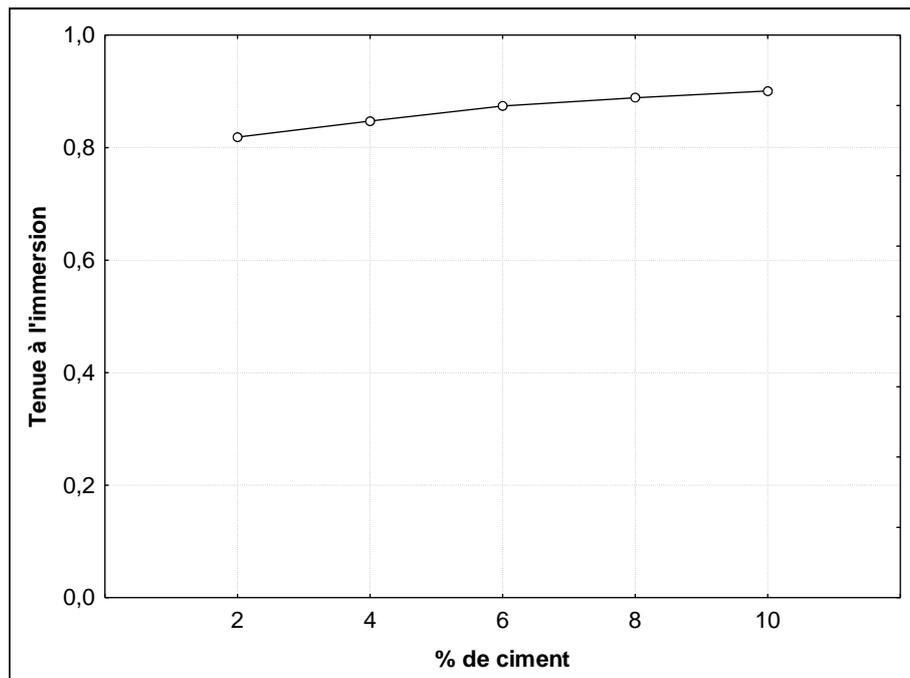


Figure 4.33. Effet du ciment sur la tenue à l'immersion.

#### 4.4.4.2.3. Effet de correcteur granulaire sur la tenue à l'immersion

La Figure 4.34 présente l'évolution de la tenue à l'immersion moyenne (la moyenne des tenues à l'immersion des mélanges qui ont la même teneur en sable SF) en fonction du dosage de sable SF. On constate que, contrairement aux deux cas précédents (résistance en compression et en traction), l'effet du dosage de sable SF sur la tenue à l'immersion n'est pas significatif. On remarque aussi que les valeurs de la tenue à l'immersion moyenne pour chaque dosage de sable SF sont très proches (0,86, 0,87, 0,87 et 0,87 respectivement pour les dosages 0, 10, 20 et 30%). Ceci montre que l'addition du sable SF aux mélanges ne participe pas à la durabilité à l'eau de sable de dune stabilisé.

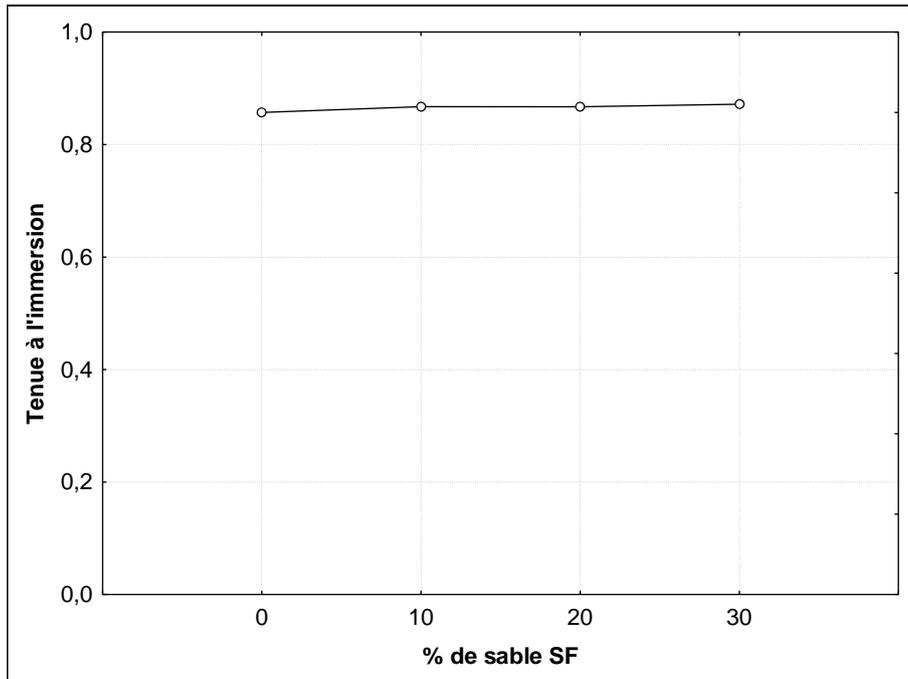


Figure 4.34. Effet du sable SF sur la tenue à l'immersion.

#### 4.4.4.2.4. Evolution de la tenue à l'immersion

Les courbes de la figure 4.35.a montrent que, pour un pourcentage de sable SF déterminé, la résistance à l'immersion augmente légèrement avec la proportion du ciment ajouté. On note aussi qu'elle est peu influencée par l'origine du sable.

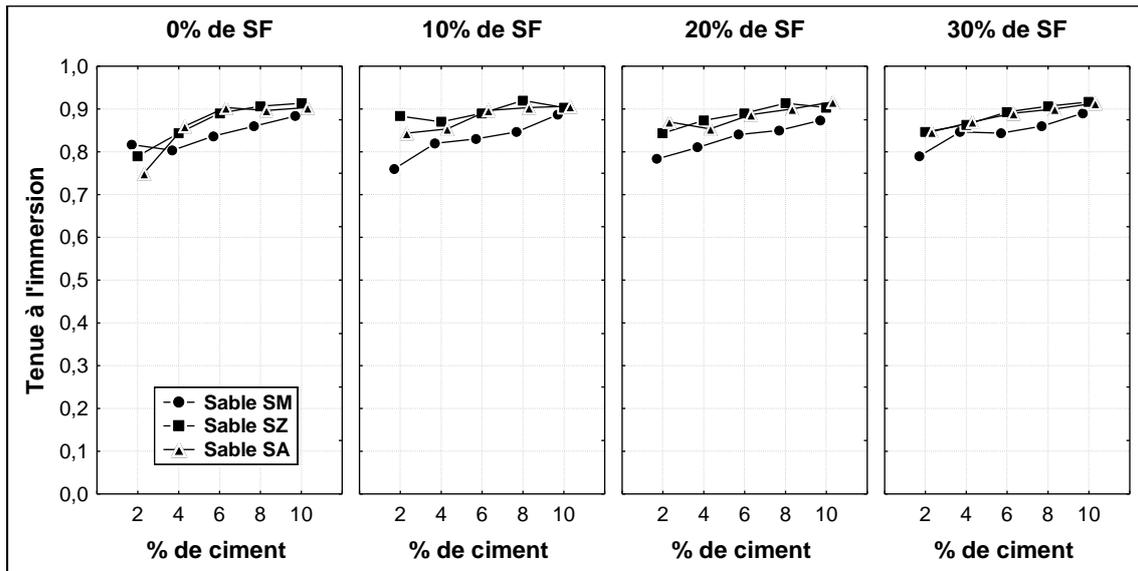


Figure 4.35.a. Evolution de la tenue à l'immersion en fonction du pourcentage de ciment pour une teneur en SF donnée

La figure 4.35.b montre que pour une proportion de ciment déterminée, l'effet du pourcentage de sable FS sur la tenue à l'immersion n'est pas significatif, ce qui explique que l'ajout de sable SF aux mélanges ne participe pas à l'amélioration de la durabilité de sable stabilisé à l'eau dans l'eau.

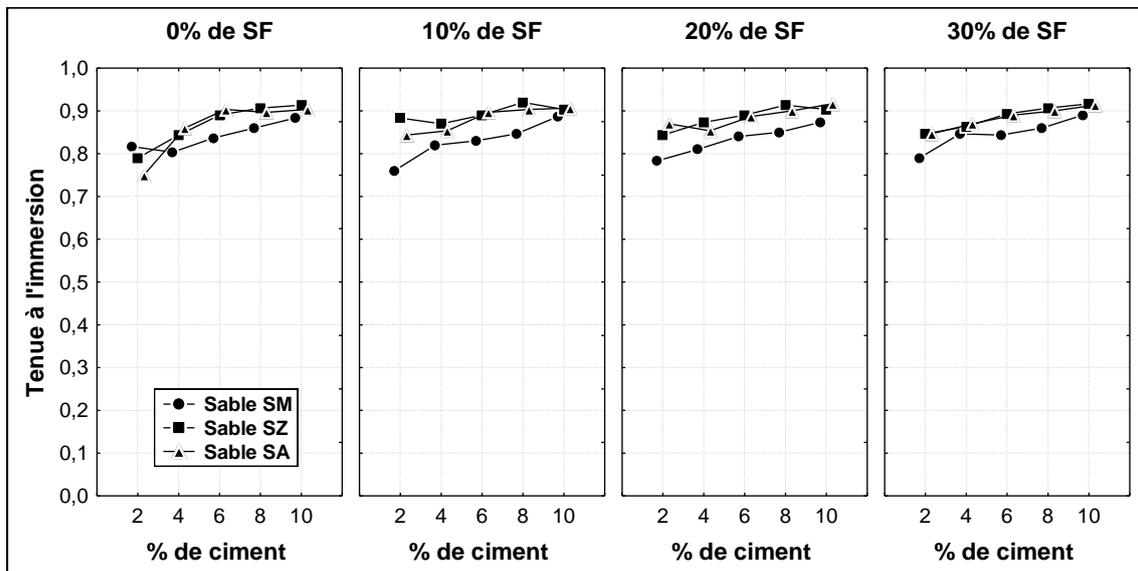


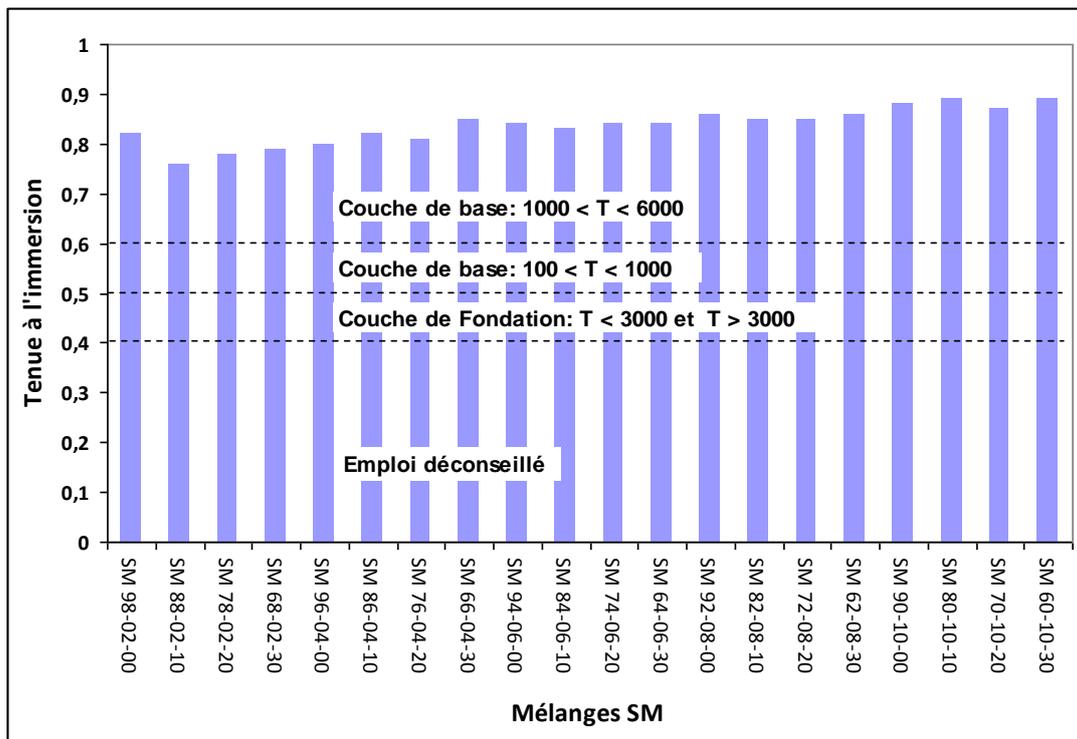
Figure 4.35.b. Evolution de la tenue à l'immersion en fonction du pourcentage de ciment pour une teneur en SF donnée.

Les valeurs de la tenue à l'immersion recommandées en couche de fondation et en couche de base pour les sables stabilisés aux liants hydrauliques sont indiquées au tableau 4.6.

**Tableau 4.6.** Valeurs de la tenue à l’immersion recommandées en couche de fondation et en couche de base [9]

	Couche de fondation		Couche de base	
	T < 3000 Véhicules/j	T > 3000 Véhicules/j	100 < T < 1000 Véhicules/j	1000 < T < 6000 Véhicules/j
Valeur minimale de $R_{imm}$	<b>0,40</b>	<b>0,40</b>	<b>0,50</b>	<b>0,60</b>

Nous remarquons que les valeurs de la tenue à l’immersion recommandées en couche de fondation et en couche de base sont garanties pour les mélanges dont les dosages en ciment sont supérieurs ou égaux à 2% (Figures 4.36).



**Figure 4.36.a.** Classement des mélanges de la série SM d’après leur tenue à l’immersion

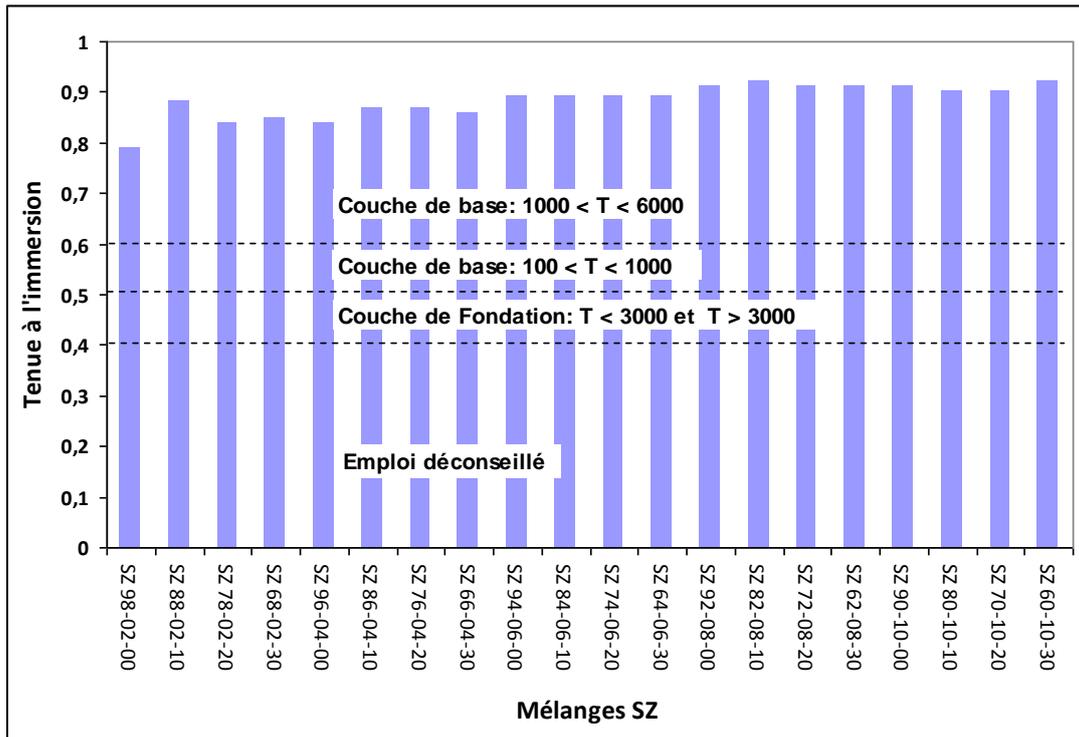


Figure 4.36.b. Classement des mélanges de la série SZ d'après leur tenue à l'immersion

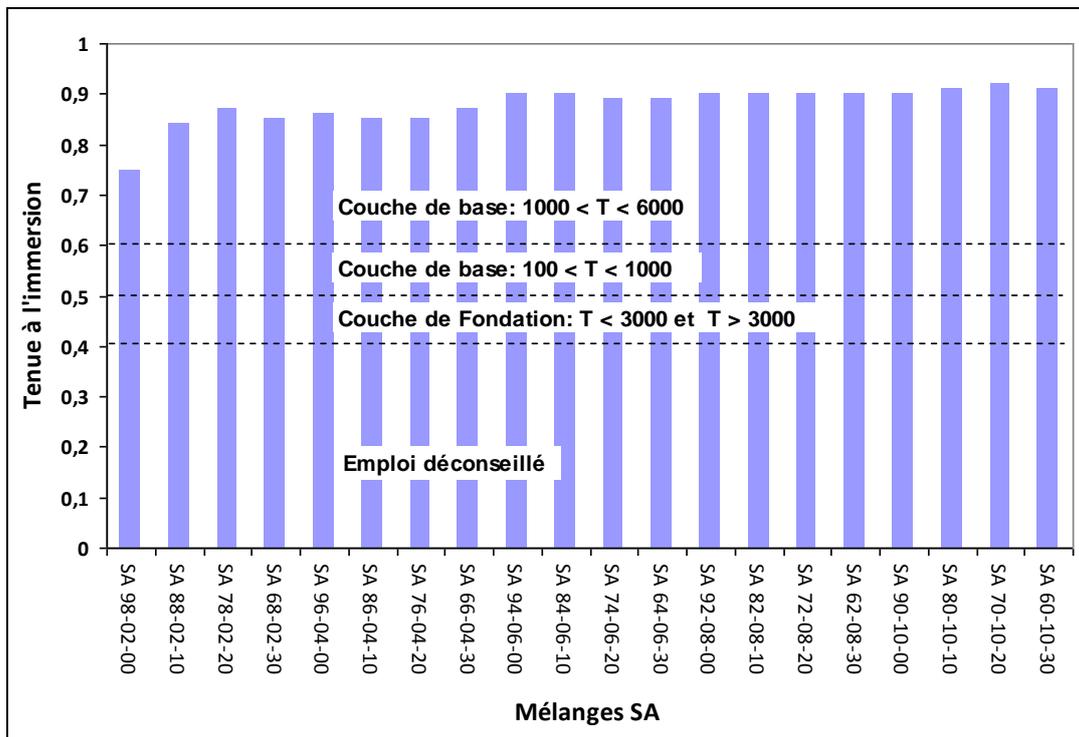


Figure 4.36.c. Classement des mélanges de la série SA d'après leur tenue à l'immersion

#### 4.5. Conclusion

Cette partie de notre étude a été menée afin de déterminer les performances mécaniques des mélanges (résistance en compression, en traction, module d'élasticité et tenue à l'immersion), d'analyser l'évolution de ces dernières en fonction de la provenance du sable, et la teneur en

agent de stabilisation (ciment et sable SF) et de définir les relations qui existent entre les performances mécaniques et la densité sèche maximale.

D'après les résultats du programme expérimental mené dans cette recherche, les principales conclusions qui peuvent être tirées sont les suivantes:

- L'augmentation de la quantité de sable SF ajoutée aux mélanges influe d'une façon très significative sur la résistance en compression. On a trouvé que, pour une teneur en ciment égale à 10%, la correction granulométrique avec 30% de sable SF peut donner un gain de résistance en compression égal à 128% pour le sable SM, 73% pour le sable SZ et de 63% pour le sable SA. Ces valeurs démontrent clairement l'efficacité de sable SF à l'amélioration de la compacité des mélanges et par conséquent leurs résistances en compression.
- L'effet de la provenance du sable de dune sur la résistance en compression devient significatif au-delà de 4% de ciment et de 10% de sable SF. Pour un dosage en ciment supérieur ou égal à 4%, l'addition de sable SF aux mélanges devient plus efficace à l'amélioration de la résistance en compression.
- Pour des pourcentages de ciment et de sable SF fixes, les mélanges constitués de sable SM, présentent les meilleures résistances à la compression. Ce résultat est principalement dû à sa granulométrie qui est relativement meilleure que celle des sables SZ et SA.
- Conformément à la classification de la norme NF EN 14227-1 (classification selon la résistance à la compression à 28 jours), la stabilisation des sables étudiés au ciment et sable SF peut donner des résistances de classe  $C_{5/6}$  dans le cas de sable SM et SZ, et de classe  $C_{3/4}$  dans le cas de sable SA.
- La résistance à la compression à 28 jours est strictement liée à la densité sèche maximale. Cette relation est d'ordre croissant et suit une fonction parabolique pour une teneur en sable SF déterminée, et elle suit une fonction linéaire pour un dosage de ciment fixé.
- Pour une teneur en ciment égale à 10%, la correction granulométrique avec 30% de sable SF peut donner un gain de résistance à la traction égal à 108% pour le sable SM, 57% pour le sable SZ et de 67% pour le sable SA. Ces valeurs démontrent clairement l'efficacité de sable SF à l'amélioration de la résistance à la traction des sables stabilisés.
- La stabilisation de sable SM avec 8% de ciment et 30% de sable SF est suffisante pour obtenir les performances recommandées pour la couche de base. Pour le sable SZ, ces performances ne sont obtenues que pour un dosage minimal de ciment égal à 10% et celui de sable SF égal à 10% ; de même pour le sable SA, mais avec une teneur minimale en sable SF égal à 20%.
- Les valeurs du module d'élasticité obtenues sont très faibles comparativement à celui d'un béton ordinaire (25000 et 45000 MPa). Ce qui indique que le sable de dune stabilisé est fortement élastique et présente une grande déformabilité.
- La valeur de la tenue à l'immersion est grande pour n'importe quel pourcentage de ciment (supérieur à 0,75 pour 2% de ciment). Elle est peu influencée par la proportion de ciment ajoutée et l'origine du sable. L'effet du pourcentage de sable SF sur cette caractéristique n'est pas significatif. Cela explique que l'ajout de sable SF aux mélanges ne participe pas à l'amélioration de la durabilité dans l'eau de sable de dune stabilisé.
- Les valeurs de la tenue à l'immersion recommandées en couche de fondation et en couche de base sont garanties pour les mélanges dont les dosages en ciment sont supérieurs ou égaux à 2%.

Dans le chapitre suivant notre étude sera basée sur les mélanges qui ont des résistances en traction à 90 jours supérieures à 0,50 MPa ; ils seront classés d'après leur module d'élasticité et leur résistance à la traction conformément à la norme NF EN 14227-1.

*Chapitre V*

---

***Classification et valorisation  
de sable de dune stabilisé en  
assises de chaussées***

---

## 5.1. Introduction

Dans ce dernier chapitre de notre thèse, nous avons déterminé le couple résistance à la traction-module d'élasticité pour les mélanges dont les résistances à la traction à 90 jours sont supérieures à 0,5 MPa. Ce couple permet de définir la classe de résistance des sables stabilisés selon la classification de la norme NF EN 14227-1. Les résultats obtenus ont été analysés selon les deux points de vue mécanique et économique, d'après lesquels les formulations optimales ont été choisies. Sur ces dernières, des essais supplémentaires ont été effectués (indice portant immédiat IPI et après immersion et tenue à l'immersion) pour étudier l'aptitude de l'utilisation des sables de dune stabilisés en assises de chaussées.

## 5.2. Classification des mélanges et choix des formulations optimales

### 5.2.1. Détermination du module d'élasticité

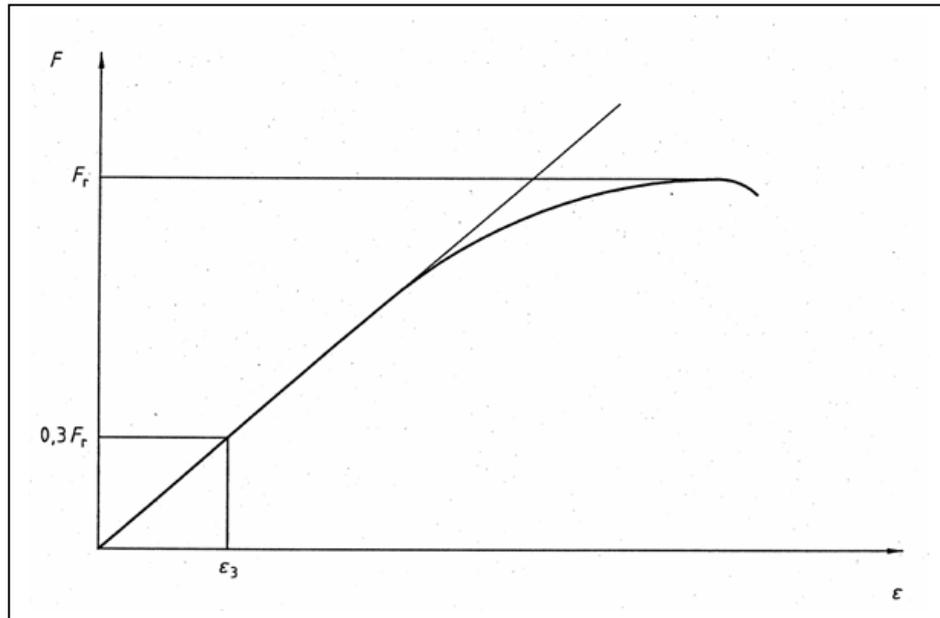
Le module d'élasticité a été déterminé par un essai de compression selon la norme NF EN 13286-43 [48], sur des éprouvettes cylindriques (diamètre et hauteur égales à 8 cm). Sa détermination nécessite la mise en place d'un protocole expérimental spécifique ; une couronne métallique est fixée sur l'éprouvette dans le tiers central afin d'éviter le phénomène de frottement. Trois capteurs de déplacement de précision 0,001 mm, fixés sur la couronne, positionnés à 120° autour de l'axe de l'éprouvette, mesurent le déplacement de la couronne ; ce qui permet de déterminer le déplacement axial du matériau dans le tiers central de l'éprouvette. (Figure 5.1)

La presse utilisée d'une capacité de 50 KN a été équipée d'un anneau dynamométrique d'une capacité de 30 KN, permettant la mesure de la force exercée sur l'éprouvette testée. La vitesse de déplacement du plateau a été fixée à 1 mm/min. Cet essai a été réalisé au sein de laboratoire LNHC – Djelfa.



**Figure 5.1.** Dispositif pour la détermination du module d'élasticité Et

Le module de déformation défini dans cette étude est la pente de la droite reliant l'origine au point d'ordonnée 0,3 Fr. (Figure 5.2)



**Figure 5.2.** Détermination du module d'élasticité  $E_t$

Le module d'élasticité peut être calculé de la manière suivante :

$$E_c \text{ ou } E_t = \frac{1,2 \cdot Fr}{\pi \cdot D^2 \cdot \varepsilon_3} \quad [23] \quad (5.1)$$

Où

- $E_c$  : module d'élasticité en compression exprimé en MPa.
- $E_t$  : module d'élasticité en traction exprimé en MPa.
- $Fr$  : force maximale supportée exprimée en N.
- $D$  : diamètre de l'éprouvette exprimé en mm.
- $\varepsilon_3$  : allongement longitudinal de l'éprouvette lorsque  $F = 0,3 Fr$ .

Le tableau 5.1 donne les valeurs des modules d'élasticité obtenues (voir détail de ces résultats en annexe III).

Tableau 5.1. Modules d'élasticité obtenus

Mélanges	F <sub>r</sub> (KN)			F <sub>r, moy</sub> (KN)	ε <sub>3, moy</sub> (‰)	E <sub>t28</sub> (MPa)
SM 62-08-30	28,94	28,4	26,67	28,00	0,28	5972
SM 80-10-10	27,96	29,24	27,1	28,10	0,28	5993
SM 70-10-20	31,37	33,29	32,65	32,44	0,28	6918
SM 60-10-30	43,32	45,88	44,39	44,53	0,28	9497
SZ 80-10-10	24,39	24,28	24,93	24,53	0,28	5232
SZ 70-10-20	28,29	29,16	28,94	28,80	0,29	5862
SZ 60-10-30	32,63	33,06	32,85	32,85	0,29	6687
SA 70-10-20	26,02	25,8	25,26	25,69	0,28	5479
SA 60-10-30	28,62	29,16	28,29	28,69	0,28	6118

### 5.2.2. Détermination de la résistance en traction

La résistance en traction a été déterminée sur des éprouvettes cylindriques (8 cm de diamètre et 8 cm de hauteur) par un essai de traction par fendage conformément à la norme NF EN 13286-42 [47], avec une presse d'une capacité de 50 KN. La presse a été équipée d'un anneau dynamométrique d'une capacité de 10 KN permettant la mesure de la force de rupture de l'éprouvette testée. La vitesse de déplacement du plateau a été fixée à 0,2 mm/min. Cet essai a été réalisé au sein de laboratoire LNHC – Djelfa.

En raison de la difficulté de la réalisation de l'essai de traction directe, la norme française NF EN 14227-1 permet d'estimer la résistance en traction à partir du résultat de l'essai de traction par fendage. La valeur maximale de la force appliquée (Fr) est utilisée pour déterminer la résistance en traction d'après l'équation 5.2 :

$$R_t = 0,8R_{tb} = 0,8 \times 2 \times 10^{-2} \cdot \frac{Fr}{\pi \cdot \Phi \cdot h} \quad (5.2)$$

Avec :

- R<sub>t</sub> : résistance à la traction estimée de R<sub>tb</sub> (MPa)
- R<sub>tb</sub> : résistance en traction par fendage (MPa)
- Fr : force de la rupture (N),
- h : hauteur de l'éprouvette (cm),
- Φ : diamètre de l'éprouvette (cm).

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 5.2 :

**Tableau 5.2.** Résistances en traction obtenues

Mélanges	$F_r$ (KN)			$F_{r, moy}$ (KN)	$R_{tb}$ (MPa)	$R_{t28}$ (MPa)
SM 62-08-30	5,49	5,15	5,67	5,44	0,541	0,433
SM 80-10-10	5,83	6,54	6,17	6,18	0,615	0,492
SM 70-10-20	7,26	6,94	7,8	7,33	0,730	0,584
SM 60-10-30	9,76	11,06	8,67	9,83	0,978	0,783
SZ 80-10-10	5,27	5,46	5,58	5,44	0,541	0,433
SZ 70-10-20	5,95	6,26	6,23	6,15	0,612	0,489
SZ 60-10-30	7,19	7,41	7,38	7,33	0,729	0,583
SA 70-10-20	6,01	6,01	6,11	6,04	0,601	0,481
SA 60-10-30	6,98	7,04	6,91	6,98	0,694	0,555

### 5.2.3. Classification des mélanges selon la norme NF EN 14227-1

Les valeurs obtenues de module d'élasticité et de résistance en traction ont été déterminées après 28 jours de conservation. Ces résultats sont ensuite estimés à 360 jours (les sables étudiés ne sont pas organiques et le ciment utilisé est normalisé), en utilisant des coefficients d'estimation indiqués par la norme NF EN 14227-1 (Tableau 1.3). Les paramètres  $R_{t360}$  et  $E_{t360}$  sont respectivement estimés par les coefficients 0,6 et 0,65 (Tableau 5.3).

**Tableau 5.3.** Valeurs de  $R_t$  et  $E_t$  estimées

Mélanges	$E_{t28}$ (MPa)	$E_{t360, estimé}$ (MPa)	$R_{t28}$ (MPa)	$R_{t360, estimé}$ (MPa)
SM 62-08-30	5972	9188	0,433	0,722
SM 80-10-10	5993	9220	0,492	0,820
SM 70-10-20	6918	10643	0,584	0,973
SM 60-10-30	9497	14611	0,783	1,305
SZ 80-10-10	5232	8049	0,433	0,722
SZ 70-10-20	5862	9018	0,489	0,815
SZ 60-10-30	6687	10288	0,583	0,972
SA 70-10-20	5479	8429	0,481	0,802
SA 60-10-30	6118	9412	0,555	0,925

Ces valeurs sont ensuite reportées sur le diagramme de classification afin d'évaluer la stabilité du matériau sable de dune stabilisé. La norme NF EN 14227-1 a cité les six classes de T0 à T5. Elle a également recommandé que les matériaux sable-ciment de classes T2, T3 et T4 soient couramment utilisables en couche d'assise de chaussée [26]. Les Figures 5.3.a, 5.3.b et

5.3.c, présentent la classification des sables de dune stabilisés d'après la norme NF EN 14227-1.

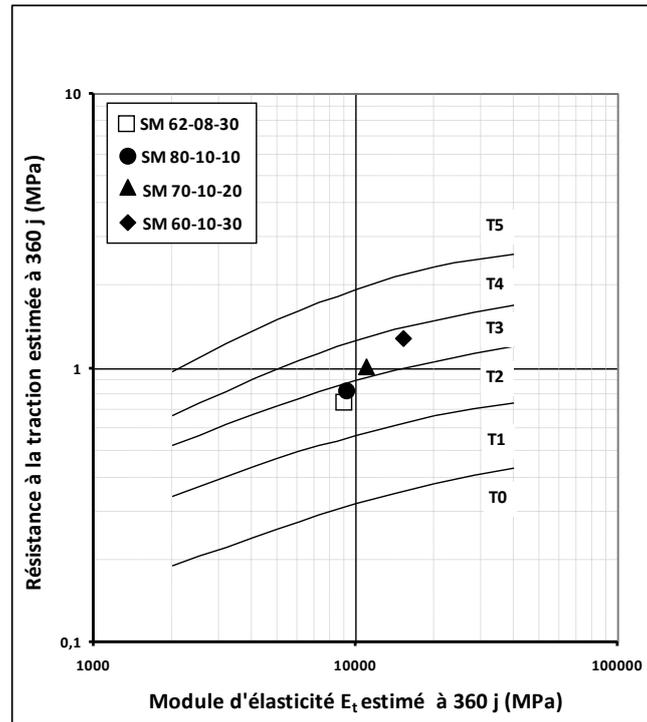


Figure 5.3.a. Classification des formulations de la série SM selon la norme NF EN 14227-1

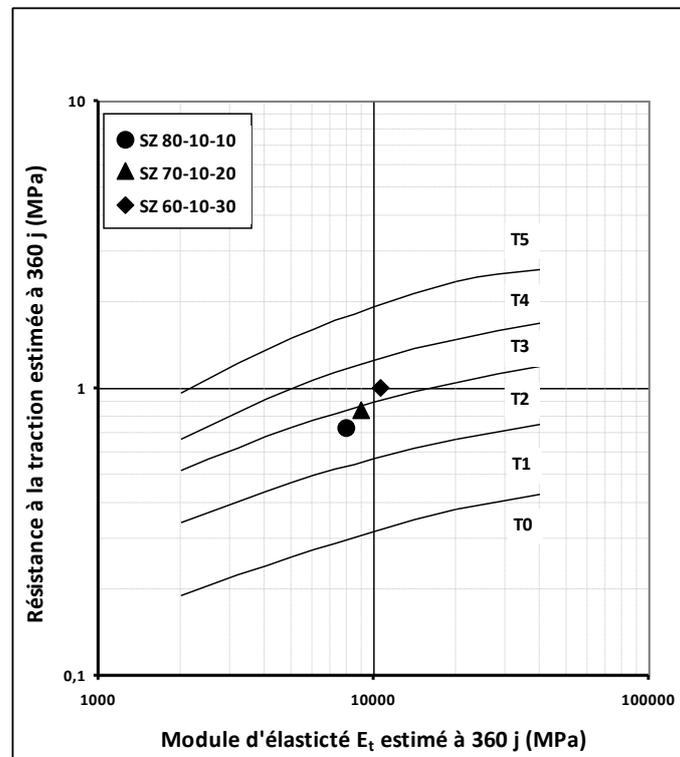
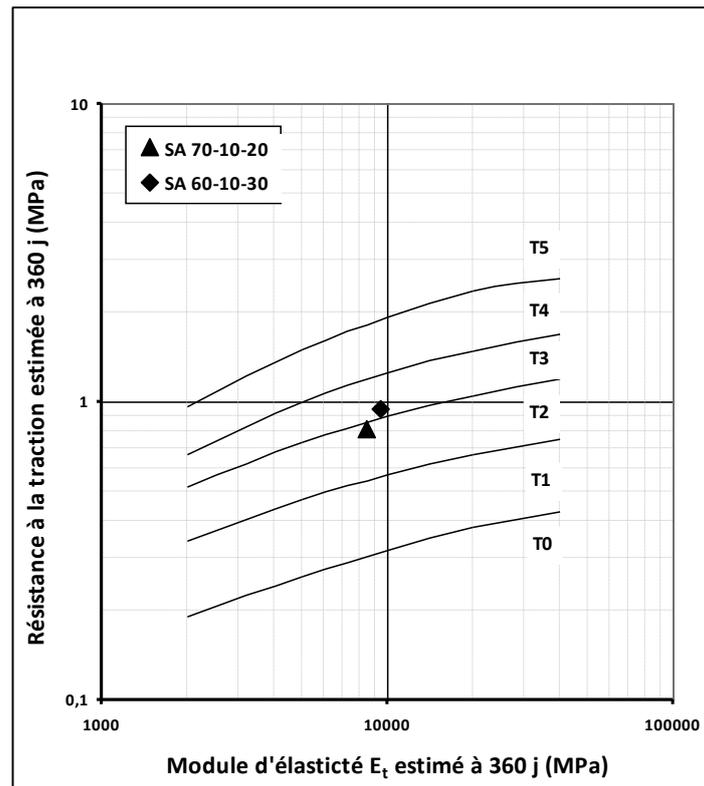


Figure 5.3.b. Classification des formulations de la série SZ selon la norme NF EN 14227-1



**Figure 5.3.c.** Classification des formulations de la série SA selon la norme NF EN 14227-1

Les résultats obtenus doivent être analysés selon les deux points de vue mécanique et économique. La valorisation de sable stabilisé représenterait un réel intérêt technico-économique si les stabilisations envisagées se situaient au minimum en T3. Rappelons qu'il est possible d'utiliser une stabilisation se positionnant en T2 mais l'épaisseur de la couche et par conséquent le coût de sa mise en œuvre sont alors plus élevés [24, 50, 51].

Les résultats des figures 5.3, montrent que toutes les formulations étudiées présentent des performances mécaniques suffisantes pour une utilisation en couche d'assise de chaussée (classe de matériaux supérieure ou égale à la classe T2).

Il convient également de noter que pour des dosages de sable SF et de ciment constants, les formulations contenant du sable SM donnent les meilleures performances mécaniques ; Ceci est principalement dû à sa granulométrie qui est relativement meilleure que celle des sables SZ et SA.

La stabilisation de sable SM avec 10% de ciment et 30% de sable SF (Formulation: SM 60-10-30) permet d'obtenir des performances mécaniques positionnées au sommet de la classe T3 (figure 5.3.a). Pour les sables SZ et SA, cette position ne peut être atteinte que si la teneur en ciment est supérieure à 10%.

L'addition de 8% de ciment et 30% de sable SF au sable SM (formulation:SM 62-08-30) permet d'obtenir des performances mécaniques placées au sommet de la classe T2 (figure 5.2.a). Pour les sables SZ et SA, cette position ne peut être atteinte que si la teneur en ciment est égale à 10% (Figure 5.3.b et figure 5.3.c).

### 5.2.4. Choix des formulations optimales

Pour le sable SM, un dosage de 10% de ciment avec 20% de sable SF permet d'obtenir une classe T3 suffisante pour les couches d'assise de chaussée. La formulation avec un dosage de 30% de sable SF permet d'atteindre des performances meilleures ; mais d'un point de vue économique elle est moins intéressante (Figure 11.a). Alors on choisit SM 70-10-20 comme formulation optimale pour la série SM. Pour les sables SZ et SA, un dosage de 10% de ciment avec 30% de sable SF permet d'obtenir une classe T3 (Figure 5.3.b et Figure 5.3.c). Alors on choisit SZ 60-10-30 et SA 60-10-30 comme formulations optimales pour les séries SZ et SA. (Tableau 5.4)

**Tableau 5.4.** Formulations optimales choisies

	Série SM	Série SZ	Série SA
Formulation optimale	<b>SM 70-10-20</b>	<b>SZ 60-10-30</b>	<b>SA 60-10-30</b>
% de ciment	10 %	10 %	10 %
% de sable SF	20 %	30 %	30 %
Classe de résistance	T3	T3	T3

## 5.3. Performances mécaniques des formulations optimales

### 5.3.1. Indice portant Immédiat (IPI)

L'indice Portant Immédiat d'un sol compacté est déterminé par un essai de poinçonnement, conformément à la norme NF P94-078. Le principe général de l'essai consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique (de 19,3 cm<sup>2</sup> de section) pour le faire pénétrer à vitesse constante (1,27 mm/min) dans une éprouvette de sol testé compactée à la teneur en eau optimale.

Durant l'essai, la courbe force – déplacement est établie sur l'anneau dynamométrique pour la force nécessaire aux enfoncements de 1.25 mm, 2 mm, 2.5 mm, 5 mm, 7.5 mm, et 10 mm. On définit les valeurs caractéristiques suivantes :

$$I_1 = \frac{\text{Effort de pénétration à 2,5 mm d'enfoncement (en KN)}}{13,35} \times 100$$

$$I_2 = \frac{\text{Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (en KN)}}{19,93} \times 100$$

Par convention, l'IPI est la plus grande des deux valeurs :  $IPI = \max(I_1, I_2)$

Nous avons utilisé une presse du laboratoire LNHC – Djelfa, d'une capacité de 50 kN. Le poinçon est monté sur un anneau dynamométrique de 50 kN (préalablement étalonné). Un comparateur de 0,01 mm de précision disposé entre le piston et le moule permet de connaître la valeur de l'enfoncement.

Les résultats de l'indice portant immédiat obtenus sont présentés dans les figures 5.4. On remarque que les valeurs d'IPI sont du même ordre de grandeur pour tous les mélanges optimaux.

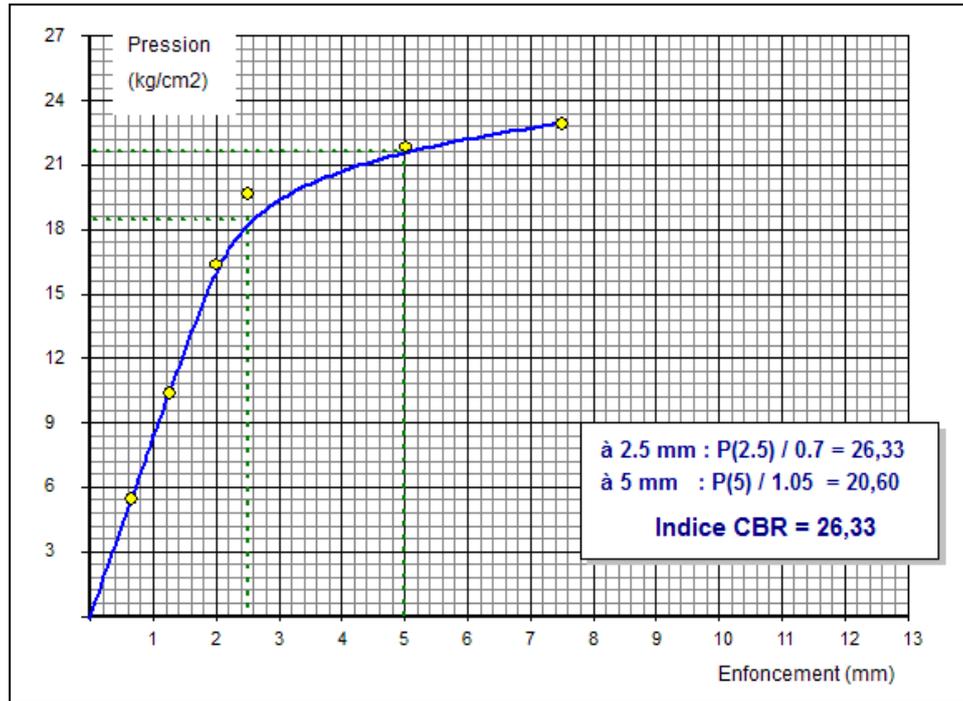


Figure 5.4.a. Courbe de l'essai C.B.R. immédiat pour la formulation SM 70-10-20

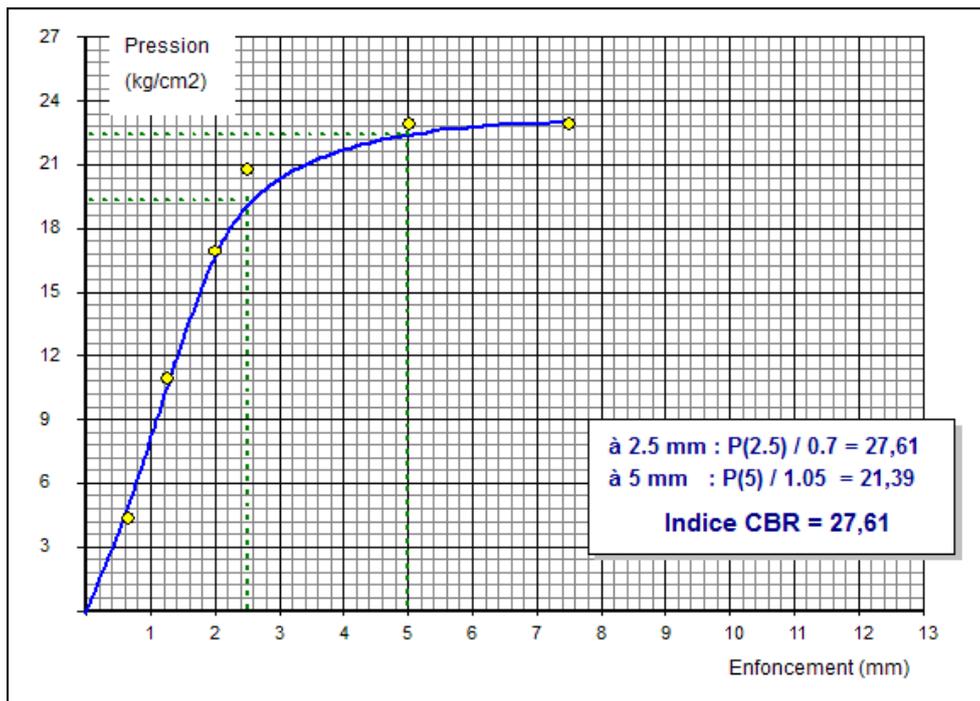


Figure 5.4.b. Courbe de l'essai C.B.R. immédiat pour la formulation SZ 60-10-30

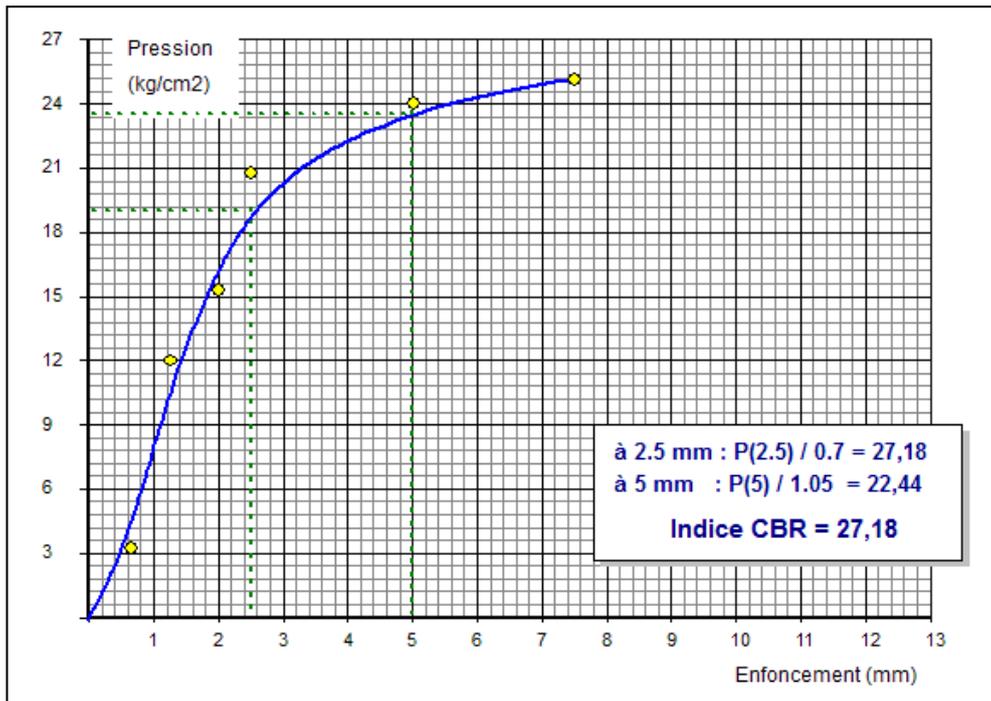


Figure 5.4.c. Courbe de l'essai C.B.R. immédiat pour la formulation SA 60-10-30

Selon les recommandations de la norme française NF P 98 115 et afin d'assurer la circulation normale des machines sur le chantier, les valeurs souhaitables de l'IPI ne doivent pas être inférieure à 35% pour la couche de fondation et 45% pour la couche de base. Toutefois, cette norme définit également des valeurs limites inférieures de 25% et 35% pour les mêmes couches citées ci-dessus.

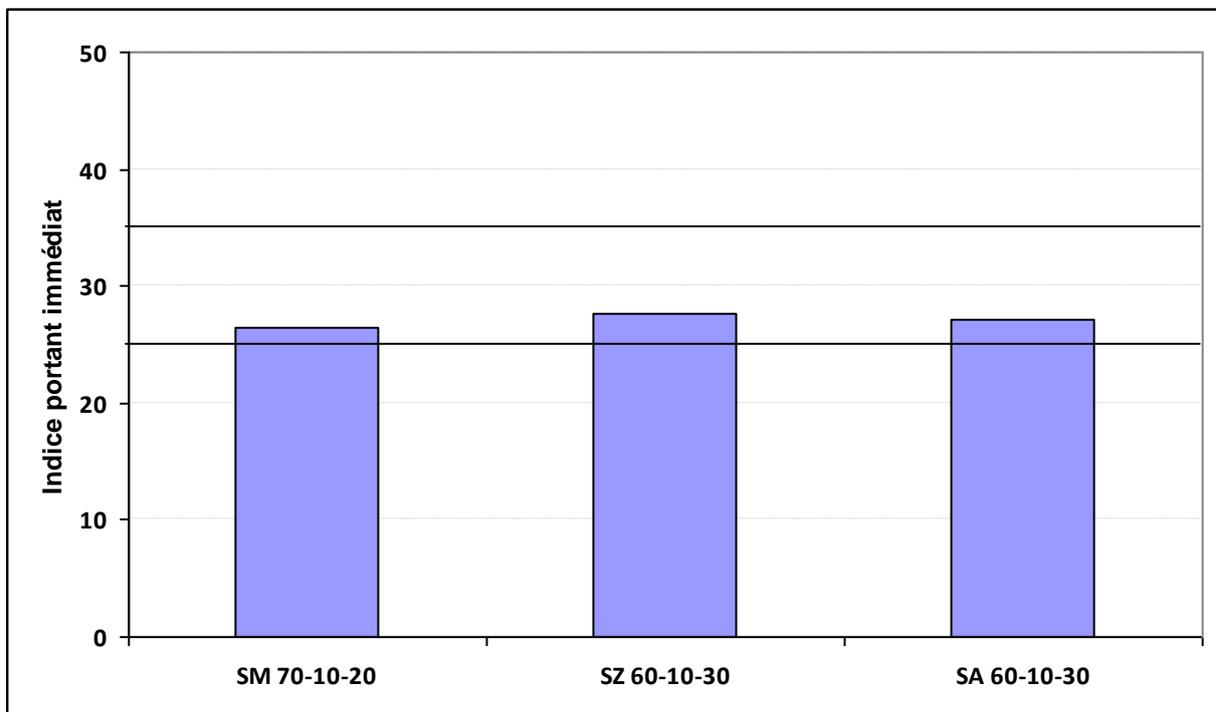


Figure 5.5. Indice portant immédiat des formulations optimales

D'après la figure 5.5, les valeurs de l'IPI sont supérieures à la valeur exigée pour une utilisation en couche de fondation (IPI > 25 %) ; c'est-à-dire que la couche de sable de dune stabilisé est circulaire juste après l'opération de compactage.

Les valeurs de l'IPI sont inférieures à celle exigée pour la couche de base (IPI > 35 %) ; Cela signifie que la couche de sable de dune stabilisé ne peut être circulaire qu'après un durcissement partiel du ciment.

### 5.3.2. Indice CBR après immersion

La détermination de l'indice CBR après immersion se fait par la mesure de la résistance au poinçonnement d'un sol compacté à la teneur en eau optimale, puis immergé durant plusieurs jours (dans notre cas la durée d'immersion est de 4 jours). L'indice CBR après immersion caractérise l'évolution de la portance d'un sol compacté soumis à des variations de régime hydrique.

Les figures 5.6 donnent les résultats obtenus de l'indice CBR après immersion.

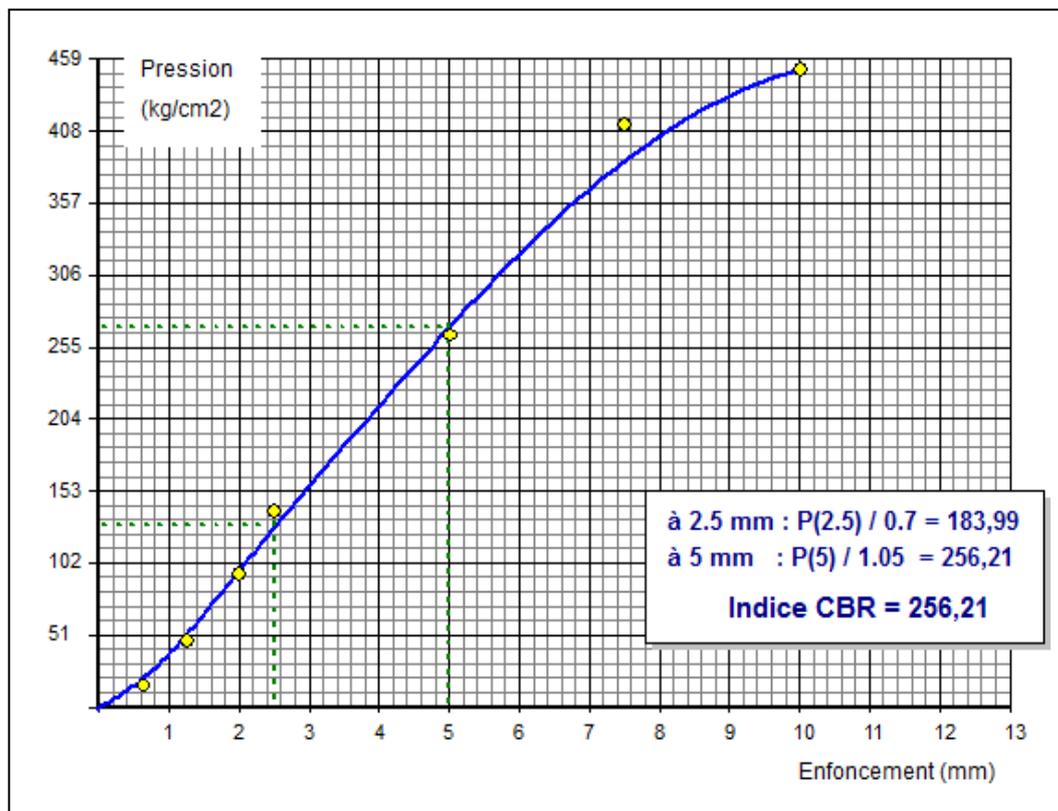


Figure 5.6.a. Courbe de l'essai C.B.R. après immersion pour la formulation SM 70-10-20

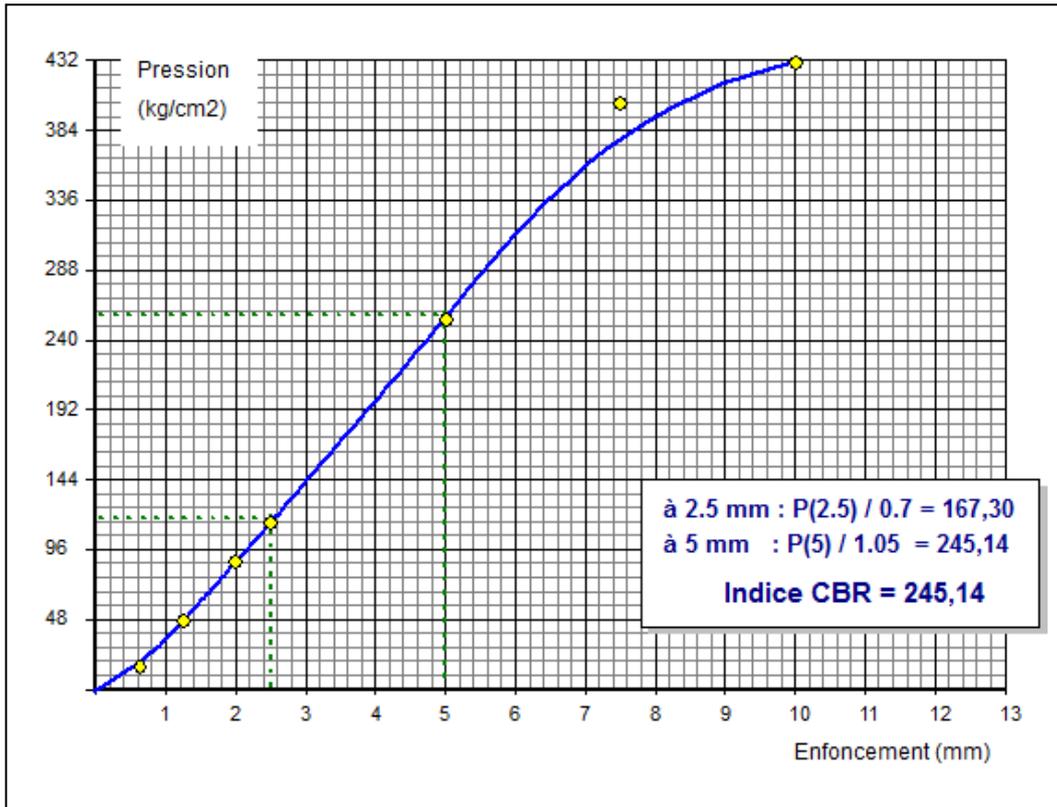


Figure 5.6.b. Courbe de l'essai C.B.R. après immersion pour la formulation SZ 60-10-30

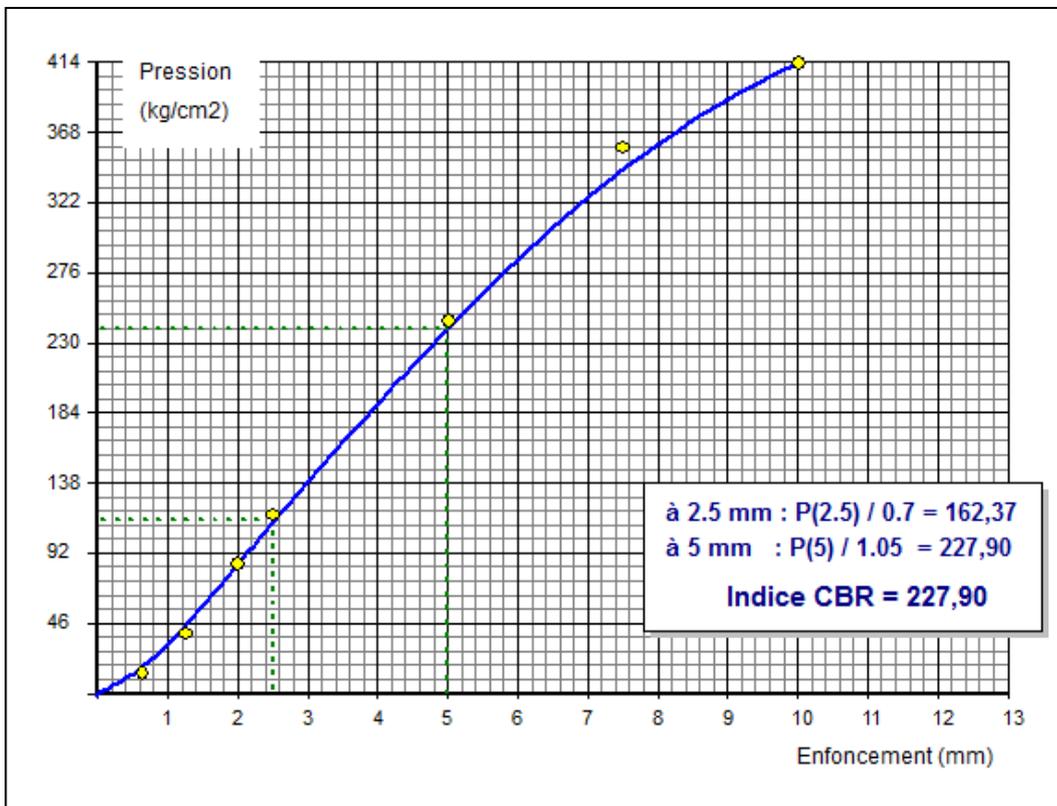


Figure 5.6.c. Courbe de l'essai C.B.R. après immersion pour la formulation SA 60-10-30

Contrairement à l'indice portant immédiat, les valeurs de d'indice CBR après immersion représentent des écarts plus significatifs : la formulation SM 70-10-20 donne la meilleure portance après immersion, puis viennent les formulations SZ 60-10-30 et SA 60-10-30.

### 5.3.3. Tenue à l'immersion

L'évaluation de l'insensibilité à l'eau (tenue à l'immersion) consiste à comparer les résistances obtenues à 60 jours sur des éprouvettes ayant subi deux modes de cure.

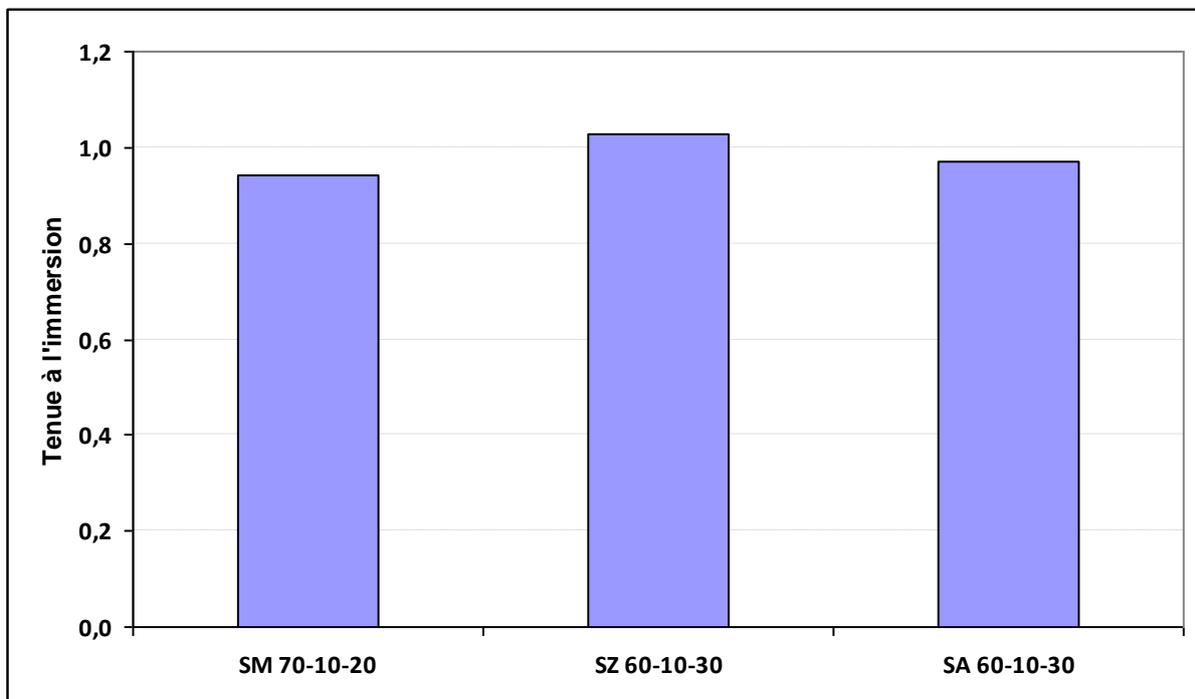
Une première série est conservée dans des conditions normales pendant 60 jours et on détermine ensuite sa résistance en compression, notée  $R_{c60}$ . La seconde série subit 28 jours de cure normale puis les éprouvettes sont immergées dans de l'eau pendant 32 jours. A terme, on détermine leur résistance en compression, notée  $R_{ci}$ .

Le rapport  $R_{ci}/R_{c60}$  permet d'apprécier l'insensibilité à l'eau du matériau. Elle est satisfaisante si la valeur obtenue est supérieure à 0,80 [52] (critère pour un sol dont la valeur au bleu est inférieure à 0,5).

Les résultats obtenus sont regroupés au tableau 5.5 et Figure 5.7.

**Tableau 5.5.** Tenue à l'immersion des formulations optimales

	SM 70-10-20	SZ 60-10-30	SA 60-10-30
$R_{c60}$ (MPa)	8.43	7.27	6.34
$R_{ci}$ (MPa)	7.92	7.50	6.15
Tenue à l'immersion	0.94	1.03	0.97



**Figure 5.7.** Tenue à l'immersion des formulations optimales

D'après la Figure 5.7, on peut considérer que quelque soit le sable de dune utilisé, le rapport représentant la tenue à l'immersion ( $R_{ci}/R_{c60}$ ) est supérieur à 0.8, valeur minimale préconisée par le GTS [52]. Les sables de dune stabilisés ne présentent donc pas de perte de résistance significative en cas d'immersion.

#### **5.4. Conclusion**

Cette campagne d'essais a permis de souligner plusieurs caractéristiques importantes concernant le comportement des sables de dunes stabilisés ;

- L'ajout de 10% de ciment et 20% de sable SF au sable SM est suffisant pour atteindre la classe T3. Pour les sables SZ et SA, cette classe de résistance ne peut être atteinte que pour un dosage de 10% de ciment et 30% de sable SF.
- Les formulations optimales choisies donnent des valeurs d'Indice Portant Immédiat autorisant la circulation des engins pour une utilisation en couche de fondation. Pour une valorisation en couche de base la circulation ne peut être autorisée qu'après un durcissement partiel du ciment.
- Le rapport représentant la tenue à l'immersion est supérieur à 0.8 quelque soit le sable utilisé ; les sables de dune stabilisés ne présentent donc pas de perte de résistance significative en cas d'immersion.

D'après cette campagne d'essais, on peut souligner que les formulations optimales choisies développent des performances mécaniques satisfaisantes pour envisager leur valorisation en couche d'assise de chaussée.

---

## ***Conclusion générale***

---

## Conclusion générale

Cette étude a été menée afin d'évaluer la possibilité d'utiliser du ciment Portland et du sable fillérisé pour stabiliser trois types de sable de dune dans la région de Djelfa, et à les valoriser en assise de chaussée. Sur la base des résultats du programme expérimental réalisé, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- La granulométrie des sables étudiés est très serrée ; près de 90 % des grains ont une dimension comprise entre 0,1 mm et 0,5 mm. Ce qui donne une compacité suffisamment grande, et par la suite des performances mécaniques (résistances en compression et en traction, et portance) non adéquates. Un traitement aux liants hydrauliques et l'utilisation d'un correcteur granulaire se sont révélées nécessaires.
- Selon le guide de terrassements routiers, les sables étudiés appartiennent à la classe D1, ces sables sont insensibles à l'eau, sans cohésion et perméables. Avec leur granulométrie souvent mal graduée et de petit calibre, ils présentent une traficabilité difficile.
- L'augmentation des quantités de ciment et de sable Fillérisé (SF) ajoutées aux mélanges conduit à une augmentation de la densité sèche maximale. Cette augmentation est attribuée essentiellement à l'accroissement de la compacité des mélanges stabilisés. Ce qui va influencer positivement l'évolution des performances mécaniques des matériaux obtenus.
- La provenance du sable influe d'une façon très significative sur la densité sèche maximale. On constate que, pour des teneurs en ciment et en sable SF fixes, la densité sèche maximale des mélanges à base de sable d'El-Masrane (SM) est supérieure à celle des mélanges constitués de sable de Zaâfrane (SZ), les mélanges de la série de sable d'El-Amra (SA) donnent la densité la plus faible.
- L'augmentation de la quantité de sable SF ajoutée aux mélanges influe d'une façon très significative sur la résistance en compression. On a trouvé que, pour une teneur en ciment égale à 10%, la correction granulométrique avec 30% de sable SF peut donner un gain de résistance en compression égal à 128% pour le sable SM, 73% pour le sable SZ et de 63% pour le sable SA. Ces valeurs démontrent clairement l'efficacité de sable SF à l'amélioration de la compacité des mélanges et par conséquent leurs résistances en compression.
- L'effet de la provenance de sable de dune sur la résistance en compression devient significatif au-delà de 4% de ciment et de 10% de sable SF. Pour un dosage en ciment supérieur ou égal à 4%, l'addition de sable SF aux mélanges devient plus efficace à l'amélioration de la résistance en compression.
- Pour des pourcentages de ciment et de sable SF fixes, les mélanges constitués de sable SM, présentent les meilleures résistances à la compression. Ceci est principalement dû à sa granulométrie qui est relativement meilleure que celle des sables SZ et SA.
- Conformément à la classification de la norme NF EN 14227-1 (classification selon la résistance à la compression à 28 jours), la stabilisation des sables étudiés au ciment et sable fillérisé peut donner des résistances de classe C<sub>5/6</sub> dans le cas de sable SM et SZ, et de classe C<sub>3/4</sub> dans le cas de sable SA.
- La résistance à la compression à 28 jours est strictement liée à la densité sèche maximale. Cette relation est d'ordre croissant et suit une fonction parabolique pour une teneur en sable SF déterminée, et elle suit une fonction linéaire pour un dosage de ciment fixée.
- Pour une teneur en ciment égale à 10%, la correction granulométrique avec 30% de sable SF peut donner un gain de résistance à la traction égal à 108% pour le sable SM, 57% pour le

sable SZ et de 67% pour le sable SA. Ces valeurs démontrent clairement l'efficacité de sable SF à l'amélioration de la résistance à la traction des sables stabilisés.

- La stabilisation de sable SM avec 8% de ciment et 30% de sable SF est suffisante pour obtenir les performances recommandées (résistance en traction par fendage supérieure à 0,5 MPa) pour la couche de base. Pour le sable SZ, ces performances ne sont obtenues que pour un dosage minimal de ciment égal à 10% et celui de sable SF égal à 10%. De même pour le sable SA, mais avec une teneur minimale en sable SF égal à 20%.

- Les valeurs du module d'élasticité obtenues sont très faibles par rapport à celui d'un béton ordinaire (généralement compris entre 25000 et 45000 MPa). Ce qui indique que le sable de dune stabilisé est fortement élastique et présente une grande déformabilité. Ce qui est positif pour un matériau routier.

- La valeur de la tenue à l'immersion est grande pour n'importe quel pourcentage de ciment (supérieur à 0,75 pour 2% de ciment). Elle est peu influencée par la proportion de ciment ajoutée et l'origine du sable. L'effet du pourcentage de sable SF sur cette caractéristique n'est pas significatif. Cela explique que l'ajout de sable SF aux mélanges ne participe pas à l'amélioration de la durabilité des sables de dune stabilisés dans l'eau.

- Les valeurs de la tenue à l'immersion recommandées en couche de fondation et en couche de base sont garanties pour les mélanges dont les dosages en ciment sont supérieurs ou égaux à 2%.

- L'ajout de 10% de ciment et 20% de sable SF au sable SM est suffisant pour atteindre la classe T3, pour les sables SZ et SA, cette classe de résistance ne peut être atteinte que pour un dosage de 10% de ciment et 30% de sable SF.

- Les formulations optimales choisies se situent en classe T3, selon la classification de la norme EN 14227-1. Elles développent des performances mécaniques satisfaisantes pour envisager leur valorisation en couche d'assise de chaussée.

Dans la perspective et pour mieux maîtriser le comportement des sables de dune stabilisés pour assise de chaussée, nous formulons le souhait que d'autres caractéristiques telles que la durabilité et le comportement vis-à-vis du fluage, le retrait, l'orniérage et la résistance à l'érosion puissent être étudiées dans les travaux à venir.

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] H. CAPDESSUS et J. J. CHAUVIN. Traitement des sables des Landes, Bulletins de Liaison de Laboratoire des Ponts et Chaussées. N° 67 p. 85-103, 1973
- [2] Direction des Routes et de la Circulation Routière. La stabilisation aux liants hydrauliques, rapport préalable, cycle d'études, 1959.
- [3] GODIN. M. P. Emplois et perspectives de la stabilisation au ciment en technique routière, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, janvier 1962
- [4] CROISE. R. Traitement des sols aux liants hydrauliques. Revue Forestière Française, N° 5, p. 427-438, 1964.
- [5] FUMET, P. Chaussées en sables gypseux et en sables stabilisés chimiquement, Revue général des routes et aérodromes, numéro spécial Sahara, France, N° 329, p. 169-178. (1959)
- [6] KETTAB, R. Contribution à la valorisation du sable de dunes. Thèse de Doctorat d'état Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, 2007.
- [7] GHRIEB. A, Etude d'un béton de sable de dunes pour pistes aéronautiques, thèse de Magister, ENP, Alger, 2003.
- [8] GTR. Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme. Editions du SETRA-LCPC, Fascicules I & II, 2000, 98 p. et 102 p.
- [9] CHAUVIN, J.J. Les sables : guide technique d'utilisation routière. ISTED, 76 p. France, 1987
- [10] AUGRI. C et CREUSSARD. P. Les granulats marins, rapport scientifique et technique N° 51, Publication du centre français pour l'exploitation des océans, 1984.
- [11] BEN DHIA M.H. (1998), Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière, Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, 213, Jan-Fev.,pp.33-42
- [12] DOMECH M. (1980), Construction des chaussées au Sahara, Rapport technique du Laboratoire Central des Travaux Publics, Alger, Sep. 1980.
- [13] AUTRET. P., Routes dans les régions en développement, LCPC, 64 p, France, 1989.
- [14] OULD SID A. C, HAVARD H., VALIN C., Terrassements routiers dans les sables de dunes de Mauritanie, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 199, sept.-oct., pp. 27-34, 1995.
- [15] FENZY E., Particularité de la technique routière au Sahara, Revue générale des routes et aérodromes, 411, pp. 57-71, 1966.
- [16] MOSZKOWICZ P., BARNA R., 2001, "Stabilisation - solidification des déchets", Techniques de l'ingénieur, Article G 2080, Volume G. 04 / 2001.
- [17] Taylor H. F. W., Cement Chemistry, Publisher: Thomas Telford Ltd, 480 p, 1997

- [18] VENUAT M., 1989, La pratique des ciments, mortiers et bétons. Tome 1. Caractéristiques des liants et des bétons. Mise en oeuvre des coulis et mortiers", Deuxième édition, Editions du moniteur, 284 p, 1989.
- [19] AFNOR, 1992. Classification des environnements agressifs. NF P 18-011
- [20] Nguyen T. B., Valorisation des sédiments de dragage traités par le procédé NOVOSOL® dans des matériaux d'assises de chaussée - Comportement mécanique et environnemental. Thèse de Doctorat, université de Toulouse, France, 2008.
- [21] Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA). Conception et dimensionnement des structures de chaussées – Guide technique, Paris, 260 p, 1994.
- [22] Lorino, T. Autopsie d'une chaussée, LCPC, 2005.
- [23] AFNOR 1992, NF P11-300. Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.
- [24] TRAN N.T. Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière. Thèse de Doctorat, Université d'Artois, France (2009).
- [25] DUBOIS V., Etude du comportement physico-mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins – Valorisation en technique routière. Thèse de Doctorat, Université d'Artois, France (2006).
- [26] AFNOR 2005, NF EN 14227-1. Mélanges traités aux liants hydrauliques - Partie 1: Mélanges granulaires traités au ciment.
- [27] Ducloux A., Diguat P. et Colombier G., Influence de la température de conservation sur la résistance des graves-laitier, *Bull, liaison ' labo. P. et Ch.*, spécial Q (déc. 1970), p. 187-190.
- [28] Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA). Conception et dimensionnement des structures de chaussées. Paris, 1994, 250 p.
- [29] Boulkhiout M., Utilisation des tufs calcaires- sable de dune en géotechnique routière – Mémoire de Magister, ENP Alger, 2003.
- [30] AFNOR, 1996. Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique - Méthode par tamisage à sec après lavage. NF P 94-056
- [31] KETTAB. R, GHRIEB. A, BALI. A. A study of dune sand concrete for aeronautical runways» advances in waste management and recycling, international symposia; 9-11 september 2003 Dundee, Scotland.
- [32] KETTAB. R, BALI. A, GHRIEB. A. Béton de sable de dunes ; 1<sup>ier</sup> Congrès international sur la technologie et la durabilité du béton USTHB 24 au 26 Mai 2004 Alger.
- [33] KETTAB. R, BALI. A, GHRIEB. A, ALLICHE. A. Etude et formulation d'un béton de sable de dunes pour chaussées aéronautiques; 1<sup>ier</sup> Congrès africain de la route du 06 au 08 Décembre 2005 Alger.

- [34] AFNOR, 1999. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 8 : évaluation des fines - Équivalent de sable. NF EN 933-8
- [35] AFNOR, 2010. Essais visant à déterminer les propriétés chimiques des granulats - Partie 1 : analyse chimique. NF EN 1744-1
- [36] AFNOR, 1998. Sols : reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache. NF P94-068
- [37] AFNOR, 1993. Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un sol - Méthode chimique. NF P94-055
- [38] GUETTALA S. , MEZGHICHE B., MELLAS M., Influence of addition dune sand powder to cement, on the properties physical-mechanical and deformability of concrete. Asian journal of civil engineering (building and housing) vol. 13, No. 6, pages 765-781, 2012
- [39] AFNOR, 1999. Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor normal, essai Proctor modifié. NF P 94-093.
- [40] Dupain R, Lanchon R, Saint-Arroman J.C. Granulats, sols, ciments et bétons – Caractéristiques des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire. Edition Casteilla, 236 p. France, 2000
- [41] AFNOR, 1992. Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation. NF P94-057.
- [42] Lanchon R. cours de laboratoire Granulats, bétons et sols. Edition Desforges. France, 1977
- [43] SCORDIA P.Y. caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers. Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille, France (2008)
- [44] VENUAT. M. Le traitement des sols à la chaux et au ciment. Publié par l'auteur, 1980, 459 p.
- [45] AL-AMOUDI. O, KHAN. K, AL-KAHTANI. N. Stabilization of a Saudi calcareous marl soil, Construction and Building Materials, 24 (2010) 1848–1854
- [46] AFNOR 2003, NF EN 13286-41. Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 41: méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la compression des mélanges traités aux liants hydrauliques.
- [47] AFNOR 2003, NF EN 13286-42. Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 42: méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la traction indirect des mélanges traités aux liants hydrauliques.
- [48] AFNOR 2003, NF EN 13286-43. Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 43: méthode d'essai pour la détermination du module d'élasticité des mélanges traités aux liants hydrauliques.

[49] AFNOR 2005, NF EN 13286-53. Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 53 : méthode de confection par compression axiale des éprouvettes de matériaux traités aux liants hydrauliques.

[50] GHRIEB. A, MITICHE-KETTAB. R, Stabilized Dune Sand for Road Foundation Layers - Case of the Dune Sand of the Region of Djelfa (Algeria), Applied Mechanics and Materials Vol. 319 (2013) pp 263-277, Trans Tech Publications, Switzerland, 2013.

[51] Scordia P.Y., caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers. Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille, France, 2008.

[52] SETRA - LCPC. GTS, Technical guideline to the treatment of soils with lime and hydraulic binders. Editions de SETRA-LCPC, 237 p. 2000.

---

# *Annexe I*

---

**Stabilisation au ciment seul (Série SM)****Mélange: SM 98-02-00****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SM</i>	<i>98</i>	<i>2940</i>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<i>2</i>	<i>60</i>
<i>Additif: sable fillérisé 0/3</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<i>13,5</i>	<i>405</i>

**Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8**

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	<i>13,5</i>	<i>1,70</i>

<i>Poids humide (g)</i>	<b>776</b>
-------------------------	------------

**Mélange: SM 96-04-00****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SM</i>	<i>96</i>	<i>2880</i>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<i>4</i>	<i>120</i>
<i>Additif: sable fillérisé 0/3</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<i>13,3</i>	<i>399</i>

**Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8**

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	<i>13,3</i>	<i>1,74</i>

<i>Poids humide (g)</i>	<b>793</b>
-------------------------	------------

**Mélange: SM 94-06-00****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SM</i>	<i>94</i>	<i>2820</i>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<i>6</i>	<i>180</i>
<i>Additif: sable fillérisé 0/3</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<i>12,4</i>	<i>372</i>

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	12,4	1,77

<i>Poids humide (g)</i>	<b>800</b>
-------------------------	------------

Mélange: SM 92-08-00Composition pour 3000 g de mélange sec

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SM</i>	92	2760
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	8	240
<i>Additif: sable fillérisé 0/3</i>	0	0
<i>Teneur en eau optimale</i>	12	360

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	12	1,79

<i>Poids humide (g)</i>	<b>806</b>
-------------------------	------------

Mélange: SM 90-10-00Composition pour 3000 g de mélange sec

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SM</i>	90	2700
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	10	300
<i>Additif: sable fillérisé 0/3</i>	0	0
<i>Teneur en eau optimale</i>	11,6	348

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	11,6	1,82

<i>Poids humide (g)</i>	<b>817</b>
-------------------------	------------

**Stabilisation au ciment à 10 % de Sable SF (Série SM)****Mélange: SM 88-02-10****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SM</i>	<b>88</b>	<b>2640</b>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<b>2</b>	<b>60</b>
<i>Additif: sable fillérisé</i>	<b>10</b>	<b>300</b>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<b>13,3</b>	<b>399</b>

**Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8**

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	<b>13,3</b>	<b>1,76</b>

<i>Poids humide (g)</i>	<b>802</b>
-------------------------	------------

**Mélange: SM 86-04-10****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SM</i>	<b>86</b>	<b>2580</b>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<b>4</b>	<b>120</b>
<i>Additif: sable fillérisé</i>	<b>10</b>	<b>300</b>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<b>12,2</b>	<b>366</b>

**Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8**

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	<b>12,2</b>	<b>1,80</b>

<i>Poids humide (g)</i>	<b>812</b>
-------------------------	------------

**Mélange: SM 84-06-10****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SM</i>	<b>84</b>	<b>2520</b>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<b>6</b>	<b>180</b>
<i>Additif: sable fillérisé</i>	<b>10</b>	<b>300</b>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<b>11,6</b>	<b>348</b>

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	11,6	1,82

<i>Poids humide (g)</i>	<b>817</b>
-------------------------	------------

Mélange: SM 82-08-10Composition pour 3000 g de mélange sec

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SM</i>	82	2460
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	8	240
<i>Additif: sable fillérisé</i>	10	300
<i>Teneur en eau optimale</i>	11	330

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	11	1,84

<i>Poids humide (g)</i>	<b>821</b>
-------------------------	------------

Mélange: SM 80-10-10Composition pour 3000 g de mélange sec

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SM</i>	80	2400
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	10	300
<i>Additif: sable fillérisé</i>	10	300
<i>Teneur en eau optimale</i>	10,5	315

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	10,5	1,86

<i>Poids humide (g)</i>	<b>826</b>
-------------------------	------------

**Stabilisation au ciment à 20 % de Sable SF (Série SM)****Mélange: SM 78-02-20****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	Pourcentage (%)	Masses (gr)
Sable: SM	78	2340
Ciment CPJ 42.5	2	60
Additif: sable fillérisé	20	600
Teneur en eau optimale	12,8	384

**Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8**

OPN	Teneur en eau optimale (%)	Densité sèche max (g/cm <sup>3</sup> )
	12,8	1,79

Poids humide (g)	<b>812</b>
------------------	------------

**Mélange: SM 76-04-20****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	Pourcentage (%)	Masses (gr)
Sable: SM	76	2280
Ciment CPJ 42.5	4	120
Additif: sable fillérisé	20	600
Teneur en eau optimale	11,5	345

**Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8**

OPN	Teneur en eau optimale (%)	Densité sèche max (g/cm <sup>3</sup> )
	11,5	1,83

Poids humide (g)	<b>820</b>
------------------	------------

**Mélange: SM 74-06-20****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	Pourcentage (%)	Masses (gr)
Sable: SM	74	2220
Ciment CPJ 42.5	6	180
Additif: sable fillérisé	20	600
Teneur en eau optimale	10,6	318

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	10,6	1,85

<i>Poids humide (g)</i>	<b>823</b>
-------------------------	------------

Mélange: SM 72-08-20Composition pour 3000 g de mélange sec

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SM</i>	72	2160
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	8	240
<i>Additif: sable fillérisé</i>	20	600
<i>Teneur en eau optimale</i>	9,7	291

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	9,7	1,88

<i>Poids humide (g)</i>	<b>829</b>
-------------------------	------------

Mélange: SM 70-10-20Composition pour 3000 g de mélange sec

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SM</i>	70	2100
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	10	300
<i>Additif: sable fillérisé</i>	20	600
<i>Teneur en eau optimale</i>	9,6	288

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	9,6	1,91

<i>Poids humide (g)</i>	<b>842</b>
-------------------------	------------

**Stabilisation au ciment à 30 % de Sable SF (Série SM)****Mélange: SM 68-02-30****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SM</i>	68	2040
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	2	60
<i>Additif: sable fillérisé</i>	30	900
<i>Teneur en eau optimale</i>	10,5	315

**Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8**

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	10,5	1,83

<i>Poids humide (g)</i>	<b>813</b>
-------------------------	------------

**Mélange: SM 66-04-30****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SM</i>	66	1980
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	4	120
<i>Additif: sable fillérisé</i>	30	900
<i>Teneur en eau optimale</i>	10	300

**Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8**

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	10	1,87

<i>Poids humide (g)</i>	<b>827</b>
-------------------------	------------

**Mélange: SM 64-06-30****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SM</i>	64	1920
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	6	180
<i>Additif: sable fillérisé</i>	30	900
<i>Teneur en eau optimale</i>	9,8	294

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	9,8	1,88

<i>Poids humide (g)</i>	<b>830</b>
-------------------------	------------

Mélange: SM 62-08-30Composition pour 3000 g de mélange sec

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SM</i>	62	1860
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	8	240
<i>Additif: sable fillérisé</i>	30	900
<i>Teneur en eau optimale</i>	9,4	282

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	9,4	1,93

<i>Poids humide (g)</i>	<b>849</b>
-------------------------	------------

Mélange: SM 60-10-30Composition pour 3000 g de mélange sec

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SM</i>	60	1800
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	10	300
<i>Additif: sable fillérisé</i>	30	900
<i>Teneur en eau optimale</i>	9,3	279

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	9,3	1,95

<i>Poids humide (g)</i>	<b>857</b>
-------------------------	------------

**Stabilisation au ciment seul (Série SZ)****Mélange: SZ 98-02-00****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SZ</i>	<b>98</b>	<b>2940</b>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<b>2</b>	<b>60</b>
<i>Additif: sable fillérisé 0/3</i>	<b>0</b>	<b>0</b>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<b>15</b>	<b>450</b>

**Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8**

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	<b>15</b>	<b>1,71</b>

<i>Poids humide (g)</i>	<b>791</b>
-------------------------	------------

**Mélange: SZ 96-04-00****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SZ</i>	<b>96</b>	<b>2880</b>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<b>4</b>	<b>120</b>
<i>Additif: sable fillérisé 0/3</i>	<b>0</b>	<b>0</b>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<b>14,2</b>	<b>426</b>

**Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8**

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	<b>14,2</b>	<b>1,73</b>

<i>Poids humide (g)</i>	<b>794</b>
-------------------------	------------

**Mélange: SZ 94-06-00****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SZ</i>	<b>94</b>	<b>2820</b>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<b>6</b>	<b>180</b>
<i>Additif: sable fillérisé 0/3</i>	<b>0</b>	<b>0</b>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<b>13,6</b>	<b>408</b>

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	<b>13,6</b>	<b>1,76</b>

<i>Poids humide (g)</i>	<b>804</b>
-------------------------	------------

Mélange: SZ 92-08-00Composition pour 3000 g de mélange sec

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SZ</i>	<b>92</b>	<b>2760</b>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<b>8</b>	<b>240</b>
<i>Additif: sable fillérisé 0/3</i>	<b>0</b>	<b>0</b>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<b>11,9</b>	<b>357</b>

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	<b>11,9</b>	<b>1,79</b>

<i>Poids humide (g)</i>	<b>805</b>
-------------------------	------------

Mélange: SZ 90-10-00Composition pour 3000 g de mélange sec

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SZ</i>	<b>90</b>	<b>2700</b>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<b>10</b>	<b>300</b>
<i>Additif: sable fillérisé 0/3</i>	<b>0</b>	<b>0</b>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<b>11</b>	<b>330</b>

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	<b>11</b>	<b>1,82</b>

<i>Poids humide (g)</i>	<b>812</b>
-------------------------	------------

**Stabilisation au ciment à 10 % de Sable SF (Série SZ)****Mélange: SZ 88-02-10****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SZ</i>	<b>88</b>	<b>2640</b>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<b>2</b>	<b>60</b>
<i>Additif: sable fillérisé</i>	<b>10</b>	<b>300</b>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<b>12,3</b>	<b>369</b>

**Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8**

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	<b>12,3</b>	<b>1,73</b>

<i>Poids humide (g)</i>	<b>781</b>
-------------------------	------------

**Mélange: SZ 86-04-10****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SZ</i>	<b>86</b>	<b>2580</b>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<b>4</b>	<b>120</b>
<i>Additif: sable fillérisé</i>	<b>10</b>	<b>300</b>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<b>11,7</b>	<b>351</b>

**Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8**

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	<b>11,7</b>	<b>1,76</b>

<i>Poids humide (g)</i>	<b>790</b>
-------------------------	------------

**Mélange: SZ 84-06-10****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SZ</i>	<b>84</b>	<b>2520</b>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<b>6</b>	<b>180</b>
<i>Additif: sable fillérisé</i>	<b>10</b>	<b>300</b>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<b>11,6</b>	<b>348</b>

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	11,6	1,79

<i>Poids humide (g)</i>	<b>803</b>
-------------------------	------------

Mélange: SZ 82-08-10Composition pour 3000 g de mélange sec

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SZ</i>	82	2460
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	8	240
<i>Additif: sable fillérisé</i>	10	300
<i>Teneur en eau optimale</i>	11	330

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	11	1,82

<i>Poids humide (g)</i>	<b>812</b>
-------------------------	------------

Mélange: SZ 80-10-10Composition pour 3000 g de mélange sec

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SZ</i>	80	2400
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	10	300
<i>Additif: sable fillérisé</i>	10	300
<i>Teneur en eau optimale</i>	10,3	309

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	10,3	1,84

<i>Poids humide (g)</i>	<b>816</b>
-------------------------	------------

**Stabilisation au ciment à 20 % de Sable SF (Série SZ)****Mélange: SZ 78-02-20****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SZ</i>	<b>78</b>	<b>2340</b>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<b>2</b>	<b>60</b>
<i>Additif: sable fillérisé</i>	<b>20</b>	<b>600</b>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<b>11,8</b>	<b>354</b>

**Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8**

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	<b>11,8</b>	<b>1,78</b>

<i>Poids humide (g)</i>	<b>800</b>
-------------------------	------------

**Mélange: SZ 76-04-20****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SZ</i>	<b>76</b>	<b>2280</b>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<b>4</b>	<b>120</b>
<i>Additif: sable fillérisé</i>	<b>20</b>	<b>600</b>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<b>11,4</b>	<b>342</b>

**Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8**

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	<b>11,4</b>	<b>1,82</b>

<i>Poids humide (g)</i>	<b>815</b>
-------------------------	------------

**Mélange: SZ 74-06-20****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SZ</i>	<b>74</b>	<b>2220</b>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<b>6</b>	<b>180</b>
<i>Additif: sable fillérisé</i>	<b>20</b>	<b>600</b>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<b>10,4</b>	<b>312</b>

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	10,4	1,84

<i>Poids humide (g)</i>	<b>817</b>
-------------------------	------------

Mélange: SZ 72-08-20Composition pour 3000 g de mélange sec

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SZ</i>	72	2160
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	8	240
<i>Additif: sable fillérisé</i>	20	600
<i>Teneur en eau optimale</i>	10,1	303

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	10,1	1,86

<i>Poids humide (g)</i>	<b>823</b>
-------------------------	------------

Mélange: SZ 70-10-20Composition pour 3000 g de mélange sec

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SZ</i>	70	2100
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	10	300
<i>Additif: sable fillérisé</i>	20	600
<i>Teneur en eau optimale</i>	10	300

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	10	1,89

<i>Poids humide (g)</i>	<b>836</b>
-------------------------	------------

**Stabilisation au ciment à 30 % de Sable SF (Série SZ)****Mélange: SZ 68-02-30****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SZ</i>	<b>68</b>	<b>2040</b>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<b>2</b>	<b>60</b>
<i>Additif: sable fillérisé</i>	<b>30</b>	<b>900</b>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<b>10,2</b>	<b>306</b>

**Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8**

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	<b>10,2</b>	<b>1,83</b>

<i>Poids humide (g)</i>	<b>811</b>
-------------------------	------------

**Mélange: SZ 66-04-30****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SZ</i>	<b>66</b>	<b>1980</b>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<b>4</b>	<b>120</b>
<i>Additif: sable fillérisé</i>	<b>30</b>	<b>900</b>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<b>10</b>	<b>300</b>

**Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8**

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	<b>10</b>	<b>1,86</b>

<i>Poids humide (g)</i>	<b>822</b>
-------------------------	------------

**Mélange: SZ 64-06-30****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SZ</i>	<b>64</b>	<b>1920</b>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<b>6</b>	<b>180</b>
<i>Additif: sable fillérisé</i>	<b>30</b>	<b>900</b>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<b>10</b>	<b>300</b>

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	10	1,90

<i>Poids humide (g)</i>	<b>840</b>
-------------------------	------------

Mélange: SZ 62-08-30Composition pour 3000 g de mélange sec

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SZ</i>	62	1860
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	8	240
<i>Additif: sable fillérisé</i>	30	900
<i>Teneur en eau optimale</i>	9,8	294

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	9,8	1,92

<i>Poids humide (g)</i>	<b>847</b>
-------------------------	------------

Mélange: SZ 60-10-30Composition pour 3000 g de mélange sec

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SZ</i>	60	1800
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	10	300
<i>Additif: sable fillérisé</i>	30	900
<i>Teneur en eau optimale</i>	9,8	294

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	9,8	1,94

<i>Poids humide (g)</i>	<b>856</b>
-------------------------	------------

**Stabilisation au ciment seul (Série SA)****Mélange: SA 98-02-00****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SA</i>	98	2940
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	2	60
<i>Additif: sable fillérisé 0/3</i>	0	0
<i>Teneur en eau optimale</i>	16,3	489

**Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8**

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	16,3	1,67

<i>Poids humide (g)</i>	<b>781</b>
-------------------------	------------

**Mélange: SA 96-04-00****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SA</i>	96	2880
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	4	120
<i>Additif: sable fillérisé 0/3</i>	0	0
<i>Teneur en eau optimale</i>	15,3	459

**Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8**

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	15,3	1,69

<i>Poids humide (g)</i>	<b>783</b>
-------------------------	------------

**Mélange: SA 94-06-00****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SA</i>	94	2820
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	6	180
<i>Additif: sable fillérisé 0/3</i>	0	0
<i>Teneur en eau optimale</i>	14,9	447

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	14,9	1,72

<i>Poids humide (g)</i>	<b>794</b>
-------------------------	------------

Mélange: SA 92-08-00Composition pour 3000 g de mélange sec

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SA</i>	92	2760
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	8	240
<i>Additif: sable fillérisé 0/3</i>	0	0
<i>Teneur en eau optimale</i>	13,1	393

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	13,3	1,74

<i>Poids humide (g)</i>	<b>793</b>
-------------------------	------------

Mélange: SA 90-10-00Composition pour 3000 g de mélange sec

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SA</i>	90	2700
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	10	300
<i>Additif: sable fillérisé 0/3</i>	0	0
<i>Teneur en eau optimale</i>	12,3	369

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	12,3	1,76

<i>Poids humide (g)</i>	<b>795</b>
-------------------------	------------

**Stabilisation au ciment à 10 % de Sable SF (Série SA)****Mélange: SA 88-02-10****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SA</i>	<b>88</b>	<b>2640</b>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<b>2</b>	<b>60</b>
<i>Additif: sable fillérisé</i>	<b>10</b>	<b>300</b>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<b>13,6</b>	<b>408</b>

**Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8**

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	<b>13,6</b>	<b>1,70</b>

<i>Poids humide (g)</i>	<b>776</b>
-------------------------	------------

**Mélange: SA 86-04-10****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SA</i>	<b>86</b>	<b>2580</b>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<b>4</b>	<b>120</b>
<i>Additif: sable fillérisé</i>	<b>10</b>	<b>300</b>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<b>13,1</b>	<b>393</b>

**Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8**

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	<b>13,1</b>	<b>1,74</b>

<i>Poids humide (g)</i>	<b>791</b>
-------------------------	------------

**Mélange: SA 84-06-10****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SA</i>	<b>84</b>	<b>2520</b>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<b>6</b>	<b>180</b>
<i>Additif: sable fillérisé</i>	<b>10</b>	<b>300</b>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<b>12,8</b>	<b>384</b>

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	12,8	1,77

<i>Poids humide (g)</i>	<b>803</b>
-------------------------	------------

Mélange: SA 82-08-10Composition pour 3000 g de mélange sec

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SA</i>	82	2460
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	8	240
<i>Additif: sable fillérisé</i>	10	300
<i>Teneur en eau optimale</i>	12,2	366

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	12,2	1,80

<i>Poids humide (g)</i>	<b>812</b>
-------------------------	------------

Mélange: SA 80-10-10Composition pour 3000 g de mélange sec

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SA</i>	80	2400
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	10	300
<i>Additif: sable fillérisé</i>	10	300
<i>Teneur en eau optimale</i>	11	330

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	11	1,83

<i>Poids humide (g)</i>	<b>817</b>
-------------------------	------------

**Stabilisation au ciment à 20 % de Sable SF (Série SA)****Mélange: SA 78-02-20****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SA</i>	<b>78</b>	<b>2340</b>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<b>2</b>	<b>60</b>
<i>Additif: sable fillérisé</i>	<b>20</b>	<b>600</b>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<b>12,9</b>	<b>387</b>

**Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8**

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	<b>12,9</b>	<b>1,73</b>

<i>Poids humide (g)</i>	<b>785</b>
-------------------------	------------

**Mélange: SA 76-04-20****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SA</i>	<b>76</b>	<b>2280</b>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<b>4</b>	<b>120</b>
<i>Additif: sable fillérisé</i>	<b>20</b>	<b>600</b>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<b>12,3</b>	<b>369</b>

**Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8**

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	<b>12,3</b>	<b>1,77</b>

<i>Poids humide (g)</i>	<b>799</b>
-------------------------	------------

**Mélange: SA 74-06-20****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SA</i>	<b>74</b>	<b>2220</b>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<b>6</b>	<b>180</b>
<i>Additif: sable fillérisé</i>	<b>20</b>	<b>600</b>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<b>11,2</b>	<b>336</b>

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	11,2	1,80

<i>Poids humide (g)</i>	<b>805</b>
-------------------------	------------

Mélange: SA 72-08-20Composition pour 3000 g de mélange sec

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SA</i>	72	2160
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	8	240
<i>Additif: sable fillérisé</i>	20	600
<i>Teneur en eau optimale</i>	11	330

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	11	1,84

<i>Poids humide (g)</i>	<b>821</b>
-------------------------	------------

Mélange: SA 70-10-20Composition pour 3000 g de mélange sec

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SA</i>	70	2100
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	10	300
<i>Additif: sable fillérisé</i>	20	600
<i>Teneur en eau optimale</i>	10,8	324

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	10,8	1,87

<i>Poids humide (g)</i>	<b>833</b>
-------------------------	------------

**Stabilisation au ciment à 30 % de Sable SF (Série SA)****Mélange: SA 68-02-30****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SA</i>	<b>68</b>	<b>2040</b>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<b>2</b>	<b>60</b>
<i>Additif: sable fillérisé</i>	<b>30</b>	<b>900</b>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<b>11,6</b>	<b>348</b>

**Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8**

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	<b>11,6</b>	<b>1,77</b>

<i>Poids humide (g)</i>	<b>794</b>
-------------------------	------------

**Mélange: SA 66-04-30****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SA</i>	<b>66</b>	<b>1980</b>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<b>4</b>	<b>120</b>
<i>Additif: sable fillérisé</i>	<b>30</b>	<b>900</b>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<b>11,1</b>	<b>333</b>

**Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8**

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	<b>11,1</b>	<b>1,80</b>

<i>Poids humide (g)</i>	<b>804</b>
-------------------------	------------

**Mélange: SA 64-06-30****Composition pour 3000 g de mélange sec**

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SA</i>	<b>64</b>	<b>1920</b>
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	<b>6</b>	<b>180</b>
<i>Additif: sable fillérisé</i>	<b>30</b>	<b>900</b>
<i>Teneur en eau optimale</i>	<b>11</b>	<b>330</b>

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	11	1,84

<i>Poids humide (g)</i>	<b>821</b>
-------------------------	------------

Mélange: SA 62-08-30Composition pour 3000 g de mélange sec

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SA</i>	62	1860
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	8	240
<i>Additif: sable fillérisé</i>	30	900
<i>Teneur en eau optimale</i>	10,8	324

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	10,8	1,87

<i>Poids humide (g)</i>	<b>833</b>
-------------------------	------------

Mélange: SA 60-10-30Composition pour 3000 g de mélange sec

	<i>Pourcentage (%)</i>	<i>Masses (gr)</i>
<i>Sable: SA</i>	60	1800
<i>Ciment CPJ 42.5</i>	10	300
<i>Additif: sable fillérisé</i>	30	900
<i>Teneur en eau optimale</i>	10,5	315

Calcul du poids humide de mélange pour une éprouvette cylindrique 8/8

<b>OPN</b>	<i>Teneur en eau optimale (%)</i>	<i>Densité sèche max (g/cm<sup>3</sup>)</i>
	10,5	1,90

<i>Poids humide (g)</i>	<b>844</b>
-------------------------	------------

---

## ***Annexe II***

---

**Résultats: Résistance en compression à 28 jours**

<b>Sable</b>	<b>% Ciment</b>	<b>% SF</b>	<b>R<sub>c28</sub> (Mpa)</b>
SM	0	0	0,00
SM	0	0	0,00
SM	0	0	0,00
SM	0	10	0,00
SM	0	10	0,00
SM	0	10	0,00
SM	0	20	0,00
SM	0	20	0,00
SM	0	20	0,00
SM	0	30	0,00
SM	0	30	0,00
SM	0	30	0,00
SM	2	0	0,18
SM	2	0	0,19
SM	2	0	0,19
SM	2	10	0,28
SM	2	10	0,29
SM	2	10	0,28
SM	2	20	0,34
SM	2	20	0,33
SM	2	20	0,34
SM	2	30	0,54
SM	2	30	0,62
SM	2	30	0,61
SM	4	0	0,56
SM	4	0	0,56
SM	4	0	0,57
SM	4	10	1,04
SM	4	10	1,06
SM	4	10	0,97
SM	4	20	1,27
SM	4	20	1,32
SM	4	20	1,36
SM	4	30	1,98
SM	4	30	1,97
SM	4	30	1,90
SM	6	0	0,93
SM	6	0	0,96
SM	6	0	0,98
SM	6	10	1,64
SM	6	10	1,51
SM	6	10	1,57
SM	6	20	2,60
SM	6	20	2,55
SM	6	20	2,50
SM	6	30	3,41

SM	6	30	3,45
SM	6	30	3,41
SM	8	0	2,01
SM	8	0	1,94
SM	8	0	1,97
SM	8	10	3,06
SM	8	10	2,78
SM	8	10	2,93
SM	8	20	4,44
SM	8	20	4,10
SM	8	20	4,77
SM	8	30	5,76
SM	8	30	5,65
SM	8	30	5,31
SM	10	0	3,87
SM	10	0	4,12
SM	10	0	3,61
SM	10	10	5,57
SM	10	10	5,82
SM	10	10	5,39
SM	10	20	7,39
SM	10	20	7,69
SM	10	20	7,05
SM	10	30	8,62
SM	10	30	9,13
SM	10	30	8,84
SZ	0	0	0,00
SZ	0	0	0,00
SZ	0	0	0,00
SZ	0	10	0,00
SZ	0	10	0,00
SZ	0	10	0,00
SZ	0	20	0,00
SZ	0	20	0,00
SZ	0	20	0,00
SZ	0	30	0,00
SZ	0	30	0,00
SZ	0	30	0,00
SZ	0	30	0,00
SZ	2	0	0,15
SZ	2	0	0,18
SZ	2	0	0,16
SZ	2	10	0,26
SZ	2	10	0,24
SZ	2	10	0,24
SZ	2	20	0,32
SZ	2	20	0,33
SZ	2	20	0,34
SZ	2	30	0,52
SZ	2	30	0,52
SZ	2	30	0,52

SZ	4	0	0,43
SZ	4	0	0,44
SZ	4	0	0,43
SZ	4	10	0,65
SZ	4	10	0,67
SZ	4	10	0,65
SZ	4	20	0,91
SZ	4	20	0,82
SZ	4	20	0,78
SZ	4	30	1,14
SZ	4	30	1,25
SZ	4	30	1,19
SZ	6	0	0,90
SZ	6	0	0,91
SZ	6	0	0,94
SZ	6	10	1,25
SZ	6	10	1,23
SZ	6	10	1,23
SZ	6	20	1,60
SZ	6	20	1,68
SZ	6	20	1,64
SZ	6	30	2,14
SZ	6	30	2,07
SZ	6	30	2,11
SZ	8	0	1,98
SZ	8	0	2,01
SZ	8	0	1,96
SZ	8	10	2,48
SZ	8	10	2,33
SZ	8	10	2,59
SZ	8	20	2,65
SZ	8	20	3,15
SZ	8	20	2,63
SZ	8	30	3,91
SZ	8	30	3,80
SZ	8	30	3,84
SZ	10	0	3,69
SZ	10	0	3,75
SZ	10	0	3,91
SZ	10	10	4,85
SZ	10	10	4,83
SZ	10	10	4,96
SZ	10	20	5,63
SZ	10	20	5,80
SZ	10	20	5,76
SZ	10	30	6,49
SZ	10	30	6,58
SZ	10	30	6,54
SA	0	0	0,00
SA	0	0	0,00

SA	0	0	0,00
SA	0	10	0,00
SA	0	10	0,00
SA	0	10	0,00
SA	0	20	0,00
SA	0	20	0,00
SA	0	20	0,00
SA	0	30	0,00
SA	0	30	0,00
SA	0	30	0,00
SA	2	0	0,13
SA	2	0	0,15
SA	2	0	0,15
SA	2	10	0,17
SA	2	10	0,20
SA	2	10	0,17
SA	2	20	0,26
SA	2	20	0,28
SA	2	20	0,26
SA	2	30	0,45
SA	2	30	0,41
SA	2	30	0,41
SA	4	0	0,34
SA	4	0	0,37
SA	4	0	0,32
SA	4	10	0,54
SA	4	10	0,54
SA	4	10	0,54
SA	4	20	0,78
SA	4	20	0,71
SA	4	20	0,71
SA	4	30	1,04
SA	4	30	1,01
SA	4	30	1,01
SA	6	0	0,84
SA	6	0	0,82
SA	6	0	0,82
SA	6	10	1,06
SA	6	10	1,14
SA	6	10	1,12
SA	6	20	1,51
SA	6	20	1,51
SA	6	20	1,51
SA	6	30	2,01
SA	6	30	1,81
SA	6	30	2,05
SA	8	0	1,83
SA	8	0	1,79
SA	8	0	1,81
SA	8	10	2,52

SA	8	10	2,18
SA	8	10	2,37
SA	8	20	2,68
SA	8	20	2,83
SA	8	20	2,74
SA	8	30	3,15
SA	8	30	2,98
SA	8	30	3,09
SA	10	0	3,50
SA	10	0	3,45
SA	10	0	3,58
SA	10	10	4,73
SA	10	10	4,49
SA	10	10	4,64
SA	10	20	5,18
SA	10	20	5,14
SA	10	20	5,03
SA	10	30	5,70
SA	10	30	5,80
SA	10	30	5,63

**Résultats: Résistance en traction à 90 jours**

<b>Sable</b>	<b>% Ciment</b>	<b>% SF</b>	<b>R<sub>t90</sub> (Mpa)</b>
SM	0	0	0,000
SM	0	0	0,000
SM	0	0	0,000
SM	0	10	0,000
SM	0	10	0,000
SM	0	10	0,000
SM	0	20	0,000
SM	0	20	0,000
SM	0	20	0,000
SM	0	30	0,000
SM	0	30	0,000
SM	0	30	0,000
SM	2	0	0,021
SM	2	0	0,019
SM	2	0	0,023
SM	2	10	0,025
SM	2	10	0,025
SM	2	10	0,025
SM	2	20	0,035
SM	2	20	0,035
SM	2	20	0,035
SM	2	30	0,044
SM	2	30	0,049
SM	2	30	0,044
SM	4	0	0,053
SM	4	0	0,059
SM	4	0	0,053
SM	4	10	0,082
SM	4	10	0,073
SM	4	10	0,097
SM	4	20	0,121
SM	4	20	0,105
SM	4	20	0,115
SM	4	30	0,147
SM	4	30	0,158
SM	4	30	0,151
SM	6	0	0,097
SM	6	0	0,097
SM	6	0	0,096
SM	6	10	0,138
SM	6	10	0,138
SM	6	10	0,124
SM	6	20	0,204
SM	6	20	0,214
SM	6	20	0,229
SM	6	30	0,282

SM	6	30	0,293
SM	6	30	0,319
SM	8	0	0,232
SM	8	0	0,241
SM	8	0	0,253
SM	8	10	0,280
SM	8	10	0,269
SM	8	10	0,290
SM	8	20	0,392
SM	8	20	0,364
SM	8	20	0,326
SM	8	30	0,514
SM	8	30	0,482
SM	8	30	0,531
SM	10	0	0,443
SM	10	0	0,467
SM	10	0	0,433
SM	10	10	0,604
SM	10	10	0,618
SM	10	10	0,578
SM	10	20	0,680
SM	10	20	0,649
SM	10	20	0,730
SM	10	30	0,914
SM	10	30	1,035
SM	10	30	0,812
SZ	0	0	0,000
SZ	0	0	0,000
SZ	0	0	0,000
SZ	0	10	0,000
SZ	0	10	0,000
SZ	0	10	0,000
SZ	0	20	0,000
SZ	0	20	0,000
SZ	0	20	0,000
SZ	0	30	0,000
SZ	0	30	0,000
SZ	0	30	0,000
SZ	0	30	0,000
SZ	2	0	0,008
SZ	2	0	0,012
SZ	2	0	0,015
SZ	2	10	0,019
SZ	2	10	0,021
SZ	2	10	0,018
SZ	2	20	0,018
SZ	2	20	0,021
SZ	2	20	0,023
SZ	2	30	0,035
SZ	2	30	0,029
SZ	2	30	0,032

SZ	4	0	0,036
SZ	4	0	0,053
SZ	4	0	0,059
SZ	4	10	0,055
SZ	4	10	0,053
SZ	4	10	0,055
SZ	4	20	0,067
SZ	4	20	0,067
SZ	4	20	0,067
SZ	4	30	0,102
SZ	4	30	0,087
SZ	4	30	0,087
SZ	6	0	0,096
SZ	6	0	0,090
SZ	6	0	0,092
SZ	6	10	0,119
SZ	6	10	0,119
SZ	6	10	0,119
SZ	6	20	0,153
SZ	6	20	0,163
SZ	6	20	0,168
SZ	6	30	0,198
SZ	6	30	0,198
SZ	6	30	0,198
SZ	6	30	0,198
SZ	8	0	0,232
SZ	8	0	0,190
SZ	8	0	0,235
SZ	8	10	0,259
SZ	8	10	0,232
SZ	8	10	0,269
SZ	8	20	0,296
SZ	8	20	0,296
SZ	8	20	0,296
SZ	8	30	0,349
SZ	8	30	0,351
SZ	8	30	0,345
SZ	10	0	0,429
SZ	10	0	0,459
SZ	10	0	0,450
SZ	10	10	0,494
SZ	10	10	0,511
SZ	10	10	0,522
SZ	10	20	0,557
SZ	10	20	0,586
SZ	10	20	0,583
SZ	10	30	0,673
SZ	10	30	0,694
SZ	10	30	0,690
SA	0	0	0,000
SA	0	0	0,000

SA	0	0	0,000
SA	0	10	0,000
SA	0	10	0,000
SA	0	10	0,000
SA	0	20	0,000
SA	0	20	0,000
SA	0	20	0,000
SA	0	30	0,000
SA	0	30	0,000
SA	0	30	0,000
SA	2	0	0,015
SA	2	0	0,015
SA	2	0	0,012
SA	2	10	0,021
SA	2	10	0,021
SA	2	10	0,023
SA	2	20	0,026
SA	2	20	0,023
SA	2	20	0,029
SA	2	30	0,035
SA	2	30	0,037
SA	2	30	0,035
SA	4	0	0,032
SA	4	0	0,035
SA	4	0	0,032
SA	4	10	0,047
SA	4	10	0,049
SA	4	10	0,044
SA	4	20	0,061
SA	4	20	0,059
SA	4	20	0,059
SA	4	30	0,067
SA	4	30	0,069
SA	4	30	0,067
SA	6	0	0,069
SA	6	0	0,073
SA	6	0	0,073
SA	6	10	0,102
SA	6	10	0,102
SA	6	10	0,102
SA	6	20	0,145
SA	6	20	0,143
SA	6	20	0,143
SA	6	30	0,174
SA	6	30	0,180
SA	6	30	0,180
SA	8	0	0,190
SA	8	0	0,204
SA	8	0	0,174
SA	8	10	0,221

SA	8	10	0,218
SA	8	10	0,229
SA	8	20	0,261
SA	8	20	0,259
SA	8	20	0,259
SA	8	30	0,305
SA	8	30	0,308
SA	8	30	0,314
SA	10	0	0,380
SA	10	0	0,386
SA	10	0	0,400
SA	10	10	0,490
SA	10	10	0,484
SA	10	10	0,480
SA	10	20	0,563
SA	10	20	0,563
SA	10	20	0,572
SA	10	30	0,653
SA	10	30	0,659
SA	10	30	0,647

**Résultats: Tenue à l'immersion**

<b>Sable</b>	<b>% Ciment</b>	<b>% SF</b>	<b>Tenue à l'immersion</b>
SM	2	0	0,87
SM	2	0	0,84
SM	2	0	0,74
SM	2	10	0,77
SM	2	10	0,78
SM	2	10	0,73
SM	2	20	0,79
SM	2	20	0,77
SM	2	20	0,79
SM	2	30	0,88
SM	2	30	0,72
SM	2	30	0,77
SM	4	0	0,81
SM	4	0	0,81
SM	4	0	0,79
SM	4	10	0,73
SM	4	10	0,82
SM	4	10	0,91
SM	4	20	0,85
SM	4	20	0,82
SM	4	20	0,76
SM	4	30	0,86
SM	4	30	0,82
SM	4	30	0,86
SM	6	0	0,85
SM	6	0	0,83
SM	6	0	0,83
SM	6	10	0,79
SM	6	10	0,86
SM	6	10	0,84
SM	6	20	0,80
SM	6	20	0,85
SM	6	20	0,87
SM	6	30	0,87
SM	6	30	0,84
SM	6	30	0,82
SM	8	0	0,84
SM	8	0	0,86
SM	8	0	0,88
SM	8	10	0,86
SM	8	10	0,83
SM	8	10	0,85
SM	8	20	0,85
SM	8	20	0,91
SM	8	20	0,79

SM	8	30	0,84
SM	8	30	0,85
SM	8	30	0,89
SM	10	0	0,88
SM	10	0	0,78
SM	10	0	0,99
SM	10	10	0,89
SM	10	10	0,82
SM	10	10	0,95
SM	10	20	0,84
SM	10	20	0,86
SM	10	20	0,92
SM	10	30	0,95
SM	10	30	0,86
SM	10	30	0,86
SZ	2	0	0,86
SZ	2	0	0,71
SZ	2	0	0,80
SZ	2	10	0,83
SZ	2	10	0,91
SZ	2	10	0,91
SZ	2	20	0,87
SZ	2	20	0,84
SZ	2	20	0,82
SZ	2	30	0,83
SZ	2	30	0,88
SZ	2	30	0,83
SZ	4	0	0,85
SZ	4	0	0,83
SZ	4	0	0,85
SZ	4	10	0,87
SZ	4	10	0,87
SZ	4	10	0,87
SZ	4	20	0,83
SZ	4	20	0,84
SZ	4	20	0,95
SZ	4	30	0,90
SZ	4	30	0,84
SZ	4	30	0,85
SZ	6	0	0,84
SZ	6	0	0,93
SZ	6	0	0,90
SZ	6	10	0,90
SZ	6	10	0,88
SZ	6	10	0,89
SZ	6	20	0,92
SZ	6	20	0,86
SZ	6	20	0,89
SZ	6	30	0,88
SZ	6	30	0,91

SZ	6	30	0,89
SZ	8	0	0,90
SZ	8	0	0,91
SZ	8	0	0,91
SZ	8	10	0,88
SZ	8	10	1,05
SZ	8	10	0,83
SZ	8	20	0,96
SZ	8	20	0,79
SZ	8	20	0,99
SZ	8	30	0,94
SZ	8	30	0,88
SZ	8	30	0,90
SZ	10	0	0,93
SZ	10	0	0,95
SZ	10	0	0,86
SZ	10	10	0,91
SZ	10	10	0,93
SZ	10	10	0,87
SZ	10	20	0,92
SZ	10	20	0,88
SZ	10	20	0,91
SZ	10	30	0,93
SZ	10	30	0,91
SZ	10	30	0,91
SA	2	0	0,83
SA	2	0	0,71
SA	2	0	0,71
SA	2	10	0,87
SA	2	10	0,66
SA	2	10	1,00
SA	2	20	0,92
SA	2	20	0,77
SA	2	20	0,92
SA	2	30	0,81
SA	2	30	0,84
SA	2	30	0,89
SA	4	0	0,82
SA	4	0	0,83
SA	4	0	0,93
SA	4	10	0,88
SA	4	10	0,84
SA	4	10	0,84
SA	4	20	0,83
SA	4	20	0,88
SA	4	20	0,85
SA	4	30	0,83
SA	4	30	0,89
SA	4	30	0,89
SA	6	0	0,87

SA	6	0	0,92
SA	6	0	0,92
SA	6	10	0,92
SA	6	10	0,87
SA	6	10	0,90
SA	6	20	0,89
SA	6	20	0,87
SA	6	20	0,90
SA	6	30	0,86
SA	6	30	0,96
SA	6	30	0,85
SA	8	0	0,88
SA	8	0	0,92
SA	8	0	0,89
SA	8	10	0,85
SA	8	10	0,97
SA	8	10	0,89
SA	8	20	0,93
SA	8	20	0,87
SA	8	20	0,90
SA	8	30	0,88
SA	8	30	0,94
SA	8	30	0,88
SA	10	0	0,90
SA	10	0	0,90
SA	10	0	0,91
SA	10	10	0,88
SA	10	10	0,91
SA	10	10	0,93
SA	10	20	0,90
SA	10	20	0,90
SA	10	20	0,95
SA	10	30	0,91
SA	10	30	0,89
SA	10	30	0,94

---

## ***Annexe III***

---

## Modules d'élasticités des mélanges sélectionnés "norme NF EN 13286-43"

Mélange <b>SM</b>	Force de rupture ( $F_r$ ) en (KN)			(Fr) moy en (KN)	0,3 Fr en DIV	Déplacement à 30 % de $F_r$ ( $\epsilon_3$ ) DIV			Déformation à 30% de Fr (‰)	Module d'élasticité ( $E_{t28}$ ) en MPa
	SM 62-08-30	28,94	28,4	26,67	28,00	271	12	15	-6	0,28
SM 80-10-10	27,96	29,24	27,1	28,10	272	10	5	6	0,28	5993
SM 70-10-20	31,37	33,29	32,65	32,44	314	12	8	1	0,28	6918
SM 60-10-30	43,32	45,88	44,39	44,53	123	6	7	8	0,28	9497

Mélange <b>SZ</b>	Force de rupture ( $F_r$ ) en (KN)			(Fr) moy en (KN)	0,3 Fr en DIV	Déplacement à 30 % de $F_r$ ( $\epsilon_3$ ) DIV			Déformation à 30% de Fr (‰)	Module d'élasticité ( $E_t$ ) en MPa
	SZ 80-10-10	24,39	24,28	24,93	24,53	237	0	9	12	0,28
SZ 70-10-20	28,29	29,16	28,94	28,80	279	2	14	6	0,29	5862
SZ 60-10-30	32,63	33,06	32,85	32,85	318	4	10	8	0,29	6687

Mélange <b>SA</b>	Force de rupture ( $F_r$ ) en (KN)			(Fr) moy en (KN)	0,3 Fr en DIV	Déplacement à 30 % de $F_r$ ( $\epsilon_3$ ) DIV			Déformation à 30% de Fr (‰)	Module d'élasticité ( $E_t$ ) en MPa
	SA 70-10-20	26,02	25,8	25,26	25,69	249	9	10	2	0,28
SA 60-10-30	28,62	29,16	28,29	28,69	278	4	7	10	0,28	6118