

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



جامعة سعد دحلب – البلدية 1 -
Université Saad Dahleb Blida 1

كلية التكنولوجيا
Faculté De Technologie

قسم الهندسة المدنية
Département de Génie Civil

مذكرة نهاية التخرج

MEMOIRE DE PROJET DE FIN D'ETUDE

Pour l'obtention du diplôme Master en Génie Civil

Option : Géotechnique

THÈME

FORMULATION D'UN MATERIAU ROUTIER A BASE DE DECHET
DE CERAMIQUE, SABLE DE DUNE TRAITE AU LAITIER DE HAUT
FOURNEAU.

Etudié et réaliser par

BADRI Roufaida

Devant le jury composé de :

Mme. BENTLEMSAN. N	U. Saad Dahleb-Blida	Présidente
Dr. ABED. Y	U. Saad Dahleb-Blida	Examineur
Dr. CHERFA. H	U. Houari boumediene	Promotrice
Dr. SI AHMED. M	U. Saad Dahleb-Blida	Co-Promoteur
Mme. DEBICHE	U. Houari boumediene	Invité

Blida, Juillet 2023.

Remercîment

En achevant ce modeste travail je remercie Dieu qui m'a donné le courage et la patience de faire ce travail.

*Je tiens à remercier infiniment ma promotrice madame **CHERFA .H** pour tous les conseils et les idées qu'elle m'a donnés, ainsi que pour son soutien moral et technique.*

*Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon Co-promoteur monsieur **SI AHMED.M** de m'avoir accompagné avec son savoir tout le long de ce travail*

Je tiens à exprimer mes sincère remerciement aux membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être membres du jury et de bien vouloir examiner ce travail.

*Je ne remercierais jamais assez madame **DEBICHE** da m'avoir accompagné tout le long de mon cursus universitaire avec ces encouragements et ça motivation*

*Je tiens a exprimé mes profonds remerciements à madame **AOUILI-BERBAR.J** de m'avoir soutenue et motivé l'année passée*

*J'exprime également mes sincères reconnaissances à **MAIZA HAMZA** chef de service sols et matériaux*

*Ainsi **BELABED RAMDAN** directeur du laboratoire **CTTP** et **ZAATOUCHE MOUNIR** chef de service produit noir*

*Enfin, que les membres du laboratoire **CTTP** de **KOUBA** trouvent ici toute ma gratitude pour leur soutien ainsi qu'à toute personne qui à contribuer de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.*

Dédicace

Au nom de Dieu le clément et le miséricordieux, je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents

A ma chère mère que dieu te protège et te garde pour moi en bonne santé, en témoignage de ma gratitude pour tes sacrifices et le soutien que tu m'apporté tout le long de mes études, tu étais la seule à croire en mes capacité.

A mon chère frère badri othmane

A mon cher oncle qui m'a accompagné et soutenu pour que je puisse atteindre mon objectif

A mes chères tantes et ma chère grande mère

Je dédie ce travail à toute ma grande famille

A toutes mes chères amies

Résumé

Le principal problème de la réalisation des routes est celui de l'approvisionnement en matériaux. Nous avons donc eu recours à l'utilisation de matériaux locaux tout en cherchant à améliorer leur comportement mécanique pour les mettre aux normes requises. L'objectif visé est un objectif environnemental et économique.

Le but du travail présenté dans ce mémoire est la valorisation du sable de dune, qui est abondant dans la commune de Bou Saada la wilaya de M'sila (Algérie). Cette étude a pour objectif aussi de valoriser les déchets de céramiques et le laitier de haut fourneau qui sont des déchets industriels dans la construction des routes.

Dans notre travail de recherche on a proposé 4 mélanges de base dans lequel on a déterminé, la teneur en eau optimale (Proctor modifié), l'indice CBR immédiat et à l'immersion pour que l'un des mélanges de base va être traité avec le laitier et la chaux, pour enfin procéder à un exemple de renforcement du tronçon CW204 à sidi khouiled la wilaya de Ouargla.

Mots clés : Sable de dune, déchets industriels, géotechnique routière, Proctor modifié, renforcement

Abstract

The main problem of road construction is the supply of materials. We therefore used local materials while seeking to improve their mechanical behavior to bring them to the required standards. The objective is an environmental and economic objective.

The purpose of the work presented in this thesis is the valorization of dune sand, which is abundant in the commune of Bousaada la wilaya de M'sila (Algeria). This study also aims to recover industrial waste such as ceramic waste and blast furnace slag in road construction.

In our research work We proposed 4 basic mixtures in which we determined, the optimal water content (modified Proctor), the shear strength, the immediate CBR index and immersion so that after one of the basic mixtures will be treated with slag and lime, to finally proceed to an example of reinforcement of the section CW204 to sidi khouiled the wilaya of Ouargla.

Keys words: dune sand, industrials wastes, road geotechnics, modified Proctor, strengthening.

ملخص

المشكلة الرئيسية في بناء الطرق هي توفير المواد. لذلك استخدمنا المواد المحلية أثناء سعيها لتحسين سلوكهم الميكانيكي لجعلها تفي بالمعايير المطلوبة. الهدف هو هدف بيئي واقتصادي.

والغرض من العمل الوارد في هذه الرسالة هو تبيين رمال الكثبان الرملية التي تتوافر بكثرة في بلدية بوسعادة لولاية المسيلة (الجزائر). تهدف هذه الدراسة أيضًا إلى استعادة النفايات الصناعية مثل نفايات السيراميك وخبث فرن الانفجار في بناء الطرق.

في عملنا البحثي اقترحنا 4 خلانط أساسية حددنا فيها، المحتوى الأمثل لنسبة لمياه (البروكتور المعدل، ومؤشر CBR الفوري، والغمر بحيث يتم بعد أحد الخلانط الأساسية معالجة الخبث والجير، والانتقال أخيرًا إلى مثال على تعزيز شطر من طريق CW204 سيدي خويل ولاية ورقلة.

الكلمات المفتاحية: رمال الكثبان الرملية، النفايات الصناعية، جيوتقنية الطرق، البروكتور المعدل، تعزيز.

Sommaire

Remercîment

Résumé

Abstract

ملخص

Liste Des Figures

Liste Des Tableaux

INTRODUCTION GENERALE..... 1

CHAPITRE I : APPLICATION DES DECHETS DE CERAMIQUES POUR LA REHABILITATION DES STRUCTURE ROUTIERE

I-1-Introduction..... 4

I-2-Les chaussées..... 4

I-2-1- Types de structure de chaussée..... 5

I-2-1-1- Chaussées souples..... 5

I-2-1-2-Chaussées bitumineuses épaisses..... 6

I-2-1-3- Chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques..... 7

I-2-1-4-Chaussées à structure mixte..... 8

I-2-1-5-Chaussées à structures inverses..... 9

I-2-1-6- Chaussées en béton de ciment (les chaussées rigides)..... 9

I-3- Dégradations des chaussées..... 9

I-3-1-Définition..... 9

I-3-1-1-Description et classification des principales dégradations..... 10

I-3-1-2-Choix des solutions de réhabilitation..... 13

I-4-Dechets de céramiques..... 15

I-4-1-Définition..... 15

I-4-2- Caractéristiques physiques..... 15

I-4-3-Caractéristiques chimiques..... 15

I-5-Tronçons réalisés avec les déchets de céramiques..... 16

I-6- Conclusion..... 17

CHAPITRE II : SABLE DE DUNES ET LE LAITIER DE HAUT FOURNEAU EN TECHNIQUE ROUTIERE

Partie 01 : Sable de dune..... 19

II-1-Introduction..... 19

II-1-1-Définition du sable de dunes	19
II-1-2-Mécanisme de formation des dunes.....	19
II-1-3-Intérêt de sable de dune	20
II-1-4-Utilisation des sables de dunes	20
II-2-Identification des sables de dunes	25
II-2-1- Composition chimique.....	25
II-2-2-Analyse granulométrique.....	25
II-2-3-Analyses minéralogiques	26
II-2-4-Comportement mécanique	26
II-3-Conclusion	28
Partie 02 : Laitiers de haut fourneau.....	29
II-1-Introduction	29
II-2-Historique du laitier de haut fourneau	30
II-2-1-Présentation d'un haut fourneau	31
II-3-Fabrications et traitements des différentes formes de laitiers.....	32
II-3-1-laitier cristallisé.....	32
II-3-2-laitier vitrifié	32
II-4-Utilisation des laitiers de haut fourneau	34
II-4-1-En cimenteries	34
II-4-2-Confection des bétons.....	34
II-4-3-Les travaux routiers	35
II-5-Les propriétés chimiques physiques et minéralogiques du laitier	35
II-5-1-analyses chimiques élémentaires	35
II-5-2- Caractéristiques minéralogiques.....	36
II-5-2-1-Laitier cristallisé	37
II-5-2-2 Laitier vitrifié	37
II-6- Conclusion	38
CHAPITRE III : ETAT DE L'ART SUR LA VALORISATION DES SABLES SE	
DUNE ET LES DECHETS INDUSTRIELS	
III-1-Introduction	40
III-2-Domaine routier.....	40
III-2-1-Sable de dunes	40
III-2-2-Sable de dunes et laitier de haut fourneau.....	45
III-2-3-Déchets de céramiques	47

III-3-Domaine du béton	56
III-3-1-Sable de dunes	56
III-3-2-Déchets de céramiques	58

CHAPITRE IV : CARACTERISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES DES MATERIAUX D'ETUDE

IV-1-Introduction	Erreur ! Signet non défini.
IV-2-Provenance des matériaux utilisés	Erreur ! Signet non défini.
IV-3-Identification des matériaux utilisés	Erreur ! Signet non défini.
IV-3-1-Mesure de la propreté des matériaux	Erreur ! Signet non défini.
IV-3-2-Analyse granulométrique	Erreur ! Signet non défini.
IV-3-3-Equivalent de sable	Erreur ! Signet non défini.
IV-3-4-Détermination des masses volumiques (NFP 18— 554)	Erreur ! Signet non défini.
IV-3-4-1-Calcul de la masse volumique en vrac	Erreur ! Signet non défini.
IV-3-4-2-Calcul de la masse volumique réelle (absolue)	Erreur ! Signet non défini.
IV-3-5-Essai au bleu de méthylène	Erreur ! Signet non défini.
IV-3-6-Diffractogramme du sable de dune	Erreur ! Signet non défini.
IV-3-7-Les analyses chimiques sommaires des déchets de céramiques	Erreur ! Signet non défini.
IV-3-8-Essai Proctor modifié	Erreur ! Signet non défini.
IV-3-8-1-Introduction	Erreur ! Signet non défini.
IV-3-8-2-But de l'essai Proctor	Erreur ! Signet non défini.
IV-3-8-3-Principe de l'essai Proctor	Erreur ! Signet non défini.
IV-3-8-4-Les variantes de l'essai Proctor	Erreur ! Signet non défini.
IV-3-8-5-Appareillage	Erreur ! Signet non défini.
IV-3-9-Essai C.B.R (California -Bearing - Ratio) (norme NF P 94-07)	Erreur ! Signet non défini.
IV-4-Conclusion	Erreur ! Signet non défini.

CHAPITRE V : FORMULATION EXPERIMENTALE DES MELANGES : SABLE DE DUNE DECHETS DE CERAMIQUES -SABLE DE DUNE –DECHETS DE CERAMIQUES-LAITIER, ET L'ETUDE DES DIFFERENTS MELANGES VIS-A-VIS DES ESSAIS MECANIQUES

V-1-Introduction	Erreur ! Signet non défini.
V-2-Méthodologie de formulation du mélange	Erreur ! Signet non défini.

V-3-Détermination des caractéristiques mécaniques du mélange de base**Erreur ! Signet non défini.**

V-4-Détermination de l'indice portant immédiat (IPI) du mélange de base ..**Erreur ! Signet non défini.**

V-5-Détermination des caractéristiques mécaniques du mélange final.. **Erreur ! Signet non défini.**

V-5-1- Proctor modifié du mélange final**Erreur ! Signet non défini.**

V-5-2-Détermination de l'indice portant immédiat (IPI) du mélange final **Erreur ! Signet non défini.**

V-5-3-Détermination de l'indice portant après immersion (IPI) du mélange final **Erreur ! Signet non défini.**

V-6-Conclusion.....**Erreur ! Signet non défini.**

CHAPITRE VI : DIMENSIONNEMENT D'UN CORPS DE CHAUSSEE ROUTIER

AVEC LES RESULTATS DE LA COMPAGNE EXPERIMENTALE

VI-1-Introduction.....**Erreur ! Signet non défini.**

VI-2- Objectif de l'étude.....**Erreur ! Signet non défini.**

VI-3- Présentation du projet.....**Erreur ! Signet non défini.**

VI-4- Auscultation et analyse des données de la chaussée**Erreur ! Signet non défini.**

VI-4-1- Relève visuel de dégradations de la chaussée**Erreur ! Signet non défini.**

VI-4-2- Analyse des données des déflexions**Erreur ! Signet non défini.**

VI-4-3-Calcul de Trafic.....**Erreur ! Signet non défini.**

VI-4-4- Investigations géotechniques**Erreur ! Signet non défini.**

VI-5- Diagnostic et modélisation.....**Erreur ! Signet non défini.**

VI-6- Modélisation de corps de chaussée par le logiciel ALIZE.**Erreur ! Signet non défini.**

VI-6-1 Présentation du logiciel**Erreur ! Signet non défini.**

VI-7-Conception**Erreur ! Signet non défini.**

VI-8- Solution proposé**Erreur ! Signet non défini.**

VI-9-Conclusion**Erreur ! Signet non défini.**

CONCLUSION GENERALE 64

Références bibliographiques 66

Liste Des Figures

Figure I.1: Structure de chaussée.	5
Figure I. 2: Chaussée bitumineuse épaisse.....	7
Figure I. 3: Chaussées à assise traités au liant hydraulique (chaussé semi-rigide).	7
Figure I. 4: Chaussées à structure mixte.	8
Figure I. 5: Chaussées à structure inverse.	9
Figure I. 6: Différents dégradations visant chaque couche.	10
Figure I. 7: Dégradation de chaussée type déformation.....	11
Figure I. 8: Dégradation de type arrachement.....	12
Figure I. 9: Dégradation de type remonté des matériaux.	12
Figure I. 10: Diffractogramme de la céramique	16
Figure I. 11: Diffractogramme de la céramique	16
Figure II. 1: Mécanisme des dunes.	20
Figure II. 2: courbe granulométrique du sable de dune n Tunisie et mauritanien.	26
Figure II. 3: DRX de sable de dune.	26
Figure II. 4: Les principales formes de laitier.....	29
Figure II. 5: Coupe schématique d'un haut fourneau.....	31
Figure II. 6: Procès de fabrication du laitier.	32
Figure II. 7: Composition chimique de deux types de laitier.....	33
Figure II. 8: Les types de laitiers.....	34
Figure II. 9: Diagramme de Keil.....	36
Figure II. 10: Diffractogramme des rayons X d'un laitier vitrifié.....	38

Figure III. 1: Courbe Proctor modifié (90% Tuf+10% sable de dune).....	41
Figure III. 2: Courbe Proctor modifié (80% Tuf+20% sable de dune).....	41
Figure III. 3: Courbe Proctor modifié (70% Tuf+30% sable de dune).....	41
Figure III. 4: Courbe Proctor modifié (60% Tuf+40% sable de dune).....	42
Figure III. 5: Variation de la densité sèche en fonction du pourcentage de sable de dunes. ..	43
Figure III. 6: Variation de la force du piston en fonction de son enfoncement (mélanges avec 10% et 20% du sable de dunes).	43
Figure III. 7: Variation de la force du piston en fonction de son enfoncement (mélanges avec 30% et 40% du sable de dunes)	44
Figure III. 8: Courbe de Variation de l'indice de portance du I CBR en fonction des différents pourcentages de sable de dunes.....	44
Figure III. 9: Les courbes granulométriques des constituants du SL.....	46
Figure III. 10: Évolution de l'indice portant immédiat en fonction de dosage en laitier.....	46
Figure III. 11: La force en fonction de déplacement (CBR 100% sol).....	48
Figure III. 12: La force en fonction de déplacement (CBR sol + 10% déchet de céramique).	48
Figure III. 13: La force en fonction de déplacement (CBR sol+ 4% ciment).....	48
Figure III. 14: La force en fonction de déplacement (sol + 4% ciment +5% déchets de céramique).	49
Figure III. 15: La force en fonction de déplacement (sol +2% ciment +5% et 10% déchets de céramique).	49
Figure III. 16: L'effet de (5% du déchet de céramique + 4% ciment) en fonction du temps on CBR.	49
Figure III. 17: L'effet de 10% du déchet de céramique + 4% ciment) on CBR en fonction du temps.....	50
Figure III. 18: Résultat essai CBR (différents pourcentages du déchet de céramique et Ciment).	50
Figure III. 19: Résultat essai CBR (différents pourcentages du déchet de céramique et ciment).	50
Figure III. 20: La courbe CBR 100% sol.....	52
Figure III. 21: La courbe CBR 10% de déchets de céramiques.....	52
Figure III. 22: La courbe CBR 4% de ciment.....	52
Figure III. 23: Résultat essai CBR (sol + déchets de céramiques).	53
Figure III. 24: Résultat essai CBR (sol + marbre).	53

Figure III. 25: Résultat essai CBR (sol + 3% de ciment).	54
Figure III. 26: Résultat essai CBR (sol +4% de ciment).	54
Figure III. 27: Tassement du sol traité à 4% du ciment.	55
Figure III. 28: Diamètre d'étalement en fonction de E/C et du % en superplastifiant.	57
Figure III. 29: Taux de remplissage fonction de E/C et du % du superplastifiant.....	57
Figure III. 30: Indice de ségrégation en fonction de E/C et du % du superplastifiant.....	57
Figure III. 31: Evolution de la résistance à la compression en fonction du dosage en superplastifiant.....	58
Figure III. 32: Résistance à la traction en fonction du dosage en superplastifiant.	58
Figure III. 33: Comparaison de l'ouvrabilité des mélanges de BT et BC.	59
Figure III. 34: Variation de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution.....	60
Figure III. 35: Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction du taux de substitution.....	60
Figure III. 36: Résistance en compression obtenue par sclérométrie.	61
Figure III. 37: Résistance en compression obtenue par ultrason.	61
Figure III. 38: Résistance en compression calculée par la méthode combinée.	61
Figure III. 39: Variation de l'absorption par immersion en fonction du taux de substitution.	62
Figure III. 40: Variation de l'absorption par capillarité en fonction de la racine carrée du temps.....	62
Figure III. 41: Variation de la profondeur de pénétration des chlorures en fonction du taux de substitution.....	63
Figure IV. 1: sable de dunes 0/2.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure IV. 2: déchets de céramiques 0/6,3.	Erreur ! Signet non défini.
Figure IV. 3: laitier granulé 0/5.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure IV. 4: Tamiseuse automatique.	Erreur ! Signet non défini.
Figure IV. 5: Courbe granulométrique du sable de dune 0/2.	Erreur ! Signet non défini.
Figure IV. 6: Courbe granulométrique de déchets de céramiques.	Erreur ! Signet non défini.
Figure IV. 7: Courbe granulométrique du laitier.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure IV. 8: Essais de l'équivalent de sable.	Erreur ! Signet non défini.
Figure IV. 9: Appareillage de l'essai au bleu de méthylène.	Erreur ! Signet non défini.

Figure IV. 10: Diagramme de diffraction des rayons X du sable de dune. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV. 11: Diagramme de diffraction des rayons X du sable de dune. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV. 12: Distribution des coups pour le Proctor normal et modifié. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV. 13: La courbe Proctor type. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V. 1: Courbe mélange 80%SD+20%DC. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V. 2: Courbe mélange 70%SD+30%DC. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V. 3: Courbe mélange 60%SD+40%DC. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V. 4: Courbe mélange 40%SD+60%DC. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V. 5: Courbe Proctor du mélange 80%SD+20%DC. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V. 6: Courbe Proctor du mélange 80%SD+20%DC. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V. 7: Courbe Proctor du mélange 40%DC+60%SD. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V. 8: Courbe Proctor du mélange 60%DC+40%SD. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V. 9: IPI du sable de dune. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V. 10: IPI 80%SD+20%DC. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V. 11: Matériaux avant le malaxage. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V. 12: IPI 70%SD+30%DC. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V. 13: IPI 60%SD+40%DC. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V. 14: Mélange des matériaux après malaxage. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V. 15: IPI 40%SD+60%DC. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V. 16: Echantillon après le poinçonnement. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V. 17: Courbe Proctor du mélange. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V. 18: Courbe du mélange finale. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V. 19: Courbe IPI du mélange final **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V. 20: Echantillon immergé. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V. 21: La courbe CBR immergé du mélange final. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure VI. 1: Situation géographique du projet du CW 204 Du PK 07+000 au PK 21+350.
..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure VI. 2: Sondage 1 PK 09+500. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure VI. 3: Sondage 2 PK 14+300. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure VI. 4: Sondages 3 PK 15+000.	Erreur ! Signet non défini.
Figure VI. 5: Sondage 4 PK 19+200.	Erreur ! Signet non défini.
Figure VI. 6: Zone homogènes sur le tronçon à renforcer.	Erreur ! Signet non défini.
Figure VI. 7: Modèle multicouche de Burmister.	Erreur ! Signet non défini.
Figure VI. 8: Modélisation de la structure de renforcement de la structure retenue....	Erreur ! Signet non défini.

Liste Des Tableaux

Tableau I. 1 : classe du trafic	6
Tableau I. 2: Actions proposées en fonction de l'état de dégradation	14
Tableau I. 3: Les composants chimiques de quatre différents types de céramique	16
Tableau II. 1: Les composants chimiques du sable de dune de Ben Dhia.	25
Tableau II. 2: Quelques propriétés de deux types de sable de dune de Biskra.	27
Tableau II. 3: Les caractéristiques physico-chimiques des sables de dune de l'Algérie.	28
Tableau II. 4: Composition chimique élémentaire du laitier de haut fourneau.	35
Tableau II. 5: Composition chimique moyenne du laitier de haut fourneau (Michard et Javelle 1988).	35
Tableau II. 6: Classification des laitiers selon le produit CA.	36
Tableau II. 7: Constituants des laitiers cristallisés.	37
Tableau III. 1: Caractéristiques de compactage et de portance	42
Tableau III. 2: Influence de l'ajout de sable de dunes sur la densité sèche γ_{dmax} et la teneur en eau W_{opt}	42
Tableau III. 3: Influence du Pourcentage de sable de dunes sur les propriétés physico-mécaniques	45
Tableau III. 4: Les valeurs de la résistance à la traction à un an.	47
Tableau III. 5: Synthèse des résultats d'essais Proctor.	51

Tableau III. 6: Résultat essai CBR (différent pourcentage du déchet de céramique et déchet marbre).....	53
Tableau III. 7: Résultat essai de tassement (sol + 4 % liant hydraulique).....	54
Tableau III. 8: Composition de BAP préparés.	56
Tableau IV. 1: Les normes des essais d'identification.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau IV. 2: Les provenances des matériaux d'études.	Erreur ! Signet non défini.
Tableau IV. 3: Les coefficients de courbure et d'uniformité des matériaux.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau IV. 4: Résultats d'équivalent de sable.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau IV. 5: Les densités volumiques des matériaux.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau IV. 6: Les valeurs du bleu de méthylène.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau IV. 7: Analyses chimiques sommaires des déchets de céramiques.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau IV. 8: Modalités d'exécution des essais proctor normal et modifié....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau IV. 9: Classification des matériaux.	Erreur ! Signet non défini.
Tableau V. 1: Coefficients de courbures et d'uniformités tirés des courbes mélanges.	Erreur ! Signet non défini.
Tableau V. 2: Les caractéristiques Proctor de chaque courbe.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau V. 3: les résultats numériques de l'IPI.	Erreur ! Signet non défini.
Tableau VI. 1: Déflexion caractéristique par zone homogène.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau VI. 2: TCEi par poste.	Erreur ! Signet non défini.
Tableau VI. 3: Classification GTR.	Erreur ! Signet non défini.
Tableau VI. 4: Les caractéristiques mécaniques du matériau proposé.	Erreur ! Signet non défini.

INTRODUCTION GENERALE

La route est devenue aujourd'hui une nécessité et un facteur important du développement économique et social des nations. Actuellement, elle occupe une des grandes priorités pour laquelle on réserve une grande part du budget de l'état. L'Algérie connaît la réalisation de nombreux projets routiers grandioses tels que le projet de l'autoroute Est - Ouest d'un linéaire de **1.216 Km** et qui s'intègre dans le grand projet régional de l'autoroute maghrébine. Ces projets, qui se font avec la technique des chaussées souples, nécessitent de grandes quantités de matériaux nobles tels que les granulats et sables concassés de carrières et qui malheureusement se font de plus en plus rares.

La solution apportée par la chaussée semi-rigide, permet, selon les propriétés mécaniques des matériaux traités et pour un trafic donné, de réduire la quantité des matériaux bitumineux utilisés par comparaison avec une chaussée totalement souple, avec des économies variables selon les situations du marché concerné. En fait, durant les dernières années, les administrations de certains pays ont émis des décrets limitant l'utilisation du bitume dans les couches de chaussée afin d'économiser les produits pétroliers importés, ce qui a joué en faveur de l'utilisation des couches traitées aux liants hydrauliques.

De nombreux chercheurs, dans des thématiques scientifiques diverses, cherchent à exploiter le sable naturel (sable de dune), généralement de granulométrie 0/2 propre et présent à l'abondance. Son utilisation pourrait être liée à sa très forte teneur en silice, matériau à la base d'applications dans l'électronique et l'optique par exemple. En génie civil, ce sable présente aussi un grand intérêt économique et environnemental pour l'Algérie. En effet, la hausse de la demande du sable de construction en Algérie, l'incapacité des carrières algériennes à fournir du sable fin. Actuellement, de grands efforts sont consentis afin de valoriser le sable de dune.

Les carreaux de céramique ont été produits à un rythme accru dans le monde entier aujourd'hui, en particulier en Turquie en tant que premier producteur en Europe et en Chine en tant que leader mondial. En raison du grand nombre de déchets de carreaux céramiques produits dans le secteur du logement, les stocks de déchets de carreaux céramiques constituent des risques environnementaux. Par conséquent, la présente étude vise à évaluer la performance des déchets de carreaux de céramique avec de sable de dune à utiliser comme matériau routier.

Le laitier de haut fourneau est un sous – produit de la fabrication de la fonte. Il est considéré comme un déchet industriel qui se présente sous deux formes cristallisée et vitrifiée (granulé), et qui peut être valorisé en l'utilisant dans la technique routière par le biais de sables traités aux liants hydrauliques et spécialement les sables laitiers.

Le laitier de haut fourneau est un sous – produit de la fabrication de la fonte. Il est considéré comme un déchet industriel qui se présente sous deux formes cristallisée et vitrifiée (granulé), et qui peut être valorisé en l'utilisant dans la technique routière par le biais de sables traités aux liants hydrauliques et spécialement les sables laitiers.

En Algérie la production moyenne annuelle du laitier de haut fourneau est estimée à 500.000 tonnes. Le laitier ne possède par lui-même aucune vertu liante, mais en présence d'eau et d'un activant hydraulique tel que la chaux, il réagit chimiquement pour former des composés possédant des valeurs liantes.

C'est dans ce cadre que s'inscrit notre travail de recherche qui est subdivisés en deux grandes parties

La partie étude bibliographique qui englobe trois chapitres :

- Le premier chapitre comprenne application des déchets de céramiques dans la réhabilitation de la structure routière.
- Le deuxième chapitre est sur l'état de reconnaissance des sables de dunes et des laitiers de haut fourneau en technique routière.
- Le troisième chapitre état de l'art ou on va présenter les gens et leurs travaux d'études et de recherches sur les sables de dune et les déchets de céramique en génie civil.

La deuxième partie qui comprenne l'étude expérimentale

- Premier chapitre qui consiste à déterminer la caractérisation physico-chimique des matériaux d'étude.
- Deuxième chapitre la formulation expérimentale du mélange sable de dune-déchets de céramique et sable de dune-déchets de céramique-laitier et l'étude des différents mélanges vis-à-vis des essais mécaniques.
- Troisième chapitre consiste à faire un dimensionnement d'un corps de chaussée routier avec les résultats de la campagne expérimentale.

Et on termine avec une conclusion générale et les références bibliographiques.

CHAPITRE I

APPLICATION DES DECHETS DE CERAMIQUES POUR LA REHABILITATION DES STRUCTURE ROUTIERE

I-1-Introduction

Les infrastructures de transport (réseau routier) sont un élément nécessaire pour assurer la fluidité et la facilité du déplacement des individus. La route est composée de plusieurs couches de matériaux d'épaisseurs différentes qui supportent les charges des véhicules et résiste aux facteurs d'agressivité externes qui sont en étroite relation avec l'environnement.

Avec le développement observé dans le domaine de la construction, on constate une augmentation significative de l'accumulation des déchets, résultant de la démolition. L'effort pour collecter, recycler et réutiliser ces déchets dans d'autres régions pour les exploiter et valoriser en technique routière. Des généralités sur les déchets de céramiques et leurs utilisations dans structures routiers.

Les déchets céramiques ne sont pas suffisamment exploités, Dans ce qui suit, nous présenterons la définition de la route, ses composantes, la structure et les différents matériaux constituant le corps de chaussée, types de chaussée, les dégradations qui peuvent subir une route et les solutions proposés.

I-2-Les chaussées

Les chaussées sont constituées par des couches superposées de matériaux non susceptibles de résistance notable à la traction. Les couches supérieures sont généralement plus résistantes et moins déformables que les couches inférieures. Pour une assurance parfaite et un confort idéal, la chaussée exige généralement pour sa construction, plusieurs couches exécutées en matériaux différents, d'épaisseurs déterminées, ayant chacune un rôle bien défini. En principe une chaussée peut avoir en ordre les trois (03) couches.[01]

Le schéma suivant représente la structure d'une chaussée :

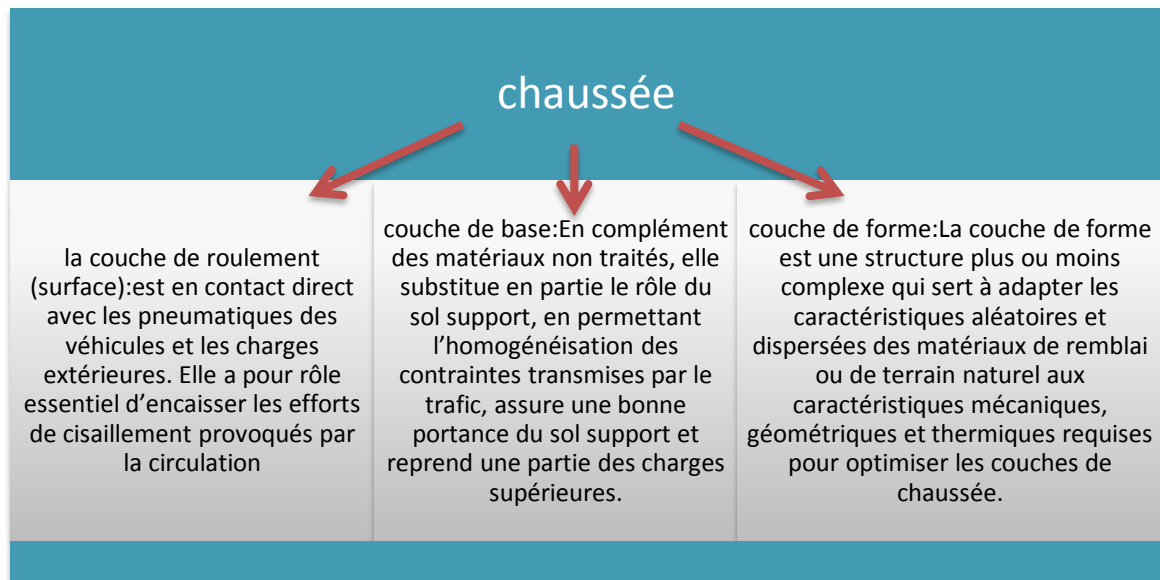


Figure I.1: Structure de chaussée.

I-2-1- Types de structure de chaussée

I-2-1-1- Chaussées souples

Les chaussées souples sont constituées d'une couche bitumineuse mince (≤ 12 cm) pour la couche de roulement, et d'un corps de chaussée, assise, constituée d'une ou plusieurs couches de grave non traitée (GNT). L'épaisseur globale de la chaussée est comprise entre 30 et 60 cm ; la structure type est illustrée sur la figure

La couverture bitumineuse relativement mince (≤ 12 cm) assure peu la diffusion des contraintes verticales dues au trafic et subit à sa base des efforts répétés de traction par flexion. L'assise en matériaux non traités présente une faible rigidité qui est en relation avec l'épaisseur de la couche granulaire et la rigidité du sol ; cela a pour effet de rendre ces chaussées particulièrement sensibles aux variations d'état hydrique des matériaux non traités et des sols supports. Les variations hydriques du sol support affectent fortement la chaussée ; ceci se manifeste par les « effets de bord » : réduction de la portance en période pluvieuse (avec affaissement de rive) et fissuration de retrait hydrique en période de dessiccation.

L'endommagement dans les chaussées souples apparaît par des déformations permanentes de type orniérage à grand rayon flaches et affaissements détériorant les qualités du profil en long et en travers. Ces déformations croissent avec le trafic cumulé, en gravité et en étendue. Ces sollicitations répétées entraînent une fatigue des enrobés, des fissures d'abord isolées apparaissent évoluant vers du faïençage à maille de faibles dimensions, phénomène aggravé par les infiltrations d'eau.[01]

Les mélanges granulaires sont composés uniquement de granulats et d'eau (aucun liant hydraulique ou hydrocarboné n'entre dans leur composition). Leur granulométrie est continue avec un diamètre maximal de grains compris entre 14 et 31,5 mm. On distingue deux catégories de GNT :

GNT A : des matériaux obtenus en une seule fraction granulométrique.

GNT B : des matériaux recomposés de plusieurs fractions granulaires distinctes, dans des proportions définies et qui sont malaxées et humidifiées en centrale (appellation traditionnelle GRH : grave reconstituée humidifiée).

Le classement GNT 1 à 4 est en fonction des caractéristiques granulométriques des granulats (GNT 1 : 0/63, GNT 2 : 0/31,5, GNT 3 : 0/20, GNT 4 : 0/14).

- **Classe de trafic**

Le tableau I.1 présente les classes du trafic selon la norme NF P 98-086 Annexe E :

Tableau I. 1 : classe du trafic

Classe	T5		T4		T3		T2		T1		T0		TS		T Exp
					T3-	T3+	T2-	T2+	T1-	T1+	T0-	T0+	TS-	TS+	
M.J.A.	0	25	50	85	150	200	300	500	750	1200	2000	3000	5000	7000	

I-2-1-2-Chaussées bitumineuses épaisses

La structure des chaussées bitumineuses épaisses comporte une couche de roulement bitumineuse sur un corps de chaussée en matériaux traité aux liants hydrocarbonés, fait d'une ou de deux couches (base et fondation). L'épaisseur des couches d'assise est le plus souvent comprise entre 15 et 40 La rigidité et la résistance en traction des matériaux bitumineux atténuent fortement les contraintes sur le sol par diffusion. Ces efforts sont repris en traction-flexion par ces couches. Tant que les interfaces entre les différentes couches restent collées, les efforts de traction maximaux se produisent à la base de la couche la plus profonde. Si les couches sont décollées, chacune d'elles se trouve sollicitée en traction et peut se rompre par fatigue. La qualité des interfaces a donc une grande incidence sur le comportement de ces chaussées. [01]

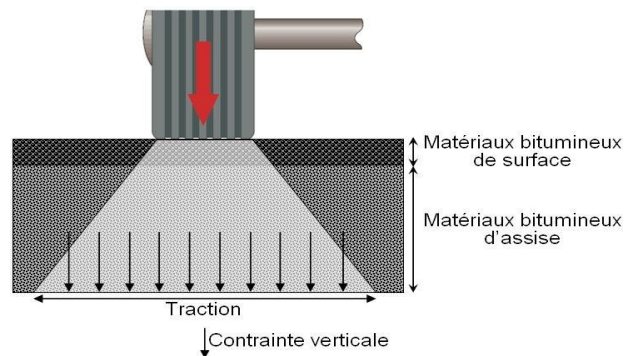


Figure I. 2: Chaussée bitumineuse épaisse.

Les endommagements de ce type de chaussée se voient par apparition de fissures longitudinales de fatigue dans les traces de roues est généralement postérieur aux dégradations de surface. Sans traitement, ces fissures évoluent vers du faïençage dont la maille se réduit peu à peu, l'eau accélère le processus d'attrition et de dés enrobage avec formation de nids de poule. On n'observe pas de dommages dus aux déformations du sol support, car la méthode dimensionnement définit l'épaisseur de matériaux bitumineux à mettre en place pour un comportement acceptable en fatigue sans sollicitations particulières du sol support. [01]

I-2-1-3- Chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

Leur structure ayant de grande rigidité permet l'absorption des contraintes de traction-flexion. Si les interfaces de GTLH (granulats traités aux liants hydrauliques). Sont bien adhérentes, la contrainte maximale apparaît à la base de la fondation, sinon les deux couches travaillent en traction et s'endommagent. L'interface surface-base est une zone sensible: siège de contraintes normales et de cisaillement et présentant une faiblesse de la surface de la base. Elles comportent une couche de roulement bitumineuse sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposée en une ou deux couches dont l'épaisseur totale est de l'ordre de 20 à 50 cm (voir figure).

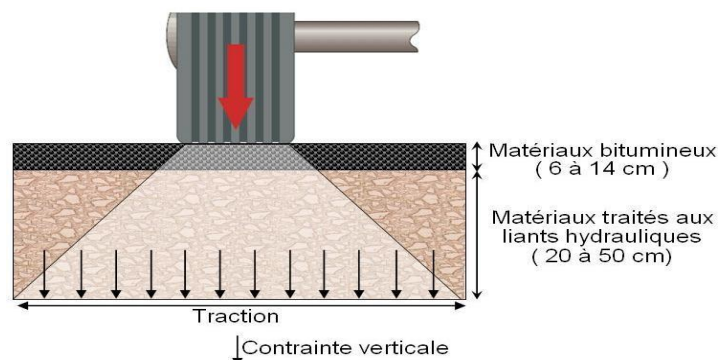


Figure I. 3: Chaussées à assise traités au liant hydraulique (chaussée semi-rigide).

Hydrauliques. Pour être désignée comme mixte, le rapport de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale doit être de l'ordre de 1/2.

Grâce à son épaisseur, la couche de base en matériaux bitumineux permet de ralentir la remontée des fissures transversales de la couche de fondation et d'atténuer les gradients thermiques journaliers ; en sus, ses performances mécaniques lui permettent de réduire les contraintes de flexion à la base de la couche de fondation. La figure I.3 représente les différentes couches constituantes et les sollicitations engendrées. [01]

I-2-1-4-Chaussées à structure mixte

Les chaussées à structure mixte sont constituées d'une couche de roulement et de base en matériaux bitumineux d'une vingtaine de centimètres, sur une fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. Pour être désignée comme mixte, le rapport de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale doit être de l'ordre de 1/2.

Grâce à son épaisseur, la couche de base en matériaux bitumineux permet de ralentir la remontée des fissures transversales de la couche de fondation et d'atténuer les gradients thermiques journaliers ; en sus, ses performances mécaniques lui permettent de réduire les contraintes de flexion à la base de la couche de fondation.

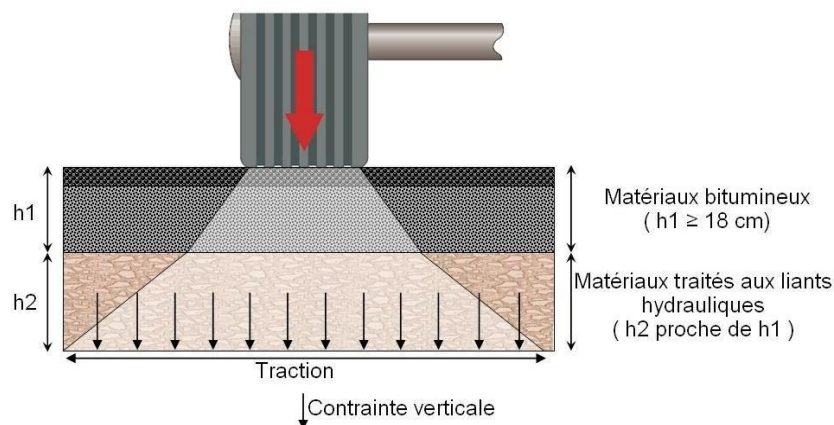


Figure I. 4: Chaussées à structure mixte.

A cause de la différence entre les coefficients de dilatation thermique entre les matériaux bitumineux et hydrauliques et de l'action du trafic, les couches de base et de fondation peuvent finir par se décoller et se rompre dans certaines zones, ce qui conduit à considérer un mode de fonctionnement mécanique de la structure en deux temps :

- L'interface entre les couches de fondation et de base est considérée collée : la base de la couche traitée aux liants hydrauliques est sollicitée en fatigue par traction ;
- L'interface entre les couches de fondation et de base est localement décollée :

➤ Dès lors, les deux couches sont fortement sollicitées en traction à leur base. [01]

I-2-1-5-Chaussées à structures inverses

Elles sont constituées de matériaux traités aux liants hydrauliques (MTLH), recouverte par une couche intermédiaire en grave non traitée (GNT) de faible épaisseur (~ 12 cm), et d'une couche de base en matériaux bitumineux figure I.5.

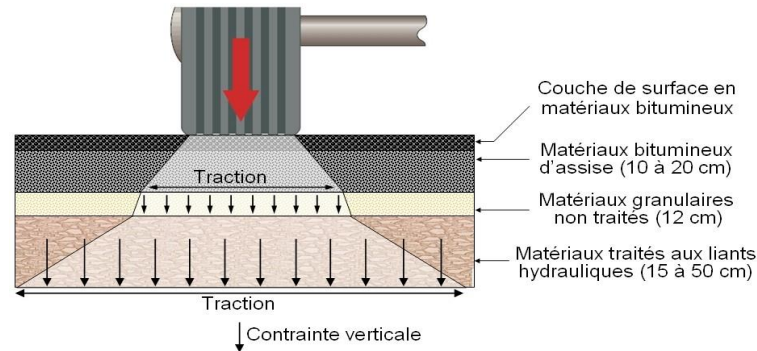


Figure I. 5: Chaussées à structure inverse.

Le rôle de la couche de la fondation (en matériaux traités aux liants hydrauliques) atténue les contraintes sur le sol et assure un support de faible déformabilité aux couches supérieures (c'est parfois la couche de forme traitée au ciment qui remplace cette fondation); la couche granulaire, relativement déformable dans le sens horizontal, évite la remontée des fissures de retrait dues aux mouvements d'origine thermique. La couverture bitumeuse assure l'unification des couches et leur imperméabilité. [01]

I-2-1-6- Chaussées en béton de ciment (les chaussées rigides)

Les structures de ces chaussées (figure I.11) comportent une couche de béton de ciment de 15 à 40 cm d'épaisseur éventuellement recouverte d'une couche de roulement mince en matériaux bitumineux. La couche de béton repose soit sur une couche de fondation (qui peut être en matériaux traités aux liants hydrauliques, en béton de ciment, ou drainante non traitée), soit directement sur le support de chaussée avec, dans ce cas, interposition fréquente d'une couche bitumeuse. La dalle de béton peut être continue avec un renforcement longitudinal "béton armé continu", ou discontinue avec ou sans éléments de liaison aux joints. [01]

I-3- Dégradations des chaussées

I-3-1-Définition

La description précise des défauts d'une chaussée est incontestablement un des éléments importants à prendre en compte pour établir le diagnostic et choisir la technique d'entretien à mettre en œuvre. Les descriptions seront faites selon une présentation commune qui puisse

assurer la transcription fidèle des observations visuelles. On est amené ainsi à recenser et à décrire avec soin les défauts apparents dans le souci d'une classification adéquate et d'une meilleure appréciation des causes permettant de proposer les remèdes les plus appropriés.

La partie suivante s'efforce de répondre à ces exigences en :

- donnant une méthodologie d'inspection basée sur une description et une classification (selon le degré de gravité) des principaux défauts susceptibles d'être rencontrés sur route.
- présentant les causes les plus probables susceptibles d'être à l'origine de ces dégradations
- proposant des remèdes.

A l'instar de la plupart des systèmes de relevés utilisés, l'analyse de l'état des dégradations doit être faite sur la base d'une inspection visuelle détaillée qui doit porter sur un relevé systématique du type de chaque dégradation, de son étendue et de sa gravité. Elle doit intéresser aussi bien le revêtement de la chaussée, les éléments latéraux et "obstructions" (fossés, accotements...), la signalisation et les marquages (panneaux, équipements ...) que les structures (ponceaux, dalots, murs de soutènement...).

La longueur des sous-sections dépendra d'une manière générale de l'homogénéité de l'itinéraire à ausculter et ne pourrait qu'exceptionnellement être inférieure à 50 m pour les routes du Nord et 100m pour celles du Sud. [02]

I-3-1-1-Description et classification des principales dégradations

On peut classer les principales dégradations en quatre familles :

- Les déformations.
- Les fissurations.
- Les arrachements.
- Les remontés des matériaux.

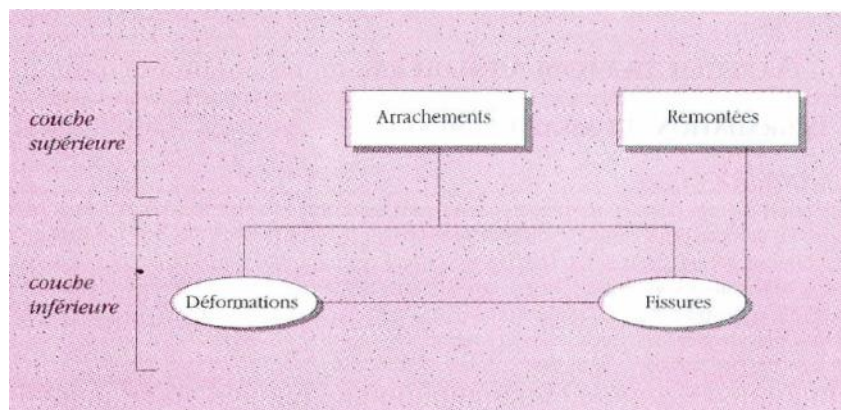


Figure I. 6: Différents dégradations visant chaque couche. [02]

➤ Déformation

Il s'agit d'une dégradation entraînant une modification de la route donnant à la surface de la chaussée un aspect différent à celui désiré, ces déformations qui prennent dans le corps de chaussée, affectent en général les couche inférieures pour atteindre la couche de roulement, ils peuvent se distinguer selon leur forme ou leur localisation comme suit :

- Tassement : Abaissement du niveau de la chaussée.
- Affaissement : Variation du niveau du profil longitudinale aussi bien suivant l'axe que la rive ou transversal. Ils peuvent être localisés ou généralisés.
- Flache : Dépression localisée en forme arrondie ou ovale.
- Bourrelet : Enfléments apparaissant à la surface de la chaussée suivant un profil longitudinal ou transversal.
- Tôle ondulée : Ondulation régulières et rapprochées perpendiculaires à l'axe de la chaussée, rencontrée fréquemment sur les routes non revêtues.
- Bosses : Soulèvement localisé de la chaussée.
- Ornière : Dépression longitudinale se développant sous le passa des roues. [02]



Figure I. 7: Dégradation de chaussée type déformation.

➤ Fissurations :

Elles sont définies comme étant une cassure du revêtement suivant une ligne avec ou sans rupture du corps de chaussée. Elles peuvent intéresser aussi bien la couche de roulement seule, qu'une partie ou la totalité du corps de chaussée.

- Faiençages : Cassures en mailles du revêtement. Elles sont dites à mailles fines ou peaux de crocodile lorsque le côté varie de 10 à 40 cm et à mailles larges au-delà de 40 cm de côté.
- Fissures paraboliques de glissement : Fissures ou déchirements de la chaussée en forme de demi-lune ou de croissant à axe longitudinale.
- Fissures fines : Petite fissures superficielles et fines.

- Fissures longitudinales : Fissures suivant l'axe ou la rive et en dents de scie.
- Fissures transversales. [02]

➤ **Arrachements :**

Il s'agit désordres affectant en général la couche de roulement. On y distingue :

- Ravinement.
- Nids de poule et trous : Cavités de taille variée et de forme arrondie à bords franc, créées à la surface de la chaussée par enlèvement des matériaux.
- Plumage, peignage, dés enrobage : Arrachements de gravillons du revêtement.
- Têtes de chat et perte de matériaux : Apparition excessive de granulats durs en relief par usure du mortier les entourant.
- Dégradations de rive (épaufrures) : Cassure du revêtement au bord de la chaussée. [02]



Figure I. 8: Dégradation de type arrachement.

➤ **Remontées de matériaux :**

Il s'agit d'apparition en surface de remontées des couches inférieures de boue, d'eau, de liant ou de sel. [02]

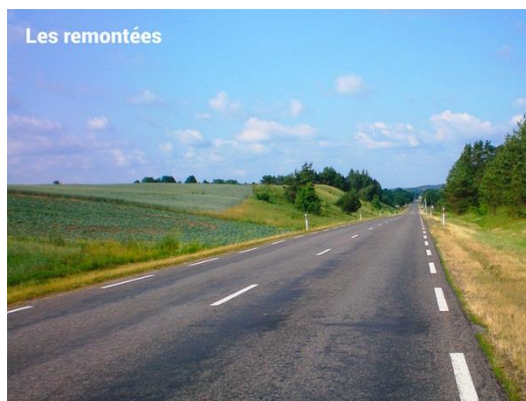


Figure I. 9: Dégradation de type remonté des matériaux.

I-3-1-2-Choix des solutions de réhabilitation

I-3-1-2-1-Sectionnement en tronçons homogène

Après avoir fait le diagnostic qui nous permet de découper l'itinéraire en zone homogènes et de définir les actions à entreprendre. Les zones homogènes sont des longueurs de tronçons qui ont les mêmes caractéristiques de point de vue :

- Déflexions mesurées.
- Etat de surface (dégradation et uni)
- Condition de drainage et d'assainissement.
- Corps de chaussée (type, épaisseur des matériaux...)
- Nature du sol support
- Nature des profils (déblais, remblais mixte) [02]

I-3-1-2-2-Détermination des solutions de réhabilitation

Pour la réhabilitation d'une route un ensemble de solutions est possible, il est proposé des actions relatives de traitement :

- Des dégradations
- De l'assainissement
- De la structure
- De la géométrie et des dépendances
- De la sécurité
- De l'environnement [02]

I-3-1-2-3-Actions proposé

Le tableau I.2 ci-dessous propose un ensemble de remèdes pour les dégradations, ces remèdes sont à utiliser avec discernement en fonction des éléments particulier de chaque section. [02]

Tableau I. 2: Actions proposées en fonction de l'état de dégradation [02]

Etat de dégradation	Actions proposées	N° de la dégradation concernée
Bon	- Aucune action	
	- Rabotage de la couche de roulement	15,16,17,18,19,20
	- Rabotage et balayage	5,6,7
	- Surveiller le drainage et le profil transversal de la chaussée	17
	- Comblir les trous	13
	- Réparer les zones endommagées	18
	- Réparation locale	15,16
Moyen	- Reprendre des gravillons ou de sable sur les zones atteintes	20
	- Reprofilage léger	5,6,7,14,17
	- Rabotage	5,6,13
	- Entretien des fossés rétablir le niveau normal de la chaussée	1,2,3
	- Scellement des fissures	11,12
Mauvais	- Traitement superficiel ou enduisage	8,9,10,15,16
	- Rechargement des accotements et réparation des rives du revêtement	18
	- Reprofilage important ou remise en état complet de la chaussée	7,17
	- Rechargement ou remise en état complet de la chaussée	13,17
	- Reprofilage	5,6,14
	- Rechargement	14,19
	- Remplacement des couches concernées en choisissant des composants mieux adaptés	4
	- Entretien des fossés et enlèvement en profondeur des matériaux pollués de la chaussée remplacement de la couche de base ou de fondation et compactage intensif remise à niveau correcte de la couche de roulement	1,2,3
	- Enlèvement du revêtement ou de la couche concernée et pose d'une nouvelle couche	8,9,10,11,12,15,16,20
	- Reconstruction	18

I-4-Dechets de céramiques

I-4-1-Définition

Un matériau céramique est solide à température ambiante et n'est ni métallique, ni organique. Les objets en céramique sont réalisés par solidification à haute température d'une pâte humide plastique (verre minéraux), ou frittage (agglutination par chauffage) d'une poudre sèche préalablement comprimée, sans passer par une phase liquide (céramique polycristalline) ; par assimilation, on désigne sous le terme « céramique » les objets ainsi fabriqués. [03]

I-4-2- Caractéristiques physiques

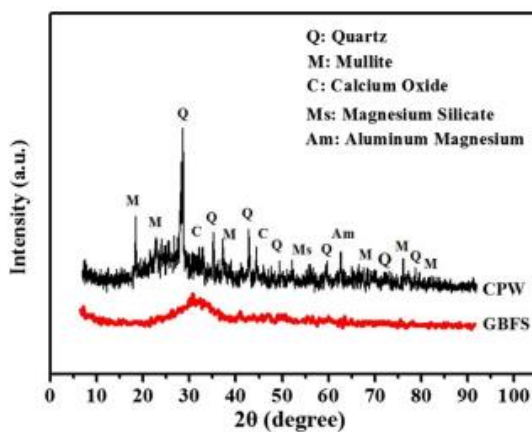
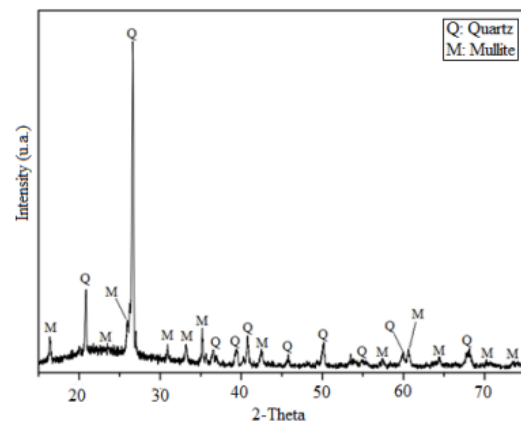
- **Dureté** : la caractéristique la plus distinctive des céramiques avancées est leur extrême dureté. Par exemple, l'alumine a une dureté presque 3 fois supérieure à celle de l'acier inoxydable.
- **Rigidité** : La grande rigidité des céramiques est mesurée en testant l'élasticité après l'application d'une charge de Son inflexibilité en fait une pièce qui évite la déformation.
- **Résistance à l'impact** : les céramiques techniques actuelles ont une faible résistance à la rupture, mais la zircone stabilisée offre des améliorations significatives de la résistance à l'atteinte du point de rupture.
- **Gravité spécifique (densité)** : en général, les céramiques ont une densité plus faible que les métaux à haute résistance. Dans un même volume, de nombreuses céramiques peuvent réduire le poids à la moitié de celui du métal. [04]

I-4-3-Caractéristiques chimiques

En se basant sur quelques recherches faites par des auteurs dans différents pays en ce qui concerne les caractéristiques chimiques des céramiques on peut tirer les résultats ci-dessous :

Tableau I. 3: Les composants chimiques de quatre différents types de céramique

Eléments chimiques	Reference [05]	Reference [06]	Reference [07]	Reference [08]	
Oxyde	Pourcentage	Pourcentage	Pourcentage	Pourcentage	L'intervalle de Pourcentage
SiO ₂	74.10	72.6	64.62	55,88	[55,88_74,10]
Al ₂ O ₃	17.80	12.6	20.00	23,61	[17,80_23,61]
K ₂ O	2.65	0.03	3.42	2,758	[0,03_3,42]
Fe ₂ O ₃	3.58	0.56	1.66	6,440	[0,56_6,440]
MgO	/	0.99	1.23	0,892	[0,99_1,23]
CaO	1.13	0.02	0.82	0,39	[0 ,02_1,13]
TiO ₂	0.44	/	0.68	0,816	[0,44_0,816]
Na ₂ O	/	13.5	0.49	1,022	[0,49_13,5]
LOI	0.10	0.13	/	8	[0,1_0,13]

**Figure I. 10:** Diffractogramme de la céramique [07]**Figure I. 11:** Diffractogramme de la céramique [06]

I-5-Tronçons réalisés avec les déchets de céramiques

- **A6 - Autoroute d'Arlon**

Sur le plan international, l'autoroute Luxembourg-Arlon relie le Luxembourg au réseau autoroutier belge.

L'autoroute A6 (Autoroute d'Arlon) est une des parties importantes du réseau autoroutier du Grand-Duché de Luxembourg et relie la capitale avec l'autoroute E25/E44 du côté belge menant à Bruxelles. Faisant partie du réseau des routes européennes, elle porte également la nomination E25. [32]

Elle se compose de quatre échangeurs, les croix de Gasperich et de Cessange et de l'Aire de Capellen.

Sa construction débuta dans les années 1970, la première section fut mise en service en 1978.

Construite pour délester la route nationale N6, l'autoroute A6 fut entièrement ouverte à la circulation en 1982 Route M4, Royaume-Uni :

- L'autoroute M4 est une autoroute du Royaume-Uni d'une longueur de 305 km. Construite entre 1961 et 1996, elle est la route principale pour les véhicules au pays de Galles. [32]

- Autoroute I-10, États-Unis : L'Interstate 10 est une autoroute inter-États située dans le Sud des États-Unis. Elle commence sur la Côte Ouest à la California State Route 1, à Santa Monica en Californie, et finit à l'Interstate 95, à Jacksonville en Floride. Longueur dans chaque État : Californie : 244 miles Arizona : 391 miles [32]

- Route D100, Turquie : La D.100 est une route nationale d'ouest en est en Turquie. Il commence à Kapikule, le point de contrôle frontalier bulgare, et se termine à Gürbulak, le point de contrôle frontalier iranien. Puisqu'il s'étend d'ouest en est, il traverse la plupart des routes nationales du nord au sud, notamment la D.650, la D.750, la D.850 et la D.950. [32]

I-6- Conclusion

Dans le chapitre présent nous avons vu :

- Des généralités sur la chaussée comme ces couches constituantes et les différents types de chaussée, ainsi que les dégradations qui peuvent atteindre les couches supérieurs et inférieurs.
- On a vu aussi les déchets de céramiques qui sont de nature argileuse et leurs caractéristiques physiques qui présentent une rigidité et une dureté assez importante et une forte densité, ainsi que les caractéristiques chimiques.
- Présentation de quelques tronçons routiers réalisés avec les déchets de céramiques

CHAPITRE II

SABLE DE DUNES ET LE LAITIER DE HAUT FOURNEAU EN TECHNIQUE ROUTIERE

Partie 01 : Sable de dune

II-1-Introduction

Le terme sable est généralement utilisé pour désigner un mélange de grains meuble n'ayant aucune cohésion et dont la dimension des grains est généralement comprise entre 0,062 et 5 mm. Du point de vue géologique, le terme sable recouvre deux aspects : un aspect granulométrique (taille des grains) et un aspect minéralogique (nature minéralogique des grains). Une particule individuelle est appelée grain de sable. Le sable peut avoir une origine naturelle ou artificielle ; d'origine naturelle, il provient de la désagrégation naturelle de roches au cours de leur processus d'érosion, artificiel, il est obtenu par broyage de roches massives après des opérations de concassage et de criblage, il est appelé aussi sable de carrière, il est caractérisé par des grains aux aspérités marquées. La composition du sable varie d'un endroit à l'autre selon la nature des roches.

II-1-1-Définition du sable de dunes

Le sable de dune est le sable que l'on trouve dans les dunes mouvantes, c'est le résultat de la désagrégation lente des roches sous l'action des agents d'érosion tels que l'air, la pluie... etc. Ces sables se déposent en édifices dunaires constitués d'une succession de crêtes et de couloirs qui correspondent à des vagues. [09]

II-1-2-Mécanisme de formation des dunes

Les dunes se forment dans des zones où le sable est abondant et non fixé par la végétation (désert, plage, lit fluvial à l'étiage). Le sable est érodé et pris en charge par le vent (déflation). Il est transporté aux ras du sol par saltation, puis s'accumule quand la compétence du vent chute (versant sous le vent). Une dune peut se déplacer par érosion du versant au vent et accumulation sur le versant opposé. [10]

La figure II.1 représente le mécanisme de dunes :

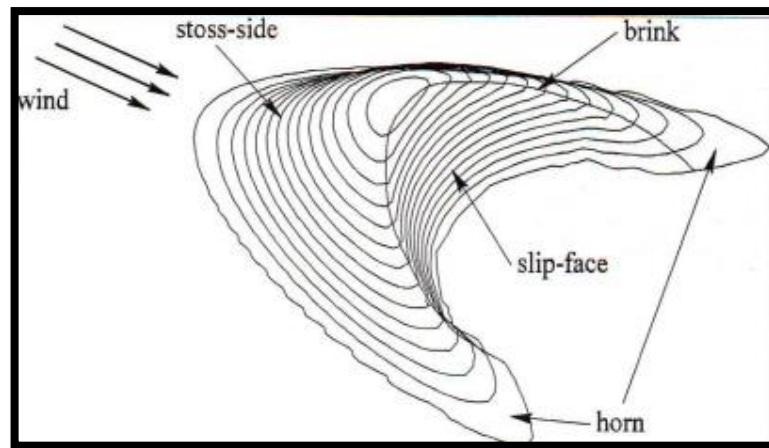


Figure II. 1: Mécanisme des dunes.

II-1-3-Intérêt de sable de dune

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

➤ Les aspects économiques

Les aspects sont évidents dans la mesure où l'utilisation du sable de dune permet une économie certaine dans le transport des matériaux, puisqu'il est partout disponible en quantité inépuisable. Par ailleurs, son extraction n'engendre pratiquement pas de frais supplémentaires et son mélange avec les autres matériaux sur chantier peut se faire facilement. [18]

➤ Les aspects techniques

Le sable peut contribuer à la densification des matériaux. Ceci permet, par la même occasion, l'amélioration de leurs caractéristiques géotechniques en augmentant le frottement interne et en améliorant la portance. Il peut être utilisé pour diminuer la plasticité des matériaux de base. [18]

II-1-4-Utilisation des sables de dunes

On trouve :

➤ Dans le béton :

Le sable de dunes était utilisé depuis longtemps dans l'exécution des travaux de remblayage des fouilles de fondations et les travaux routiers, mais l'utilisation comme constituant principal du béton n'apparaît qu'après la naissance du béton de sable en 1853 par F. COIGNET (Rapport général et conclusion de 23e congrès mondial de la route.

Cette naissance a donné le courage de commencer une nouvelle investigation qui a étudié la possibilité d'utiliser le sable de dunes comme un constituant principal dans les structures des ouvrages en génie civil pour cette raison plusieurs actions de recherches, soit en Algérie ou à

l'étranger, ont été engagées et hypothéquées. On trouve comme exemple les recherches menées à l'étranger : les travaux de KOTZIAS (A. BENTATA [27]) qui sont fait au golfe d'Arabie pour les deux raisons suivantes :

- Les gros granulats disponibles uniquement dans des endroits très lointains.
- Il y a abondance de sable de dunes qu'on peut obtenir à moindre frais Les recherches menées à l'Afrique occidentales par UZOMAKA au Nigeria (A. BENTATA) et I. J. CHAUVIN et MIKHAILOV au Russie (J.J. CHAUVIN). [14]

➤ **Le domaine routier :**

L'utilisation des sables en techniques routières n'est pas nouvelle. A l'époque déjà, les ingénieurs avaient recours à l'utilisation du sable mélangé à un liant hydrocarboné en particulier pour les couches de roulement (R. NEDJARI). Beaucoup d'études et des réalisations ont été faites et un guide pratique d'utilisation routière.

De sables a été publié par Chauvin (1987) (M.H.BEN DHIA) 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 (Autret, 1989) (M.H.BEN DHIA). Mais il pourrait être mélangé avec d'autres matériaux. [16]

On cite :

- Sables traités aux liants hydrocarbonés
- Sables traités aux liants hydrauliques

Liants :

Un liant est un produit qui sert à agglomérer une masse solide, des particules solides sous forme de poudre ou de granulats Les liants rentrent dans la fabrication des bétons des mortiers et même des peintures, des colles, des mastics...etc.

Dans les travaux publics et les bâtiments, on distingue deux grandes classes de liants :

Liants hydrophiles

Liants hydrophobes

➤ **Sables traités aux liants hydrocarbonés (au bitume) :**

Le sable bitume est un mélange d'un ou plusieurs sables avec bitume pur. Généralement, le mélange nécessite l'ajout de fines provenant soit des matériaux de concassages-broyage (sable

filiérisé, fines calcaires), soit des pulvérulents industriels (chaux, ciment). Le bitume utilisé doit être assez dur, de classe 40/50 ou 20/30 afin d'assurer une rigidité et une stabilité convenable. La fabrication du mélange (sable + bitume) se fait en centrale d'enrobage à chaud. [13]

- **Domaine d'utilisation :**

Ils sont utilisés soit dans le corps des couches d'assises, soit pour d'autres usages (cure, scellement, imprégnation, etc.).

Ce sont :

Les liants normalisés :

- Les bitumes purs,
- Les bitumes fluxés,
- Les bitumes fluidifiés,
- Les goudrons,

Les émulsions de bitume :

- Les liants modifiés ou spéciaux

- **Spécification :**

Constituant :

Sable :

Toutes sortes de sables fins, moyens ou grossiers, calcaires ou siliceux peuvent être employés, mais ils exigent deux paramètres :

Propreté :

Equivalent de sable à 10% de fine $ES > 40$.

Valeur au bleu de méthylène $VBS < 0.2$

Stabilité immédiate avant mélange :

Indice de portance immédiat $IPI > 40$

Il n'y a pas de restriction concernant la granulométrie du sable à utiliser. Le sable employé devra par ailleurs contenir moins de 0,2% de matières organiques.

Bitume :

Le bitume doit répondre selon l'essai de pénétrabilité et l'essai de température bille anneau à une classe de 40/50 ou 20/30.

Formulation :

Le % de sable naturel est $> 60\%$

Le % de sable correcteur incorporé 40% (avec % en fines $> 16\%$)

Le % de fine du mélange à blanc à traité au bitume est $>7\%$

La teneur en bitume du mélange est de 6 à 7 %.

- **Performance :**

Les performances mécaniques d'un sable bitume destine pour une couche de base à un trafic PL/j sur la voie la plus chargée inférieure à 300 PL/j sont :

Stabilité Hubbard-Field C (en Kg) à 60° (après immersion)	>500
Résistance Duriez mini à sec [Mpa]	4
% de perte max de résistance avec immersion	40

- **Fabrication :**

La fabrication du sable bitume s'effectue au niveau d'une centrale d'enrobage à chaud

La dure de malaxage pour cette technique et plus importante que pour un BB ou GB

Afin de bien répartir le débit de prédoseurs du sable naturel, il est conseillé d'utiliser deux trémies qui alimente simultanément le tapis au lieu d'un seul.

En cas d'utilisation de la chaux comme filler d'apport un silo à pulvérulent doit être installé.

Le transport est assuré par des camions dont le bâchage est nécessaire afin de respecter la température de mise en œuvre

- **Mise en œuvre :**

Rependage :

Le rependage d'un sable bitume est assuré par un finisseur à table vibrante dont la vitesse d'avancement est de 4 à 7 m/mm

Une couche d'imprégnation au Cut back 0/1 est réalisée sur la couche support avec un dosage de 0,7 à 1 kg/m²

Compactage :

Le compactage de sable bitume est assuré par les engins suivant :

Un compacteur statique à cylindrique lisse de poids total de de 8 à 10 tonnes (en tête)

Un compacteur à pneumatique à charge par roue de 2,5 à 3,5 tonnes/roue faiblement gonflées (de l'ordre de 2 à 3 bars).

Le nombre de passe de chaque engin sera fixé par une planche d'essai réalisé au début du chantier.

Epaisseur technologiques de mise en œuvre :

Le seuil technologique après compactage, en une seule couche est :

Epaisseur minimale = 4cm

Epaisseur maximale = 10cm

➤ **Sables traités aux liants hydrauliques :**

Les liants :

Les liants hydrauliques sont des substances minérales qui durcissent après addition d'eau. Les plus utilisés dans le secteur de la construction sont les ciments, les cendres volantes, les laitiers de haut fourneau, la chaux et le gypse. Ils sont responsables de la solidité et du comportement des bétons, des mortiers ou de la stabilisation des sols.

Parmi ces liants hydrophiles, on distingue deux catégories :

Liants hydrauliques : ce sont les liants d'origine minérale mélangés avec l'eau, ont les propriétés de faire prise et durcir, tant à l'air libre que sous l'eau. Les liants hydrauliques sont représentés par les ciments, les plâtres et les chaux hydrauliques.

Liants aériens : ce sont des liants mélangés avec l'eau, ne peut peuvent faire prise et durcir qu'à l'air libre. La chaux aérienne est obtenue par la cuisson de calcaire très pur (de 95 % à 99 %).[19]

On trouve 2 types de sables :

Sable-ciment :

Mélange homogène de sable et de liant (ciment ou chaux) que l'on combine avec une certaine quantité d'eau et auquel des adjuvants peuvent être également ajouté. [15]

Sable-laitier :

Un sable laitier SL peut être défini comme le mélange, effectué en centrale de malaxage, d'un (ou plusieurs) sable(s), d'un certain pourcentage de laitier vitrifié (brut ou broyé) et d'un activant basique à un dosage généralement voisin de 1%. Il est principalement utilisé dans la confection des assises de chaussées. On parle de sable-laitier lorsque le matériau de base est un sable. [15]

➤ **Autres utilisations :**

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

Les sables jouent également un grand rôle comme réservoirs potentiels pour les nappes d'eau (aquifères) ou les hydrocarbures. Il importe que l'exploitation du sable, souvent anarchique,

soit réglementée pour éviter de perturber de fragiles équilibres naturels : érosion des plages dont l'alimentation naturelle en sable a été coupée ; destruction à terre de la nappe phréatique, etc. [16]

II-2-Identification des sables de dunes

II-2-1- 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 à une couleur blanche légèrement jaune et ocre il se dessèche et perd facilement sa cohésion en surface. (Ben Dhia, 1998). à titre d'exemple Gueddouda (Gueddouda, 2011) fait une étude sur Comportement hydromécanique des sols compactés : Application à la conception d'une barrière ouvragée, il a utilisé deux matériaux, la bentonite et le sable de dune de la région de Laghouat. Le tableau 1 illustre les résultats de l'analyse chimique effectuée par LNHC de Djelfa (Laboratoire National d'Habitat et de Construction. [20]

Les résultats sont présentés dans le tableau II.1 ci-dessous :

Tableau II. 1: Les composants chimiques du sable de dune de Ben Dhia.

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

II-2-2-Analyse granulométrique

Le diamètre des plus gros éléments des sables de dunes du Sahara est de l'ordre de 0,5 mm. Il est maximal aux endroits les plus proches de la roche mère et diminue de plus en plus quand on s'en éloigne. Les particules deviennent aussi de plus en plus arrondies. Le diamètre des éléments les plus fins est de l'ordre de 0,04mm. Le coefficient d'uniformité ($C_u = D_{60} / D_{10}$) est de l'ordre de 1,8 et le coefficient de courbure ($C_c = D_{30}^2 / [D_{10} \cdot D_{60}]$) est de l'ordre de 10. Il s'agit donc d'un sable très fin mal gradué. La figure II.2 montre deux courbes granulométriques de sables de dunes prélevés dans deux zones sahariennes différentes en Tunisie (Gara, 1994) et en Mauritanie (Ould Sid et al. 1995) (cité par Ben Dhia, 1998). [20]

La figure suivante représente la granulométrie des sables de dune de la Mauritanie et la Tunisie :

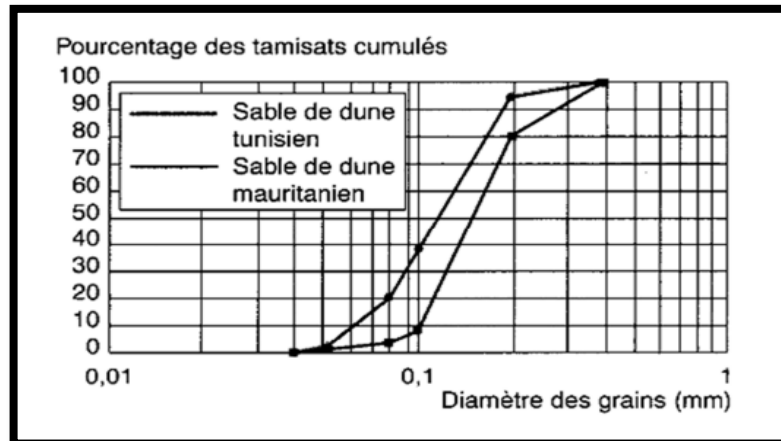


Figure II. 2: courbe granulométrique du sable de dune n Tunisie et mauritanien. [20]

II-2-3-Analyses minéralogiques

L'analyse par DRX du sable dunaire révèle la présence d'atomes Si et O2 ce qui correspond à la présence de l'espèce SiO₂ (silice). De plus le pourcentage atomique important de Si nous indique que SiO₂ est l'espèce prépondérante. Les autres valeurs de pourcentages atomiques nous permettent d'établir que le sable dunaire contient aussi quelques traces, en comparaison avec SiO₂, d'espèces calciques et magnésiques les résultats sont présente dans le spectre. (Gueddouda, 2011). [20]

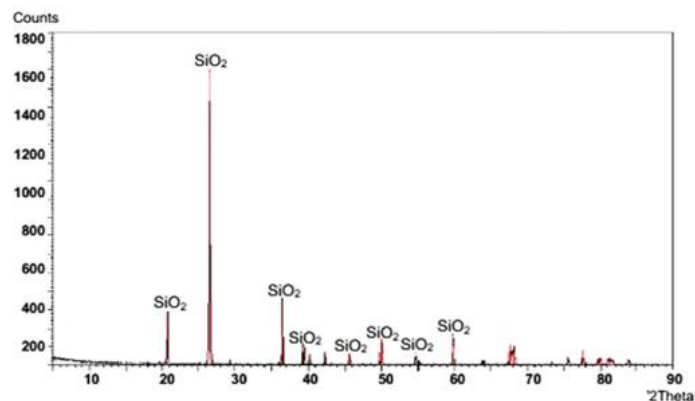


Figure II. 3: DRX de sable de dune (Gueddouda2011). [20]

II-2-4-Comportement mécanique

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

- l'effet de la teneur en eau sur le compactage est peu significatif quand la teneur en eau est faible (0 à 6 %).

- la cohésion a une valeur très faible, de l'ordre de 5kPa.
- l'angle de frottement interne varie de 30 à 35°, selon la densité du sable.

Les valeurs de ces paramètres montrent que le sable de dune peut avoir un bon comportement mécanique même lorsque sa compacité est faible, à condition d'être à l'abri du vent. Par ailleurs, l'indice portant CBR de ces sables, au poids volumique et à la teneur en eau de l'optimum Proctor modifié, est relativement faible. 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. (Ben Dhia, 1998). [20]

II-1-5-propriété :

Le sable de dune ne contient pratiquement pas de traces d'argile. Il a une limite de liquidité WL de l'ordre de 25 et une limite de plasticité non mesurable. La valeur de l'équivalent de sable est supérieure à 60%. La valeur de bleu est de l'ordre de 0,1. (Ben Dhia, 1998). Le tableau II.3 présente quelques propriétés de deux types de sable de dune de la wilaya de Biskra :

- Sable de dune de la région de Lichana « SD1 »
- Sable de dune de la région d'Aïn Bennaoui (El-Hadjeb) « SD2 » Ces résultats sont obtenus par Hocine azzouz (2004). Cette étude est entamée, pour tirer des conséquences sur l'utilisation de sable de dune dans la composition du béton. [20]

Tableau II. 2: Quelques propriétés de deux types de sable de dune de Biskra.

	Masse volumique apparente	Masse volumique absolu	Equivalent de sable ES/ESV	Module de finesse
SD1	1330	2760	75/93	1,36
SD2	1285	2580	71/89	1,22

Dans le tableau suivant on a résumé les caractéristiques physico-chimiques des sables de dune de différentes régions de notre grande Sahara algérienne :

Tableau II. 3: Les caractéristiques physico-chimiques des sables de dune de l'Algérie.

SD	ES	Masse volumique absolu	Masse volumique apparente	VB	MF	Classification LCPC	Classification GTR
El Oued	82.4	2.56	1.77	/	1.615		
M'sila (oued metair)	80.37	2,60	1 ,63		0.84		
Adrar (Bouda)	95.65	2,65	1,54	0 ,2			B1
Ghardaïa (sebseb)	76	/	/	0,84		SB	/
Djelfa	68	2,54	1,48	/	0,91	Sable propre	

II-3-Conclusion

Nous avons présenté dans cette partie du 2^{ém} chapitre des généralités sur le sable de dune telle que, Définition d'un sable de dune, Intérêt de sable de dune, quelques paramètres qui nous ont permis d'identifier ce type de sable comme la composition chimique et minéralogique, analyse granulométrique, comportement mécanique et quelques propriétés. On a parlé aussi sur les divers utilisations des sables de dune comme ils constituent l'essentiel de la matière première de l'industrie du verre, son utilisation dans les formulations des bétons, et en technique routière.

Partie 02 : Laitiers de haut fourneau

II-1-Introduction

Le laitier de haut-fourneau est produit par les usines sidérurgiques intégrées, également appelées « en filière fonte ». La fonte sidérurgique est produite au niveau du haut fourneau lors de la réduction des minerais de fer (composés d'oxydes de fer et d'une gangue minérale) par le carbone du coke (figure 1). Les éléments non ferreux du minerai (silice, chaux et alumine) ainsi que les additifs minéraux se retrouvent dans le laitier de haut-fourneau, surnageant sur la fonte par effet de densité. Le laitier est ensuite séparé de la fonte grâce à un siphon. (Figure).

Le laitier sort sous forme liquide à 1500°C du haut-fourneau. Il existe deux procédés majeurs pour le refroidir :

- Lentement, à l'air libre, dans des fosses, et l'on obtient alors du laitier de haut fourneau cristallisé.
- Brusquement, à l'eau, dans un granulateur, et l'on obtient alors du laitier de haut fourneau vitrifié, souvent nommé "granulé".

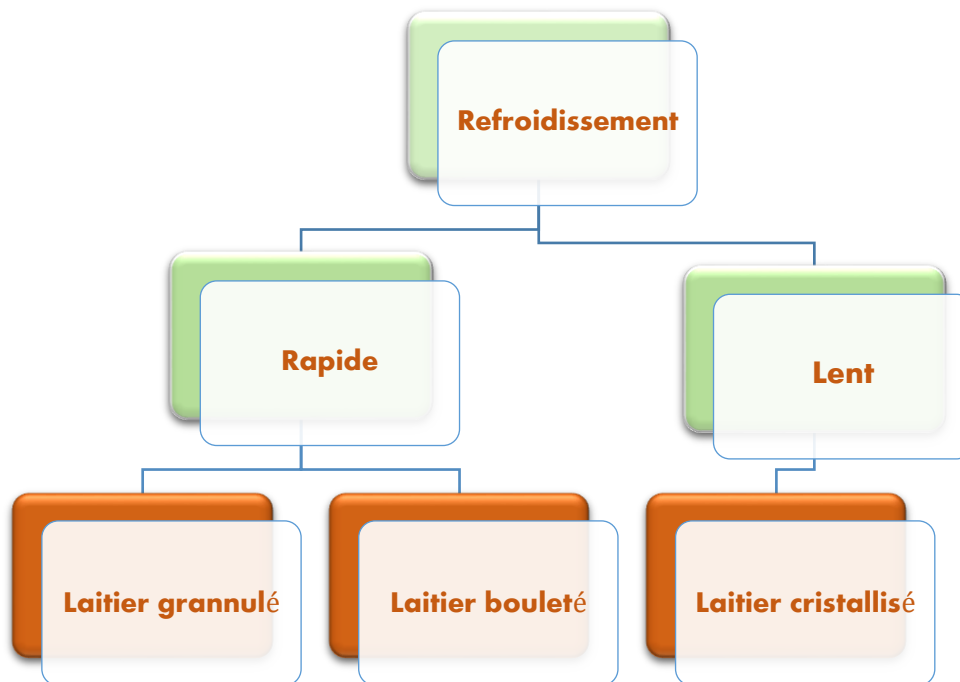


Figure II. 4: Les principales formes de laitier.

II-2-Historique du laitier de haut fourneau

Les sidérurgistes se préoccupaient de se débarrasser du laitier. L'accroissement des quantités de laitier produites posait le problème de son évacuation. Le refroidissement lent, qui était la règle, créait des blocs de grandes dimensions que la faiblesse des moyens mécaniques et de la manutention de l'époque rendait difficile à traiter.

Des solutions plus astucieuses que le refroidissement lent apparurent également : elles procurèrent un refroidissement rapide et une fragmentation poussée du laitier. Par la suite, elles s'avèrent améliorer fortement sa valorisation.

En 1853, l'anglais CUNNINGILIAM découvrit le principe de la granulation du laitier à l'eau. Mais, on ne savait toujours trop quoi faire du laitier. C'est en 1862 que l'Allemand Emil LANGEN directeur de la fonderie Friedrich fut à l'origine d'une découverte décisive :

Celle des propriétés hydrauliques du laitier sous sa forme granulée, propriétés que LARIOT présenta dès 1774. Très rapidement la granulation cessa d'être une manière pratique de faciliter la manutention du laitier pour devenir une méthode industrielle.

Ensuite différents types de granulation furent inventés et expérimentés, pour améliorer la constance des caractéristiques du laitier granulé, et augmenter sa réactivité.

En France VICAT avait remarqué l'analogie entre les compositions chimiques du ciment portland et du laitier, et pressenti l'utilisation de ce dernier dans la fabrication du ciment. Devant la concurrence aux ciments portland, la première introduction de laitier en cimenteries par l'Allemand PRUSSING en 1882.

C'est encore le hasard qui va être à l'origine de la découverte du laitier expansé peu après 1900, en Allemagne. En 1911, il fût breveté par C.H. SCHOL pour la fabrication de briques légères. Dans ce brevet d'origine, des jets d'air sous pression ajoutent leur effet à celui de l'eau vaporisée.

Le procédé SCHOL fut ensuite complété par le brevet KINNEY-OSBORNE, où des jets de vapeur s'ajoutent à ceux d'eau et d'air comprimé. Plus simplement, le brevet GALLAI HATCI-IARD prévoit l'expansion grâce à un système de simples jets d'eau sous pression. La production de laitier expansé se développa rapidement en Allemagne dès avant 1914 et de manière importante. En Angleterre, c'est en 1934 que démarra La production industrielle. En France c'est en 1952 que la SEXLAL mit en route son unité de production.

La société PONT — MOUSSON manufacturé un tel produit jusqu'en 1985. Depuis il n'existe plus en France de production du laitier expansé.

Le bouletage constitue une nouveauté en matière de traitement du laitier de haut fourneau développé au Canada à partir de 1968 par National Slag Limited. Il en résulte un laitier comparable au laitier granulé, mais à granulométrie très étalée.

D'abord, expérimenté en France par UNISOR à DUNKERQUE en 1973, elle a été appliquée à grande échelle chez SOLMER, dans son usine de FOS- SUR — MER mise en route en 1974.

Le dernier en date, des modes de traitement du laitier a été étudié par PONT AMOUSSON SA. À partir de 1983 puis breveté. Ce produit, commercialisé sous le terme SOLAIPAM, peut être utilisé comme granulats légers ou comme liant après pré broyage. [21]

II-2-1-Présentation d'un haut fourneau

Le haut-fourneau est un réacteur thermo-chimique à cuve verticale qui assure la réduction, la fusion et la carburation des oxydes de fer en fonte. Cette transformation est assurée par le carbone. Outre la fonte. En général, une petite moitié de la production de gaz est utilisée au haut fourneau lui-même pour le chauffage du vent dans les régénérateurs thermiques. Le solde (laitier) est valorisé pour l'utiliser dans le domaine de travaux publics et génie civil. [23]

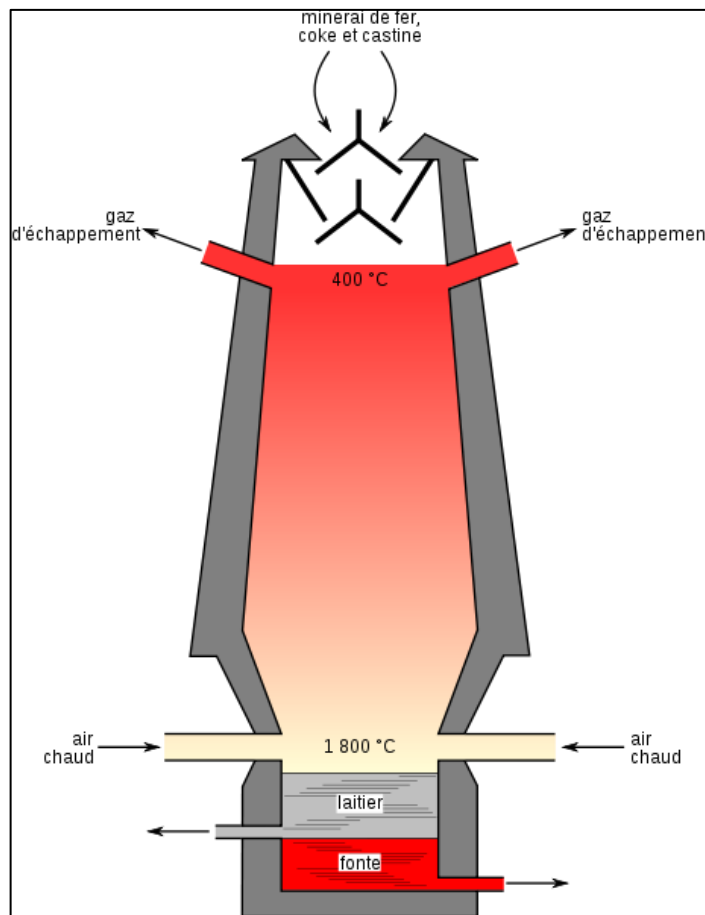


Figure II. 5: Coupe schématique d'un haut fourneau.

II-3-Fabrications et traitements des différentes formes de laitiers

Dans le haut fourneau, en plus du minerai de fer et du coke, on introduit un fondant, généralement à base de chaux, pour abaisser le point de fusion de la gangue et permettre ainsi au minerai de s'extraire à une température de 1400 à 1500 (°C). Les oxydes de la charge non transformés en métal constituent le laitier. Le laitier est évacué du haut fourneau à l'état liquide, à la température de fusion de la gangue, surnageant la fonte par différence de densité. [23]

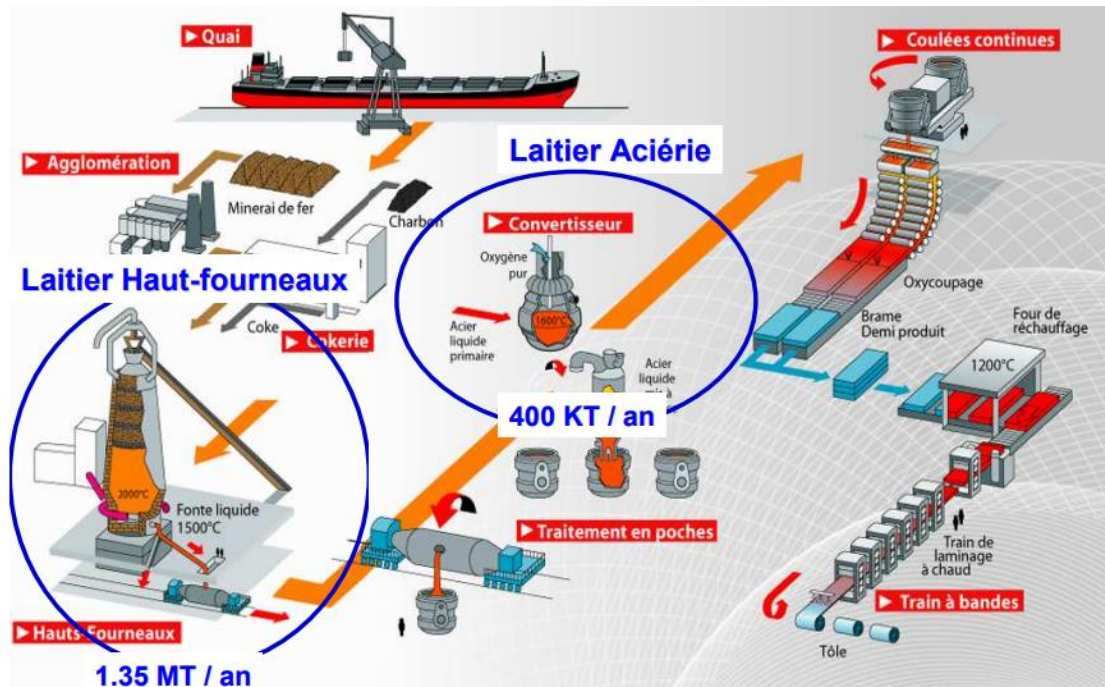


Figure II. 6: Procès de fabrication du laitier.

II-3-1-laitier cristallisé

Est produit à partir d'un laitier liquide à 1300°C /1500°C qui est évacué immédiatement en poche à laitier, dès la sortie du haut-fourneau vers des zones spécifiques nommées crassiers, pour y être déversé, coulée après coulée. Il s'y refroidit lentement, se transformant ainsi en roche dure artificielle. Le laitier cristallisé, chimiquement stable, est destiné à être concassé. Ses constituants sont essentiellement des silicates et des silico-aluminates de calcium. Les laitiers de haut-fourneau cristallisés permettent l'élaboration de granulats au sens de la norme française XP P 18-545 et des normes européennes granulats (NF EN 12620, 13242, 13043 et 13383). [21]

II-3-2-laitier vitrifié [10]

Est brutalement refroidi à l'eau (trempé), il présente une structure vitreuse désordonnée, susceptible, sous certaines conditions, d'évoluer vers une forme cristalline stable en

développant des résistances mécaniques, comme le ferait un ciment. Les laitiers de haut-fourneau vitrifiés possèdent des propriétés hydrauliques mises à profit pour les formulations des ciments ou directement dans le traitement des assises de chaussées. Seul le procédé de granulation est utilisé à ce jour : il aboutit à la production de laitier granulé. Le refroidissement se fait en bassin ou par jet d'eau sous pression. Sur certains sites comme à Dunkerque, c'est un autre procédé de refroidissement qui est utilisé, le système INBA (brevet de refroidissement à apports hydriques contrôlés avec tambour de déshydratation et recyclage d'eau).

Ensuite, les différents types de granulations furent inventés et expérimentés pour :

- Améliorer la constante des caractéristiques du laitier granulé.
- Augmenter sa réactivité.
- Diminuer la consommation d'eau qui est importante (8 à 10 m³ /t de laitier)

Traitements de sol argileux, remblais, merlons, colonnes ballastées, plate-forme, pistes, GNT, GNT mixte (avec ajout de laitier de haut fourneaux, enrochements terrestres, ...)[21]

	Fonte Thomas de Lorraine (%)	Fonte Hématite du Nord (%)
FeO	0,5-1,0	0,9
SiO₂ (oxyde de silicium)	32-35	35
CaO (oxyde de calcium ou chaux)	41-45	36,5
MnO (oxyde de manganèse)	0,5-1,0	0,8
MgO (oxyde de magnésium)	4-6	9,5
P₂O₅ (pentoxyde de phosphore)	0,1-0,5	0,05
Al₂O₃ (oxyde d'aluminium)	15-17	13,5
CaO+ MgO/ SiO₂+ Al₂O₃	0,9-1,1	0,95
S (soufre)	0,5-1,0	1,0
CaO/ SiO₂	1,2-1,4	1,05

Figure II. 7: Composition chimique de deux types de laitier. [21]



Figure II. 8: Les types de laitiers.

II-4-Utilisation des laitiers de haut fourneau

II-4-1-En cimenteries

L'emploi du laitier granulé en cimenterie est doublement important, car il permet à la fois des économies considérables d'énergie (réduction du combustible de 30 à 40 %), et permet d'obtenir des ciments présentant des propriétés variées.

Le laitier peut produire un liant hydraulique de plusieurs façons.

- Premièrement, il peut être mélangé à du calcaire et être utilisé comme matière première pour produire du ciment Portland par le procédé à sec. Le clinker obtenu à partir de ces matériaux est souvent utilisé avec le laitier dans la fabrication du ciment portland au laitier.

Cette utilisation du laitier est économique (car la chaux est présentée sous forme de CaO de sorte que l'on n'a plus à fournir l'énergie nécessaire pour la décarbonatation.

- Deuxièmement, dans la plupart des pays, le laitier granulé et broyé est utilisé dans le ciment portland comme ajout pour fabriquer des ciments portland au laitier. Troisièmement, le laitier du haut fourneau granulé broyé à une finesse appropriée peut être utilisé seul comme liant mais en présence d'un catalyseur à base d'alcalin. [21]

II-4-2-Confection des bétons

Dans un béton, le squelette granulaire (sable et granulats naturels peuvent être ; remplacé par le laitier vitreux et le laitier cristallisé concassé respectivement). Le laitier concassé forme d'excellent granulats pour le béton.

De même le laitier granulé entre dans la confection des bétons légers (bétons cellulaires), et les briques de laitiers. [21]

II-4-3-Les travaux routiers

Les utilisations concernent la construction des chaussées, des routes, autoroutes et les assises où on peut utiliser soit le laitier granulé où le laitier concassé. [21]

II-5-Les propriétés chimiques physiques et minéralogiques du laitier

II-5-1-analyses chimiques élémentaires

Le laitier contient essentiellement quatre composés dont l'expression en oxydes représente 95 à 97 % des constituants du laitier : chaux (CaO), silice (SiO₂), alumine (Al₂O₃), magnésie (MgO). Les autres phases sont des oxydes secondaires (FeO, MnO) et des composés sulfurés présentés dans le tableau suivant :

Tableau II. 4: Composition chimique élémentaire du laitier de haut fourneau. [21]

Composés	%
CaO (oxyde de calcium ou chaux)	40 à 48
SiO ₂ (oxyde de silicium)	32 à 41
Al ₂ O ₃ (oxyde d'aluminium)	9 à 18
MgO (oxyde de magnésium)	1 à 9
MnO (oxyde de manganèse)	0.4 à 0.7
FeO (oxyde de fer)	0.2 à 1
S (soufre)	0.6 à 1.5

Le Tableau représente les compositions chimiques moyennes de quelques laitiers :

Tableau II. 5: Composition chimique moyenne du laitier de haut fourneau (Michard et Javelle 1988). [21]

Composés	Fonte de Thomas de Lorraine %	Fonte Hématite du Nord %
FeO	0.5-1	0.9
SiO ₂	32-35	35
CaO	41-45	36.5
MnO	0.5-1	0.8
MgO	4-6	9.5
MnO	0.1-0.5	0.05
P ₂ O ₅	15-17	13.5
Al ₂ O ₃	0.9-1.1	0.95
CaO+MgO/Al ₂ O ₃ +SiO ₂	0.5-1	1
S	1.2-1.5	1.05

Une classification chimique est proposée par les normes P 18 302 et NF EN 14227-2. Elle repose sur le calcul d'un paramètre, le produit C.A, dans lequel C représente la teneur en CaO et A la teneur en Al₂O₃. Ce produit représente une réactivité potentielle du laitier, mais cette dernière propriété est également influencée par la teneur en fines et par le taux de vitrification du produit.

Trois types de laitier sont définis selon leurs caractéristiques chimiques en fonction de la valeur du produit C.A [21] .dans le tableau suivant :

Tableau II. 6: Classification des laitiers selon le produit CA. [21]

Produit C. A	Type (NF EN 14227-2)	Type (P18 302)
>550	CA1	T (Thomas)
425 à 550	CA2	H (Hématite)
<425	CA3	A (Autre)

Le diagramme de Keil, diagramme triangulaire représentant le système ternaire chaux-silice-alumine (Figure 6), permet de situer le laitier de haut-fourneau par rapport à d'autres liants utilisés en technique routière. Ce diagramme montre que les laitiers ont une composition relativement proche de celle du clinker du ciment Portland, même si celui-ci ne nécessite qu'un apport d'eau pour déclencher son hydraulicité, alors que le laitier doit être activé par un apport chimique.

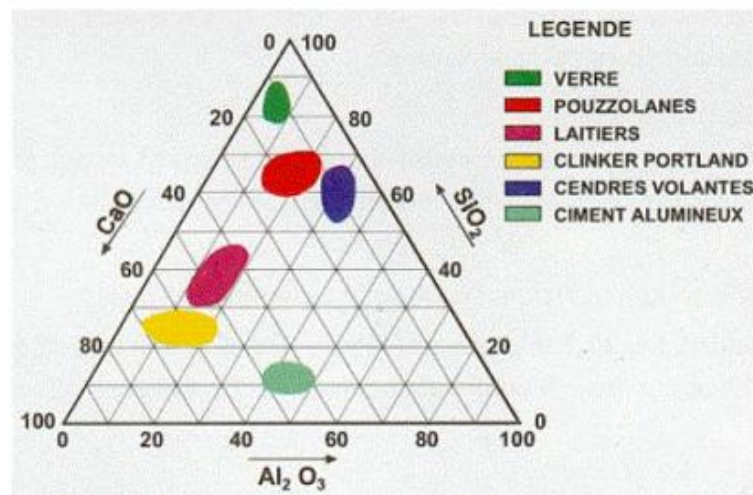


Figure II. 9: Diagramme de Keil. [21]

II-5-2- Caractéristiques minéralogiques

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. [21]

II-5-2-1-Laitier cristallisé

Obtenu par refroidissement lent du laitier en fusion, le laitier cristallisé est composé de constituants cristallisés, essentiellement de silicate ou de silico-aluminate de chaux ainsi que des oxydes, des sulfures et exceptionnellement des nitrures issus essentiellement de la gangue et des fondants utilisés dans la matière première (minerai, fonte, acier...) [21]

Tableau II. 7: Constituants des laitiers cristallisés. [21]

Désignation	Formulation minéralogique
Classe de silicate	
Méililite (solution solide de deux pôles minéraux : Gehlenite et Akermanite)	2 CaO – Al ₂ O ₃ – SiO ₂ 2 CaO – MgO – 2 SiO ₂
Merwinite	3 CaO – MgO – 2 SiO ₂
Silicate bicalcique	2 CaO – SiO ₂
Rankinite	3 CaO - SiO ₂
Wollastonite	CaO - SiO ₂
Forsterite	2 MgO - SiO ₂
Enstatite	MgO - SiO ₂
Monticelite	CaO – MgO - SiO ₂
Anorthite	CaO – Al ₂ O ₃ – 2 SiO ₂
Diopside	CaO – MgO – 2 SiO ₂
Leucite	(K ₂ O – Na ₂ O) Al ₂ O ₃ - 4 SiO ₂
Augite (silicate complexe)	(Ca – Mg – Fe – Ti – Al)
Classe des oxydes	
Spinelles	MgO – Al ₂ O ₃ FeO – FeO ₂
Perowskite	CaO – TiO ₂
Classe des sulfates	
Oldhamite	CaS MnS FeS
Autre constituants possibles	Carbures – nitrures – thiosulfates alcalins...

II-5-2-2 Laitier vitrifié

L'analyse des phases par diffraction des rayons X (Alexandre et Sebileau, 1988) fait apparaître, pour le laitier vitrifié, des raies de phases cristallisées (méililite et merwinite). L'importance de la phase amorphe dépend du degré de vitrification : sur un laitier totalement vitrifié, seule la phase amorphe est représentée. [23]

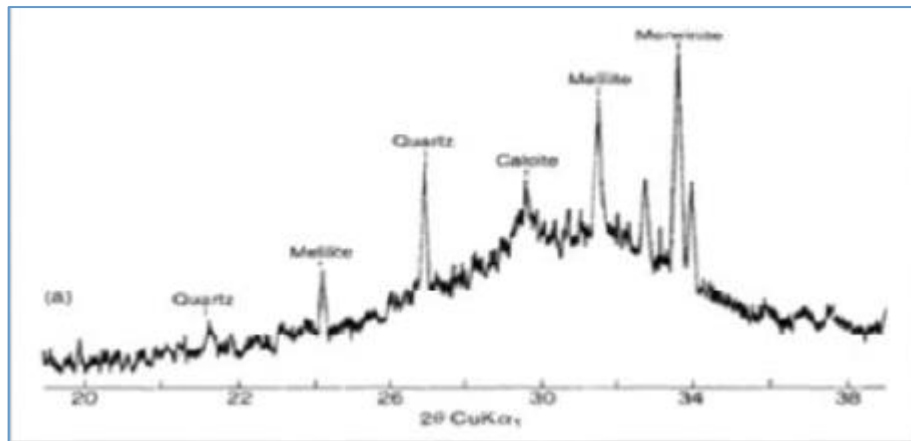


Figure II. 10: Diffractogramme des rayons X d'un laitier vitrifié. [23]

II-6- Conclusion

Dans la 2^{ème} partie de ce chapitre nous avons présentés Le laitier de haut fourneau est un coproduit de la fabrication de la fonte dont la composition chimique et minérale est stable dans le temps.

Le laitier de haut fourneau est devenu un matériau très important assez utilisé dans le monde, il faut ces preuves dans de grands projets réalisés par des pays très avancés, donc le doute ne subsiste plus, quant aux performances et avantages qu'il présente tel que :

- ✓ L'obtention d'une grande variété de matériaux ayant un meilleur rapport qualité /prix.
- ✓ La création d'emploi.
- ✓ Des économies d'énergie importante.
- ✓ La préservation des ressources naturelles et la protection de l'environnement.

CHAPITRE III

ETAT DE L'ART SUR LA VALORISATION DES SABLES SE DUNE ET LES DECHETS INDUSTRIELS

III-1-Introduction

Plusieurs travaux de recherche ont été effectués à travers le monde afin de valoriser le laitier de haut fourneau, le sable de dune et les déchets de céramique dans le domaine de génie civil. Ces matériaux ont été utilisés pour la stabilisation et l'amélioration des caractéristiques physicochimiques et mécaniques des sols et dans la fabrication des bétons. Ci-dessous sont présentés et commentés les résultats trouvés par les plus récents travaux antérieurs.

III-2-Domaine routier

III-2-1-Sable de dunes

Khalili khadidja : mémoire de master 2016

Dans cette étude Khalili Khadidja va étudier les caractéristiques du tuf de la carrière de BERBAA et sable de dune de BOUDA et leurs influences dans un mélange en différents pourcentages. L'objectif principal de cette étude est de déterminer la variation des caractéristiques physiques (γ_{dmax} , ω_{opt} , w_L , W_p , I_p et VBS ,) en fonction des pourcentages suivants :

- 90 % de tuf de sable de dunes.
- 80 % de tuf +20 % de sable de dunes.
- 70 % de tuf + 30 % de sable de dunes.
- 60 % de tuf +40 % de sable de dunes.

Essai Proctor modifié :

1. Tracé des courbes Proctor modifiés :

Les figures suivantes (III.1, III2, III3, III4) montrent la variation de la teneur en eau W en fonction du poids volumique sec γ_d .

Pour les différents mélanges, les résultats montrent que l'ajout de sable de dunes tend à améliorer les caractéristiques optimales de compactage des mélanges en comparaison à celles du tuf sans ajout.

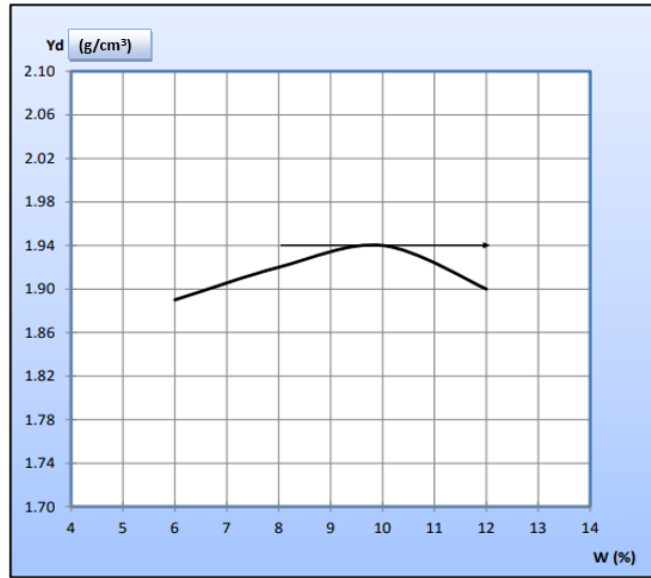


Figure III. 1: Courbe Proctor modifié (90% Tuf+10% sable de dune).

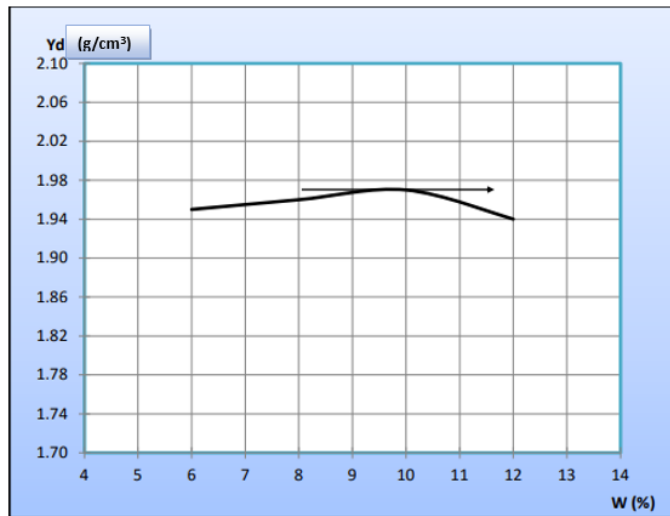


Figure III. 2: Courbe Proctor modifié (80% Tuf+20% sable de dune).

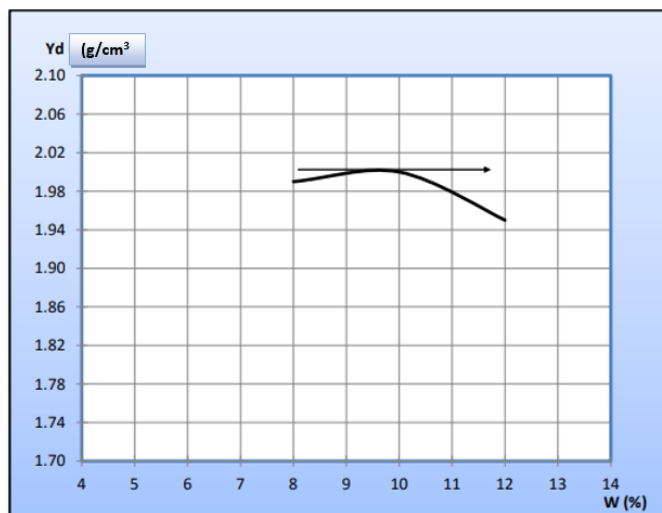


Figure III. 3: Courbe Proctor modifié (70% Tuf+30% sable de dune).

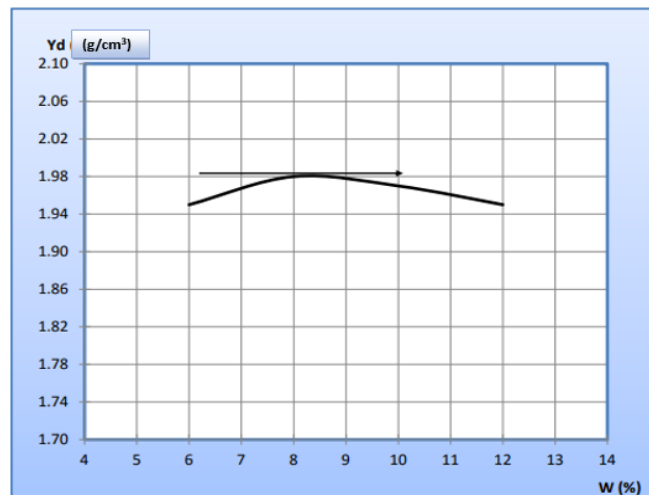


Figure III. 4: Courbe Proctor modifié (60% Tuf+40% sable de dune).

Comparaison des résultats :

Les essais Proctor Modifié ont été faits selon la norme NFP94-093 pour les différents mélanges Tuf/Sable de dune. Le Tableau III.1 indique les valeurs de masse volumique sèche et de teneur en eau correspondantes à l'optimum Proctor Modifié pour les différents mélanges.

Tableau III. 1: Caractéristiques de compactage et de portance

Essai	Proctor modifié		Portance	
	γ_{dmax} (g/cm ³)	W_{opt}	I CBR immédiat	I CBR imbibé
Tuf	1,93	10,7	88,34	34,2

Tableau III.2 représente les résultats de variations de la densité et la teneur en eau optimum après l'ajout du sable de dune :

Tableau III. 2: Influence de l'ajout de sable de dunes sur la densité sèche γ_{dmax} et la teneur en eau W_{opt} .

	100% Tuf	90% Tuf + 10% sable de dunes	80% Tuf + 20% sable de dunes	70% Tuf + 30% sable de dunes	60% Tuf + 40% sable de dunes
γ_{dmax} (g/cm ³)	1,93	1,94	1,97	2,00	1,98
W_{opt} %	10,7	10	9,9	9,8	7,7

La variation de la masse volumique sèche γ_{dmax} et W_{opt} du tuf et tuf + un pourcentage de sable des dunes est présenté sur la courbe suivante :

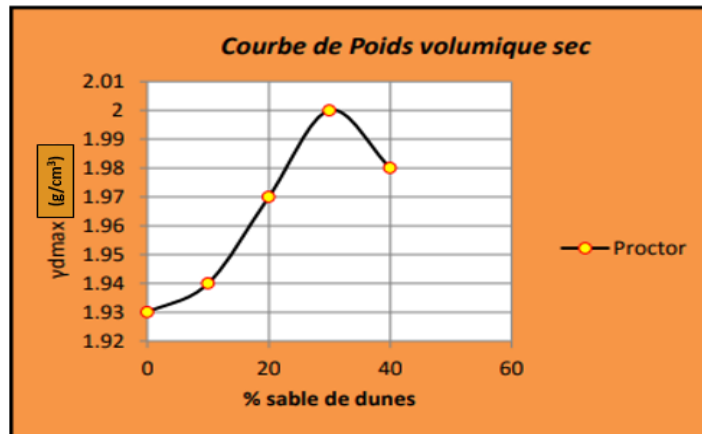


Figure III. 5: Variation de la densité sèche en fonction du pourcentage de sable de dunes.

On remarque que plus on augmente le pourcentage de sable des dunes la valeur du poids volumique sec à l'optimum augmente, par contre la teneur en eau optimale.

Tracé des courbes CBR :

L'essai de portance est réalisé conformément à la norme NFP 94-078 pour les différents mélanges Tuf/Sable de dunes. L'indice CBR est déterminé immédiatement, juste après le compactage. Nous avons suivi le même protocole de l'essai CBR pour les mélanges suivants :

- 90 % de tuf + 10 % de sable de dunes ;
- 80 % de tuf + 20 % de sable de dunes ;
- 70 % de tuf + 30 % de sable de dunes ;
- 60 % de tuf + % de sable de dunes.

Les figures suivantes III.6 et III.7 montrent la variation de la force de piston en fonction de son enfoncement.

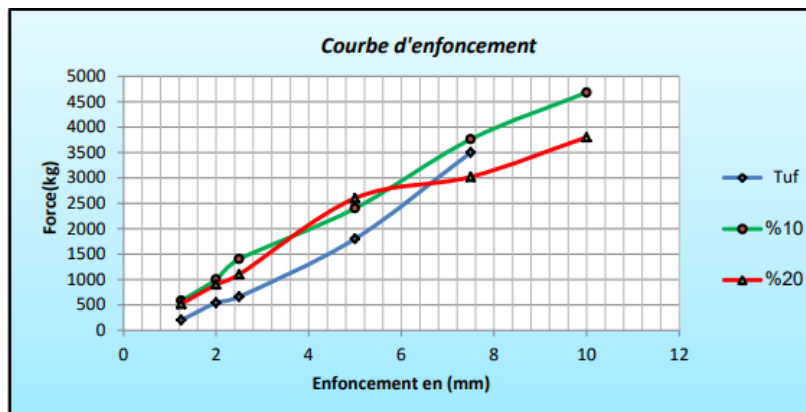


Figure III. 6: Variation de la force du piston en fonction de son enfoncement (mélanges avec 10% et 20% du sable de dunes).

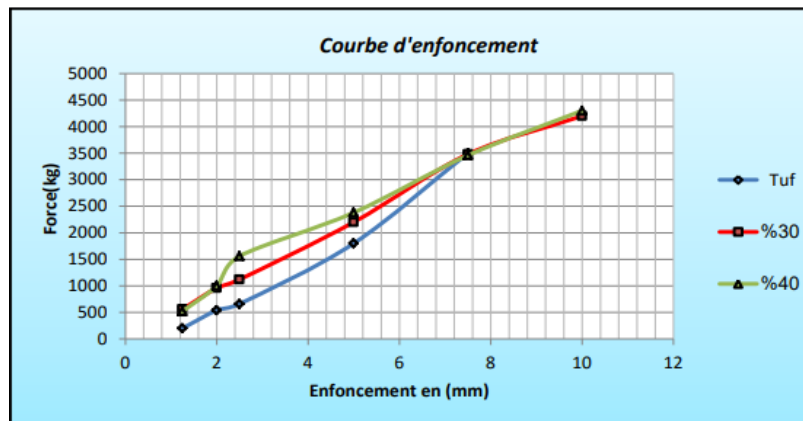


Figure III. 7: Variation de la force du piston en fonction de son enfoncement (mélanges avec 30% et 40% du sable de dunes)

La Figure III.8 rassemble les résultats de l'indice CBR, sous forme de courbes I CBR, pour les différents pourcentages de sable de dunes

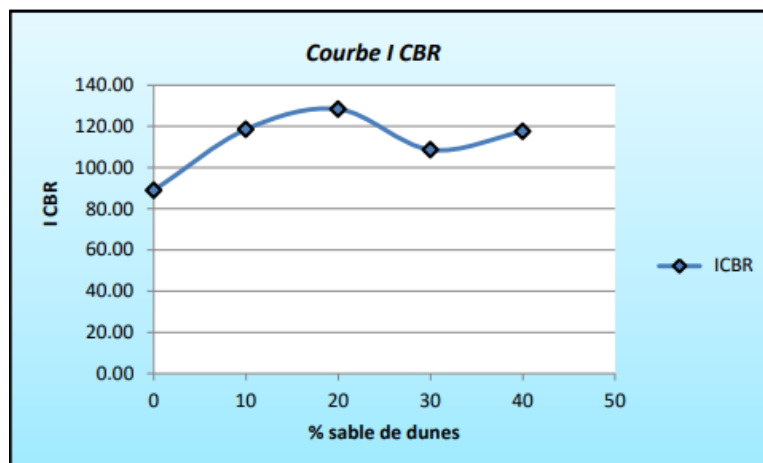


Figure III. 8: Courbe de Variation de l'indice de portance du I CBR en fonction des différents pourcentages de sable de dunes.

Les résultats de figure III.8 montrent que pour un pourcentage de sable de dunes, la Variation de l'indice de portance du I CBR augmente de façon très significative avec l'augmentation de sable de dunes jusqu'à 20% et diminue pour 30%.

Le tableau III.3 récapitule les caractéristiques physico-mécaniques et des matériaux étudiés du pourcentage du sable de dunes

Résumé de l'étude des mélanges Tuf + sable de dunes :

Tableau III. 3: Influence du Pourcentage de sable de dunes sur les propriétés physico-mécaniques

% sable de dune	IP%	W% _{optm}	γ_{dmax} (t/m ³)	I CBR Immédiat	VBs	R _c (kg/cm ²) (c=100)
0	9.70	10.7	1.93	88.82	0.6	23.42
10	6.29	10	1.94	118.43	0.55	22.85
20	5.49	9.9	1.97	128.30	0.4	16.28
30	5.48	9.8	2.00	108.56	0.3	13.42
40	5.30	7.7	1.98	117.44	0.25	10.28

D'après le tableau III.3 qui présente les résultats obtenus, on remarque que les essais de compactage ont montré une nette amélioration de la densité sèche liée à une diminution de la teneur optimale de l'eau de compactage. La portance elle augmente jusqu'à un taux de 25% de sable de dunes. La résistance à la compression simple, seule caractéristique mécanique qui se voit diminuer avec l'ajout de sable, cela peut s'expliquer que la cohésion du sable est tellement faible voir même nul, que les éléments fins du tuf n'arrivent pas à se coller aux grains de sable vu leur nature siliceuse. Ce point faible peut être résout par un éventuel traitement avec de la chaux ou au ciment.

III-2-2-Sable de dunes et laitier de haut fourneau

Djallal Eddine Telmat, Hayet Cherfa, K. Ait Mokhtar aout 2013 :

Dans leur travail expérimental, Il s'agit de tester un sable laitier (SL) à base de sable de dune traité au laitier de haut fourneau, la caractérisation des matériaux constituant ce mélange sera étudiée, le sable laitier sera formulé, en laboratoire, à différents pourcentages de laitier puis ses caractéristiques mécaniques (indice portant immédiat IPI, compression simple et traction) seront étudiées. [25]

Les matériaux utilisés :

Sables de dunes : fraction de 0/2mm provenant de BOU-SAADA (M'sila).

Le laitier : laitier granulé de fraction 0/5mm provenant de du complexe sidérurgique d'El-Hadjar (Annaba).

La chaux : C'est une chaux éteinte qui joue le rôle d'activant du laitier et provenant de la wilaya de Ghardaïa.

Sable correcteur : C'est un sable de carrière de fraction 0/6 mm.

Les courbes granulométriques des matériaux constituant le sable laitier sont représentées dans la figure III.9 ci-dessous :

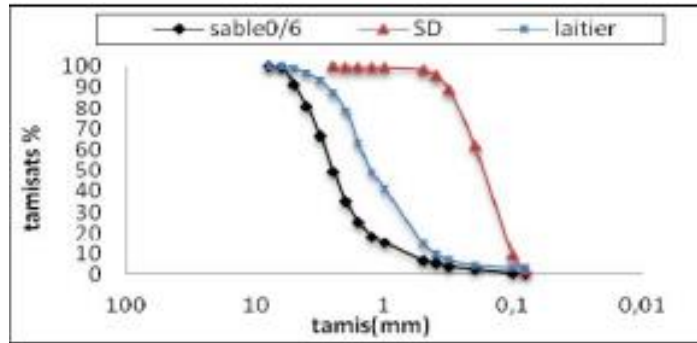


Figure III. 9: Les courbes granulométriques des constituants du SL.

Etude du mélange sable laitier :

Plusieurs formulations ont été réalisées en faisant varier les pourcentages du laitier, la figure 8 donne les courbes Proctor des formulations retenues en respectant les conditions de la stabilité immédiate, sachant que pour chaque mélange, 1% de chaux a été incorporé

Déterminations de l'indice portant immédiat (IPI) de sable laitier SL

Après avoir satisfait la première condition de la stabilité immédiate avant compactage, on va tester les formulations retenues vis-à-vis de l'indice portant immédiat et cela après la détermination des caractéristiques Proctor modifié. Pour mieux voir l'influence de l'ajout de laitier sur la stabilité immédiate des sables laitier, on a tracé la courbe qui donne l'indice portant immédiat en fonction de dosage en laitier et la courbe ainsi obtenue est donnée sur la figure III.10 :

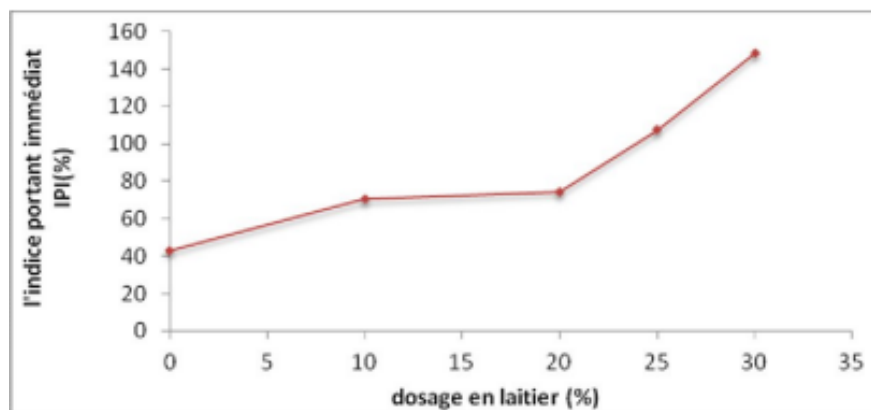


Figure III. 10: Évolution de l'indice portant immédiat en fonction de dosage en laitier.

Nous remarquons que l'indice portant immédiat augmente avec l'augmentation de la teneur en laitier sans pour autant atteindre un optimum avec les teneurs testées.

La résistance à la traction de sable laitier

Des séries de trois éprouvettes de diamètre 5 cm et de hauteur 10 cm, obtenues par compactage statique ont subi l'essai de traction à 90 et 180 jours. Les valeurs obtenues sont projetées en valeurs équivalentes à un an grâce à des coefficients empiriques donnés par la norme NF P 98-114-2, et sont calculés comme suit :

$$Rt\ 360j\ (\text{bars}) = Rt90j / 0.7\ (1)$$

Le tableau 2 donne les valeurs de la résistance à la traction du sable laitier pour les différents dosages en laitier à 360 jours.

Tableau III. 4: Les valeurs de la résistance à la traction à un an.

Laitier (%)	0	10	20	25	30
Rt 360 (bars)	1.46	3.07	4.07	6.05	6.64

Commentaire

Cette étude montre que l'incorporation progressive du laitier granulé améliore la portance et entraîne une augmentation des résistances mécaniques des sables laitier à travers le temps.

Il est évident que les résistances mécaniques à la compression simple et à la traction du sable traité à plusieurs pourcentages de laitier, sont meilleures comparées à celles du sable non traité (à 0% de laitier).

Ces résultats expérimentaux montrent qu'il est tout à fait possible de fabriquer un matériau tel que le sable laitier présentant des meilleures caractéristiques mécaniques dans les conditions Algériennes et avec des matériaux locaux tels que le laitier d'El Hadjar et le sable de dune qui se trouve en quantités immenses.

III-2-3-Déchets de céramiques

ENZARTIHA Ilyas GOUICHICHE Youcef mémoire Master 2018 :

A travers cette étude Ilyas et Youcef visionnent :

- Éliminer le problème des dommages routiers et assurer l'établissement de routes de haute qualité et une durée de vie plus longue.
- Utiliser autant de déchets que possible, en particulier les déchets de céramiques.
- Éliminer la pollution dans l'espace d'agriculture et zone côtière.
- Réduire les coûts par l'utilisation des déchets et minimiser la maintenance après l'utilisation de la route.

- Augmentation de la capacité portante du sol, la rigidité, imperméabilité, homogénéité, vieillissement, durabilité, prédiction de la résistance fonction du type de sol, par introduisant des déchets de céramique et de ciment dans l'amélioration du sol.

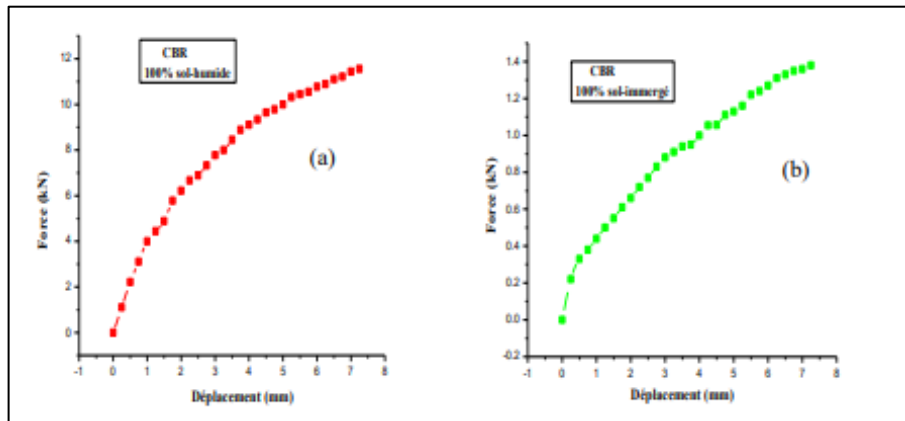


Figure III. 11: La force en fonction de déplacement (CBR 100% sol).

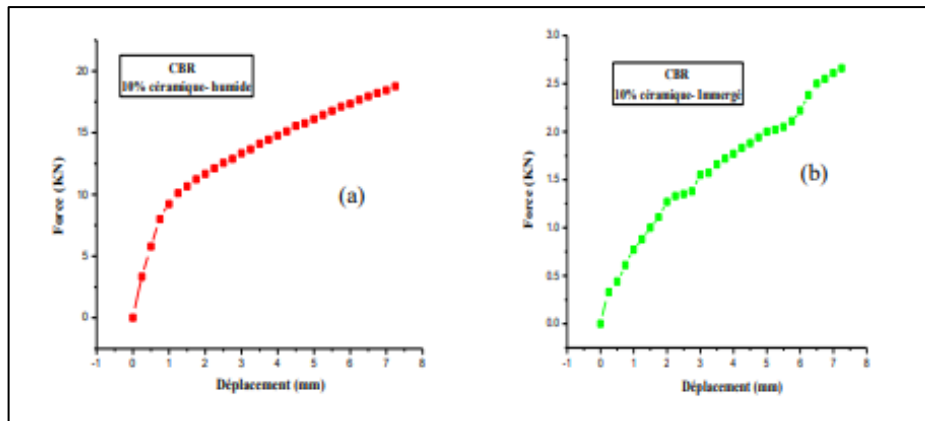


Figure III. 12: La force en fonction de déplacement (CBR sol + 10% déchet de céramique).

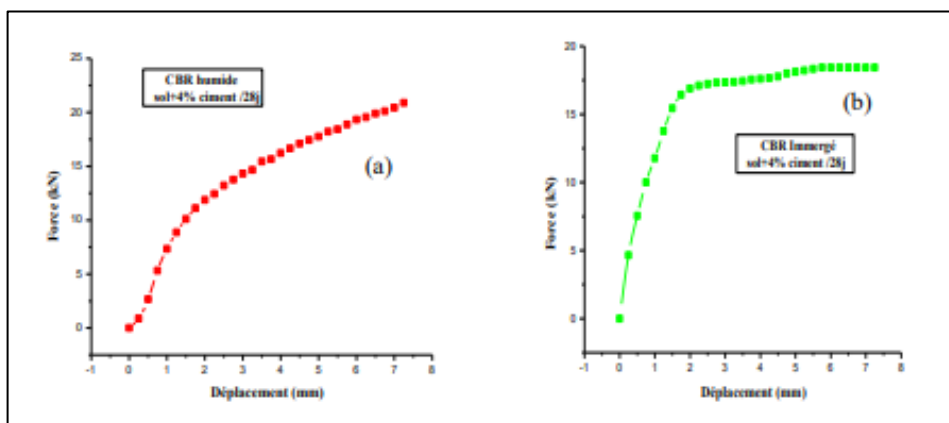


Figure III. 13: La force en fonction de déplacement (CBR sol+ 4% ciment).

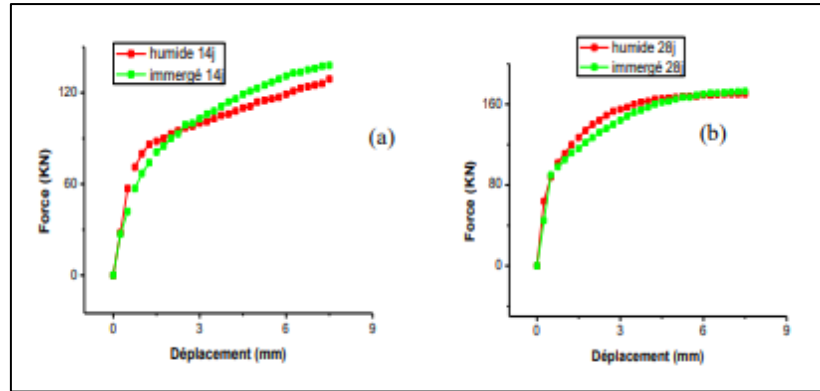


Figure III. 14: La force en fonction de déplacement (sol + 4% ciment +5% déchets de céramique).

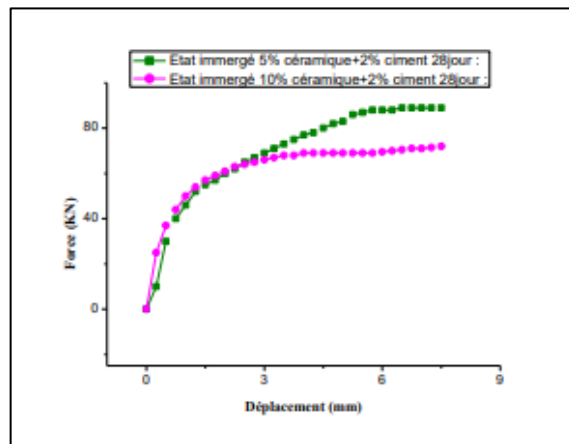


Figure III. 15: La force en fonction de déplacement (sol +2% ciment +5% et 10% déchets de céramique).

La Figure III.16 montre la force du sol traité avec 2% de ciment et 5% de céramique recyclée et 2% de ciment et 10% de céramique recyclée à 28 jours pour les deux conditions (humide et immergée) environ 4 fois pour le premier mélange et 3 fois pour le deuxième mélange. Qui peut conclure en utilisant 2% de ciment pour la stabilisation peut efficacité économique.

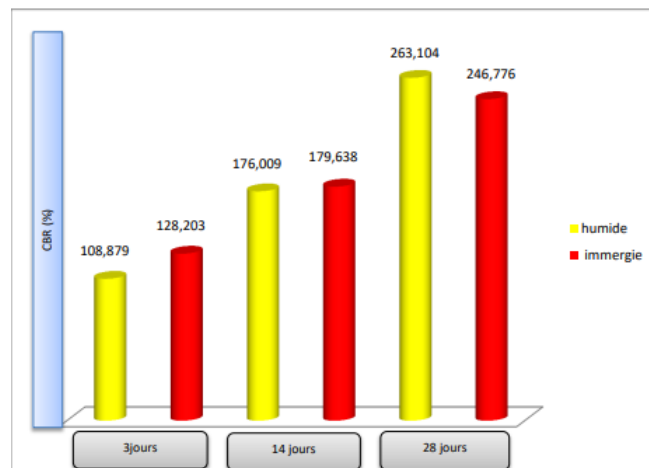


Figure III. 16: L'effet de (5% du déchet de céramique + 4% ciment) en fonction du temps on CBR.

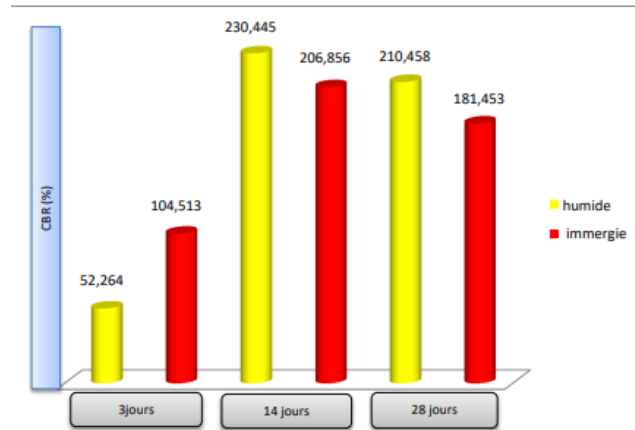


Figure III. 17: L'effet de 10% du déchet de céramique + 4% ciment) on CBR en fonction du temps.

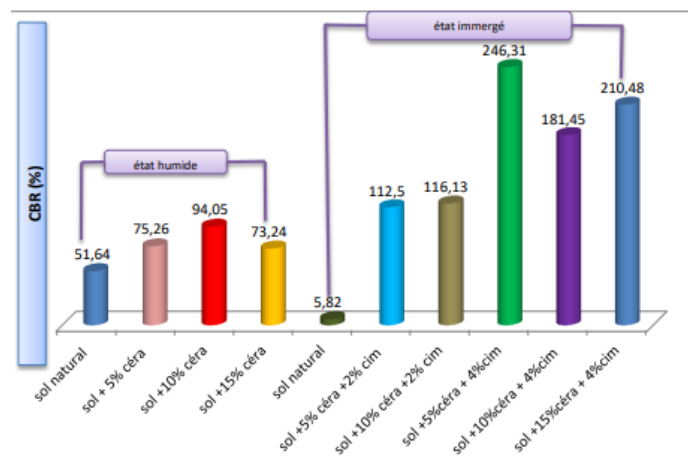


Figure III. 18: Résultat essai CBR (différents pourcentages du déchet de céramique et Ciment).

A partir de ces résultats, nous pouvons conclure que toutes les valeurs de CBR pour tous les mélanges sont supérieures à la valeur requise, seuls les échantillons de sol naturel dans l'état immergée la valeur de CBR très faible.

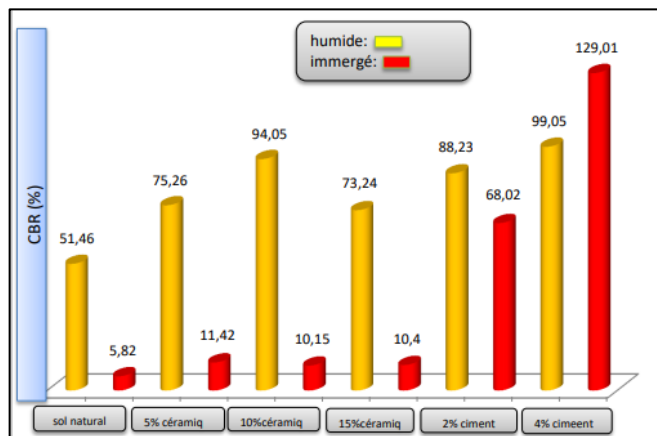


Figure III. 19: Résultat essai CBR (différents pourcentages du déchet de céramique et ciment).

Commentaire

Le traitement du sol avec 5%, 10 % et 15 % de déchets céramiques et 2%, 4% de ciment avec 5% et 10% de déchets de céramique permet améliorer les propriétés du sol. En augmentant la valeur CBR 94% en utilisant 10% de déchets de céramique, 129% en cas d'utilisation 4% de ciment et 246% en cas d'utilisation 4% de ciment avec 5% de céramique Figure III.19

Résultat essai CBR (différents pourcentages du déchet de céramique et ciment)

Hamla et Chabani mémoire 2017 :

L'objectif de cette étude est d'ajouter des déchets de céramique, de marbre, et du ciment pour améliorer les paramètres du sol tels que les propriétés physiques et mécaniques, comme les limites, les densités et la capacité portante. La bonne conception du mélange est le facteur important qui affecte la qualité des sols stabilisés. Les effets de différentes proportions de déchets de céramique, de marbre et de ciment sur les propriétés géotechniques des sols modifiés ont été étudiés expérimentalement. Les tests de laboratoire effectués dans le cadre de ce travail de recherche ont été la limite Atterberg, le compactage et le test de California Bearing Ratio.

Essai Proctor :

Le tableau suivant résume tous les résultats de l'essai proctor obtenu au niveau de laboratoire :

Tableau III. 5: Synthèse des résultats d'essais Proctor.

Déchet	$\gamma_{d \max}$ (g/cm ³)	ω_{OPM} (%)	Gain en $\gamma_{d \max}$ (%)
0 %	1.94	12.96	0
5 % céramique	1.95	11.15	1
10 % céramique	1.99	9.94	5
15 % céramique	1.95	11.49	1
20 % céramique	1.94	11.94	0
4 % Marbre	1.96	12.02	2
6 % Marbre	1.96	11.72	2
8 % Marbre	1.97	11.87	3
10 % Marbre	1.99	10.78	5
Sol + 3 % Ciment	1.96	12.25	2
Sol + 4 % Ciment	1.96	12.22	2
5 % céramique + 3 % Ciment	1.94	11.76	0
5 % céramique + 4 % Ciment	1.97	12.49	3
10 % céramique + 3 % Ciment	1.97	12.54	3
10 % céramique + 4 % Ciment	1.98	11.35	4
15 % céramique + 3 % Ciment	1.96	11.48	2
15 % céramique + 4 % Ciment	1.96	11.85	2

Essai CBR :

Les courbes suivantes représentent les résultats après l'ajout des déchets de marbres et de céramiques :

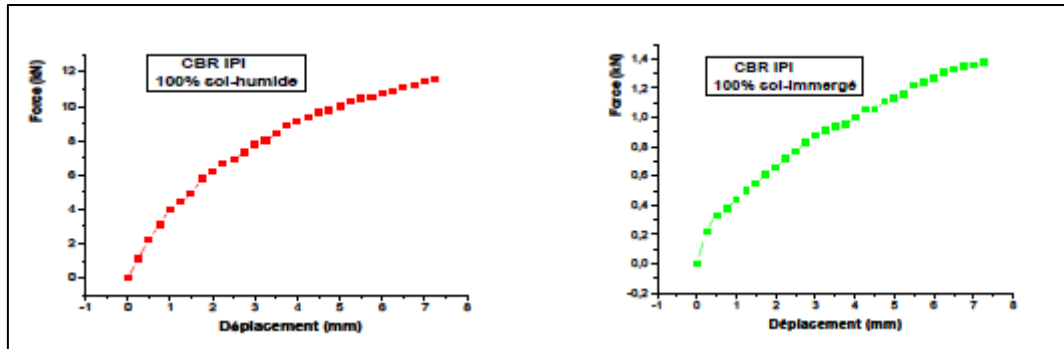


Figure III. 20: La courbe CBR 100% sol.

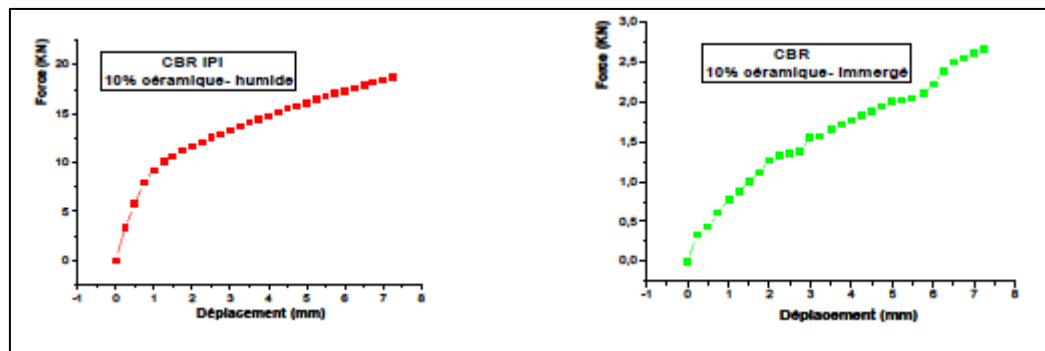


Figure III. 21: La courbe CBR 10% de déchets de céramiques

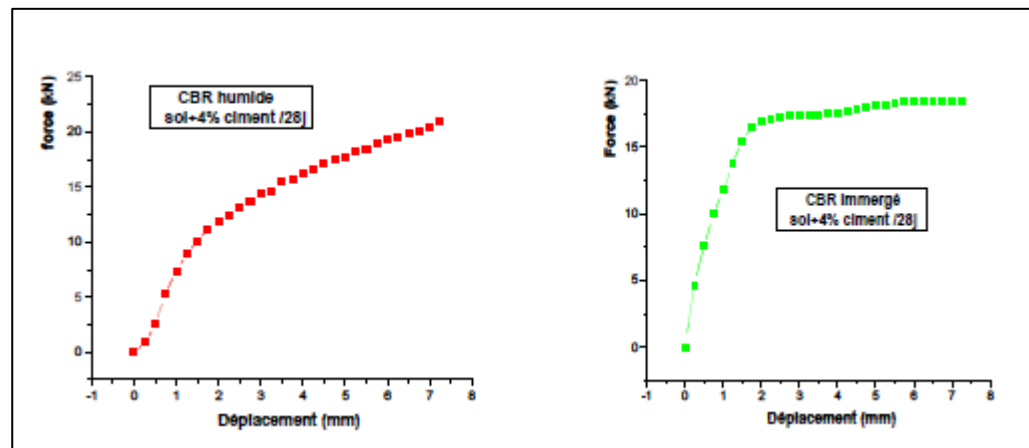
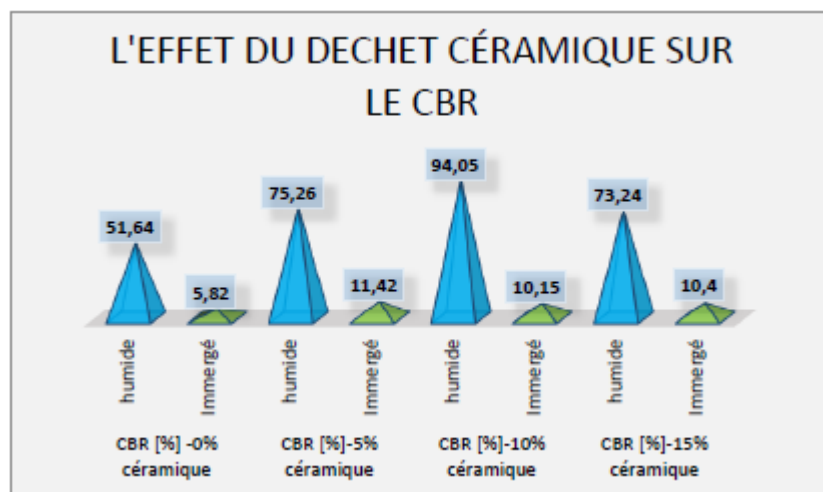
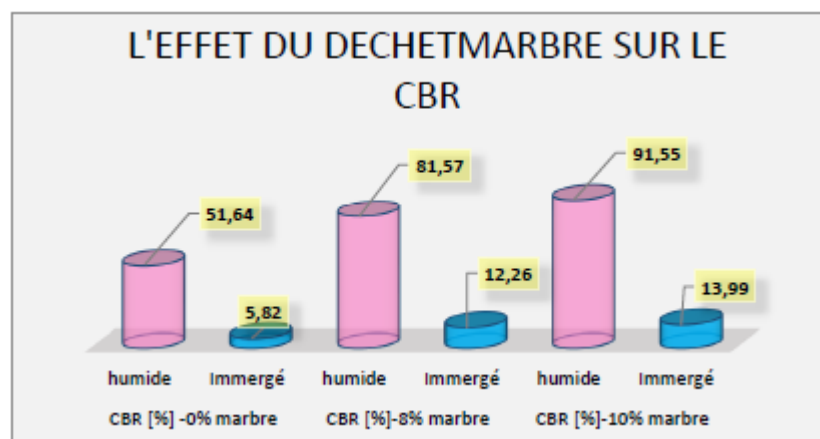


Figure III. 22: La courbe CBR 4% de ciment.

Tableau III. 6: Résultat essai CBR (différents pourcentages de déchets de céramique et de marbre)

Déchet (%)	CBR (%) - humide	CBR (%) - Immergé
0%	51.64	5.82
5% Céramique	75.26	11.42
10% Céramique	94.05	10.15
15% Céramique	73.24	10.40
8% Marbre	81.57	12.26
10% Marbre	91.55	13.99

**Figure III. 23:** Résultat essai CBR (sol + déchets de céramiques).**Figure III. 24:** Résultat essai CBR (sol + marbre).

L'amélioration de la portance du sol traitée (augmentation de CBR et IPI) est justifiée par la diminution du volume des vides dans le sol qui est due à la bonne distribution des particules du sol avec les particules fines de Traitement.

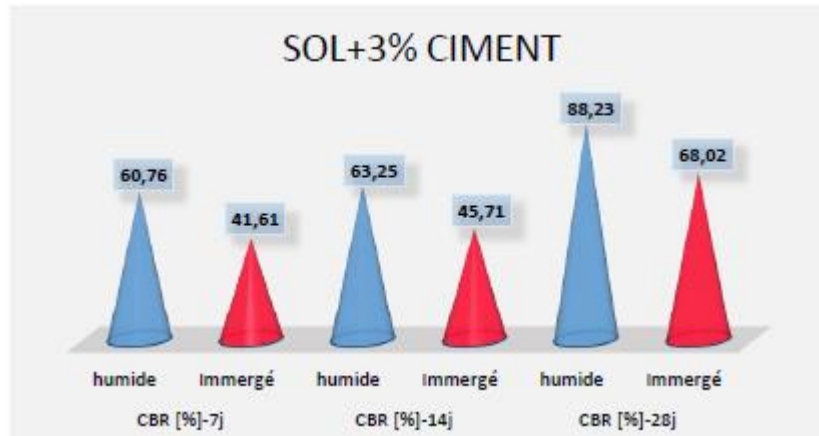


Figure III. 25: Résultat essai CBR (sol + 3% de ciment).

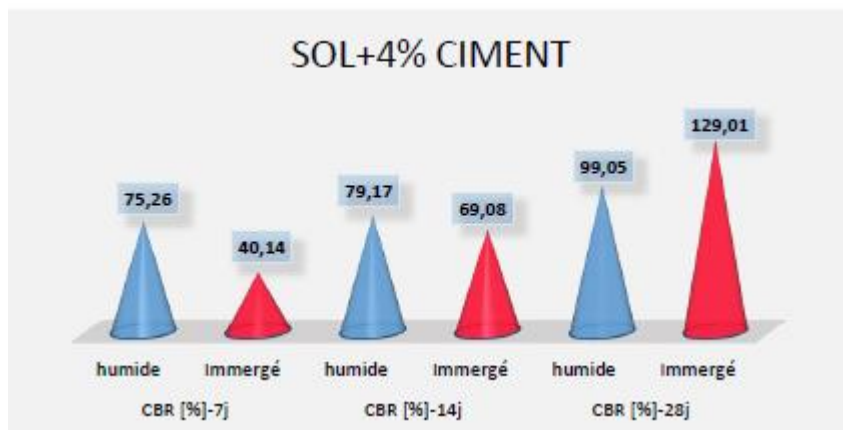


Figure III. 26: Résultat essai CBR (sol +4% de ciment).

Essai de tassement :

Le tassement est calculé à partir du déplacement mesuré pendant l'essai CBR les résultats sont comme suit :

Tableau III. 7: Résultat essai de tassement (sol + 4 % liant hydraulique).

H _{initial} (mm)	Lecture du comparateur		ΔH (mm)	H _{final} (mm)	Tassement (%)	
116.2	Sol non traité	24 h	24	0.24	115.96	0.20
		7j	21	0.21	115.99	0.18
	Sol traité (4% ciment)	14j	17	0.17	116.03	0.14
		28j	7	0.07	116.13	0.06

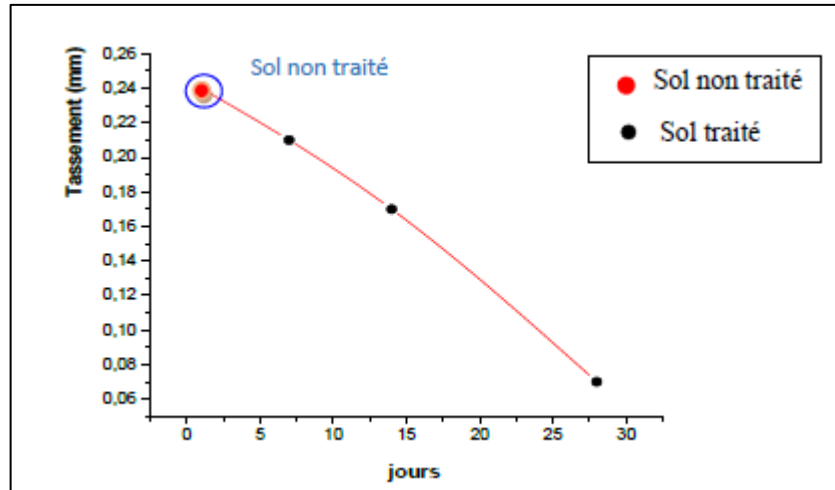


Figure III. 27: Tassement du sol traité à 4% du ciment.

Commentaire :

La stabilisation du sol avec déchet de céramique ou de marbre ne change pas son état, selon l'essai de limite d'Atterberg. Mais il influe sur les paramètres de la compacité de Proctor où l'utilisation de ces produits dans la masse du sol augmente la densité spécifique sèche maximale et réduit la valeur de la teneur en eau optimale. Il influence aussi sur la portance du sol ou ce déchet augmente la valeur du pourcentage du CBR dans les deux cas humide et immergé.

Le liant hydraulique (ciment), améliore et renforce le sol, il remplit les vides entre les particules avec un échange du squelette granulaire du sol traité.

III-3-Domaine du béton

III-3-1-Sable de dunes

Leila ZEGHICHI, Azzeddine LAHMADI, Zied BENGHAZI 09-12 Mai, 2012 :

Dans cette étude Leila Zeghichi et ses compagnons traitent l'effet des sables de dunes sans le béton autoplaçant qui est caractérisé par sa fluidité sans aucune nécessité de vibration (sans risque de ségrégation) en incorporant dans le béton une quantité élevée de fines, et en réduisant le rapport E/P par l'introduction des superplastifiants. La qualité des granulats est un paramètre très important. L'étude suivante traite la caractérisation du sable de dune, son influence sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton autoplaçant en traitant :

- L'influence de la quantité d'eau.
- L'influence du dosage en superplastifiant.

Afin d'optimiser une formulation du béton la plus adéquate aux différents matériaux locaux de la région de M'sila (Algérie).

Formulation du BAP :

La formulation des BAP a été faite d'après AFGC (Association Française de Génie Civil) [10] plusieurs mélanges sont préparés en variant E/C et le dosage en superplastifiants ; leur composition est indiquée au tableau III.8 :

Tableau III. 8: Composition de BAP préparés.

Composition	Désignation des bétons							
	BAP0 1	BAP0 2	BAP03	BAP04	BAP05	BAP06	BAP07	BAP0 9
G/S	01	01	01	01	01	01	01	01
E/C	0,50	0,50	0,50	0,50	0,55	0,55	0,55	0,55
F/C	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
E/L	0,40	0,40	0,40	0,40	0,44	0,44	0,44	0,44
% superplastifiants	01	1,5	1,75	02	01	1,5	1,75	02
Eau	200	200	200	200	220	220	220	220
Ciment	400	400	400	400	400	400	400	400
Calcaire	100	100	100	100	100	100	100	100
Gravier 3/8	425	425	425	425	425	425	425	425
Gravier 8/16	425	425	425	425	425	425	425	425
Sable de dunes	850	850	850	850	850	850	850	850
Superplastifiants	04	06	07	08	04	06	07	08

Les éprouvettes ont été confectionnées conformément aux normes en vigueur, se sont de différentes géométries selon le test effectué : $10 \times 10 \times 10$ cm pour l'essai de compression et 16×32 cm pour l'essai de fendage, elles sont conservées après démoulage dans l'eau à 20°C .

Les résultats sont indiqués sur les figures suivantes :

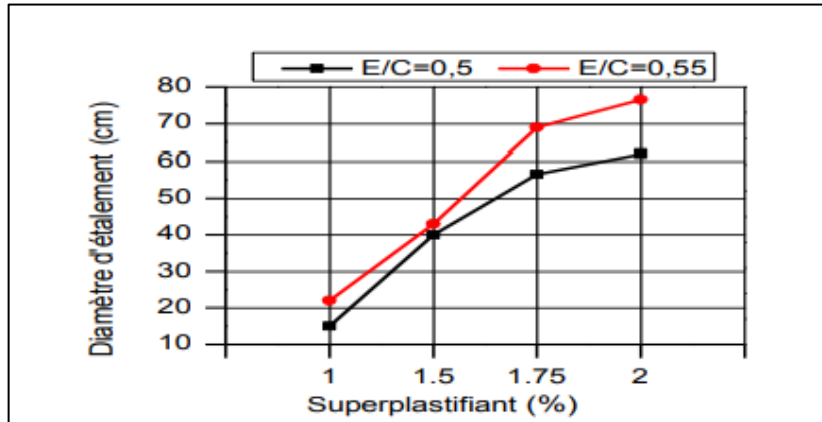


Figure III. 28: Diamètre d'étalement en fonction de E/C et du % en superplastifiant.

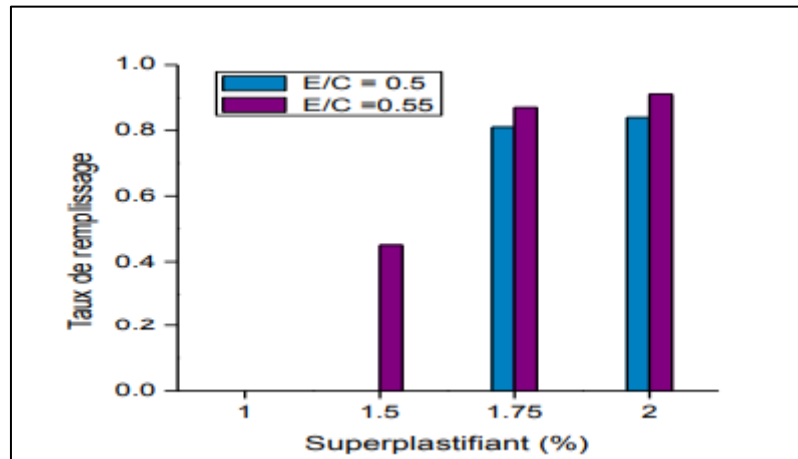


Figure III. 29: Taux de remplissage fonction de E/C et du % du superplastifiant.

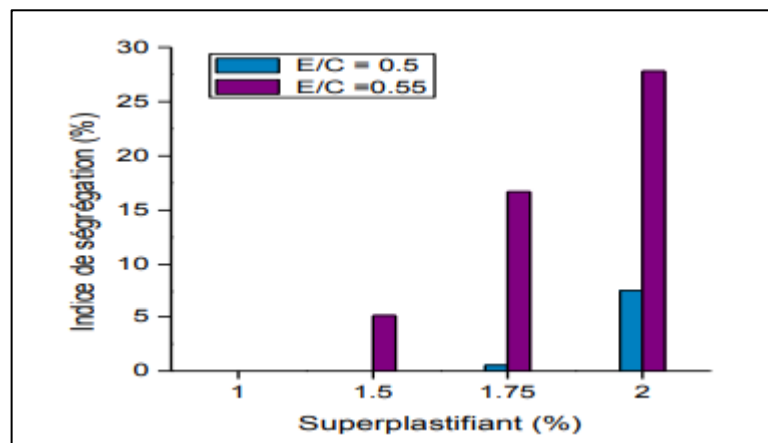
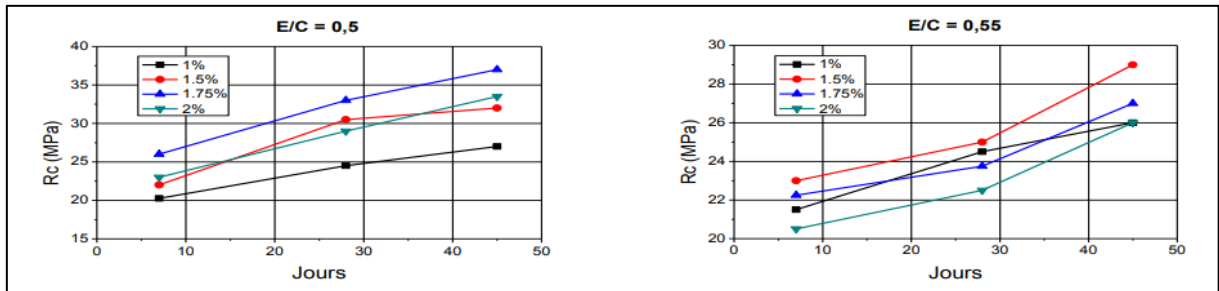


Figure III. 30: Indice de ségrégation en fonction de E/C et du % du superplastifiant.

État durci

- Résistance mécanique en compression :

La résistance en compression est estimée à 14 jours, 28 jours et 45 jours de durcissement. Les résultats obtenus sont représentés à la figure III.31 :



a. E/C = 0.5

b. E/C = 0.55

Figure III. 31: Evolution de la résistance à la compression en fonction du dosage en superplastifiant.

- Résistance en traction :

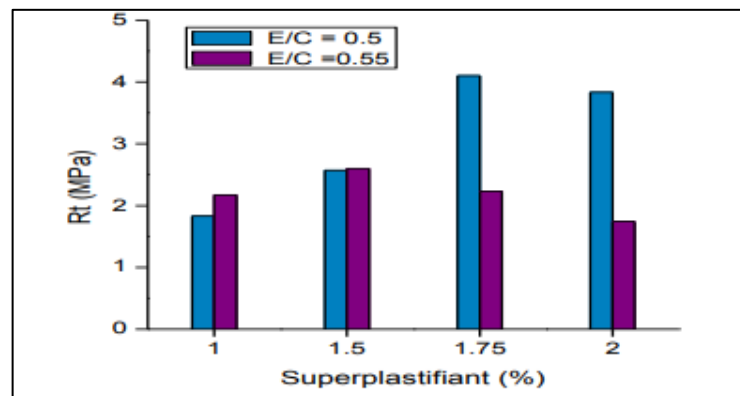


Figure III. 32: Résistance à la traction en fonction du dosage en superplastifiant.

Commentaire :

Le sable de dune, qui représente une réserve inépuisable dans le Sud Algérien, est couramment utilisé dans les travaux de construction en Algérie, un sable dont 50% des grains, ont un diamètre compris entre 0.125 et 0.315 mm, un module de finesse ne dépassant pas 1.6 exigeant ainsi une quantité importante d'eau de gâchage pour la confection des bétons, ce qui affecte le comportement mécanique de ces derniers.

III-3-2-Déchets de céramiques

HEBHOUB Houria, KHERRAF Leila, MOUATS Wassila, ABDELOUAHED Assia, BOUGHAMSA Wassila article publié le 09/01/2020 :

L'objectif principal du présent travail est de valoriser les déchets de céramiques dans la fabrication du béton en vue d'économiser les granulats ordinaires et d'éliminer les déchets par recyclage d'où la protection de l'environnement. Dans ce travail, une étude expérimentale a été entreprise afin d'étudier les modifications apportées sur un béton hydraulique par le remplacement partiel avec un taux de 15% d'un sable ordinaire par un sable de déchets de céramiques (chutes de faïences) et ce, à l'état frais (densité, ouvrabilité et air occlus) et à l'état durci (résistance en compression et en traction par flexion, scléromètre et ultrason, absorption par immersion et capillaire et pénétration des chlorures). Le choix de ce taux est basé sur des études antérieures [7, 9, 10], qui stipulent qu'il était possible d'obtenir un béton de meilleure qualité que le béton témoin en substituant des granulats fins avec divers proportions allant de 10% à 50% de matériau céramique sans préciser le comportement pour le taux de 15% qui fera l'objet de ce travail.

La formulation du mélange du béton témoin (BT) a été obtenue à l'aide de la méthode de Dreux-Gorisse avec les paramètres fixes dont le rapport E/C= 0.55, le dosage en ciment (350 kg/m³) et le squelette granulaire continu. La composition du mélange (BC) a été obtenue en remplaçant le sable ordinaire par 15% de sable déchets de céramiques.

La figure III.33 montre la différence de l'ouvrabilité entre le BT et BC :

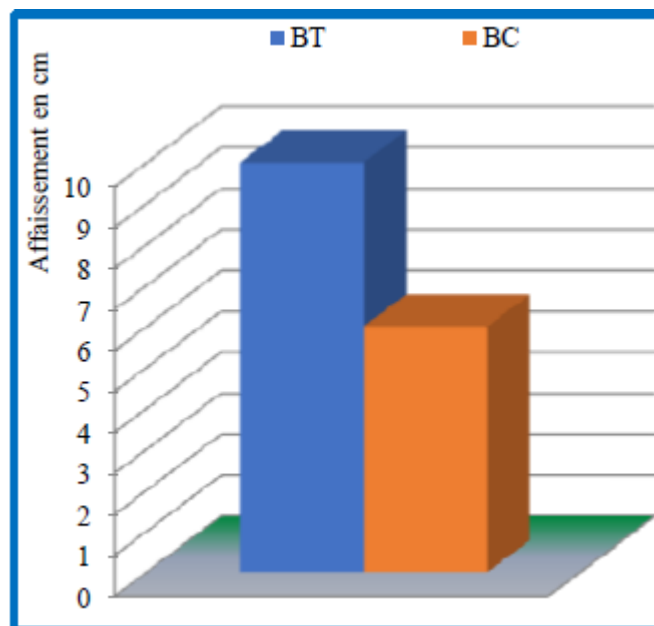


Figure III. 33: Comparaison de l'ouvrabilité des mélanges de BT et BC.

La figure III.34 montre la résistance à la compression et la figure III.35 la résistance à la traction par flexion :

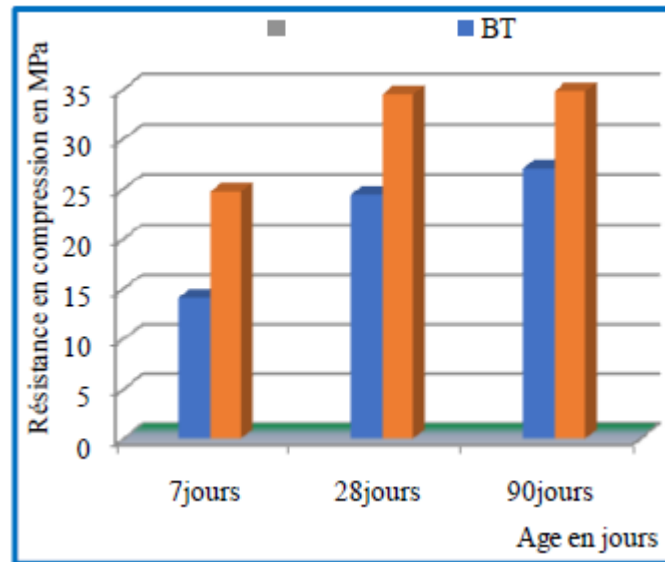


Figure III. 34: Variation de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution.

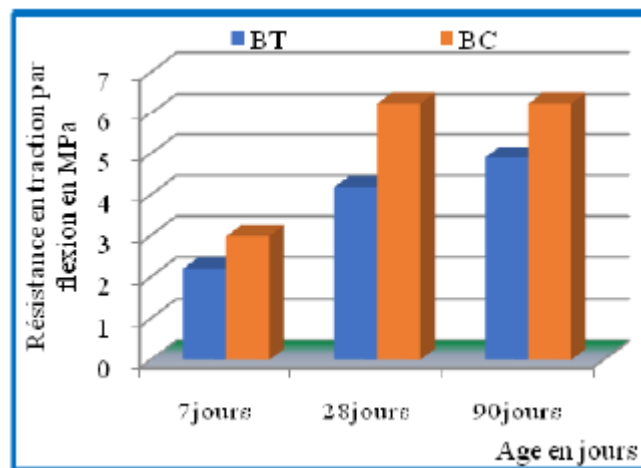


Figure III. 35: Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction du taux de substitution.

Dans les 3 figures suivantes III.36, III.37, III.38 montrent la résistance à la compression obtenue par scléromètre, ultrason et par la méthode combinée :

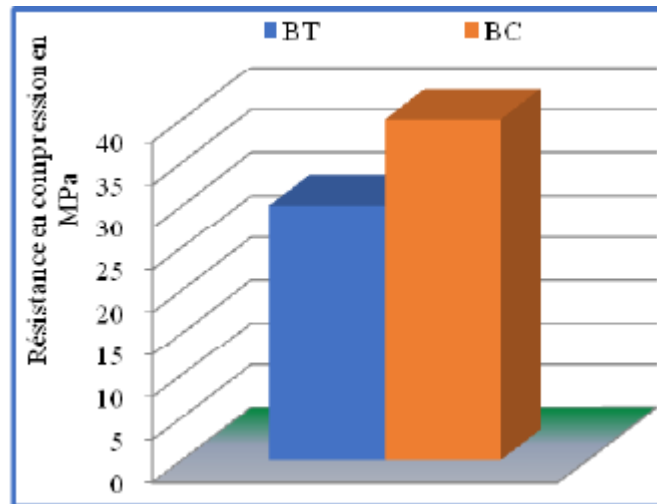


Figure III. 36: Résistance en compression obtenue par sclérométrie.

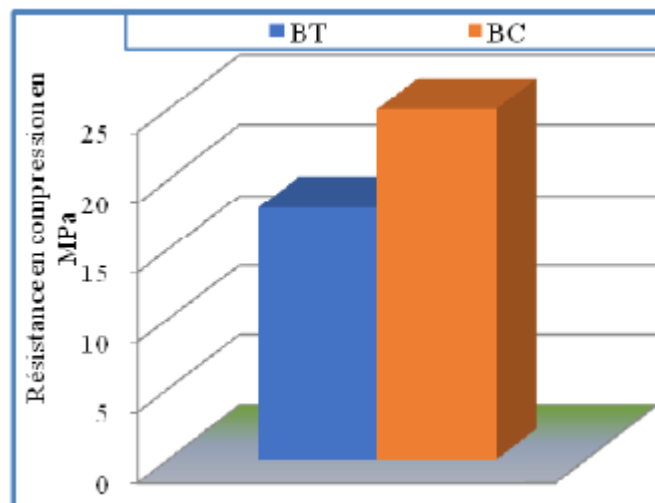


Figure III. 37: Résistance en compression obtenue par ultrason.

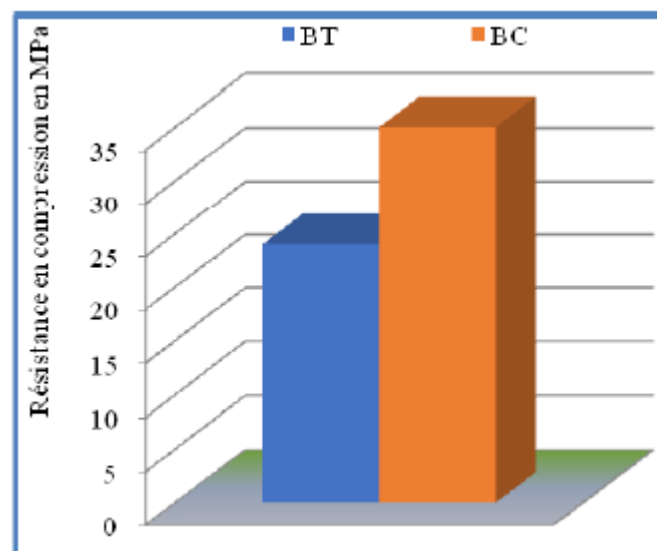


Figure III. 38: Résistance en compression calculée par la méthode combinée.

Les figures suivantes III.39, III.40 représente la variation de l'absorption par immersion et par capillarité :

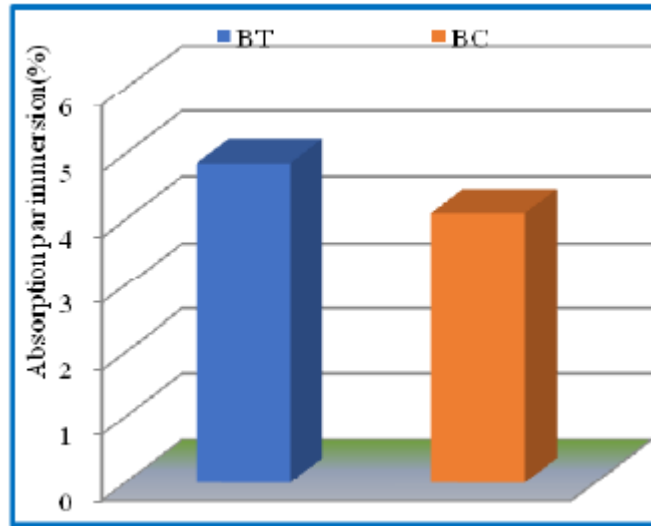


Figure III. 39: Variation de l'absorption par immersion en fonction du taux de substitution.

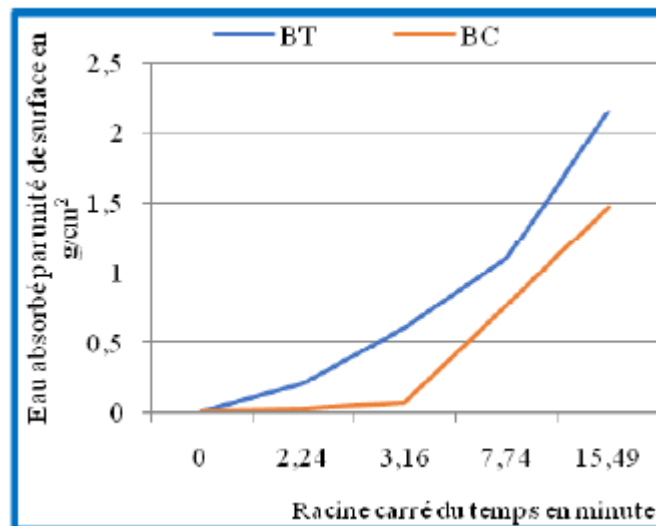


Figure III. 40: Variation de l'absorption par capillarité en fonction de la racine carrée du temps.

La dernière figure de cet article représente Variation de la profondeur de pénétration des chlorures en fonction du taux de substitution :

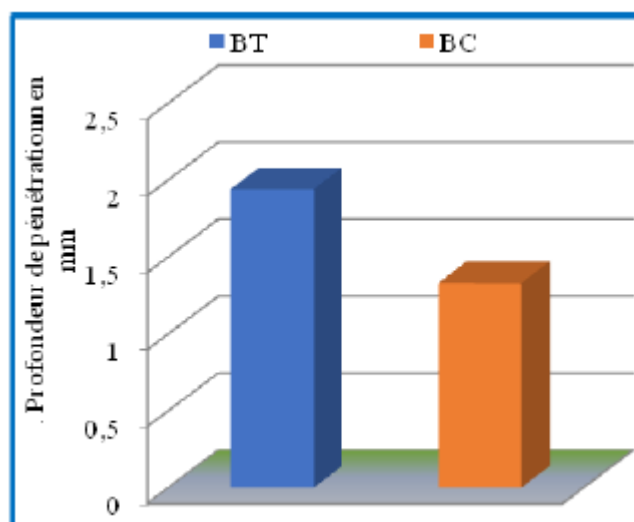


Figure III. 41: Variation de la profondeur de pénétration des chlorures en fonction du taux de substitution

CONCLUSION GENERALE

Les travaux des chercheurs pour la valorisation des matériaux locaux abandonnés dans la nature tel que sable de dune en Algérie, les déchets de céramique ainsi que le laitier de haut fourneau, l'utilisation de ces matériaux dans la construction a permis de résoudre, à la fois le problème environnemental (sur exploitation des agrégats importés du nord vers le sud et le problème des déchets industriels jetés dans la nature) et aussi l'optimisation des coûts économiques (le coût élevé du transport des agrégats).

Dans ce contexte l'étude élaborée dans le cadre de ce mémoire a été consacrée à la caractérisation des matériaux nobles abandonnés en Algérie à faire des essais et des formulations au laboratoire avec le mélange du sable de dune-déchets de céramique, sable de dune-déchets de céramiques-laitier de hauts fourneaux. Une première partie expérimentale a concerné la caractérisation par essais physiques au laboratoire qui nous a permis d'identifier les matériaux comme suit :

- Nature propre d'après les résultats de l'équivalent de sable : $ES_{DC}=74,05$
 $ES_{SD}=77,72$
- Faible argilosité avec une valeur de bleu de 0,1 pour les déchets de céramiques et 0,25 pour le sable de dune
- Granulométrie bien graduée pour les déchets de céramiques et mal graduée pour le sable de dune.

Les résultats obtenus montrent que nos matériaux peuvent être valorisés et utilisés en Génie Civil, notamment en technique routière.

La seconde partie expérimentale a concerné l'étude de formulation du mélange sable de dune-déchets de céramiques avec une variation progressive de déchets de céramiques jusqu'à atteindre un indice CBR immédiat de 47,338 qui présente une stabilité au compactage acceptable, après l'ajout de laitier au mélange sable de dune-déchets de céramiques l'IPI est resté le même et celui d'après l'immersion a donné un résultat satisfaisant de 52,5.

La dernière partie qui est la partie d'application des résultats obtenus précédemment nous avons pris de renforcer le tronçon routier CW 204 situé à Sidi Khouiled, Ouargla après une évaluation géotechnique le tronçon nécessite un renforcement avec une couche de forme,

donc on a proposé deux solutions avec notre matériau de classes différentes :

- Solution 1 : couche de forme de 70cm de classe S1
- Solution 2 : couche de forme de 40cm de classe S2

On conclut que les matériaux utilisés dans le cadre de ces travaux de mémoire de fin d'étude peuvent être utilisés comme couches de formes dans les couches de routes, On recommande la réalisation des planches d'essais expérimentales et d'autres essais pour une utilisation plus large dans d'autres structures géotechniques.

RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES :

Pour des travaux futurs dans le cadre d'utilisation des matériaux d'étude on recommande ce qui suit :

- ✓ Des planches d'essais expérimentaux (essai de plaque) pour le renforcement de la géotechnique routière.
- ✓ Opter pour une granulométrie avec un pourcentage plus élevé que celle utiliser.
- ✓ Augmenter le pourcentage de la chaux.
- ✓ Opter pour le laitier granulé broyé pour une meilleure réactivité avec la chaux
- ✓ Injecter un pourcentage de fine.
- ✓ Opter pour un liant hydraulique comme celui proposé par celui de LAFARGE c'est ARDIA 600 c'est un liant pour traitement des sols en place.

Références bibliographiques

- [01] SMAIDA A 2019 « Contribution à la valorisation des matériaux locaux dans les couches d'assises routières » thèse de doctorat en genie civil géotechnique USTHB
- [02] Guide de réhabilitation des routes fascicule 01
- [03] Bourema Moufida, « Etude des caractéristiques d'un BHP à base de déchet de brique rouge à l'état frais et durci », Mémoire de master en génie civil, Université de 20. Aout 1955-Skikda, 11 Juin 2015
- [04] <https://www.steelceram.com/fr/caracteristiques-des-materiaux-ceramiques/>
- [06] Ghasan Fahim Huseien, Abdul Rahman Mohd Sam, Kwok Wei Shah, Jahangir Mirza, Effects of ceramic tile powder waste on properties of self-compacted-alkali-activated concrete, 9 November 2019, P03.
- [05] Hossein Mohamad Hosseini, Nor Hasanah Abdul Shukor Lim, Mahmood Md. Tahir, Rayed AL Yousef, Hisham Alabduljabbar, Mostafa Samadi, Enhanced performance of green mortar comprising high volume of ceramic waste in aggressive environments, 8 April 2019, P02
- [07]: Diego Henrique de Almeida¹, Rodolfo Henrique Freitas Grillo², Sylma Carvalho Maestrelli³, Carolina Del Roveri³ (Department de Engenharia Civil (DECIV), Universidade Federal de Rondônia (UNIR), CEP: 76801-059, Porto Velho, Rondônia, Brazil. Properties of concrete manufactured with use of ceramic sanitary ware waste as aggregate, 28/06/2018, P05
- [08]: Daoudi Lahcen, Elboudour Elidrissi Hicham, Saadi Latifa, Albizane Abderrahmane, Bennazha Jamal, Waqif Mohamed, Elouahabi Meriam, Fagel Nathalie, Characteristics and ceramic properties of clayey materials fromAmezmiz region (Western High Atlas, Morocco), 23 October 2014, P04.
- [9] Tafraoui A. (2009). Contribution à la valorisation de sable de dune de l'erg occidental (Algérie). Thèse de doctorat, université de Toulouse (France). 67,77 p.
- [10] Ben Dhia .M.H (1998) : quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routiere en milieu saharien, bulletin de laboratoire des po,ts et des chaussées P 33-42

- [11] Houssam BELKHIRI & Ahmed DERRAGUI," Contribution à l'étude des comportements mécaniques de mortier à base de sable de dune et fines siliceuses" Mémoire de Fin d'Etudes, Université Ziane Achour de Djelfa, année 2016.
- [12] Chauvin. J. J. *Les sables : guide d'utilisation routière*. Comité de recherche des matériaux locaux. Edition, ISTED 1987.
- [13] catalogue de dimensionnement des chaussées neuves. Fascicule 3. Fiche technique de dimensionnement. Novembre 2001 P93-94
- [14] Abadou Y, Mitiche-Kettab R, Ghrieb A (2016): Ceramic waste influence on dune sand mortar performance, *Construction and Building Materials* 125; 703–713, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.083.
- [16] Chauvin, J.J (1987). *Les sables – guide pratique d'utilisation routière – Synthèse*, ISTED.
- [15] [Wikipédia, l'encyclopédie libre \(wikipedia.org\)](http://wikipedia.org)
- [17] http://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/benabidabderrahmane/files/chapitreiii_les_liants.pdf
- [18] présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER : étude d'un comportement mécanique d'un mélange sable de dune-argile de wilaya de Ghardaïa renforcé par géotextile
- [19] <https://construction-maison.ooreka.fr/astuce/voir/726953/liants>
- [20] Gueddouda M.K (2011) : Comportement hydromécanique des sols compactés, application à la conception d'une barrière ouvragée « sable de dune –bentonite, Thèse de Doctorat, Université ABOUBAKR Belkaid – TLEMCEN.
- [21] OFRIR Observatoire Français des Ressources dans les InFrastructures, site internet : <http://ofrir2.ifsttar.fr/>
- [22] CHERFA H. stabilisation des sols et des couches de chaussée par des résidus industriels application au laitier de haut fourneau, Thèse de Magister. Université des Sciences et de technologie Houari Boumediene. Alger. 2010. 145 P.
- [23] BEHIM M. « Réactivité, rôle et durabilité des laitiers d'El Hadjar dans les matériaux à matrice cimentaire », Thèse de Doctorat, 2005. Université BADJI MOKHTAR – ANNABA.

[24] Chabani, Hamla 2017. « Amélioration de la stabilité du sol dans les projets de construction routière par les déchets de céramiques et les liants hydrauliques » Mémoire pour l'obtention du Diplôme de Master université de Mohamed El Bachir El Ibrahim – Bord Bou Arreridj.

[25] Djallal Eddine, Telmat, Hayet Cherfa, K. Ait Mokhtar. « étude d'un matériau routier composé de laitier de haut fourneau et de sable de dune » CFM 2013 - 21ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2013, Bordeaux, France.

[26] khalili khadidja 2015/2016. « caractérisation d'un mélange : Tuf + sable de dune » mémoire de fin d'études UNIVERSITE COLONEL AHMED DRAÏA D'ADRAR.

Leila ZEGHICHI, Azzeddine LAHMADI, Zied BENGHAZI 09-12 Mai, 2012. « Contribution à l'étude des caractéristiques de sable de dune et son effet sur le comportement dans des bétons autoplaçant » Université de M'sila, B.P. 166, Ichbilia, M'sila 2012.

[27] HEBHOUB Houria, KHERRAF Leila, MOUATS Wassila, ABDELOUAHED Assia, BOUGHAMSA Wassila «EFFECTS OF THE 15% SUBSTITUTION RATE OF SAND OF CERAMIC WASTE ON THE PROPERTIES OF A HYDRAULIC CONCRETE»

[28] DT1997 guide d'application des normes pour le réseau routier

[29] Rapport de renforcement du CTPP.

[30] HABAL Adel Hassan Yahya 2019 « étude du comportement mécanique d'un matériau routier compacte avec un liant hydraulique issu d'un laitier granule broyé » thèse de master 2 spécialité voies et ouvrages d'art USTHB.

[31] Rapport de renforcement de CTPP

Normes

NF P 18 – 560. Norme Française. Analyse granulométrique par tamisage. Septembre 1990

NF P 18 598. Norme Française. Équivalent de sable. Octobre 1991.

NF P 18 554. Norme Française. Mesure des masses volumiques des gravillons, cailloux et sables. Décembre 1979.

NF P 18 592. Norme Française. Essai au bleu de méthylène – méthode à la tâche. Décembre 1990.

NF P 94-093 norme française essai Proctor modifié.

NF P 94-078 Norme français essai CBR (California -Bearing – Ratio).