



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ DE KASDI MERBAH OUARGLA



FACULTE DES SCIENCES APPLIQUÉES
Département de Génie Civil et Hydraulique

Laboratoire Exploitation et Valorisation
des Ressources Naturelle en Zones Aride

N° d'ordre :

N° de série :

Thèse

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences

Filière : Génie Civil

Option : Constructions Civiles

Présentée par :

KHELLOU Abderrezak

Thème

Contribution à l'étude du comportement des matériaux gypso-calcaires de la région d'Ouargla en vue d'une utilisation en construction routière

Soutenu Publiquement le : 15 /03 /2018

Devant le Jury Composé de :

HACINI Messaoud	Professeur	Université d'Ouargla	Président
BOUAZIZ Ahmed	M. C. A	Université de Biskra	Examineur
REMADNA Mohamed Saddek	M. C. A	Université de Biskra	Examineur
KRIKER Abdelouahed	Professeur	Université d'Ouargla	Rapporteur
HAFSI Abdellatif	M.C. Associé	LTPS Ouargla	Co-rapporteur

Remerciements

je tiens tout d'abord à exprimer mes profonds remerciement Monsieur **KRIKER Abdelouahed** Professeur à l'Université de Ouargla et directeur du Laboratoire d'Exploitation et Valorisation des Ressources Naturelles en Zones Arides à l'université d'e Ouargla pour sa disponibilité et pour l'aide qu'il m'a apportée durant la préparation de cette thèse ainsi que pour les conseils et les encouragements qu'il m'a prodigué.

Mes vifs remerciements et mes respects les plus distingués vont à Monsieur **HAFSI Abdelatif**, Maître de Conférence Associé LTPS Ouargla , pour le suivi qu'il m accordé ses conseils et orientation ainsi que ses encouragement tous au long de ce travail

Je suis très reconnaissant envers Monsieur **HACINI Messaoud**, Professeur à l'Université de Ouargla , d'avoir accepté de présider le jury de ma thèse.

Je remercie Monsieur **BOUAZIZ Ahmed**, Professeur à l'Université de Biskra et **REMADNA Mohamed Sadek**, Maître de Conférence à l'Université de Biskra d'avoir accepté de participer au Jury et d'examiner cette thèse.

Mes remerciements vont aussi à tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation, à tous mes amis et collègues de travail qui ont grandement contribué à faire de mon passage au doctorat une belle expérience

En fin que toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail trouvent ici mes sincères remerciements.

ملخص

يندرج هذا العمل في إطار ترمين المواد المحلية لمنطقة ورقلة وتدويرا البقايا الصلبة والنفايات المختلفة لغرض استغلالهم في بناء الطرق الصحراوية. هذه الدراسة تهدف إلى معرفة السلوك الميكانيكي (مؤشر التحمل و مقاومة للضغط البسيط) لرمل جبسي المعالج. حيث تم خلط هذا الأخير مرة مع بقايا الأجور المهشمة و مرة أخرى برمل الكتبان.

النتائج المتحصل عليها من الدراسة التجريبية أظهرت أن أفضل مؤشر لتحمل تم الحصول عليهم عند الخليطين " المثاليين " (80 % رمل جبسي - 20% بقايا الأجور) و (80 % رمل جبسي - 20% رمل الكتبان). بينما تم تسجيل تناقص في المقاومة للضغط للخليطين المثليين والتي تم تحسينها بعد اللجوء إلى معالجة بمادة الجير للخليط الأول و بمادة الجير زائد رماد بقايا النخيل المثمرة للخليط الثاني .

الكلمات المفتاحية : رمل جبسي ، بقايا الأجور، رمل الكتبان ، رماد بقايا النخيل المثمرة ، معالجة ، مؤشر التحمل ، مقاومة للضغط البسيط .

RESUME

Ce travail s'inscrit dans le contexte de la valorisation des matériaux locaux de la région d'Ouargla et du recyclage de déchets en vue de leur utilisation en construction routière saharienne. Son objectif est étudié le comportement mécanique (portance, résistance à la compression simple) du sable gypseux traité. Ce dernier a été mélangé une fois avec les déchets de briques concassées (DB) et une fois avec le sable des dunes (SG).

Les résultats de l'étude expérimentale ont montré que la meilleure portance est obtenue pour les deux mélanges " optimaux " : 80% SG -20% DB et 80% SG -20% SD. Cependant, une diminution de la résistance à la compression des mélanges optimaux a été enregistrée. Le recours au traitement du mélange 80% SG -20% DB à la chaux et à la chaux plus la cendre de déchets de palmiers pour 80% SG -20% SD a permis d'améliorer cette résistance.

MOTS-CLES : *Sable gypseux, sable de dunes, cendre de déchets de palmiers dattiers, traitement, indice portant, résistance à la compression simple.*

ABSTRACT

This work appears in the context of valorization of the local materials of Ouargla region and recycling wastes in order to use them in road construction of the Sahara. It aims the studying the mechanical behavior (bearing capacity and compressive strength) of treated gypsum sand (SG). This last is mixed once with crushed bricks waste (DB) and another time with sand of dunes (SD).

The results showed that the maximum value of bearing capacity is obtained when the two "optimal " ixtures are composed of 80% SG /20% DB and 80% SG /20% SD. While, the compressive strength of the optimal mixtures decreased according to the age.) The treatment of the mixture (80% SG -20% DB) with lime and the mixture (80% SG -20% SD) with by-product ash of date palm and lime improved their compressive strength.

Keywords: *Gypsum sand, sand of dunes, by-product ash of date palm, treatment, bearing capacity, compressive strength.*

SOMMAIRE

Liste des notations et abréviations

Liste de figures

Listes de tableaux

Listes de photos

Introduction générale

Chapitre 1

Généralités sur les matériaux gypso-calcaires

1.1	<i>Introduction</i>	17
1.2	<i>Définitions</i>	17
1.3	<i>Gypse et les encroûtements gypseux</i>	17
1.3.1	<i>Gypse</i>	17
1.3.2	<i>Propriétés physico-chimiques du gypse</i>	18
1.3.3	<i>Encroûtement Gypseux</i>	19
1.3.4	<i>Genèse des encroûtements gypseux</i>	20
1.3.5	<i>Distribution des sols gypseux dans le monde et en Algérie</i>	21
1.3.6	<i>Profil d'un encroûtement gypseux</i>	21
1.3.7	<i>Sables gypseux</i>	22
1.4	<i>Calcaires et les encroûtements calcaires</i>	23
1.4.1	<i>Calcaire</i>	23
1.4.2	<i>Propriétés physico-chimiques du calcaire</i>	23
1.4.3	<i>Encroûtements calcaires</i>	23
1.4.4	<i>Genèse des encroûtements</i>	24
1.4.5	<i>Stades d'évolution des encroûtements calcaire mur</i>	26
1.4.6	<i>Classification des encroûtements calcaires</i>	28
1.4.7	<i>Répartition des encroûtements calcaires dans le monde et en Algérie</i>	29
1.5	<i>Encroûtements gypso calcaires (mixte)</i>	30
1.6	<i>Interaction gypse-calcaire</i>	31
1.7	<i>Recherche de Gisements</i>	32
1.8	<i>Comportement en laboratoire des matériaux gypso-calcaires</i>	33
1.8.1	<i>Granulométrie</i>	33

1.8.2	<i>Pollution des tufs</i>	36
1.8.2.1	<i>Essai des Limites d'Atterberg</i>	36
1.8.2.2	<i>Essai d'équivalent de Sables (E.S.)</i>	36
1.8.2.3	<i>Essai au bleu de méthylène</i>	36
1.8.3	<i>Comportement au compactage</i>	36
1.8.4	<i>Portance</i>	37
1.8.5	<i>Résistance à la compression simple</i>	37
1.9	<i>Durcissement des tufs compactes</i>	38
1.9.1	<i>Constatations sur chantiers</i>	38
1.9.2	<i>Etude en laboratoire</i>	39
1.10	<i>Explication du phénomène de durcissement</i>	40
1.11	<i>Techniques de Stabilisation des tufs</i>	41
1.11.1	<i>Stabilisation à base de liants hydrauliques</i>	41
1.11.2	<i>Stabilisation par des produits organiques</i>	41
1.11.3	<i>Stabilisation par mélanges de tuf et de Granulats</i>	41
1.12	<i>Technique routière saharienne</i>	42
1.12.1	<i>Routes sahariennes</i>	42
1.12.2	<i>Principe de la technique</i>	43
1.12.3	<i>Structure de la chaussée saharienne</i>	44
1.12.4	<i>Assises en tufs d'encroûtements</i>	46
1.13	<i>Conclusion</i>	46

Chapitre 2

Recyclage des déchets de BTP et traitement des matériaux routiers

2.1	<i>Introduction</i>	47
2.2	<i>Définitions</i>	47
2.3	<i>Classification des déchets</i>	48
2.3.1	<i>Déchets inertes</i>	48
2.3.2	<i>Déchets industriels banals (DIB)</i>	48
2.3.3	<i>Déchets dangereux</i>	48
2.4	<i>Valorisation des déchets inertes de BTP en construction routière</i>	49
2.5	<i>Processus d'élaboration des granulats recyclés</i>	49
2.6	<i>Performances mécaniques des granulats recyclés</i>	50
2.7	<i>Traitement des matériaux aux liants</i>	52

2.7.1	<i>Liants hydrauliques</i>	53
2.7.1.1	<i>chaux</i>	53
2.7.1.2	<i>Ciment</i>	54
2.7.2	<i>Liants pouzzolaniques</i>	54
2.7.2.1	<i>Pouzzolanes naturelles</i>	55
2.7.2.2	<i>Cendres de Charbon</i>	56
2.8	<i>Cendres de Bois</i>	59
2.9	<i>Cendres de papèterie</i>	60
2.10	<i>Conclusion.</i>	61

Chapitre 3

Caractérisation des matériaux

3.1	<i>Introduction</i>	62
3.2	<i>Sable gypseux</i>	62
3.2.1	<i>Composition chimique sommaire</i>	63
3.2.2	<i>Analyse granulométrique</i>	64
3.2.3	<i>Essai au bleu de méthylène</i>	65
3.2.4	<i>Limites d'Atterberg</i>	67
3.2.5	<i>Caractéristiques de compactage</i>	67
3.2.6	<i>Portance</i>	69
3.2.7	<i>Résistance à la compression simple</i>	70
3.2.8	<i>Classification du matériau selon le GTR</i>	72
3.3	<i>Déchets de brique</i>	73
3.4	<i>Sable de dunes</i>	74
3.5	<i>Produits de traitement utilisés</i>	75
3.5.1	<i>Cendre de sous produits palmier dattiers</i>	76
3.5.2	<i>Chaux</i>	78
3.6	<i>Conclusion</i>	80

Chapitre 4

Comportement du sable gypseux traité

4.1	<i>Introduction</i>	81
4.2	<i>Déroulement de l'étude expérimentale</i>	81
4.3	<i>Sable gypseux traité à la Chaux</i>	83
4.3.1	<i>Comportement au compactage</i>	83

4.3.2	<i>Portance</i>	85
4.3.3	<i>Comportement en compression simple</i>	86
4.4	<i>Comportement du mélange sable gypseux et déchets de briques (MSG-DB)</i>	89
4.4.1	<i>Comportement au compactage</i>	90
4.4.2	<i>Portance</i>	92
4.4.3	<i>Comportement en compression simple</i>	95
4.4.4	<i>Traitement du mélange optimal (MSG –20DB1) à la chaux</i>	97
4.5	<i>Comportement du mélange sable gypseux et sable de dunes</i>	100
4.5.1	<i>Comportement au compactage</i>	101
4.5.2	<i>Portance</i>	104
4.5.3	<i>comportement en compression simple du mélange optimal MSG-SD20</i>	105
4.5.4	<i>Mélange optimal traité à la chaux</i>	106
4.5.5	<i>Traitement Mélanges optimal MSG-20SD à la chaux plus à la cendre de sous produit de palmiers dattiers (CSPD)</i>	107
4.6	<i>Conclusion</i>	114
	<i>Conclusion générale</i>	116
	<i>Référence bibliographique</i>	119
	<i>Annexe</i>	125

Liste des figures

Figure 1.1	: Mécanisme de formation du gypse en milieu marin lagunaire.....	18
Figure 1.2	: Structure du gypse	19
Figure 1.3	: Distribution des sols gypseux dans le monde	21
Figure 1.4	: Profil d'un encroûtement gypseux selon Durant	22
Figure 1.5	: Schéma du circuit de la formation des encroûtements calcaires.....	26
Figure 1.6	: Profil d'encroûtement mur selon Ruellan	27
Figure 1.7	: Répartition des encroûtements calcaires dans le monde.....	30
Figure 1.8	: Fuseaux granulométriques de matériaux extraits de différents encroûtements.....	33
Figure 1.9	: Fuseau de spécification de la technique routière saharienne.....	34
Figure 1.10	: Evolution granulométrique d'un tuf en fonction du nombre de passe d'un compacteur vibrant (CV) et d'un compacteur à pneus.....	35
Figure 1.11	: Evolution granulométrique d'un tuf calcaire lors d'un compactage type Proctor	35
Figure 1.12	: Exemple de courbes de Proctor modifiée de certains tufs	37
Figure 1.13	: Evolution de la résistance en compression simple de deux tufs calcaires conservés de trois façons différentes.....	39
Figure 1.14	: Influence de la teneur en eau de confection sur la résistance à la compression	40
Figure 1.15	: Influence de l'ajout du sable de dunes aux tufs sur la densité sèche.....	42
Figure 1.16	: Influence du taux d'incorporation de sable sur l'indice portant I_{cbr}	42
Figure 1.17	: Coupe transversale type d'une chaussée saharienne.....	45
Figure 2.1	: Essais CBR des différents mélanges de granulats recyclés avant et après immersion.....	51
Figure 2.2	: Courbes Proctor de comparaison entre granulats recyclés et granulats naturels.....	51
Figure 2.3	: Courbes de contraintes-déformations au cisaillement des différents mélanges granulats recyclés.....	51
Figure 2.4	: Evolution de la résistance en Compression en fonction du temps pour un mélange tuf calcaire et sable calcaire traité à la chaux.....	53
Figure 2.5	: Variation de l'indice CBR d'un mélange tuf calcaire et sable calcaire en fonction du dosage en chaux.....	53
Figure 2.6	: Evolution de la résistance en compression en fonction de la teneur en ciment pour les différentes durées de conservation.....	54
Figure 2.7	: Variation de l'indice CBR en fonction de la teneur en ciment pour les différentes durées de conservation.....	54
Figure 2.8	: Relation entre pourcentage de cendres volantes et la résistance en compression.....	58
Figure 2.9	: Diagramme ternaire $CaO-Al_2O_3-SiO_2$	59

Figure 3.1	: Compositions chimique sommaire du matériau de base.....	63
Figure 3.2	: Diffractogramme aux rayons X du sable gypseux utilisé.....	64
Figure 3.3	: Courbe granulométrique du sable gypseux.....	65
Figure 3.4	: Classification des matériaux en fonction de VBS.....	66
Figure 3.5	: Courbe de Proctor du sableux gypseux.....	68
Figure 3.6	: Critère de l'IPI pour la différente couche de la chaussée.....	69
Figure 3.7	: Evolution de la résistance à la compression simple en fonction de la durée de conservation.....	71
Figure 3.8	: Abaque de classification (GTR ,1992).....	73
Figure 3.9	: Courbe granulométrique du sable de dunes.....	75
Figure 3.10	: Diffraction des rayons X de la cendre utilisée.....	77
Figure 3.11	: Situation de la cendre des fibres de palmiers dattiers dans le digramme ternaire (CaO -Al ₂ O ₃ -Sio ₂)	78
Figure 3.12	: Diagramme de diffraction aux rayon X de la chaux.....	79
Figure 4 .1	: Déroulement de l'étude expérimentale.....	82
Figure 4 .2	: Courbes de Proctor du sable gypseux traité à la chaux.....	83
Figure 4 .3	: Evolution des caractéristiques de l'optimum Proctor suite au chaulage du sol.....	84
Figure 4.4	: Caractéristiques de compactage du SG traité à la chaux.....	85
Figure 4 .5	: Effet de l'ajout de la chaux sur de l'IPI et ICBRim.....	86
Figure 4 .6	: Evolution de la Rc du sable gypseux traité à 6% de chaux en fonction de la durée de conservation.....	87
Figure 4 .7	: Evolution de la Rc du sable gypseux traité à 6% de chaux pour divers teneurs en eau de confection des éprouvettes.....	88
Figure 4 .8	: Influence de la teneur en eau de confection des éprouvettes sur Rc du sable gypseux traité à 6% de chaux.....	88
Figure 4.9	: Courbes de Proctor du mélange (MSG-DB2,5).....	90
Figure 4.10	: Courbes de Proctor du mélange (MSG-DB1).....	90
Figure4.11	: Effet de type de classe sur de la densité sèche maximale.....	91
Figure4.12	: Effet de type de classe sur de la teneur en eau optimale.....	92
Figure 4.13	: Variation de la portance des mélanges MSG-DB2,5.....	93
Figure 4.14	: Variation de la portance des mélanges MSG-DB1.....	93
Figure 4.15	: Effet du type de classe de déchets sur IPI.....	94
Figure 4.16	: Effet du type de classe de déchets sur ICBRim.....	95
Figure 4.17	: Evolution de la Rc du mélange MSG-20DB1 en fonction de la durée conservation.....	96
Figure 4.18	: Evolution de la Rc du MSG- 20 DB1 et du sable gypseux en fonction de la durée de conservation.....	97
Figure 4.19	: Evolution Rc du mélange optimal traité à 6% de chaux ,sans traitement et sable gypseux en fonction la durée de conservation.....	98

Figure 4.20	: Evolution Rc du mélange optimal traité à 6% de chaux à différents teneurs en de de confection des éprouvettes.....	99
Figure 4.21	: Influence de la teneur de confection sur la résistance du mélange optimal traité à 6% de chaux.....	100
Figure 4.22	: Courbes de Proctor des différents mélanges MSG-SD.....	102
Figure 4.23	: Courbe de compactage d'échantillons compactés en laboratoire suivant l'essai Proctor modifié à différentes énergies de compactage.....	102
Figure 4.24	: Variation de la densité sèche maximale des mélanges MSG-SD en fonction du pourcentage de SD incorporé	103
Figure 4.25	: Variation de la teneur en eau optimale des mélanges MSG-SD en fonction du pourcentage de SD incorporé	103
Figure4 .26	: Variation de la portance (IPI et ICBRim) en fonction du pourcentage du sable de dunes incorporé dans le mélange MSG-SD.....	104
Figure 4.27	: Evolution de la Rc du MSG-20SD et SG en fonction la durée de conservation.....	106
Figure 4.28	: Evolution de la Rc du MSG-20SD traité à 6% de chaux et SG en fonction la durée de conservation.....	107
Figure 4.29	: Evolution de la Rc du MSG-20SD traité à 6% de chaux en fonction de pourcentage de CPSD.....	108
Figure 4.30	: Evolution de RC d'un tuf gypso-calcaire en fonction du pourcentage de cendre (CSPD) à différents âges.....	109
Figure 4.31	: Evolution de la Rc du MSG-20SD traité à 6% de chaux en fonction de la durée de conservation pour différentes pourcentage de CPSD.....	109
Figure 4.32	: Influence de la teneur d'eau de confection des éprouvettes sur Rc du mélange MSG-20SD traité à 6% de chaux et 8% de CPSD.....	110
Figure 4.33	: Influence de la teneur d'eau de confection des éprouvettes sur Rc du mélange MSG-20SD traité à 6% de chaux et 12% de CPSD.....	111
Figure 4 .34	: Evolution Rc du mélange optimal MSG-20SD traité 6% de chaux et 8% de cendre pour différentes teneur en eau de confection.....	112
Figure 4.35	: Evolution Rc du mélange optimal MSG-20SD traité 6% de chaux et 12% de cendre pour différentes teneur en eau de confection.....	112
Figure 4.36	: Résistance à la compression pour les différentes formules.....	113

Liste des photos

Photo 2.1	: Processus de valorisation matériaux de démolition	50
Photo 2.2	: Capture des cendres dans un central thermique	56
Photo 3.1	: Echantillon du matériau extrait	62
Photo 3.2	: Situation de site prélèvement du sable gypseux	63
Photo 3.3	: Appareillage de l'essai au bleu méthylène	66
Photo 3.4	: Appareil de Compactage	67
Photo 3.5	: Moule de compression simple	70
Photo 3.6	: Ecrasement des éprouvettes	71
Photo 3.7	: Déchets de brique	73
Photo 3.8	: Déchets de briques concassés	73
Photo 3.9	: Certain types de sous-produits de palmiers dattiers	76
Photo 3.10	: Cendre de sous-produits de palmiers dattiers	77

Liste des tableaux

Tableau 1.1	: Classification des encroûtements calcaires selon Ruellan.....	29
Tableau 1.2	: Synthèse des caractéristiques géotechnique et mécaniques des tufs d'encroûtement	38
Tableau 2.1	: Usage possible des granulats recyclés	49
Tableau 2.2	: Composition chimique élémentaire d'une pouzzolane naturelle	56
Tableau 2.3	: Fourchette de variation de la composition chimique de cendre volante.....	57
Tableau 2.4	: Composition chimique d'une cendre de foyer de JLEC (MAROC) ...	58
Tableau 2.5	: Composé essentiellement des cendres de papier	60
Tableau 3.1	: Classification des matériaux par apport à la valeur de VBS	66
Tableau 3.2	: Résultats de limites d'Atterberg	67
Tableau 3.3	: Synthèse des résultats des essais de caractérisation	72
Tableau 3.4	: Résultats d'analyse chimique sommaire de déchets de briques	74
Tableau 3.5	: Caractéristiques physiques de sable de dunes.....	75
Tableau 3.6	: Analyse minéralogique des fibres calcinées à 400 °	77
Tableau 3.7	: Fiche technique des Propriétés physiques et chimiques de la chaux Saida.....	79
Tableau 4.1	: Différents mélanges élaborés MSG-DB.....	89
Tableau 4.2	: Les résultats de la portance des mélanges MSG-DB.....	92
Tableau 4.3	: Différents mélanges élaborés MSG.....	101
Tableau 4.4	: Résultats de la portance des mélanges MSG-SD.....	104

Liste des notations et abréviations

Al_2O_3	: Alumine
BTP	: Bâtiment et des travaux publics
$CaCO_3$: Carbonate de calcium
CaO	: Chaux
$CaSO_4, 2H_2O$: Gypse
CSPD	: Cendre de sous produits de palmiers dattiers
C_u	: Coefficient d'uniformité
DB	: Déches de Briques
DIB	: Déchets industriels banals
D_{max}	: Dimension maximale
Esp	: Equivalent de sable piston
Fe_2O_3	: Oxyde ferrique
FAO	: Food and Agriculture Organization
GTR	: Guide technique pour la réalisation des remblais et de couche de forme
H_2CO_3	: Acide carbonique
I_p	: Indice de plasticité
IPI	: Indice portant immédiat
ICBRim	: Indice CBR après 4 heures d'immersion
LTPS	: Laboratoire des travaux publics du sud
MSG-DB	: Mélange Sable Gypseux et Déches de Briques concassés
MSG-SD	: Mélange Sable Gypseux et Sable de Dunes
Mf	: Modules de finesse
MgO	: Magnésie
$MgCO_3$: Carbonate De Magnésium
NaCl	: Chlorure de Sodium
Rc	: Résistance à la compression simple
SD	: Sable de Dunes

SG	: Sable Gypseux
SiO ₂	: Silice
VBS	: Valeur du bleu de méthylène
W	: Teneur en eau de confection des éprouvettes
W _L	: Limite de liquidité
W _P	: Limite de plasticité
W _{od}	: Teneur en eau optimale de durcissement
W _{opm}	: Teneur en eau optimale
γ _{app}	: Masse volumique apparente
γ _{abs}	: Masse volumique absolue

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Le Sahara d'Algérie, caractérisé par son climat aride et sec, couvre les trois quart de la superficie du territoire national. Il représente un intérêt économique stratégique pour le pays. Ses champs pétroliers, ses ressources en minerais et aquifères souterrains sont autant d'éléments qui ont justifié une intégration au territoire national des vastes espaces sahariens.

Les politiques d'intégration territoriale se sont alors appuyées principalement sur le désenclavement de ces zones par l'établissement d'un réseau de transport de tout genre, et dont le réseau routier constitue l'infrastructure prioritaire et le plus avantageux.

Vue l'étendue du Sahara et pour des raisons économiques, la construction et l'entretien des routes passent impérativement par l'utilisation des matériaux locaux disponibles.

Les matériaux gypso-calcaires, connus par les tufs d'encroutement ou simplement par les tufs sont parmi les ressources naturelles qui se trouvent en abondant dans la région d'Ouargla. Ces matériaux sont largement utilisés en construction routière saharienne. Selon leur composition chimique, les tufs sont regroupés en trois catégories : les tufs calcaires, les tufs gypseux (sable gypseux) et les tufs gypso-calcaire (mixte).

Parfois, certains types de tufs sont peu exploitables en raison de la médiocrité de leurs caractéristiques géotechniques et mécaniques qui ne répondent pas aux exigences techniques recommandées pour envisager leur utilisation en assise de chaussées.

La résolution de ce problème a obligé les géotechniciens routiers à recourir au traitement de ces matériaux aux liant (chaux ; ciment, cendre volante fumé de silice ...) ou à les mélanger avec d'autres matériaux et déchets d'origines divers (mines et carrières, industrie, métallurgique, et autres industries...).

La technique de traitement des matériaux routiers et les sols sur place aux liants hydrauliques (ciments, chaux...) ou pouzzolaniques (cendre volante, fumé de silice, ...) n'est pas nouvelle et qui remonte aux années soixante. Elle permet la valorisation des matériaux ayant des performances mécaniques initialement jugées non satisfaisantes (limon, argile, sable, marnes...) pour des ouvrages de terrassement et d'assises des chaussées.

Actuellement, ce type de traitement est bien maîtrisé, il présente de multiples avantages:

- Technique : amélioration de la performance géotechnique et mécanique à court terme et long terme

- Ecologique : limitation à l'évacuation des matériaux impropre à la décharge publique légale ou illégale
- Economique : limitation de l'utilisation des matériaux dite noble (grave) que leur exploitation génère des coûts importants

Plusieurs travaux de recherche ont été menés sur le traitement des tufs d'encroûtement en les associant à d'autres matériaux granulaires ou des liants hydrauliques et qui font l'objet de nombreuses publications (Colombien, 1988 ; Amaroui, 2002 ; Morsli et al., 2007, Goual et al., 2011 ; Goual, 2012 ; Cherrak et al. 2015). La plupart de ces études portent sur l'évolution des propriétés physiques et mécaniques en fonction du pourcentage des additifs. Ainsi, les travaux entrepris dans cette thèse s'inscrivent dans la poursuite des recherches dans ce domaine.

Dans le cadre d'un programme global qui s'intéresse à la valorisation des matériaux locaux des régions sahariennes, Cette étude est lancée au sein du laboratoire exploitation et valorisation des ressources naturelles en zone arides (EVRNZA) en collaboration avec le laboratoire des travaux publics du sud (LTPS) d'Ouargla.

De nombreux résultats d'analyse, obtenus auprès du laboratoire LTPS, sur certains types de tufs d'encroûtement, en particulier les sables gypseux provenant de différents gisements de la région d'Ouargla ont montré la médiocrité des propriétés géotechniques et mécaniques (les paramètres de compactage, l'indice portant immédiat et imbibé, la résistance à la compression, et la sensibilité à l'eau) qui empêche une éventuelle utilisation en corps de chaussé.

L'objectif de ce travail est d'améliorer les performances mécaniques des sables gypseux en les associant d'abord avec les déchets de briques concassées, puis avec le sable de dunes, afin de formuler des mélanges aptes à être utilisés en construction routière saharienne.

Le choix de déchets de briques est imposé par le souci de recycler et de trouver un débouché aux centaines de milliers de tonnes de déchets « briquillons », issus de la mauvaise cuisson et des résidus de casse des briques lors des différentes opérations de manutention, au niveau des briqueteries installées dans la ville Touggourt.

Cependant, le choix du sable de dunes est dû à sa disponibilité dans la région, et qui nous oblige à le valoriser. Le sable est généralement caractérisé par une granulométrie homométrique et par une faible teneur en fine. Il est souvent ajouté pour agir comme un correcteur granulométrique.

A l'instar de ce qui a été fait avec les cendres de bois (Tarun et al, 2003; Vahanen et al, 2014) et les cendres de biomasse (Jan,2003) pour traiter des matériaux routiers, ainsi que les résultats encourageants obtenus lors de l'ajout de la cendre de sous-produit de palmiers dattiers au béton (Rezig,2012),un traitement mixte d'un mélange composé de sable gypseux et de sable de dunes (MSG-SD) a été réalisé en utilisant la cendre de sous-produit de palmiers dattiers et la chaux .

Cette étude est subdivisée en deux parties :

La première partie présente une revue bibliographique, qui comporte deux chapitres. Le premier chapitre fournit des généralités sur les matériaux gypso-calcaire, leurs origines et leurs utilisations en technique routière saharienne. Tandis que, le deuxième chapitre est consacré à l'utilisation des déchets et les sous-produits industriels recyclés ainsi que le traitement des matériaux aux liants.

La seconde partie fait l'objet d'une étude expérimentale et se compose de deux chapitres. Le premier est consacré à la caractérisation et l'identification des matériaux utilisés, tandis que le dernier chapitre se focalise sur l'étude du comportement mécanique de deux mélanges qui sont formulés à partir de : sable gypseux/ déchets de briques et sable gypseux /sable de dunes.

Chapitre **1**

Généralités sur les matériaux gypso- calcaires

Chapitre 1: Généralités sur les matériaux gypso-calcaires

1.1 Introduction

Les matériaux gypso-calcaires également appelés " tufs d'encroûtements" ou tout simplement " tufs " sont très largement employés comme remblais et matériaux de construction routière dans les pays à climat semi-aride et aride. Ils sont extraits de formations superficielles qui occupent une superficie relativement importante dans les régions sahariennes.

Les études relatives aux encroûtements, menées par les pédologues, géologues, et géotechniciens remontent à plus d'un siècle. La définition donnée pour chaque type d'encroûtements et les hypothèses avancées pour expliquer la genèse de ces formations dépendent de la spécialité de l'auteur.

Dans ce chapitre, et avant d'aborder l'origine et la genèse de différents types d'encroûtements, et leurs classifications, il est important de présenter quelques définitions concernant les croûtes et les encroûtements.

1.2 Définitions

En pédologie, la définition la plus simple de l'encroûtement est :

En pédologie, on définit l'encroûtement comme étant la partie relativement cimentée d'une accumulation calcaire ou gypseuse s'étendant à l'ensemble d'un horizon mais moins dure qu'une croûte. (Carpenter, 1997)

D'après Hamrouni (1975) et Ben-Dhia(1983), Les encroûtements se définissent comme étant des formations superficielles, tendres, friables, poreuses, légères et de couleurs claires. Elles datent du Quaternaire et résultent d'un certain nombre d'échanges par dissolution et précipitation.

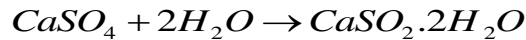
Suivant leur formation, les encroûtements se groupent en trois catégories : les encroûtements calcaires, gypseux et gypso-calcaires (mixtes).

1.3 Les Gypses et les encroûtements gypseux

1.3.1 Les Gypses

Le sulfate de calcium $CaSO_4$ s'hydrate et cristallise dans le système monoclinique pour former le minérale appelé gypse ($CaSO_4,2H_2O$), cette hydratation (fixation d'eau)

s'accompagne d'une augmentation de volume de 33 à 50% (Horta ,1979) . Elle s'opère selon la relation suivante :



Le gypse est une roche sédimentaire appartient à la famille des évaporites (Yuzer,1982; Auvray, 2003). Il résulte généralement de l'évaporation de l'eau lagune, marines sursaturés (figure 1.1).

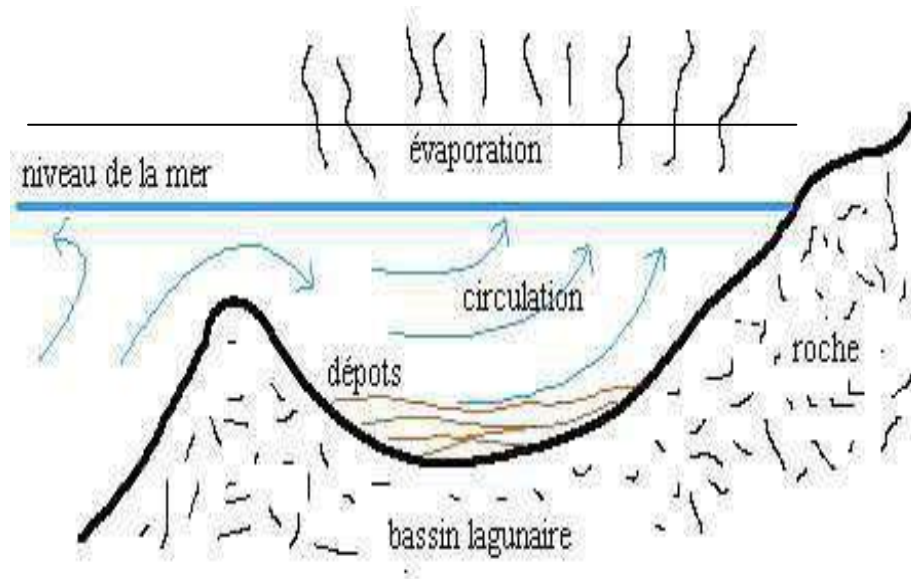


Figure 1.1: Mécanisme de formation du gypse en milieu marin lagunaire

IL est usuellement appelé « pierre à plâtre » (Quelet, 1964; Marnezy, 2004) ou aussi dihydratée, désigne l'espèce minérale naturelle de formule $CaSO_4.2H_2O$. Cette même formule s'applique en outre à la phase artificielle que constitue le gypse cuit et réhydraté, obtenu à partir des produits de cuisson mis en présence d'eau, ainsi qu'au gypse synthétique.

1.3.2 Propriétés physico-chimiques du gypse

Le gypse a une couleur blanche s'il est pur, incolore et limpide s'il est très pur comme l'albâtre, mais souvent coloré par des impuretés (sable, argile, $CaCO_3$, bitume même) du jaune au rouge, parfois grisâtre ou brunâtre. Sa densité est de l'ordre de $2,32 \text{ g/cm}^3$ (O'Donoghue, 1997). Lorsque le gypse est présent sous forme poudreuse, la densité du sol est faible car le gypse a un faible poids spécifique, aussi la porosité est élevée, alors que les croûtes gypseuses sont dures et présentent une faible porosité.

Le gypse est tendre et peut être rayé à l'ongle, sa dureté est de 1.5 à 2 sur l'échelle de Mohs suivant l'orientation de la face cristalline.

La solubilité du gypse est importante dans l'eau, elle est de l'ordre de quelques g/l. A 20°C elle est voisine de 2g/l dans l'eau pure (Marnezy, 2004), aussi cette solubilité dépend de la quantité des autres sels dissous et en particulier la halite (Chlorure de Sodium NaCl). Une particularité remarquable du gypse est que sa solubilité passe par un maximum à la température de 37-38° C, et tombe ensuite assez rapidement pour devenir très faible aux températures élevées, et se transforme entièrement en semi hydrate.

En général, la structure du gypse est définie comme étant une structure réticulaire simple (figure1.2), constituée par des feuillets de tétraèdres de forme anionique SO_4^{--} (le soufre au centre et les oxygènes aux sommets), étroitement liés entre eux par des cations Ca^{++} , et des molécules d'eau qui assurent la liaison et la cohésion entre les feuillets (Gautier, 2004).

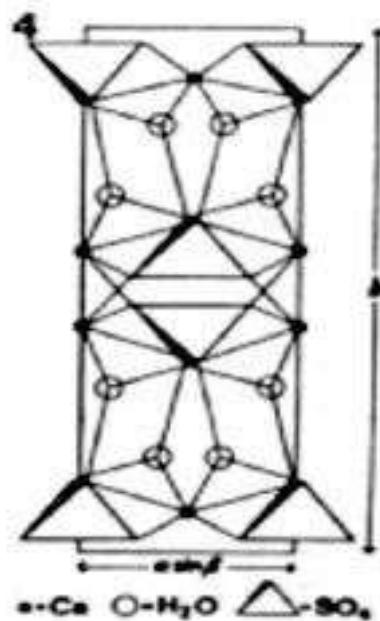


Figure 1.2 : Structure du gypse (Fischesser, 1950)

1.3.3 Encroûtement Gypseux

Se sont des formations dures d'allure plus ou moins scoriacée, se présentant sous l'aspect d'un gré (Durand, 1953). C'est le reste de la formation enrichie en surface de calcium et assez compact, se trouvent sous la croûte gypseuse (Bureau et Roederer ,1961).

L'épaisseur de ces formations varie de quelques centimètres à plus d'un mètre parfois, de haut en bas on y distingue principalement deux horizons :

Le premier, de couleur blanchâtre, d'aspect massif, présente une structure pulvérulente, très fine, comme du 'talc'. Il y a une certaine cohérence et une compacité dans cette masse amorphe car il est possible d'en prélever des mottes.

Le second horizon diffère très peu du précédent, Il y a une légère variation dans la coloration, à peine moins blanche à jaune très pâle. L'aspect général reste massif, la structure change à peine à l'apparence d'un limon pulvérulent. Parfois de petits cristaux sont visibles à l'œil nu.

1.3.4 Genèse des encroûtements gypseux

Plusieurs hypothèses relatives à la formation des encroûtements gypseuses ont été formulées (Bureau et Roderer 1961 ; Coque, 1962; Durand, 1963, Trichet, 1963; Pouget, 1968; Watson, 1988; Halitim, 1988).

Pour Bureau et Roderer,(1961) "L'encroûtement gypseux serait dû à une accumulation progressive de gypse vers la surface, à partir d'une roche mère gypseuse, principalement par évaporation. L'accroissement de la teneur en gypse dans les différents horizons s'accompagne d'un amincissement de la taille. Une croûte zonière superficielle de quelques millimètres est le terme normal de cette pédogenèse par un phénomène de concentration à la surface de l'encroûtement par la suite d'alternances de dissolutions et d'évaporations".

Pour Durand (1953) et Waren (1982) , la concentration de l'eau sous l'influence de l'évaporation, conduit au dépôt de sulfates de calcium, en présence de chlorure de sodium provoquant sa précipitation sous formes plus ou moins hydratées. C'est le mécanisme responsable de la formation du gypse pulvérulent. Ces dépôts sont caractérisés par une grande pureté du minérale et une rareté des éléments classiques.

L'origine lagunaire serait donc à envisager pour expliquer le maintien de cet encroûtement à ce niveau. il semble que le dépôt de gypse s'est produit beaucoup plus tard que celui du calcaire, c'est à dire au cours du dernier pluvial, il a plus de 1200 ans (Durand 1953) .

1.3.5 Distribution des sols gypseux dans le monde et en Algérie

Les sols gypseux se trouvent généralement dans les zones arides et semi-arides du monde (Watson, 1985; Stengel et Gelin, 1998). Des zones où les roches mères ou les sédiments gypseux sont fréquents, et/ou les précipitations faibles et occasionnelles (300-400mm) induisent un drainage climatique déficitaire pour évacuer le gypse du sol (Herrero et Boixadera, 2002).

L'espace occupé par les sols gypseux englobe pratiquement l'ensemble des continents (figure 1.3). La superficie de ces sols est estimée à 85 millions d'hectares (F.A.O, 1990).

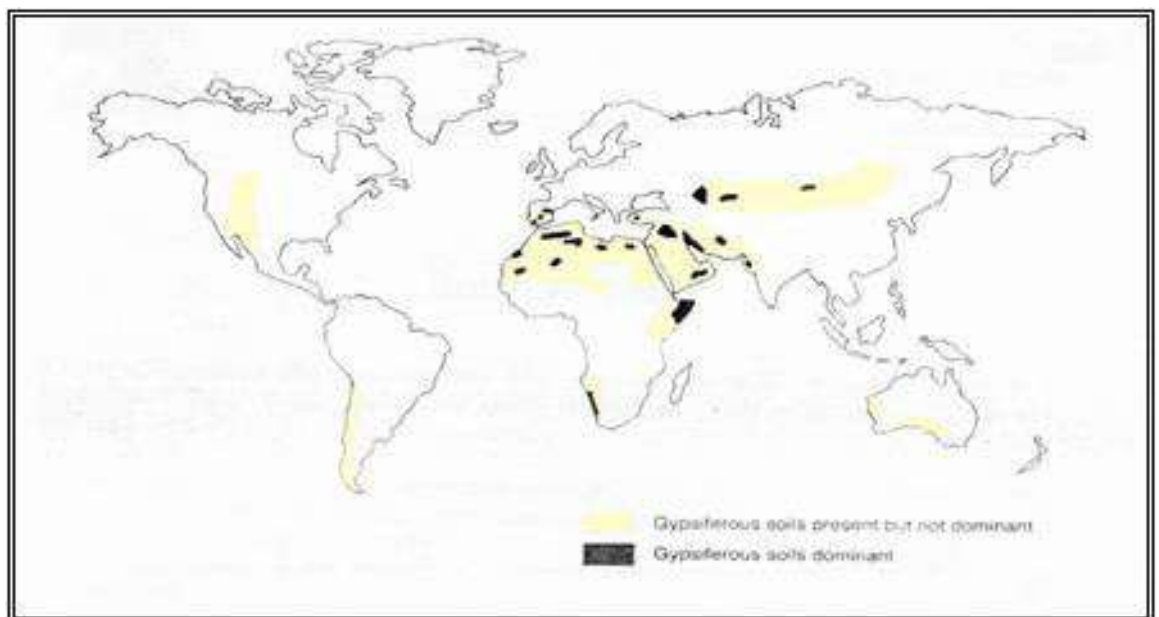


Figure 1.3 : *Distribution des sols gypseux dans le monde (FAO, 1993)*

En Algérie, la superficie couverte par les sols gypseux est estimée à 7966.3 Km², soit 3,3% de la surface totale du pays et 12,2% de la superficie totale des sols gypseux du monde (F.A.O,1990) . Ils occupent une grande surface au sud Est (les régions de Ouargla, Hassi Messaoud et El Oued).

1.3.6 Profil d'un encroûtement gypseux

Pour Horta (1979), le profil d'un sol encroûté par le gypse (Figure 1.4) présente généralement, de haut en bas, trois horizons principaux :

- **Horizon supérieur : A**

Appelé " trich " en arabe, cet horizon a une épaisseur comprise entre 10 et 20cm, il est l'équivalent de la terre végétale en zone tempérée. Cet horizon est caractérisé par l'abondance

de racines gypsifiées et par un encroûtement discontinu en feuillets et granules, il est friable, poreux et souvent sableux.

- **Horizon massif ou pierre à plâtre : B**

Appelé (Taffeza) en arabe, son épaisseur varie généralement entre 1 et 2 m, il vient juste après l'horizon supérieur. C'est un véritable grès à ciment gypseux, utilisé souvent comme pierre à bâtir à cause de sa dureté remarquable.

- **Horizon des roses de sable : C**

A la base de l'horizon massif, l'encroûtement devient clair, humide et sableux. De gros cristaux de gypse imbriqués apparaissent "louss" en arabe, la nappe est souvent de 50 cm à 1 m en dessous. Au contact direct de la nappe, le gypse cristallise en agrégats de cristaux larges et aplatis qui englobent des grains de sable.

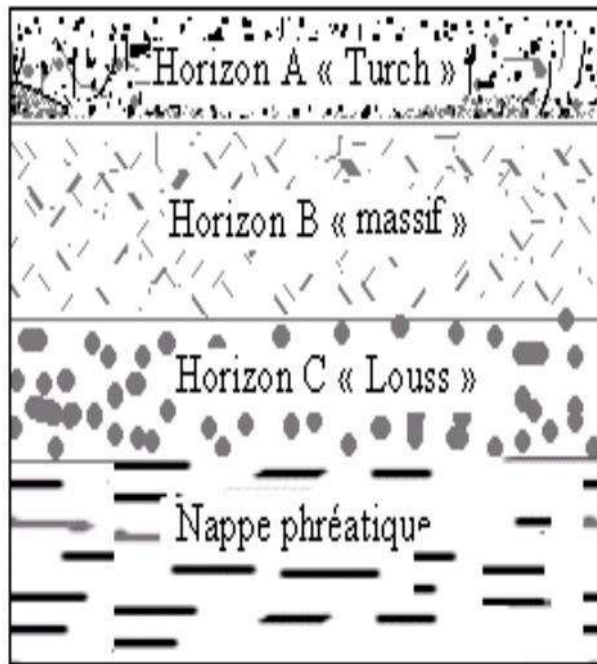


Figure 1.4: Profil d'un encroûtement gypseux selon Durant (Morsli,2007)

1.3.7 Sables gypseux

Les encroûtements récents et actuels, sous lesquels il existe encore une nappe phréatiques, peuvent être débité en grave à l'extraction. Toutefois, vu la faible dureté du gypse, cette grave évolue en sable lors du compactage. Horta (1979). Ces encroûtements sont les principaux gisements de sable gypseux, appelés plus couramment tufs gypseux, qui ont un intérêt en construction routière.

Les gisements de sable gypseux sont situés le plus souvent sur des surfaces topographiques anciennes. Ces surfaces sont pratiquement toujours encroûtées et surélevées par rapport aux dépressions où l'on ne rencontre généralement pas de sols valables pour la construction des assises de chaussées. Dans certaines régions, la surface encroûtée est recouverte par l'erg. Dans ce cas, les gisements sont à rechercher dans les « *Sahanes* » ou zone dégagées entre les dunes.

1.4 Calcaires et encroûtements calcaires

1.4.1 Calcaires

Les calcaires sont des roches sédimentaires, tout comme les gypses, facilement solubles dans l'eau, composées principalement de carbonate de calcium CaCO_3 , mais aussi de carbonate de magnésium MgCO_3 . Lorsque la roche comporte une proportion non négligeable d'argile, on parle plutôt de marne. Ils se forment par accumulation, au fond des mers, à partir des coquillages et squelettes des micros algues et animaux marins. Le calcaire est reconnaissable par sa teinte blanche et généralement par la présence de fossiles. Il est à la base de nombreux matériaux.

1.4.2 Propriétés physico-chimiques du calcaire

Le calcaire se compose d'au moins 70% de calcite (CaCO_3). Généralement, il a une couleur blanche comme il peut exister aussi teintés en jaune, gris, brun ou même noir. Sa densité varie de 2,7 à 2,9 de $2,32 \text{ g/cm}^3$ et sa dureté est de l'ordre 3 sur l'échelle de Mohs (Rohleder et Kroker, 2001).

Le carbonate de calcium est très faiblement soluble dans l'eau pure (de l'ordre de 15 à 20 mg/L à 25 °C), mais soluble dans l'eau chargée de dioxyde de carbone. Or la solubilité des gaz dans l'eau augmente avec la pression et, contrairement à celle de la plupart des solides, diminue lorsque la température augmente.

Le calcaire peut être identifié car il peut être dissous par les acides tel que l'acide chlorhydrique en solution, le chauffage aux à peu près de 900 °C produit l'oxyde de calcium ou chaux vive avec du CO_2 .

1.4.3 Encroûtements calcaires

De nombreuses définitions ont été données aux croûtes, et aux encroûtements calcaires, celles-ci diffèrent selon la spécialité de l'auteur (géologue, pédologue ou géotechnicien).

Parmi les définitions proposées, on peut retenir celles données par GOUDIE, 1988.

" La croûte calcaire appelée aussi encroûtement calcaire est un matériau terrestre composé essentiellement, mais pas exclusivement de carbonates de calcium. Les croûtes existent à l'état poudreux, nodulaire ou très induré; elles sont dues à la cimentation, à l'accumulation ou au remplacement de quantités plus au moins grandes de sols, roche ou matériaux altérés par du calcaire dans une zone d'infiltration " (Goudie, 1988).

1.4.4 Genèse des encroûtements calcaires

D'après Horta (1979), la formation des encroûtements calcaires correspond à certaines conditions climatiques critiques. Pour que les sols s'encroûtent de manière appréciable, les précipitations doivent être capables de solubiliser des quantités importantes de carbonates, sans toutefois excéder un certain seuil au-delà duquel elles pourraient emporter la totalité ou la majeure partie de ces carbonates vers les bassins marins ou lacustres. Ces conditions climatiques peuvent être illustrées par le climat qui règne dans les zones méditerranéennes subhumides et semi-arides.

En Afrique du Nord, la découverte des encroûtements calcaires remonte au siècle dernier (Pomel,1872).

Concernant l'origine et la formation de ces encroûtements, le débat entre les scientifiques et les spécialistes montre qu'il n'existe pas encore de consensus sur la question.

Plusieurs hypothèses relatives à l'origine des encroûtements calcaires ont été avancées (Boulaine,1961 ;Durand,1963 ; Briot,1976 ;Ruellan,1980 ; Vogt ,1984 ; Halitim,1988).

Parmi ces hypothèse ou théories on peut citer :

***L'hypothèse d'un apport éolien aux encroûtements**

Le rôle des apports éoliens dans la genèse des croûtes calcaires a été invoqué par Brown ,1956 ;Coque ,1961 ; Gardner ,1972 ;Kulke,1974 montrant que "les croûtes sont formées d'un sédiment où les sables dunaires du soubassement sont mélangés aux apports de l'amont dans une matrice calcaire. L'agent de transport est l'eau d'un ruissellement laminaire ou réticulaire " .

*** L'hypothèse per ascensum "par ascendant"**

Cette théorie fait appel aux processus liés à l'évaporation : remontée de solutions capillaires du sol et précipitation en surface des matières dissoutes.

*** L'hypothèse per descemum "par ascendant"**

Elle remonte aux travaux des pédologues dans les années 1920. Sous climat aride ou semi-aride, la croûte se forme par lessivage de la partie supérieure du sol et l'accumulation carbonatée. Elle s'opère à la base de la zone lessivée; l'horizon B migre vers le bas, de quelques centimètres à plus de 2 m, et la croûte s'épaissit grâce à cette descente. L'érosion peut décaper entièrement l'horizon A, faisant affleurer l'encroûtement. Au carbonate provenant du lessivage peuvent s'ajouter des apports latéraux en solution. Cette théorie n'a plus subi de modifications significatives jusqu'à nos jours.

*** L'hypothèse sédimentaire**

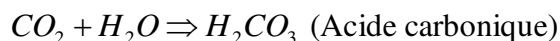
Cette hypothèse est née dans les années 1937-38. Les croûtes seraient des constructions sédimentaires, dues aux eaux de ruissellement laminaire. Elle répond à trois questions essentielles :

- D' où vient le calcaire ?
- Comment a-t-il été transporté ?
- comment s'est-il redéposé ?

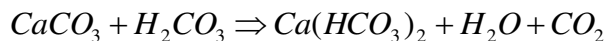
a) Provenance et transport du calcaire

Le calcaire qui contribue à la formation des encroûtements provient des massifs calcaires solubilisés en hivers et leur transport par les eaux de pluies. La solubilité augmente quand la température diminue contrairement à d'autres matériaux. Elle dépend également de la teneur en dioxyde de carbone dissout dans l'eau (figure 1.5).

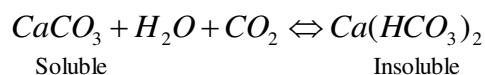
L'eau chargée de gaz carbonique produit de l'acide selon la réaction chimique suivante (Ben Dhia, 1983) :



L'acide carbonique ainsi formé donne lieu à la dissolution du calcaire



Au total, on a l'équilibre chimique suivant :



Le carbonate de calcium, de formule $CaCO_3$ est un solide de couleur blanche. Le carbonate de calcium précipité a une forme, il est bien ordonné et donne un minéral qui peut cristalliser dans deux formes particulières: la calcite et l'aragonite.

En ce qui concerne la dissolution des calcaires, les organismes vivants jouent aussi un rôle important. Par les sécrétions acides des racines, par leur rejet de dioxyde de carbone dans

les eaux de ruissellement, ils contribuent à l'acidité des eaux qui attaquent les calcaires qui affleurent.

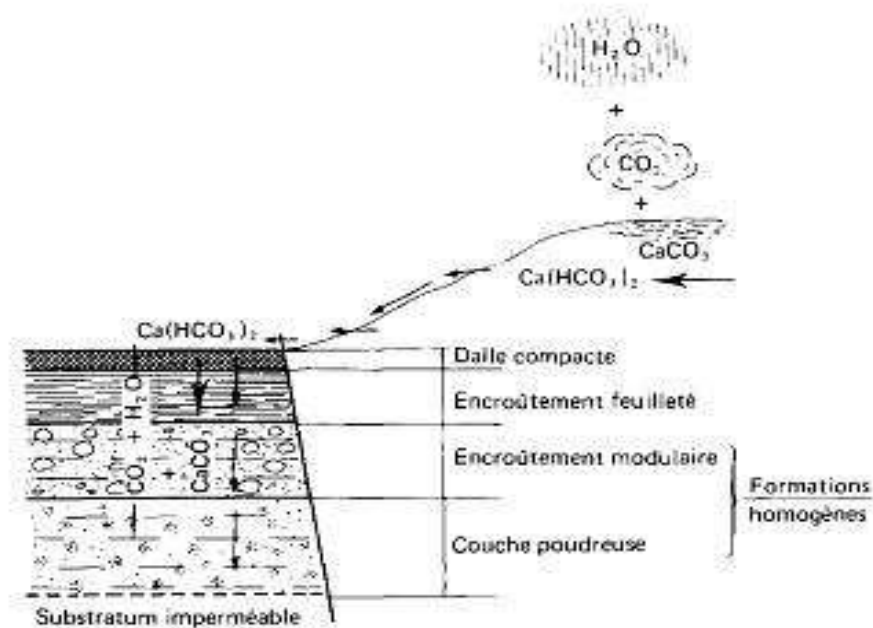


Figure 1.5 : Schéma du circuit de la formation des encroûtements calcaires (Ben Dhia,1983).

b) Dépôt de calcaire

Les particules solides se déposent par décantation ou évaporation. L'eau chargée est d'autant plus chargée que la température est plus faible et que son mouvement est plus lent. Une fois arrivée dans une plaine ou un plateau, l'eau s'infiltré dans le sol.

Pendant la saison sèche, le niveau de la nappe commence à baisser sous l'effet de l'évaporation et surtout de la végétation. A ce moment on assiste au phénomène de capillarité due à la tension superficielle reliée au potentiel capillaire. Il en résulte une dépression qui provoque le dégagement du dioxyde de carbone CO_2 dissous et par conséquent du calcaire (Ben Dhia,1983).

Mais, ces trois hypothèses citées ne prennent en considération que la circulation du carbonate de calcium à l'état dissous : or, la mise en solution du calcaire est un phénomène très lent et ne peut expliquer les énormes volumes mobilisés dans les croûtes calcaires, il faut donc envisager d'autres apports des carbonates.

1.4.5 Stades d'évolution des encroûtements calcaires mur

Le calcaire se concentre est se distribue dans les sols d'abord de manière discontinue sous forme de nodule ou d'amas friable et de nodules durs. A un stade plus avancé, lorsque

la teneur en carbonates du sol dépasse 60%, la concentration devient continue et masque la couleur primitive du sol : on a alors affaire aux encroûtements calcaires proprement dits de couleur blanchâtre (Horta, 1979).

A partir d'un certain degré de concentration, se produise ce que Ruellan (1967,1970) appelle les phénomènes pédoliques qui progressivement transforment les différents horizons des sols (Colombier,1988). L'évolution finale est l'encroûtement mur (figure 1.6).

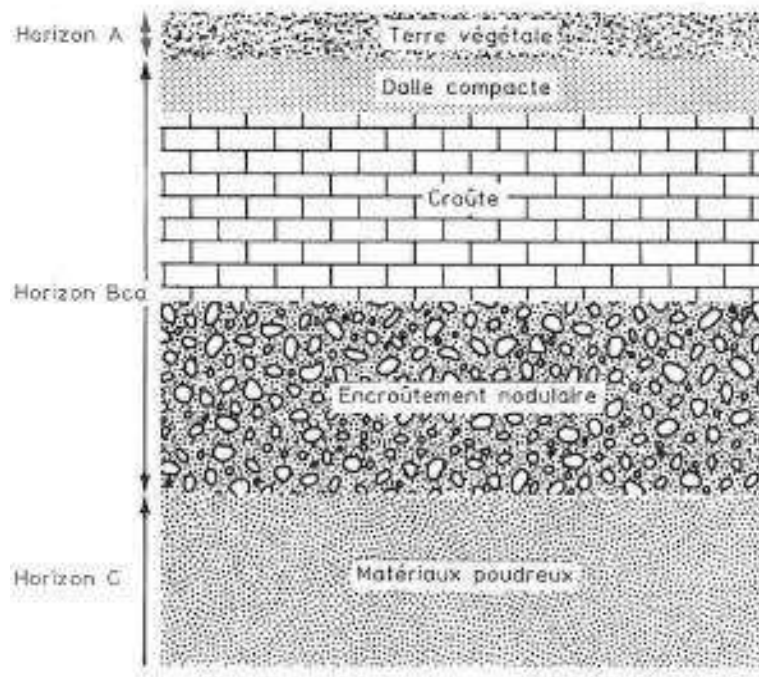


Figure 1.6 Profil d'encroûtement mur selon Ruellan (Colombier,1988)

Un sol qui passe tous ces stades présentera un profil très différencié. On y distinguera du haut vers le bas, les horizons suivants (Horta,1979) :

Horizon A.

C'est la couche de terre végétale dont l'épaisseur peut atteindre quelque décimètre, ou disparaître complètement en cas d'érosion.

Horizon Bca.

C'est l'horizon d'encroûtement proprement dit, son épaisseur peut varier de quelques décimètres à plusieurs mètres. Il comprend le plus souvent :

- Une dalle compacte, dure à forte teneur en carbonates (40 à 80 %) et dont l'épaisseur peut atteindre une vingtaine de centimètre.

- Une croûte constituée par une superposition de feuillets. La dureté de la croûte est plus faible que celle de la dalle, son épaisseur peut atteindre les 2 m. La différenciation entre la croûte et la dalle n'est pas toujours évidente.

- Une zone nodulaire. Il s'agit de nodules calcaires durs pris dans une gangue calcaire plus ou moins pulvérulente.

Horizon C

Cet horizon constitue le matériau d'origine dans lequel on rencontre cependant quelques nodules. L'enrichissement en calcaire est faible.

1.4.6 Classification des encroûtements calcaires

La classification de Ruellan (1970) établie pour la géologie du Maghreb, semble avoir un caractère relativement universel puisqu'elle est très voisine de celle de *Netterberg* (1978) établie à partir des études faites en Afrique du sud et en Australie.

Ruellan propose trois grandes catégories:

a) Distributions diffuses

La teneur en calcaire est très faible. Le calcaire n'est pratiquement pas visible à l'œil nu.

b) Concentration discontinues

La teneur en calcaire devient plus élevée (40 à 60 %) les concentrations de calcaire se présentent sous la forme de nodule durs de 1 à quelque cm^3 ou sous la forme de nodule, ou d'amas friable qui s'écrasent facilement.

c) Concentrations continues

Lorsque la concentration en calcaire se poursuit (teneur en $\text{CaCO}_3 > 60\%$) elle devient continue, on a alors affaire aux encroûtements calcaires proprement dits.

La classification proposée par Ruellan pour les concentrations continues, est résumée sur le tableau 1.1.

Tableau 1.1 – Classification des encroûtements calcaires selon Ruellan (Colombien ,1988)

Dénomination		Description	Teneur en CaCO ₃	Epaisseur	Rapports mutuels
Encroûtements non feuilletés	Structure massive	Structure massive ou polyédrique	> 60%	0.3 à 2.0 m le plus souvent	Sous les encroûtements non feuilletés, il y a toujours des amas friables avec ou sans nodules
	Structure nodulaire	Structure nodulaire Et polyédrique			
Encroûtements feuilletés	Croûtes	Feuillets superposés et discontinus d'encroûtements massifs ou nodulaires d'épaisseur millimétrique à centimétrique croissant du bas vers le haut.	> 70%	Quelques centimètres à plus d'1 m	Sous les croûtes, il y a presque toujours des encroûtements non feuilletés. Les dalles compactes n'existent qu'au sommet des croûtes et peuvent remplacer entièrement celles-ci. Des pellicules rubanées sont presque toujours associées à la dalle compacte dont elles tapissent la surface supérieure et les fissures
	Dalles compactes	Feuillets de croûte pétrifiés, épaisseur de quelques centimètres à plusieurs décimètres			

1.4.7 Répartition des encroûtements calcaires dans le monde et en Algérie

* Dans le monde

Les encroûtements gypseux et calcaires, tous les deux sont localisés dans les régions arides et semi- arides. (Figure1.7)

Les encroûtements calcaires se rencontrent notamment dans les pays suivants :

En Amérique : les U.S.A, le Mexique et l'Argentine.

En Afrique: le Kenya, la Tanzanie, le Somalie, l'Afrique du Sud, le Madagascar, le Mozambique, la Namibie, l'Angola et les pays d'Afrique du Nord. Au Moyen-Orient, on retrouve, le Liban, la Syrie, la Jordanie, l'Arabie Saoudite et l'Inde.

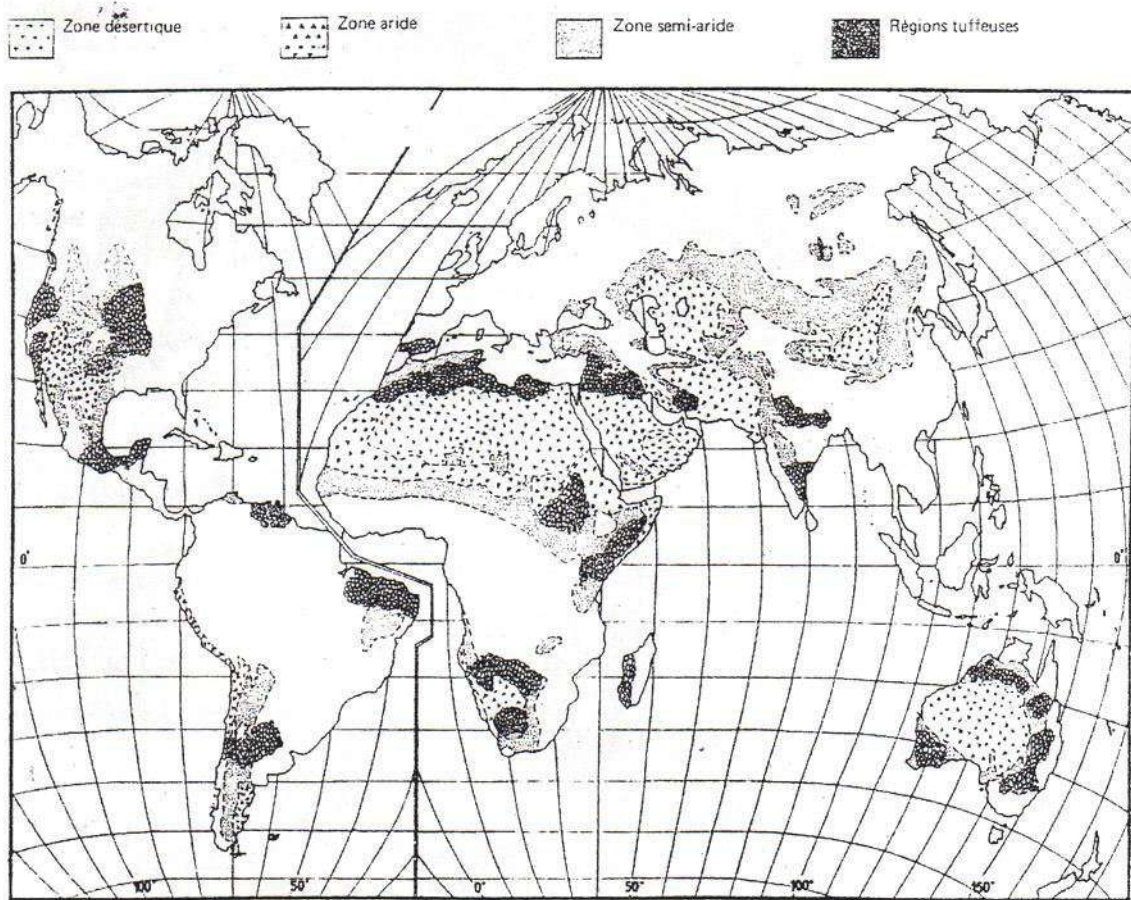


Figure 1.7 Répartition des encroûtements calcaires dans le monde (Ben-Dhia ,1983),

*** En Algérie :**

Les sols gypseux d'Algérie occupent 12,2% de la surface totale des sols gypseux du monde, ils sont estimés à 7966,3 Km² (représentant 3,3% de la surface du pays) (F.A.O., 1990).

Par contre les encroûtements calcaires occupent les régions sèches, et ils couvrent une superficie de plus de 300.000 km².

1.5 Encroûtements gypso-calcaires (mixte)

Durant le Quaternaire, il est arrivé que des régions soumise à des climats subhumide à certaines périodes soient devenues graduellement arides et vice-versa. Les oscillations climatiques du Quaternaire d'Afrique du Nord expliquent les superpositions d'accumulation du gypse et du calcaire dans certains sols. des encroutement calcaires ont pu être partiellement gypsifiés : devenus friable, ils se débitent en sable gypso-calcaire. Ailleurs, des formations gypseuses ont pu être recouvertes de carapaces calcaires : le gisement de ce type

peut fournir des graves gypso-calcaires. Ils sont bien connus dans la région de Ghardaia et Ouargla.

Les matériaux gypso-calcaire ont été largement utilisés en construction des chaussées saharienne.

D'après Fenzy (1966), la teneur en gypse et calcite de ces matériaux doit dépasser une certaine valeur. Ainsi des sables gypso-calcaire ne doivent être utilisés en couche de base que si la teneur en gypse plus carbonates dépasse 70%. Il a fait remarquer que les matériaux gypso-calcaire se regroupaient autour de deux pôles, l'un sulfaté, l'autre carbonaté.

1.6 Interaction gypse-calcaire

La plupart des encroûtements contiennent des carbonates de calcium et sulfate de calcium à des taux différent

Plusieurs travaux (Boyadgiev, 1974 ; F.A.O, 1990 ; Florea et Al-Joumaa, 1998) ont montré que l'augmentation du taux de gypse entraîne la diminution de la teneur en calcaire et vis versa.

Florea et Al-Joumaa (1998) présenté la relation suivante :

$$\text{CaCO}_3 = 23,12 - 0,174 \text{ gypse} \quad \text{ou} \quad \text{gypse} = 75,04 - 2,117 \text{ CaCO}_3$$

Pour l'horizon C, le coefficient de corrélation $R^2 = 0,368$

L'étude microscopique en zone aride de l'Algérie faite par Halitim et Robert (1987) montre qu'un envahissement de l'accumulation calcaire par le gypse avec une désintégration et une dilution au niveau de calcaire. Ils pensent que ce phénomène est dû à la pression de cristallisation du gypse qui détruit les individualisations calcaires par suite de l'arrivée continue des solutions sulfato-calciques et leurs précipitations à ce niveau.

La solubilité des deux minéraux et la composition ionique de la solution en équilibre sont dominées par le produit de la solubilité simultanée des deux réactions suivantes :



Le pH des sols gypso-calcaires est déterminé par la solubilité du gypse et du calcaire. L'activité du Ca^{+2} est élevée, le pH est plus faible dans le système CaCO_3 -gypse- CO_2 qu'en système CaCO_3 - CO_2 . L'effet de la pression CO_2 sur l'activité du Ca^{+2} est très faible en système CaCO_3 -gypse- CO_2 que celui en système CaCO_3 - CO_2 .

1.7 Recherche de Gisements

L'exploitation d'un gisement impose certainement la réponse à certaines exigences à savoir :

- Etre situé le plus proche du chantier ou au voisinage des divers lieux d'utilisation.
- Permettre d'extraire dans des conditions économiques raisonnables ;
- le matériau extrait possède de meilleures qualités géotechniques.

Avant d'effectuer une prospection par sondage ou méthodes géophysique, l'utilisation de certains indicateurs pourra aider à la reconnaissance des gisements.

***Le Climat**

La recherche sera limitée aux zones arides ou semi arides en éliminant les zones humides.

***La Topographie :**

La recherche des gisements de tuf est préférable d'effectuer tout sur les glacis de faibles pentes, car ce sont dans ces zones que les encroûtements feuilletés (les plus favorables pour les emplois routiers) ont le plus de chance de se trouver.

Les zones à forte pente sont en principe à éliminer de même que le fond des vallées, car le ruissellement aura érodé ou décomposé les encroûtements qui auraient pu se former antérieurement, dans ces zones, les encroûtements risquent d'être pollués.

La prospection dans des zones légèrement élevées qui résiste à l'érosion et où la découverte sera moins importante. Dans ces lieux, les encroûtements étant plus anciens, ils seront en principe plus durs.

***Les Indicateurs botaniques ou zoologiques :**

D'après Netterberg (1978), la présence de certains nombres de plantes dont souvent liée à l'existence des encroûtements, de même aussi pour certaines animaux et insectes. Ces indicateurs qui doivent être étudiés en fonction de la faune et la flore locale, n'ont cependant qu'une fiabilité restreinte.

*** Photographie aérienne**

Dans des zones d'accès difficiles, l'utilisation de la photographie aérienne peut être considéré comme un indicateur des intéressantes un géologue connaissant bien le contexte local. Par ce moyen, il est possible de sélectionner, dans une vaste région, les sites favorables à la présence d'encroûtement.

***Sondages de reconnaissance**

Les gisements des matériaux gypso-calcaires présentent des caractéristiques géotechniques variables aussi bien verticalement que latéralement. Il est donc nécessaire

d'effectuer des coupes précises sondages de reconnaissances qui permettent d'identifier la nature des différents horizons et leurs épaisseurs.

Seuls des sondage renseigneront sur la coupe du terrain et permettront de réaliser les prélèvements nécessaires pour analyser les matériaux. Il faut se rappeler que les encroûtements sont le plus souvent très variable dans leur épaisseur et qu'il est donc nécessaire de connaître l'épaisseur et les caractéristique géotechnique des différentes couche qui composent le gisement.

1.8 Comportement en laboratoire des matériaux gypso-calcaires

1.8.1 Granulométrie

Selon les caractéristiques du matériau d'origine et selon le processus d'extraction et d'élaboration, la granulométrie des tufs est extrêmement variable.

D'après Colombien (1988), Les courbes granulométriques des différents tufs d'encroûtement, souvent utilisés, peuvent être regroupées dans les fuseaux ci-dessous (figure 1.8).

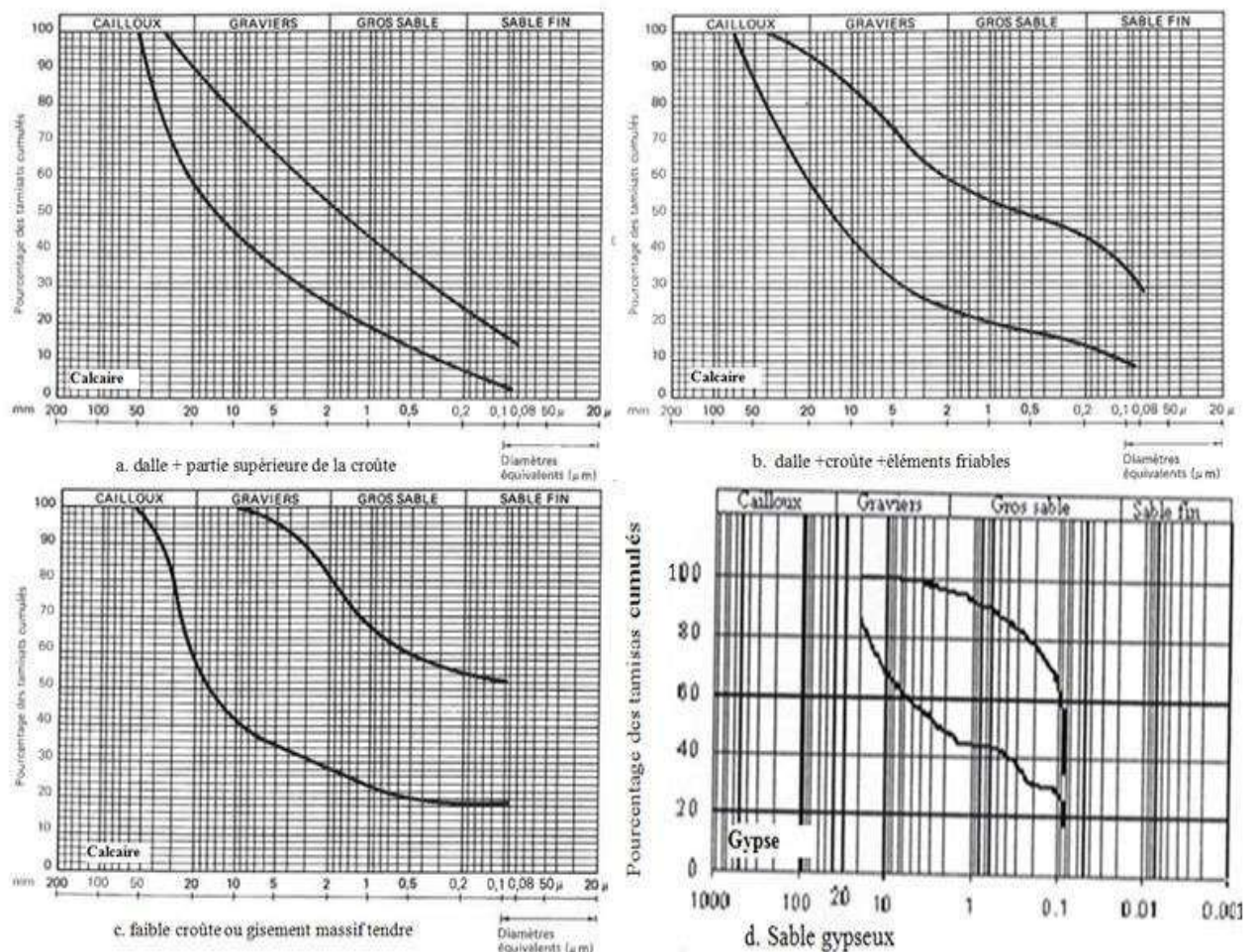


Figure 1.8 – Fuseaux granulométriques de matériaux extraits de différents encroûtements (Colombier, 1998 ; Morsli 2007).

Pour Frenzy (1966), les matériaux sahariens destinés aux constructions routières sont classés à l'aide de leurs granulométries en trois familles à partir d'un fuseau discriminant, dit « fuseau saharien » ou « fuseau de Beni Abbès » (Figure 1.9).

Ces trois familles sont :

- Famille I: ce sont des matériaux à squelette purement frottant dont la courbe granulométrique se situe au-dessous du fuseau. Ils ont un caractère non évolutif avec un angle de frottement important.

Famille II: c'est la classe des matériaux dont la courbe granulométrique s'inscrit entièrement dans le fuseau, à condition qu'ils soient non évolutifs mécaniquement par usure (valeur Los Angeles LA < 35%). Ces matériaux se rapprochent des graves non traitées.

Famille III: comprend les matériaux dont la courbe granulométrique se trouve entièrement ou partiellement au-dessus du fuseau. Ce sont des matériaux fins dont la résistance est obtenue principalement par cohésion.

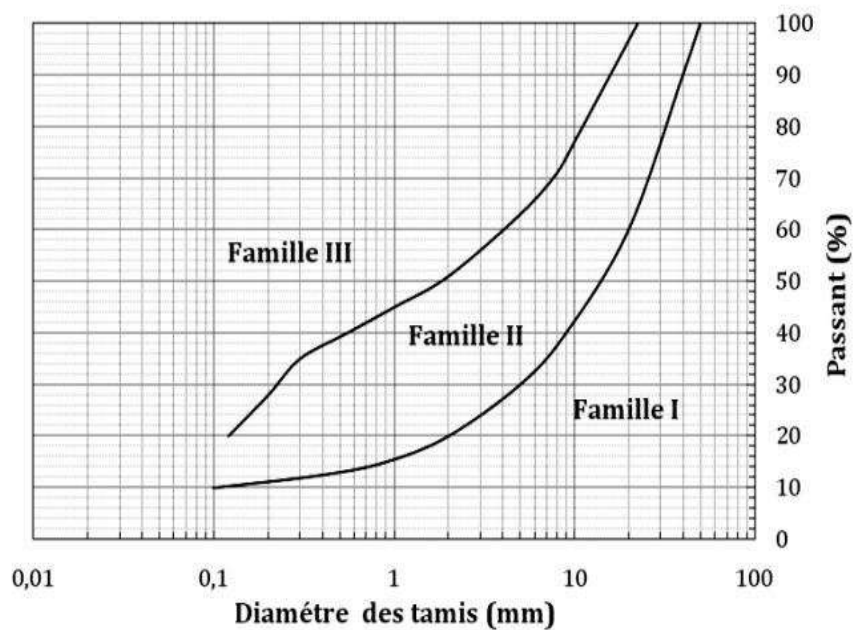


Figure 1.9 : Fuseau de spécification de la technique routière saharienne selon Frenzy, (Goual, 2012)

Compte tenu de la friabilité et de la faible résistance aux chocs de la plupart des matériaux gypso-calcaires utilisés dans les travaux routiers, l'évolution de leur granulométrie au compactage est citée comme un phénomène important par tous les utilisateurs. Ce phénomène est lié à la fois à la dureté du matériau et aux engins utilisés pour leur mise en œuvre.

Une planche d'essai a été réalisée au Maroc (SMELBG, 1980), pour étudier l'évolution granulométrique d'un tuf calcaire 0/40, après compactage du matériau sous différentes énergies (Figure 1.10)

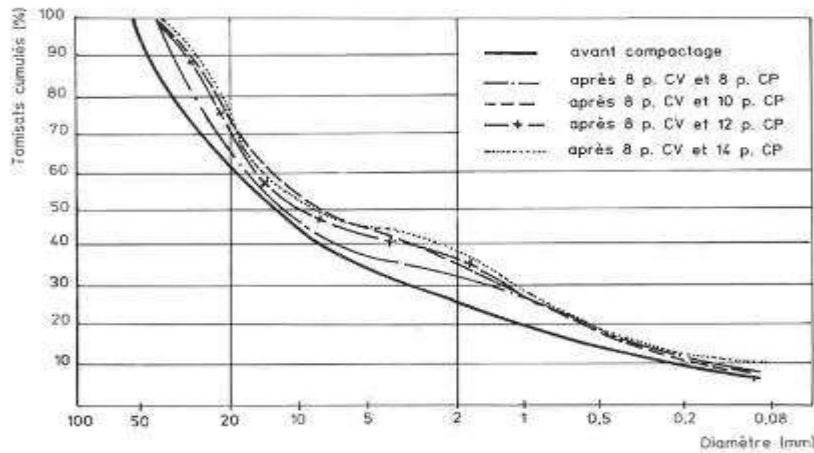


Figure 1.10: Evolution granulométrique d'un tuf en fonction du nombre de passe d'un compacteur vibrant (CV) et d'un compacteur à pneus (Ben Dhia, 1983)

Cette constatation a été vérifiée par Ben Dhia qui a soumis un échantillon de tuf calcaire ayant un Los Angeles > 70 à divers compactage de laboratoire (compactage Proctor, PCG à divers, vibro compactage)- figure 1.11.

La granulométrie évolue au début du compactage, puis se stabilise. L'allure de la courbe granulométrique d'origine est conservée et la teneur en fine assez peu augmentée.

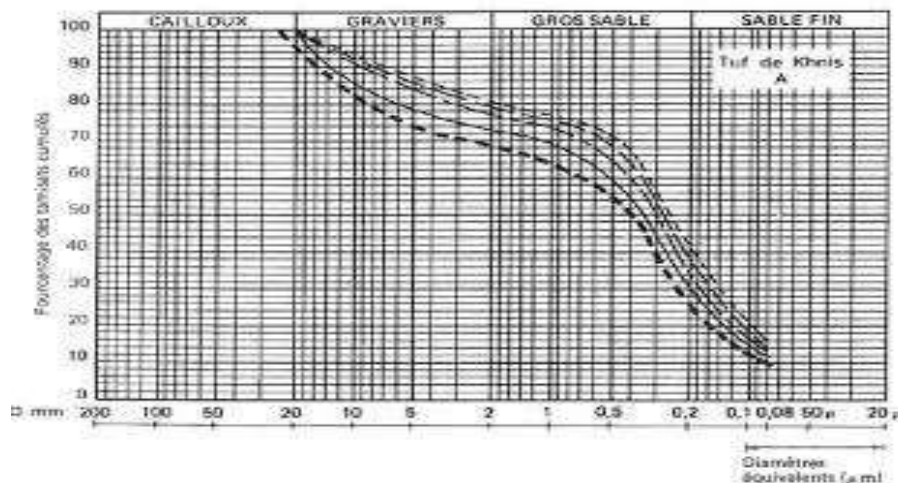


Figure 1.11 : Evolution granulométrique d'un tuf calcaire lors d'un compactage type Proctor (Ben Dhia, 1983)

Il semble d'ailleurs, qu'un passage du matériau dans un malaxeur ou que des manipulations tel qu'un brassage à la niveleuse par exemple, conduisent à une évolution du matériau au moins, aussi importante que le compactage.

1.8.2 Pollution des tufs

Avant d'utiliser n'importe quel matériau dans les différentes couches de chaussée, il est nécessaire d'avoir dans quelle mesure ils sont pollués par des fractions argileuse et par des matières organiques. La pollution peut être évaluée par les essais suivants :

1.8.2.1 Essai des limites d'Atterberg

Cet essai réalisé sur la fraction inférieure à 0.4 mm, pour estimer le taux de pollution de différents tufs encroûtements en fine argileuse, fait souvent référence à la valeur de l'indice de plasticité. Ce dernier est généralement situé dans la fourchette < 5 c'est-à-dire non mesurable à 25.

1.8.2.2 Essai d'équivalent de Sables (E.S.)

L'équivalent de sables est un rapport conventionnel volumétrique entre les grains fins et les autres. Il permet donc de caractériser l'importance des fines par une valeur numérique. Cette essai n'a que peu de signification lorsqu'il est réalisé sur la totalité de la fraction 0/5mm des matériaux. Les valeurs d'E.S. varient souvent entre 10 et 60.

1.8.2.3 Essai au bleu de méthylène

Réalisé sur la fraction 0/2 mm selon norme NF P18-592, l'essai au bleu méthylène, qui a été peu appliqué aux matériaux d'encroûtement, sera peut être le mieux adapté pour évaluer l'activité des fines et déterminer la présence d'argiles plastique à pour but de déterminer l'activité globale de la fraction argileuse.

Des essais réalisés sur ces matériaux indiquent que les valeurs au bleu de méthylène sont comprises entre 0,2 et 1,5

1.8.3 Comportement au compactage

Réalisé à la base de la norme NF P 94-093, l'essai de Proctor modifié simule l'évolution du sol au cours du compactage et permet de déterminer pour une énergie de compactage donnée, la teneur en eau optimale pour obtenir la densité sèche maximale.

Du au caractère très évolutif des matériaux gypso calcaire, il est conseillé de ne réutiliser pas le même échantillon pour les différents point de teneur en eaux.

Les tests de compactage effectués sur ces types de matériaux ont permis de relever les constatations suivantes :

- les densités sèches maximales oscillent entre 1,6 et 2 ;
- les teneurs en eau optimales sont très variables. Le plus souvent comprise entre 8 et

15% comme elles peuvent atteindre ou dépasser 20% :

- les densités les plus élevées correspondent aux teneurs en eau les plus faibles ;
- la densité sèche est peu affectée par la variation de teneur en eau pour les tufs non plastiques (figure 1.12).

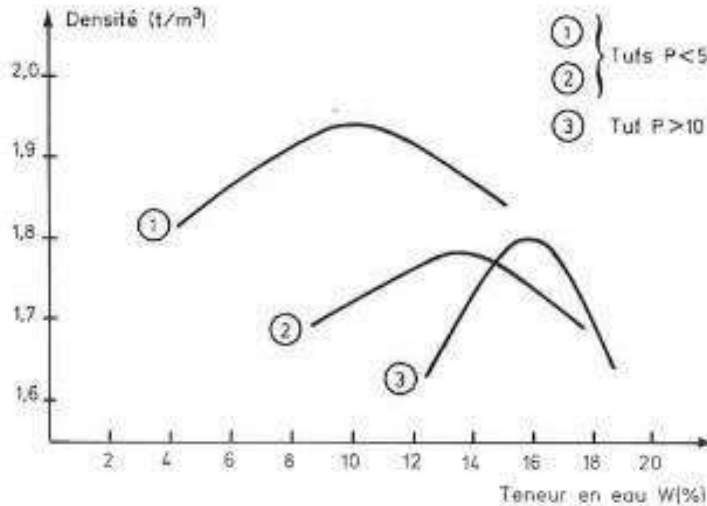


Figure 1.12 : Exemple de courbes de Proctor modifiée de certains tufs (Colombier, 1988)

1.8.4 Portance

L'essai est réalisé selon la norme NF P 94-093, Il sert à caractériser la portance du matériau c'est à dire la charge qu'il peut supporter sans se rompre, mais également à mesurer l'aptitude d'une chaussée à préserver sa portance une fois soumise à une forte immersion en cas de fortes pluies.

Selon le type du tuf, les valeurs de l'indice CBR immédiat sont très variables, oscillées entre 50 et 150. Elles sont plus élevées lorsque le matériau a un squelette dur. L'indice CBR après immersion, qui se situe souvent dans la fourchette de 30 à 100, est autant plus fort que l'indice de plasticité est élevé.

1.8.5 Résistance à la compression simple

L'essai de la résistance à la compression permet d'apprécier la valeur de la cohésion du matériau.

C'est un essai empirique, introduit pour les matériaux locaux pour la première fois par Fenzy(1966), il est réalisé sur tous les matériaux sahariens sur la fraction <5 mm.

Le compactage à l'OPM est effectué à la presse, et les éprouvettes démoulées sont séchées à l'étuve à 60° C pendant 98h (éprouvette de 5 cm de diamètre et de 10 cm de hauteur. Les valeurs des résistances à la compression simple varient entre 5 bars et 40 bars.

Les résultats obtenus par les différents auteurs (Horta,1979; Alloul, 1981 ; Ben-Dhia,1983 ; Struillou et Alloul, 1984 ; Ben-Dhia et al., 1984 ; Colombier,1988; Améraoui, 2002 ; Goual et al., 2005 ; Morsli et al., 2005 et2007 ; Goual,2012 ; Cherrak et al ,2015), ayant réalisé des essais de laboratoire sur tuf d'encroûtement, montrent une grande dispersion dans les caractéristiques géotechniques de ces matériaux. Néanmoins, les fourchettes de variation (tableau 1.2) sont établies en fonction de la nature chimiques du tufs

Tableau 1.2 : Synthèse des caractéristiques géotechnique et mécaniques des tufs d'encroûtement (Morsli ,2007)

	Encroûtement	Calcaire	Gypso-calcaire	Gypseux
Taux de Gypse et de calcaire	Calcaire	50 à 95 %	10 à 50 %	Moins de 10 %
	Gypse	Moins de 10 %	10 à 50 %	40 à 90 %
	Gypse + calcaire	Plus de 50%	Plus de 50%	Plus de 50%
Granulométrie		Très variable	Variable	Matériaux fin à pulvérulent
Limité d'Atterberg		Non mesurable < I _p <25	Ordre de 13%	Ordre de 6%
Equivalent de Sable		10 à 60 %	> 40 %	Sans signification
Essai Proctor	Densité sèche	$1.7 < \gamma_d < 2$	$1.7 < \gamma_d < 2$	$1.60 < \gamma_d < 1.90$
	Teneur en eau optimale	$8\% < W_{opt} < 20\%$	$8\% < W_{opt} < 20\%$	$8\% < W_{opt} < 20\%$
Essai CBR	immédiat	50 à 100	50 à 100	Jusqu'à 112 avec une moyenne de 40
	imbibé	30 à 100	20 à 40	Peut chuter jusqu'à 8
Essai de compression simple (MPa)		0,3 à 5	1à 6	Entre 0,3 et 5 MPA

1.9 Durcissement des tufs compacts

1.9.1 Constatations sur chantiers

Les ingénieurs routiers qui ont utilisé les tufs d'encroûtements sont d'accord sur les constatations suivantes faites dans tous les pays utilisant ce genre de matériaux.

- Après compactage et séchage, les couches d'encroûtements durcissent. C'est dans la partie supérieure de la couche que le phénomène est le plus important ;

- Sous réserve que la couche soit protégée de l'eau (couche de roulement étanche et drainage efficace), ce durcissement se conserve, voire s'accroît dans le temps ;
- Le durcissement disparaît si, faute des dispositions constructives nécessaires, la couche de tuf voit sa teneur en eau fortement augmenter ;
- Le durcissement est très inégal selon le gisement utilisé :
- L'importance de ce durcissement influence le comportement dans le temps et sous le trafic des chaussées réalisées. Les chaussées sur lesquelles ce durcissement est le plus net se comportent le mieux.

1.9.2 Etude en laboratoire

La méthode la plus courante pour reproduire en laboratoire le durcissement constaté sur chantier consiste à fabriquer des éprouvettes de tufs compactés et à mesurer l'évolution de leur résistance en compression dans le temps selon divers modes de conservation.

Les expériences de Ben Dhia (1983) sur des éprouvettes de diamètre de 16 cm, et de hauteur 32 cm ont été confectionnées par vibro compression à la teneur en eau et à la densité de L'OPM modifié pour deux tufs considérés comme différents, notamment par leur teneur en carbonates (75% de $CaCO_3$ pour El Bibane et 60% pour le tuf de Kins). Les éprouvettes ont été conservées soit en étui étanche (maintien de la teneur en eau de compactage), soit à l'air libre à 20° C ou étuve ventilées à 40°. La résistance à la compression a été mesurée à 1 jour, 7 jours, 28 jours, 60 jours, 180 jours et 360 jours.

Les résultats de ces essais sont représentés sur la figure 1.13 ci-dessous :

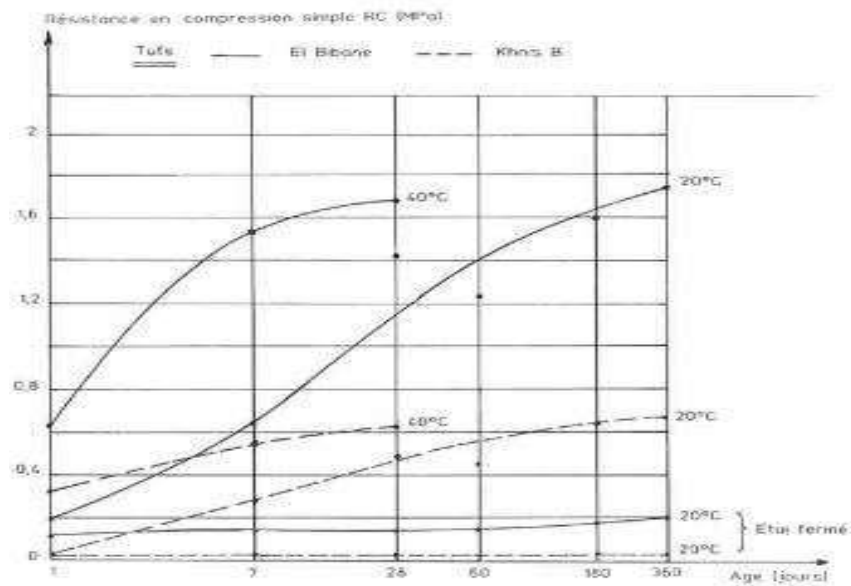


Figure 1.13 : Evolution de la résistance en compression simple de deux tufs calcaires

conservés de trois façons différentes (Ben Dhia, 1983)

Ces courbes montrent :

- Qu'il y a peu ou pas d'évolution de la résistance lorsque la teneur en eau des éprouvettes est maintenue constante;
- Que, lorsqu'une dessiccation est possible, le durcissement des éprouvettes conduit à une augmentation importante des résistances en compression qui peuvent être multipliées par 10.
- Que la température accélère le phénomène, mais qu'à long terme, on tend vers des résistances variant de 0.7MPa à 1.8 MPa.

1.10 Explication du phénomène de durcissement

L'évolution de la cohésion macroscopique du tuf gypso calcaire lors de l'évaporation de l'eau, après humidification et compactage tend vers une explication par un changement minéralogique ou une dissolution partielle des carbonates et du gypse, formant un soluté dont la concentration augmente lors de l'évaporation provoquant une recristallisation des fractions dissoutes, ce processus est appelé le cycle : Dissolution-Evaporation-Recristallisation.

Des travaux menés par M. Morsli (2007) démontrent l'existence d'une teneur en eau pour laquelle le durcissement est maximal et ont exclu tout compactage à sec pour ce type de matériaux. Et qu'une teneur en eau minimale est indispensable pour que le durcissement s'opère mais elle doit rester inférieure à la teneur en eau Wopm. (figure 1.14)

La teneur en eau optimale de durcissement (Wod) ne correspond pas à la teneur en eau optimale de compactage; elle se situe à gauche de cette dernière (Wod < Wopm).

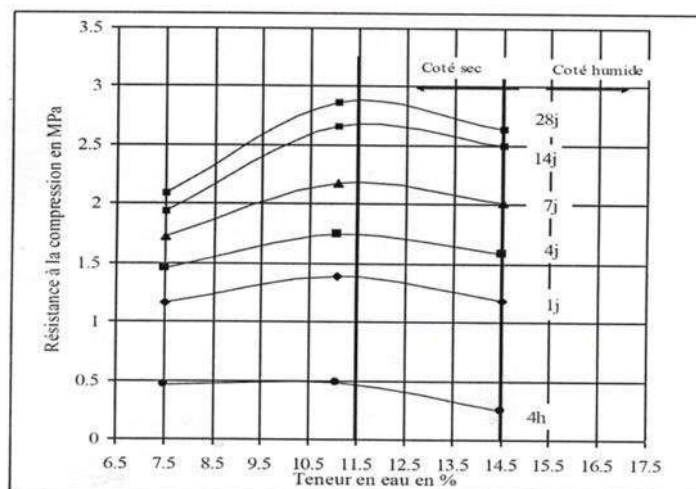


Figure 1.14 : *Influence de la teneur en eau de confection sur la résistance à la compression Morsili (2007).*

1.11 Techniques de stabilisation des tufs

Le recours au traitement des tufs d'encroûtements a déjà été envisagée. Il peut cibler soit une amélioration de la cohésion et/ou de l'angle de frottement interne, soit une amélioration des caractéristiques de mise en œuvre, soit une insensibilisation à l'eau. Les techniques de stabilisation sont généralement choisies en fonction des problèmes posés et du but recherché.

Généralement les tufs traités utilisés en corps de chaussées sont stabilisés soit par ajout de liants, soit par ajout, et à très faible pourcentage, de produits organiques très élaborés soit de mélanges de matériaux.

1.11.1 Stabilisation à base de liants hydrauliques

La chaux et le ciment sont les liants hydrauliques les plus classiquement employés pour améliorer les sols ou renforcer les matériaux. Leur action résulte essentiellement de l'effet de prise et de cristallisation de leurs constituants par hydratation.

1.11.2 Stabilisations par des produits organiques

Un certain nombre de produits organiques ont été proposés pour la stabilisation des sols fins. Il s'agit de dérivés aminés tensioactifs, de résines associées à des agents durcisseurs ou d'extraits de végétaux du type lignosulfonates ou lignosulfites.

Le but de ces produits est d'améliorer la tenue des sols fins en diminuant leur affinité pour l'eau en enrobant leurs particules d'un film tensio actif. Ces additifs sont fournis sous forme de liquides ou de pâte diluable ou de poudre dispersable.

1.11.3 Stabilisation par mélanges de tuf et de granulats

Les tufs, notamment les plus tendres, ont naturellement un pourcentage de fines élevé et ils comportent peu ou pas de squelette (sable). Certaines graves naturelles sont, au contraire, riches en gros éléments mais totalement dépourvues de fines. Par ailleurs, certains sables naturels éoliens ou alluvionnaires ont des courbes granulométriques très homométriques et sont dépourvus de fines.

L'association de tufs d'encroûtements avec d'autres matériaux (graves, sables) paraît donc tout à fait intéressante lorsqu'on veut améliorer la granulométrie d'une grave dépourvue de fines ou réduire la quantité de fines d'un tuf riche en fines.

Des travaux menés par Morsili (2007) montrent que l'ajout d'un sable de dunes, jusqu'à un pourcentage de 25%, aux tufs d'encroûtement de Béchar présentant une certaine

argilosité peut améliorer la densité sèche maximale et l'indice portant ICBR comme le montre respectivement les figures 1.15 et 1.16.

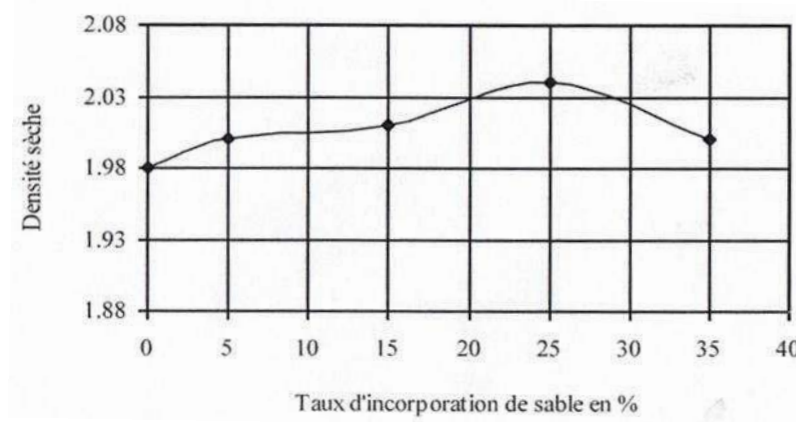


Figure 1.15: Influence de l'ajout du sable de dunes aux tufs sur la densité sèche Morsli (2007)

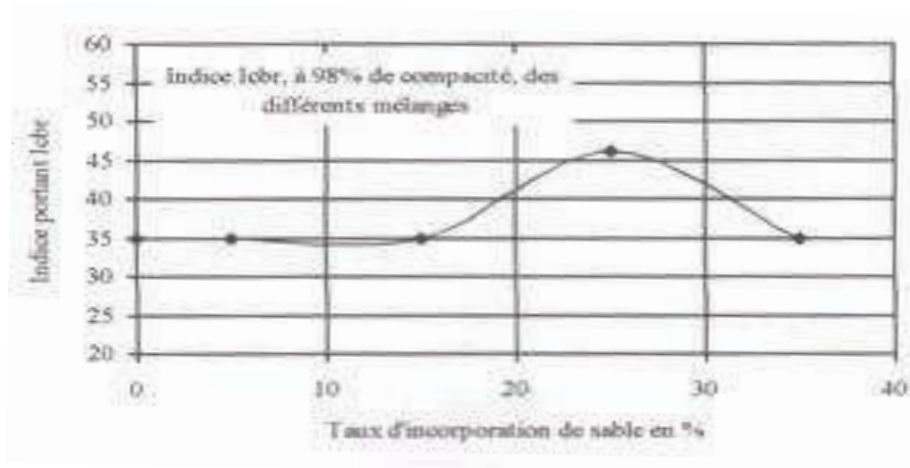


Figure 1.16: Influence du taux d'incorporation de sable sur l'indice portant Icbri Morsli (2007)

1.12 Technique routière saharienne

En 1965, lors du 1^{er} séminaire de Béni Abbès, les principes de la technique routière saharienne ont été justifiés et arrêtés. Depuis, cette technique a fait l'objet d'un certain nombre d'article de synthèse, il y a également des études portant sur certains matériaux particuliers.

La technique routière saharienne (TRS) n'est applicable que:

- sous un climat très sec (moyenne annuelle des pluies < 100 mm) et dans les conditions telles que les risques d'imbibition des sols sous chaussées soient très réduit;
- pour un trafic prévisible relativement faible.

1.12.1 Routes sahariennes

La construction des routes au Sahara présente des particularités liées, aux conditions climatiques, aux matériaux locaux, à la faiblesse du trafic et à la portance du sol support qui la diffèrent de celle des régions humides. Cette technique possède donc ses propres normes et expériences

Les premières routes sahariennes ont été réalisées vers 1955, il s'agit notamment des axes Ghardaïa – El Goléa et Ghardaïa – Ouargla, elles ont été étudiées en adoptant les bases de la technique mise au point pour la France métropolitaine à l'époque.

La première réalisation fût un chantier en régie, entrepris en 1953 près d'El-oued, dans la traversée des Oasis du Souf, région où la pierre à plâtre ou le gypse, seul matériau dur, est utilisé par les maçons locaux. On utilisa la croûte gypseuse de surface en blocage à la main; les intervalles ou "interstices" sont garnis de sable gypseux pulvérisé, après humidification et compactage, l'ensemble se soudait pour former une croûte très dure. La couche de chaussée ainsi réalisée fut recouverte d'un sable à bitume à base de sable de dune. Cette réalisation ayant donné de bons résultats pour une circulation peu intense et assez légère et qui servit de base "technique" aux réalisations futures: axe Biskra-Tougourt et Biskra-El-Oued, lancés en 1955.

En 1956, sur la RN 1 entre Laghouat et Ghardaïa, les ingénieurs ont innové en saupoudrant une couche de base, un macadam classique, avec du tuf calcaire. La route a bien tenu malgré un trafic relativement élevé. Par la suite, les tufs bruts ont été utilisés en couche de base et la préférence a été donnée aux tufs à squelette qui se rapprochent le plus de la grave concassée.

Aujourd'hui, l'utilisation des tufs s'est généralisée aux tufs sans ossature. La tenue de l'ensemble des ces chaussées a été satisfaisante à chaque fois que les conditions liées aux critères de choix sont remplies et que les précautions de mises en œuvre ont été respectées.

1.12.2 Principe de la technique

Les conséquences pratiques de ces idées de base exprimées ci-dessus :

- La couche de roulement doit être parfaitement souple pour se plier sans rompre. Le revêtement qui semble s'adapter à cette condition est :

- soit l'enrobé souple mis en place en couche aussi mince que possible (enrobé à froid de faible épaisseur).
- soit de l'enduit superficiel.

Notons cependant que ces revêtements doivent avoir l'épaisseur minimale qui leur permettrait de résister efficacement aux importants efforts tangentiels développés par les pneus des essieux lourdement chargés.

- Les matériaux de la couche de base doivent pouvoir supporter des déformations élastiques sans dommage. Ces déformations peuvent être relativement importantes à la seule condition qu'elles soient entièrement réversibles.

Cette spécification est beaucoup moins rigoureuse que celle qui consiste à limiter les déformations élastiques et permet de ce fait d'utiliser une gamme assez variée de matériaux.

-La sécheresse (permanente) ouvre largement l'éventail de matériaux utilisables en couche de base. Sous un climat humide, il n'est possible d'utiliser que des matériaux à angle de frottement élevé (matériaux traités exclus) car les matériaux cohérents contiennent beaucoup de fines qui leur font perdre toute leur cohésion en présence d'eau.

-La cohésion des sols est en général obtenue par la présence d'argile, mais dès que celle-ci est humide elle sert de support et maintient l'eau sur les points de contacts entre grains qu'elle lubrifie parfaitement. Tous les éléments fins même gypseux ou calcaires sont un peu moins néfastes mais leur action est identique.

-La portance des sols de fondation, généralement bonne (indice CBR supérieur à 20) et la très faible pluviométrie sont des facteurs favorables à la conception de structures de chaussées économiques car les matériaux ne sont jamais imbibés en dehors de points bas. Le corps de chaussée se résume alors à une vingtaine de centimètre de matériaux locaux généralement disponible tout le long du tracé.

-Du point de vue revêtement, l'enduit superficiel et l'enrobé à froid sont préférés à cause de leur grande souplesse. Le choix des matériaux pour l'élaboration des granulats est très limité et demande très souvent une très grande distance de transport. L'expérience a montré que les granulats exploités en profondeur dans les carrières présentent un comportement meilleur par rapport à ceux issus du ramassage ou exploités en surface. Si le volume exploitable de la carrière en exploitation peut couvrir le besoin en granulat du tronçon en cours de réalisation, il reste impératif de chercher d'autres carrières pour le reste du projet.

1.12.3 Structure de la chaussée saharienne

La structure de chaussée se présente sous forme de structures multicouches (figure 1.17), mises en œuvre sur un ensemble appelé plate-forme support de chaussée constituée de sol terrassé 'dit sol support' surmonté généralement d'une couche de forme.

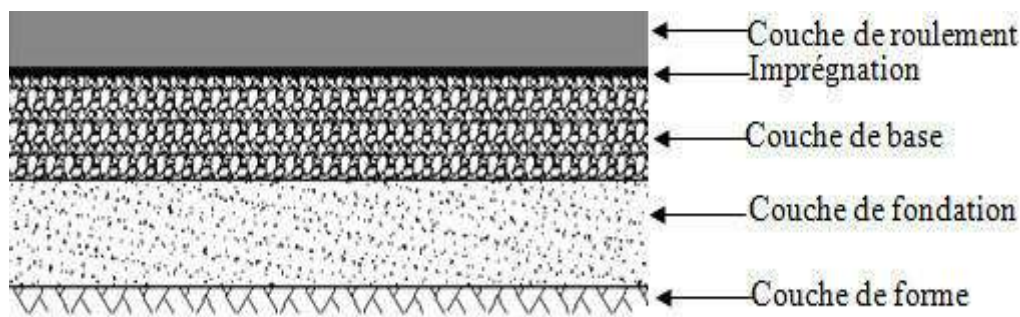


Figure 1.17- Coupe transversale type d'une chaussée saharienne.

a) Couche de forme

Il n'y a pas de sélection de matériaux pour la couche de forme à l'exception des matériaux trop fins et pulvérulents qui sont écartés. Ce sont généralement des tout-venant qui sont utilisés; cependant, dans les zones des dunes, le sable peut constituer le corps du remblai, mais sa mise en œuvre pose des problèmes particuliers: faible portance du sable, sa fluidité et difficulté d'être répandu.

b) La couche de fondation

La couche de fondation est mise en place sur la plate-forme support de la chaussée par compactage avec humidification et est exécutée sur toute la largeur de la plateforme.

La couche de fondation apporte la résistance mécanique aux charges verticales, répartissant les pressions sur la plate-forme afin de limiter les déformations à ce niveau au seuil admissible.

c) La couche de base

La couche de base est aussi compactée avec humidification et exécutée sur toute la largeur de la plate forme, avec des élargissements sur certaines sections (passages submersibles, remblais de grandes hauteurs, etc.).

d) L'imprégnation

Préalablement à la réalisation d'une couche de roulement, les matériaux de la couche de base doivent recevoir une couche d'imprégnation bitumineuse ayant pour but :

- Assurer l'accrochage de la couche de roulement sur un matériau souvent très fermé en surface;
- Servir éventuellement de couche de roulement provisoire;
- Protéger la couche de base d'éventuelles précipitations.

L'imprégnation est réalisée sur toute la largeur de la plate forme, le plus souvent au cut-back 0/1 et parfois au cut-back 10/15.

e) La couche de roulement

Selon l'intensité du trafic, la couche de roulement sera constituée par un enduit superficiel, un enrobé à froid, un enrobé à chaud ou un sable bitume.

Cette couche assure les fonctions d'adhérence avec les pneumatiques, elle doit résister aux actions directes du trafic et du climat.

1.12.4 Assises en tufs d'encroûtements

Les tufs d'encroûtements sont utilisés pour la construction des chaussées de moyen à faible trafic. L'utilisation la plus courante est en assises de chaussée (couche de base et couche de fondation), d'autres usages sont fréquents : accotements, remblais, pistes agricoles, etc. Le corps de chaussée est mince, traité à sa surface supérieure sur cinq (05) cm en moyenne afin de lui procurer une certaine rigidité et pour absorber les efforts de cisaillement très intenses induits par les poids lourds.

L'épaisseur moyenne requise pour la couche de base est de 15 cm. La couche de fondation est liée à la nature du sol de fondation et des conditions de terrassement, son épaisseur peut varier de 15 à 30 cm. Le module d'élasticité du matériau de la couche de base doit être compris entre 150 et 300 MPa (soit un indice portant compris entre 30 et 60) (Morsli, 2007).

L'imprégnation est réalisée sur toute la largeur de la plate forme, le plus souvent au cut-back 0/1 et parfois au cut-back 10/15

1.13 Conclusion

Les matériaux gypso-calcaire appartiennent à une catégorie des matériaux de chaussée très répandus dans les zones arides et semi arides. Ils se sont regroupés autour de deux pôles, l'un sulfaté, l'autre carbonaté. De tels matériaux échappent en effet totalement aux classifications habituelles en raison de la variabilité de leurs caractéristiques géotechniques.

L'évolution de la cohésion des matériaux gypso-calcaire lors de l'humification et du compactage est due au cycle: "Dissolution-Evaporation-Re cristallisation". Cela confère à ces matériaux une propriété requise pour une utilisation en construction routière saharienne

Des expériences ont montré que l'amélioration de certaines propriétés mécaniques des tufs d'encroûtement de mauvaise qualité peut se faire soit par traitement aux liants ou en mélange avec d'autres matériaux, utilisés comme des correcteur granulaire, afin d'élargir leur champs d'exploitation dans les différents couches de chaussée.

Chapitre **2**

Recyclage des déchets de BTP et traitement des matériaux routiers

Chapitre 2: Recyclage des déchets de BTP et traitement des matériaux routiers

2.1 Introduction

Aujourd'hui, le recyclage des déchets du secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP), issus des chantiers de construction et de démolition, et la valorisation des matériaux locaux peu exploités deviennent un impératif vu leurs impacts économiques et écologiques. L'utilisation de ces deux ressources comme des matériaux alternatifs en construction routière peut apporter une solution judicieuse au problème de la rareté des granulats naturels de bonne qualité qui entraînent souvent des coûts élevés.

La réintégration des déchets de BTP dans les différentes couches de chaussée peut se faire après concassage et calibrages selon le besoin. Tandis que les matériaux locaux inaptés ayant des caractéristiques géotechniques et mécaniques médiocres peuvent être traités au liant d'une manière économique.

En effet, la voie de la valorisation peut trouver des solutions aux préoccupations actuelles. Elle permet de :

- ✓ Contribuer à la protection de l'environnement en fournissant un débouché à ces déchets et en évitant ainsi leur pertes, et mise en dépôt.
- ✓ Fournir à la construction routière des matériaux alternatifs de qualité suffisante et ayant une certaine stabilité intrinsèque.
- ✓ Réduire le recours à des granulats naturels, ressource non renouvelable.
- ✓ Préserver les sites d'extraction existants.
- ✓ Lutter contre les décharges sauvages.

Dans ce chapitre, nous donnons d'abord quelques généralités sur les déchets, les différents types de déchet et leur utilisation en techniques routière. Ensuite, nous abordons le processus de traitement des matériaux routiers et ses intérêts, ainsi que les différents liants utilisés.

2.2 Définitions

Les déchets sont des « Résidus, matériaux, substances ou débris rejetés à la suite d'un processus de production, de fabrication, d'utilisation ou de consommation ». (Pilon I. et Laquerre M. ,1999).

Selon l'article N° 3 de la loi Algérienne N°01-19 du 12 décembre 2001, « tous les résidus d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, et plus généralement toute substance, ou produit et tout bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer ».

L'utilisation des déchets et des sous-produits en technique routière est déjà de pratique courante dans certains pays où ils servent notamment :

- de matériau de remblai
- de matériau de fondation (schiste houiller, laitier de haut fourneau)
- d'agrégat de béton bitumineux (laitier de haut fourneau)
- de liant hydraulique (mélange de cendre volante avec de la chaux ou du ciment).

2.3 Classification des déchets

2.3.1 Déchets inertes

Ce sont des déchets qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante; ne se décomposent pas, ne brûlent pas, et ne produisent aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entre en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. (Directive 1999/31/CE)

Ces déchets sont admissibles dans les installations de stockage de classe 3 et proviennent essentiellement des chantiers de bâtiment et de travaux publics ou d'industries de fabrication de matériaux de construction.

Ce sont notamment les déchets suivants :

Les bétons, les tuiles et les céramiques, les briques, les déchets de verre, les terres et granulats non pollués et sans mélange, les enrobés bitumeux...etc.

2.3.2 Déchets Industriels Banals (DIB)

Un déchet est dit banal s'il est traité par les mêmes procédures que ceux employés pour les déchets ménagers. Ces déchets ne sont ni inertes, ni toxiques. Ils regroupent l'ensemble des déchets non dangereux produits par les industriels et les entreprises du commerce, de l'artisanat, des services et de l'administration, de la métallurgie, la plasturgie, la peinture, la chimie et la pétrochimie. Ce sont des déchets d'emballage, des loupsés de fabrication non polluants (chute, rébus), des déchets d'entretien et les matériels en fin de vie.

Ils sont assimilables aux ordures ménagères et suivent des traitements similaires : recyclage, valorisation énergétique, stockage.

2.3.3 Déchets dangereux

Ils peuvent générer des nuisances pour l'homme et l'environnement, et présenter une ou plusieurs propriétés de danger (explosif, carburant inflammable, irritant, infectieux, mutagène, écotoxique...) ce qui implique que certaines précautions particulières. Ils font l'objet d'un contrôle administratif renforcé (production, stockage, transport, élimination).

2.4 Valorisation des déchets inertes de BTP en construction routière

Le béton et l'enrobé sont des matériaux composites composés des matériaux minéraux (graviers, gravillon, sable, bitume). La brique, la tuile et la céramique, le verre et le ballast de voie sont aussi des déchets composés de matériaux minéraux avec l'argile et la pierre. Tous ces déchets se retrouvent sous forme de gravats lors de construction ou démolition des chantiers de BTP.

Ces déchets inertes peuvent être récupérés, concassés et utilisés comme granulats en fonction de leurs dimensions, dans la couche de fondation routière, comme matériaux de remblai, pour l'aménagement paysager et pour d'autres applications dans le domaine de la construction (tableau 3.1.)

Tableau 2.1: Usage possible des granulats recyclés (tiré de planète TP, SD. et Hoclum 2010).

Granulats recyclés (mm)	Utilisation
0/4	- Mortier - Enduits
0/12 à 0/32	- Assise de chaussée - Couche de roulement dans la composition des enrobés bitumineux
0/32 à 0/80	- Remblais
6/14	- Bétons hydraulique (parpaings, canalisation) - Béton prêt à l'emploi
40/70 à 60/120	- Ballast de voie
0/125	- Aménagements décoratifs

2.5 Processus d'élaboration des granulats recyclés

Les différentes étapes d'élaboration des produits issus du recyclage des matériaux de démolition sont :

- sélection, stockage et traitement des produits bruts;
- préparation des matériaux avant concassage : cette étape consiste à réduire les plus gros éléments à l'aide d'un brise roche hydraulique (BRH) et à retirer les impuretés les plus grosses;
- tri manuel;
- déferrage électromagnétique;
- concassage et criblage : étape destinée à éliminer les matériaux de faibles caractéristiques;
- concassage secondaire éventuel de la fraction supérieure issue du concassage primaire;
- stockage;
- analyses éventuelles avant utilisation.

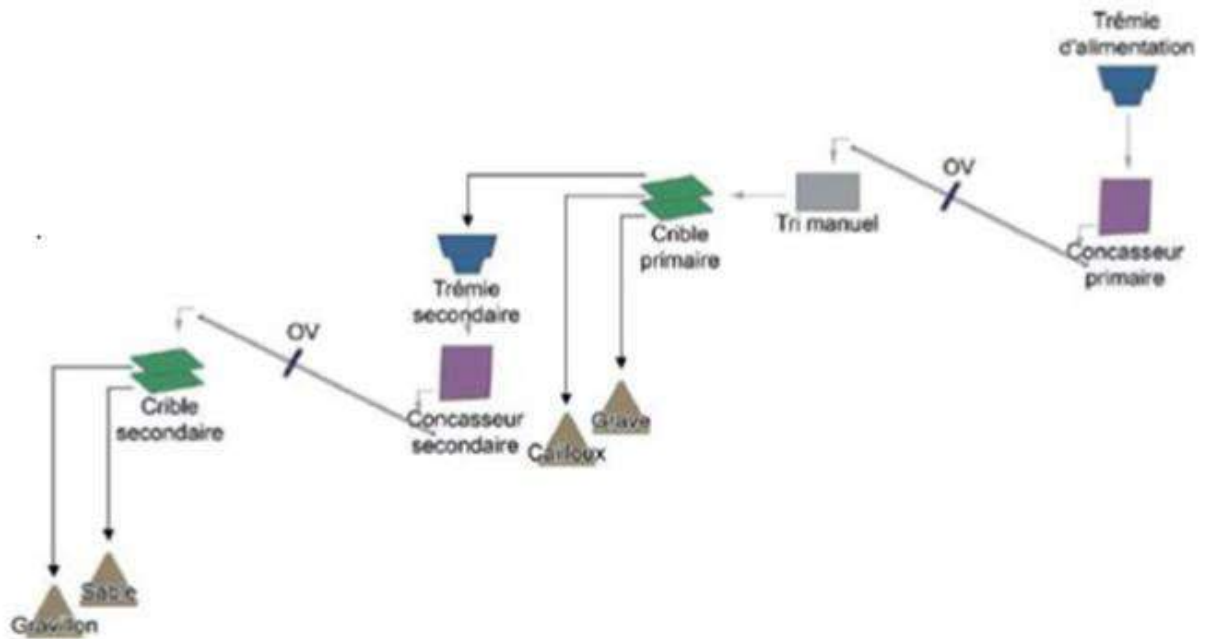


Photo 2.1 : *Processus de valorisation des matériaux de démolition (ADEME, 2011)*

2.6 Performances mécaniques des granulats recyclés

La caractérisation des granulats recyclés établie par certains auteurs (Barkat, 2007 ; Padmini et al, 2009) montre qu'un écart enregistré dans les propriétés physiques entre les granulats recyclés et les granulats naturels, notamment :

- La densité des granulats recyclés qui est plus faible que celle des granulats naturels ;
- L'absorption d'eau qui est considérable pour les granulats recyclés.

Cependant, les performances mécaniques de ces granulats recyclés, surtout issus du béton, ne sont pas loin de celle des granulats naturels.

Boudlal et Melbouci (2010) ont étudié le comportement des mélanges constitués de débris de construction et de démolition (béton+ brique), soumis aux différentes sollicitations (Proctor, CBR et cisaillement direct à la boîte de Casagrande), voir figure 2.1, 2.2 et 2.3.

Ils ont montré que le comportement est appréciable des mélanges et qu'un mélange granulat de béton +5% de brique sous forme de grains inférieurs à 0,125 mm avec des proportions ne dépassant pas 5%, a conduit à un comportement très satisfaisant proche de celui des granulats naturels sous les différentes sollicitations. Ce qui permet de le réutiliser en assises de chaussée à faible ou moyen trafic.

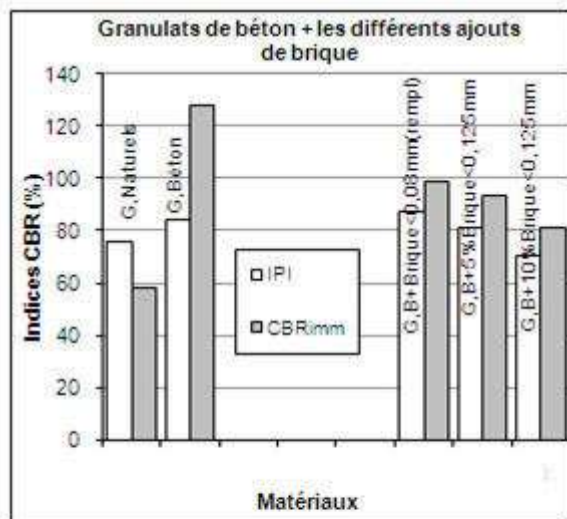


Figure 2. 1 : Essais CBR des différents mélanges de granulats recyclés avant et après immersion(Boudlal et al ,2010).

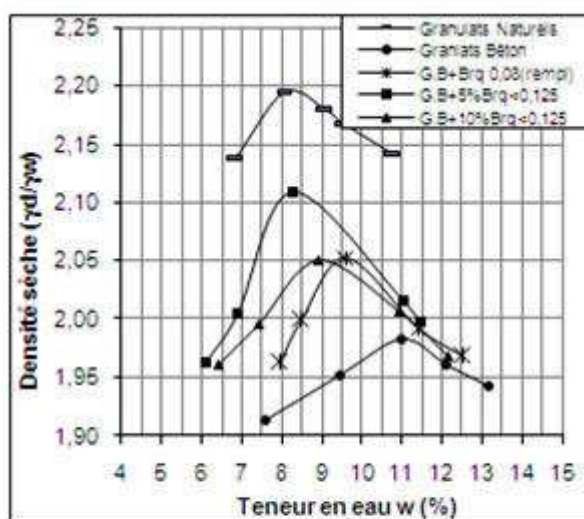


Figure 2.2: Courbes Proctor de comparaison entre granulats recyclés et granulats naturels. (Boudlal et al ,2010).

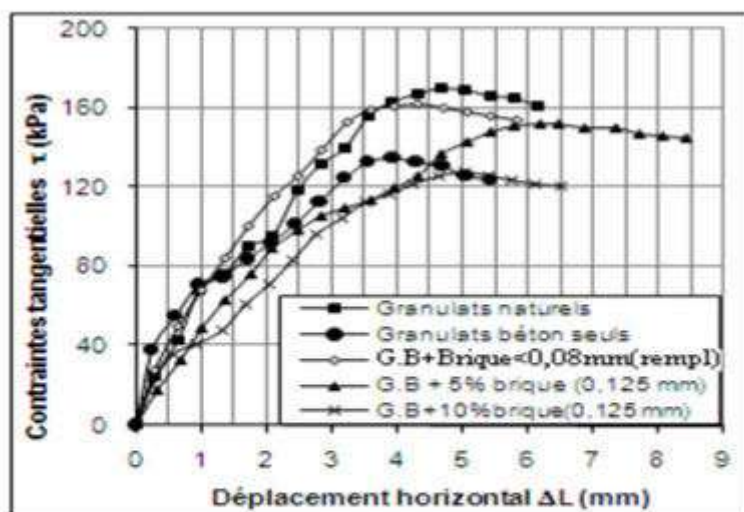


Figure 2.3 : Courbes de contraintes-déformations au cisaillement des différents mélanges de granulats recyclés(Boudlal et al ,2010).

De plus, une étude finlandaise a même prouvé que l'utilisation du béton recyclé, d'une certaine qualité et composition, permettait de réduire l'épaisseur des couches et sous-couches des routes en raison des bonnes propriétés de roulement que confère la matière. En effet, les granulats recyclés, composés de matériaux cimentaires non liés, possèdent une meilleure résistance que les granulats naturels pour cette application « Rudus ,2000 ».

2.7 Traitement des matériaux aux liants

Actuellement, la techniques du traitement des matériaux est bien maitrisée et largement utilisée dans le domaine des travaux publics (BTP), qui représente une part non négligeable du secteur de la construction routière, tant pour l'avantage mécanique qu'il présente en permettant la valorisation de matériaux aux caractéristiques géotechniques et mécaniques inadaptées, non utilisables à l'état naturel, que pour ses qualités environnementales.

Le traitement aux liants hydrauliques ou pouzzolaniques permet de réaliser les terrassements dans des conditions normales de travail tout en diminuant la susceptibilité du chantier aux intempéries. Les liants confèrent aux matériaux traités, en présence d'eau, une cohésion permanente dénommée « prise hydraulique », dont l'importance et la qualité dépendent :

- de la nature du matériau traité.
- du type de liant utilisé.
- de la quantité de liant introduite dans le mélange.
- de la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation du liant.
- de la qualité de la mouture du matériau après traitement.
- de la compacité atteinte lors de la mise en œuvre.
- de la température du milieu et de l'âge du mélange.

L'utilisation des liants hydrauliques routiers est devenue fréquente lors des travaux de terrassements tout particulièrement pour les sols fins et argileux. Le traitement peut avoir différents objectifs :

- **pour les travaux de terrassement** : à court terme, il s'agit souvent de rendre possible la reprise du trafic des engins du chantier sur les sols plastiques détrempés (absence de portance) et de diminuer les risques de gonflement lors des épisodes de gel.
- **pour les travaux de couche de forme** : comme pour les terrassements, on cherche à permettre une reprise rapide du trafic des engins du chantier pour la confection de la couche d'assise, à assurer un nivellement convenable de la plate-forme avant d'accueillir la chaussée, mais aussi à protéger le sol support des intempéries (notamment du gel précoce). A long terme, le rôle de la couche de forme est garanti par ses qualités : homogénéisation et amélioration de la portance ainsi que la diminution de la sensibilité à l'eau et/ou au gel [NF P 98-234.2].

De nombreux types de produits et de sous-produits ont été mis au point suivant le type de matériaux à traiter (sables ou graves traités, ou du type de sol) et des performances recherchées. Ces produits peuvent jouer le rôle d'un liant ou d'un correcteur granulaire.

2.7.1 Liants hydrauliques

2.7.1.1 La chaux

Elle est utilisée depuis l'antiquité, notamment dans la construction. Elle trouve une place privilégiée dans le secteur du bâtiment et dans les matériaux de construction. La chaux intervient à différents stades du traitement des sols, et sa qualité a une influence directe sur l'efficacité du traitement des sols.

L'ajout de chaux provoque rapidement, en quelques minutes, la floculation des argiles. Cette action entraîne une amélioration de la consistance qui se traduit par une augmentation de la limite de plasticité s'accompagnant ou non d'une augmentation de la limite de liquidité. Cette évolution provoque un déplacement du domaine de plasticité vers des teneurs en eau plus importantes. Le décalage de l'indice de plasticité est lié à la quantité de chaux utilisée. L'évolution de consistance favorise la granulation du sol lors du malaxage (Cimpelli C., Kargoet M. 1974).

Des travaux menés par Goual (2012) sur un mélange de tuf calcaire et sable calcaire traité à 4% puis à 8% ont montré que :

- le traitement conduit à une augmentation significative de la résistance à la compression comme le montre la figure (figure 2.4).
- les indices CBR (immédiat et après 4j d'immersion de l'eau) augmentent avec le pourcentage de la chaux et que la portance immédiate est supérieure à celle après immersion (figure 2.5).

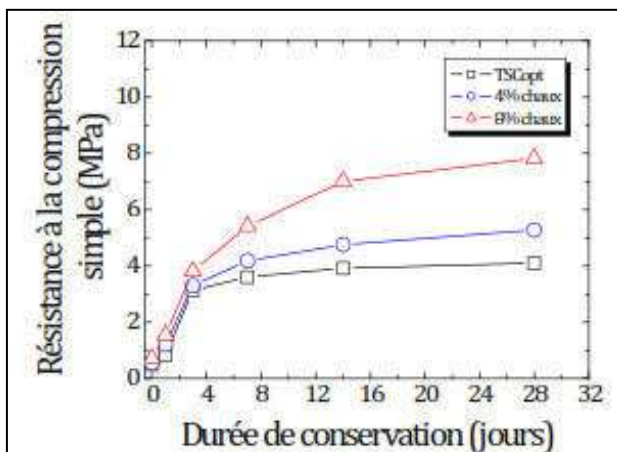


Figure 2.4: Evolution de la résistance en Compression en fonction du temps pour un mélange tuf calcaire et sable calcaire traité à la chaux (Goual , 2012).

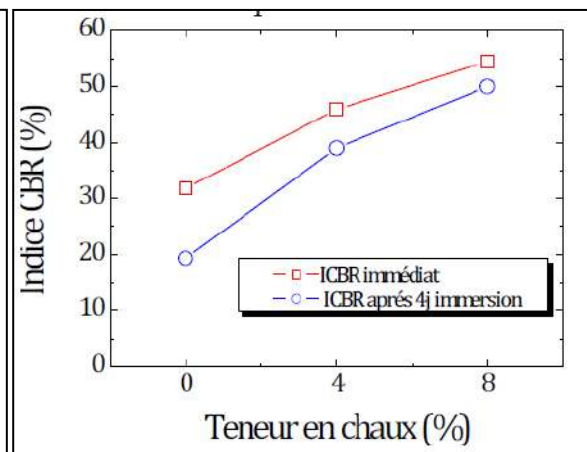


Figure 2.5: Variation de l'indice CBR d'un mélange tuf calcaire et sable calcaire en fonction du dosage en chaux (Goual . 2012).

2.7.1.2 Ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Goual (2012) a constaté que le traitement au ciment d'un mélange tuf et sable calcaire conduit à une augmentation significative de la résistance à la compression simple (figure 2.6). Pour une teneur de 8 % de ciment, les éprouvettes conservées à 28 jours présentent une résistance à la compression simple de l'ordre de 10 MPa, soit plus du double de celle du matériau non traité. Par ailleurs, il a constaté, que les indices CBR imbibés à différentes teneurs en ciment présentent des valeurs supérieures à celles immédiates de l'ordre de 2 (figure 2.7). Ceci peut être expliqué par le fait que l'immersion favorise la réaction d'hydratation du ciment par analogie au béton.

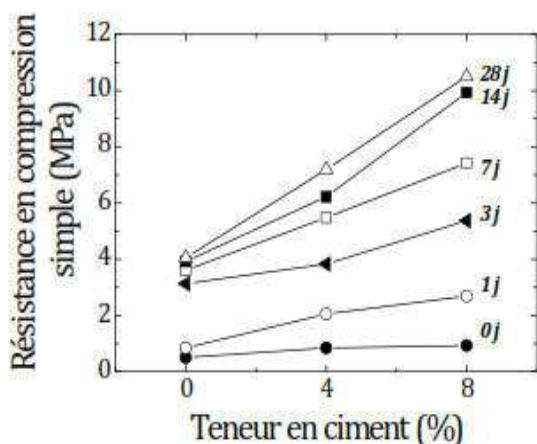


Figure 2.6 : Evolution de la résistance en compression en fonction de la teneur en ciment pour différentes durées de conservation (Goual , 2012).

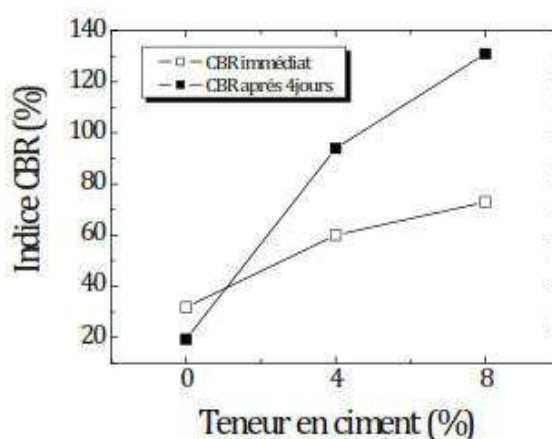


Figure 2.7 : Variation de l'indice CBR en fonction de la teneur en ciment pour les différentes durées de conservation (Goual , 2012).

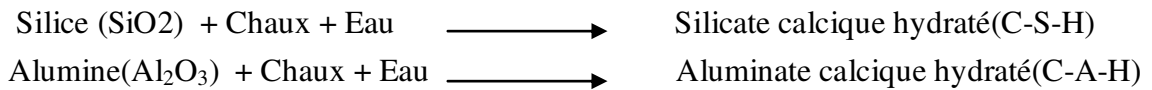
2.7.2 Liants pouzzolaniques

Les pouzzolanes sous forme de poudre et en présence d'humidité, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium pour former des composés possédant des propriétés liantes. (Silitonga ; cité par Zhibo 2008)

La dissolution de la chaux permet grâce à l'élévation de pH de provoquer la dissolution de la silice (SiO_2) et de l'alumine (Al_2O_3) contenues dans les pouzzolanes.

Ces deux composantes vont alors réagir avec l'eau et la chaux éteinte [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] provenant de la chaux vive ou/et du ciment au cours de la réaction pouzzolanique, pour

former du silicate calcique hydraté (C-S-H) et de l'aluminate calcique hydraté (C-A-H), deux produits qui ont des propriétés liantes (Ernesto,2010)



Cette réaction se décompose en deux étapes:

a) **La dissolution** : la dissolution de la chaux contenue dans le mélange va entraîner la saturation en chaux de l'eau et ainsi élever le pH à des valeurs souvent supérieur à 12. Grâce à l'élévation de pH, la silice et l'alumine vont à leur tour se dissoudre.

Leur vitesses de dissolution sont variables et dépendent de l'altération des formes cristallines des matériaux.

b) **la cristallisation** : à partir d'une certaine concentration en ions silicates et d'aluminates de calcium hydratés. Une matière est dite pouzzolanique si elle a la propriété de se combiner à la chaux en présence d'eau pour former un produit possédant des propriétés des liants.

De manière générale, les paramètres influençant les réactions pouzzolaniques sont la nature des phases actives et leurs proportions :

- la teneur en SiO₂ ;
- le rapport chaux/pouzzolane dans le mélange ;
- la durée de cure ;
- la finesse de la pouzzolane ;
- le rapport E/C du mélange ;
- la température.

De nombreux types de produits et de sous produits normalisés ou non, utilisés comme Liant pouzzolanique, ont été mis au point suivant le type d'opération (traitement de grave ou de sol, terrassement, couche de forme ou assise de chaussée), en fonction des types de matériaux à traiter (sables ou graves traités, ou du type de sol) et des performances recherchées. Parmi ces sous produits, nous trouvons, les fumés de silices, les cendres volantes, les pouzzolanes naturelles...

2.7.2.1 Pouzzolanes naturelles

Le terme pouzzolane tire son nom de Pouzzoles, une localité près de Naples en Italie. Les pouzzolanes naturelles sont essentiellement des substances d'origine volcanique ou des roches sédimentaires ayant une composition chimique et minéralogique appropriées. Les

constituants principaux de la pouzzolane sont la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3), l'oxyde ferrique (Fe_2O_3), la chaux (CaO) et la magnésie (MgO), dont les proportions sont les suivantes :

Tableau 2. 2 : Composition chimique élémentaire d'une pouzzolane naturelle (SNPP et Drire ,1988).

Oxydes (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO
Pouzzolane naturelle	42à 55%	12% à 24%	8 %à 20%	4% à 11%	1% à 10%

Les Pouzzolanes ne durcissent pas elles mêmes en présence d'eau, mais elles réagissent à température ambiante en présence d'eau et de chaux, pour former des composés ayant des propriétés hydrauliques. Ces composés sont semblables à ceux formés lors de l'hydratation des matières hydrauliques. Elles peuvent être utilisées en tant que constituant principal du ciment et en tant qu'addition minérale (Rafai, 2008).

2.7.2.2 Cendres de Charbon :

La production d'énergie électrique dans les centrales thermiques au charbon conduit à la formation de cendres. Ces résidus de combustion représentent environ 10% à 20% de la consommation de charbon (Maffiolo et al 1997 , cité par Rakotoarisoa ,2003)

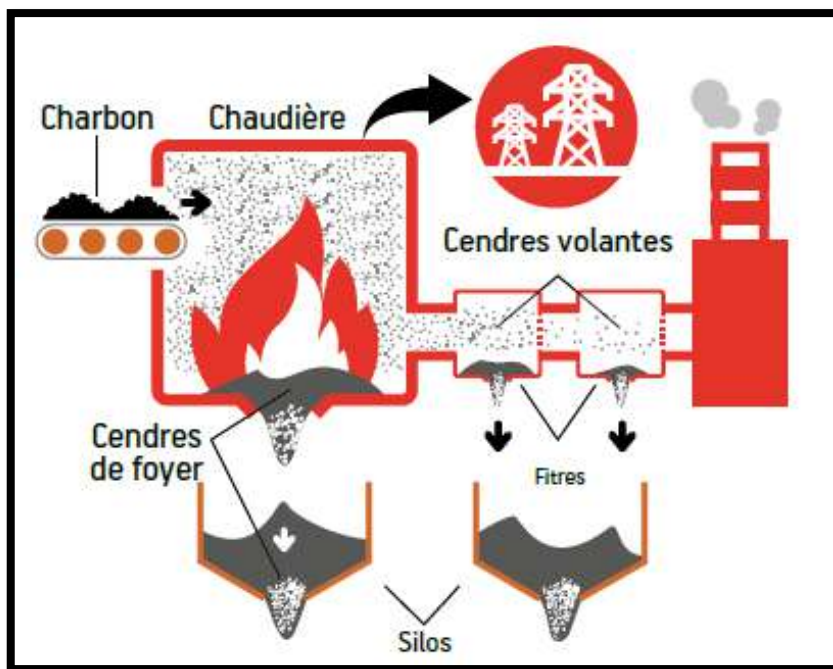


Photo 2.2: Capture des cendres dans une centrale thermique.

Le processus de combustion engendre deux types de cendres : les cendres volantes et les cendres de foyer.

*** Cendres volantes**

Les cendres volantes sont des produits pulvérulents de grande finesse résultant du dépeussierage des fumées rejetées par les centrales thermiques qui utilisent du charbon broyé comme combustible.

Ces produits se présentent généralement sous forme de sphère de verre solide, et peuvent être partiellement ou totalement cristallisés. Ces sphères peuvent être creuses ou pleines et ont un diamètre compris entre 1 et 100 µm (Rafai, 2008).

Elle possède la propriété d'être pouzzolanique provoque, en présence de la chaux, la formation des composés ayant des propriétés liantes comparables à celles d'un liant hydraulique.

Généralement, On distingue deux classes des cendres volantes:

- Les cendres volantes :cendre silico-alumineuse qui ont des propriétés pouzzolaniques;
- Les cendres volantes :cendre silico-calcique qui ont des propriétés hydrauliques et parfois pouzzolaniques.

Leur composition chimique varie dans la fourchette ci-dessous (tableau 2.3) en fonction de la provenance du charbon.

Tableau 2.3 : Fourchette de variation de la composition chimique de cendre volante (Guide Cendres ,2010)

	Cendre silico-alumineuse	Cendre silico-calcique
<i>SiO₂</i>	21 à 37 %	44 à 58%
<i>Al₂O₃</i>	41 à 61 %	20 à 24%
<i>Fe₂O₃</i>	4 à 13 %	5 à 9%
<i>CaO</i>	0 à 4,9 %	5,2 à 11,3%

Des travaux de recherche, réalisés par Senol et al (2006), impliquant différents types de cendres volantes pour la stabilisation de quatre types différents de sol support routier aux Etats-Unis , ont montré que la résistance en compression simple s'améliore avec une augmentation du pourcentage de la cendre (figure 2.8).

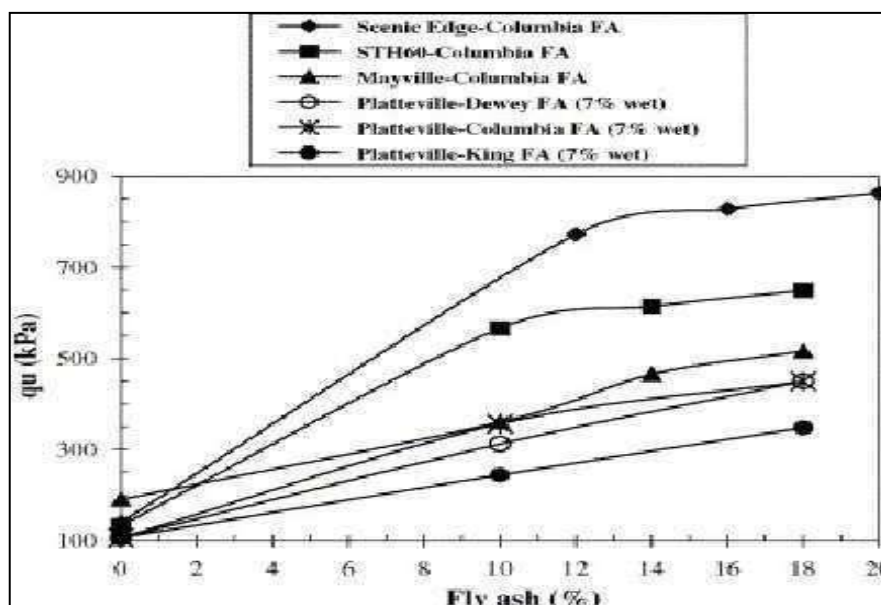


Figure 2.8 : Relation entre le pourcentage de cendres volantes et la résistance en compression (Senol et al ,2006)

*** Cendres de foyer**

Les cendres de foyer sont des sous-produits des centrales thermiques au charbon, récupérées à la base des fours. Elles se présentent sous la forme d'un sable plus ou moins scoriacé de dimension comprise entre 30 µm et 30 mm, avec parfois quelques rares éléments pouvant aller jusque 100 mm (PREDIS ,2002).

Ces cendres sont largement utilisées depuis des décennies dans toutes les couches des structures routières, c'est-à-dire en allant du bas vers le haut

- Les assainissements et traitements de sols
- Les remblais
- Les assises de chaussées
- Les chaussées en béton

Tableau 2.4 : Composition chimique d'une cendre de foyer de JLEC -MAROC- (El Moudni et al ,2009).

Oxydes (%)	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	PbO	SO ₃	CaO libre	PAF
Cendres de foyer	50	9,7	24,3	2,14	1,09	0,41	2,2	0,01	1,87	0,29	6,48

2.8 Cendres de Bois

Les cendres de chaufferies bois sont des résidus de combustion et d'incinération. Ce sont aussi des produits susceptibles d'être utilisés en tant que matières fertilisantes, ou éventuellement en tant que matériaux entrant dans des procédés de fabrication industrielle ou en tant que matériaux de construction pour le bâtiment et les travaux publics (dans les assises de chaussées) (ADEME,2001), .

La composition chimique des cendres n'est pas sans rappeler les compositions des matériaux utilisés dans le domaine des travaux publics (ciment, cendre de charbon, laitier...). En première approximation, les cendres se placent, dans le diagramme ternaire CaO-Al₂O₃-SiO₂, dans un domaine voisin des laitiers de haut fourneau (du fait de la faible teneur en Al₂O₃) ce qui permettait d'envisager une certaine compatibilité voir affinité avec les liants hydrauliques classiques (ciment).

Le diagramme ternaire suivant (photo 2.9) présente de façon très schématique la position de différents matériaux. A noter que le domaine des cendres de bois est large du fait de l'étalement des compositions chimiques rencontrées.

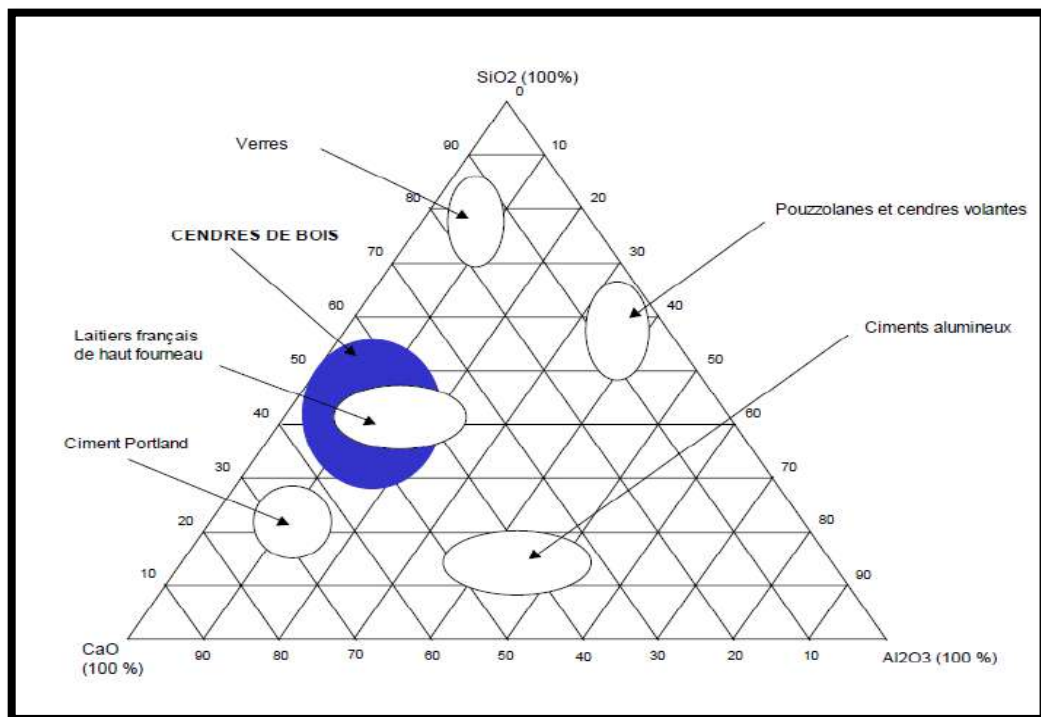


Figure 2.9 : Diagramme ternaire CaO-Al₂O₃-SiO₂

En techniques routières, les cendres de bois pourraient entrer dans la constitution de remblais et sous couches de chaussées en tant que :

- liant à faible caractère pouzzolanique,
- correcteur granulométrique ou filler dont le rôle est de compléter la granulométrie d'un matériau pauvre en fraction fine (inférieure à 500 µm).

2.9 Cendres de papèterie

Le développement de ce type de sous-produit est une conséquence de la prise de conscience des industriels du papier et du carton de la nécessité de préserver les ressources forestières et de limiter la mise en décharge des divers sous produits issus de la fabrication et du recyclage du papier (Segui, 2011).

Les boues obtenues à partir du désencrage des papiers recyclés sont principalement constituées de cellulose (fibres du papier), de calcite et de kaolinite (pour blanchir les papier).

Les filières de valorisation des boues sont diverses:

- valorisation en agriculture : épandages agricoles du fait de la teneur importante en carbonates de calcium ;
- utilisation en briqueterie ;
- hydrolyse pour obtenir de l'éthanol ;
- valorisation énergétique.

Concernant la valorisation énergétique, le pouvoir calorifique des boues brûlées est exploité pour alimenter des chaudières afin de produire de la vapeur d'eau et/ou de l'électricité après avoir été préalablement déshydratées.

Les cendres récupérées sont mélangées avec d'autres matériaux (chaux, gypse) pour élaborer de nouveaux liants hydrauliques routiers.

Les cendres provenant de la combustion de boue de désencrage espagnole et des cendres de papier de journal d'Aylesford (Royaume Uni) sont composées essentiellement de calcium, silicium et d'aluminium : ensemble, ils représentent entre 70% et 90% (Tableau 2.5).

Tableau 2.5 : Composition chimique de cendres de papier
(Vegas, 2009, Bai, 2003 Cité par Segui, 2011).

Oxydes (%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O	MnO	SO ₃	LOI
Cendres espagnoles	36,5	21,6	14,4	2,4	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0	0,3	23,2
Cendres de Royaume Uni	43,5	25,7	18,9	5,2	0,9	1,3	0,7	0,5	1,6	0,04	1,1	1,2

2.10 Conclusion

Les déchets constituent un vrai problème, inhérent à toute vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine, et à ce titre, la recherche de solutions est une véritable nécessité pour les collectivités.

Les Déchets inertes issus de secteur BTP peuvent être récupérés et recyclés en utilisant des granulats alternatifs dans les structures de chaussée.

Le traitement des matériaux routiers aux liants à base des produits et des sous produits industriels apporte des solutions judicieuses aux diverses préoccupations du monde actuel d'ordre écologique, économique et technique en vue de répondre localement aux besoins du secteur des travaux publics en matériaux.

Les pouzzolanes naturelles et divers types de cendres contiennent généralement des éléments chimiques communs (silice, alumine et hydroxyde de calcium) mais avec des proportions différentes qui sont responsables du développement des propriétés liantes au sein du matériau.

Les cendres volantes ont prouvé leur efficacité dans le traitement des matériaux routiers. En revanche, certaines cendres de bois, de papeterie et autres sont en cours de développement afin de les standardiser.

Chapitre 3

Caractérisation des matériaux

Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux

3.1 Introduction

Ce chapitre est principalement consacré à l'identification du matériau de base. Leur caractéristiques physico-mécaniques et chimiques sont déterminées par le biais des essais normalisés pratiqués dans les laboratoires de travaux publics Algériens avec une certaine adaptation pour tenir compte du contexte saharien.

Cette caractérisation s'articule sur la détermination de :

- la composition chimique sommaire (% sulfates, % carbonates, % insolubles) ;
- la granulométrie et l'argilosité (les limites d'Atterberg et la valeur au bleu méthylène) qui sont deux paramètres principaux pour déterminer la nature du matériau ;
- les paramètres de Proctor (teneur en eau optimale et densité sèche maximale) ;
- l'indice portant immédiat (IPI) et l'indice après 04 heures d'immersion ICBRim.

La caractérisation des autres matériaux et produits utilisés est effectuée d'une manière sommaire selon les moyes disponible.

3.2. Sable gypseux

Le sable gypseux (photo 3.1) est l'un des types des tufs d'encroûtement. Il est extrait d'un gisement qui se trouve dans de la willaya de Ouargla, située à environ 720 km au nord est d'Alger (photo 3.2).



Photo3.1 : Echantillon du matériau extrait

La wilaya de Ouargla se situe dans une zone saharienne, son climat sec désertique est caractérisé par une aridité qui s'exprime par l'irrégularité et la rareté des précipitation , une sécheresse permanente ,des amplitudes thermiques très importante et un régime des vents qui se traduit par des courant chauds et secs (Ozenda,1991 et Rouvilois-Brigol, 1975) .



Photo3.2 : Situation de site prélèvement du sable gypseux.

3.2.1 Composition chimique sommaire

Les essais d'analyse chimique sont effectués sur la base des normes NF P15-461, BS 1377 et NF P 94-048 pour la détermination le taux d'insolubles (quartz principalement), le taux sulfate, le taux de carbonates et la teneur en sels.

L'Analyse chimique sommaire, réalisée au laboratoire de travaux publics du sud (LTPS) de Ouargla, confirme la nature gypseuse de notre matériau compte tenu de la dominance du pourcentage des sulfates (figure3.1) qui dépasse le 70%.

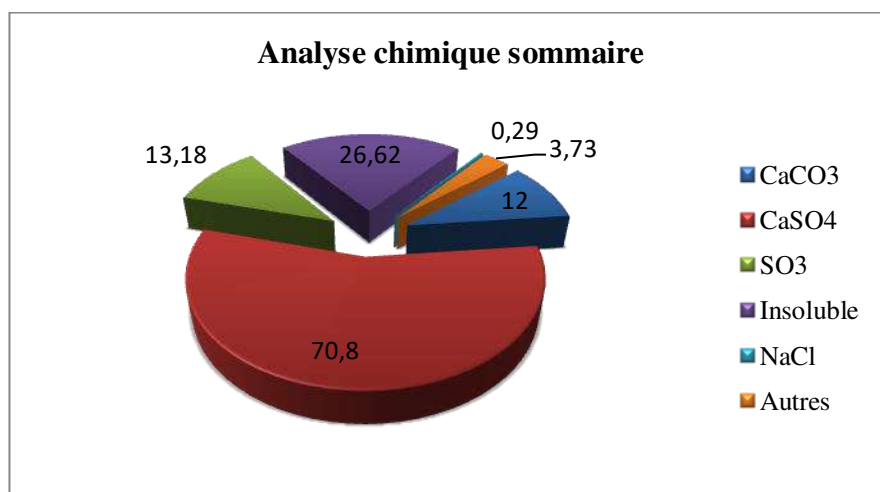


Figure 3.1 : Compositions chimique sommaire du matériau de base

L'analyse au DRX (figure 3.2) révèle que le matériau objet d'étude est principalement composé de gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

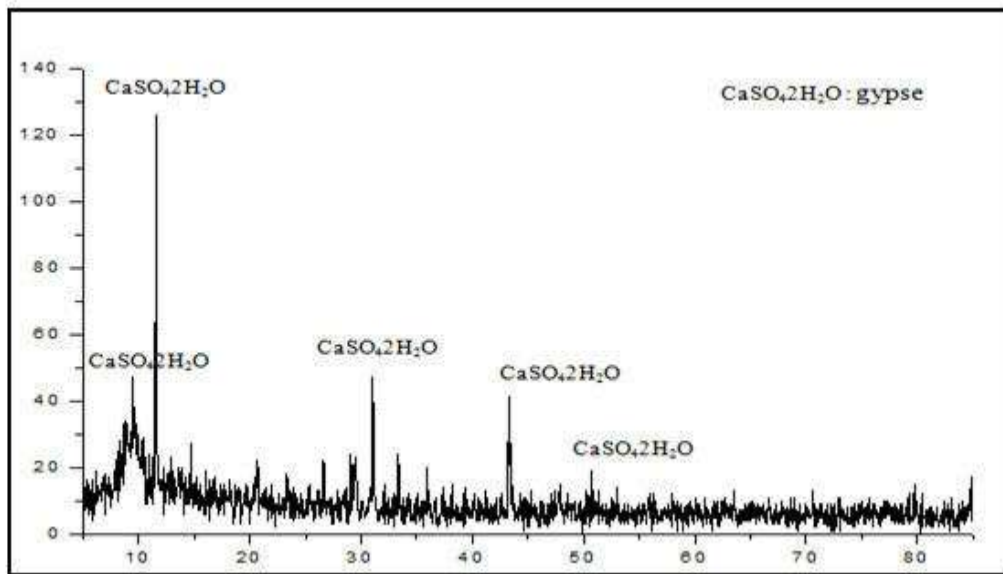


Figure 3.2 : Diffractogramme aux rayons X du sable gypseux utilisé

3.2.2 Analyse granulométrique

Dans le secteur des travaux routiers, la distribution granulométrique constitue le premier paramètre d'entrée dans les tables de classification des matériaux selon le « Guide technique pour la réalisation des remblais et de couche de forme » (GTR 1992).

L'analyse granulométrique (NF P 94-056) permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant un échantillon.

Pour les tufs d'encroûtement, cet essai se réalise par voie humide sur un échantillon imbibé dans un bac d'eau pendant 12 à 24 heures, afin de permettre aux mottes de se désagrégées.

D'après l'analyse granulométrique (figure 3.3), notre matériau a un diamètre maximal (D_{max}) de 20 mm. Il contient une fraction sableuse importante ($<2\text{mm}$) de l'ordre de 95 % et un taux élevé de fines ($<0,80\text{ mm}$), de l'ordre de 38%. Il est situé au dessous du fuseau de spécification de Béni Abbès (famille III) de la technique routière saharienne (Frenzy, 1966) qui le classe comme un matériau fin.

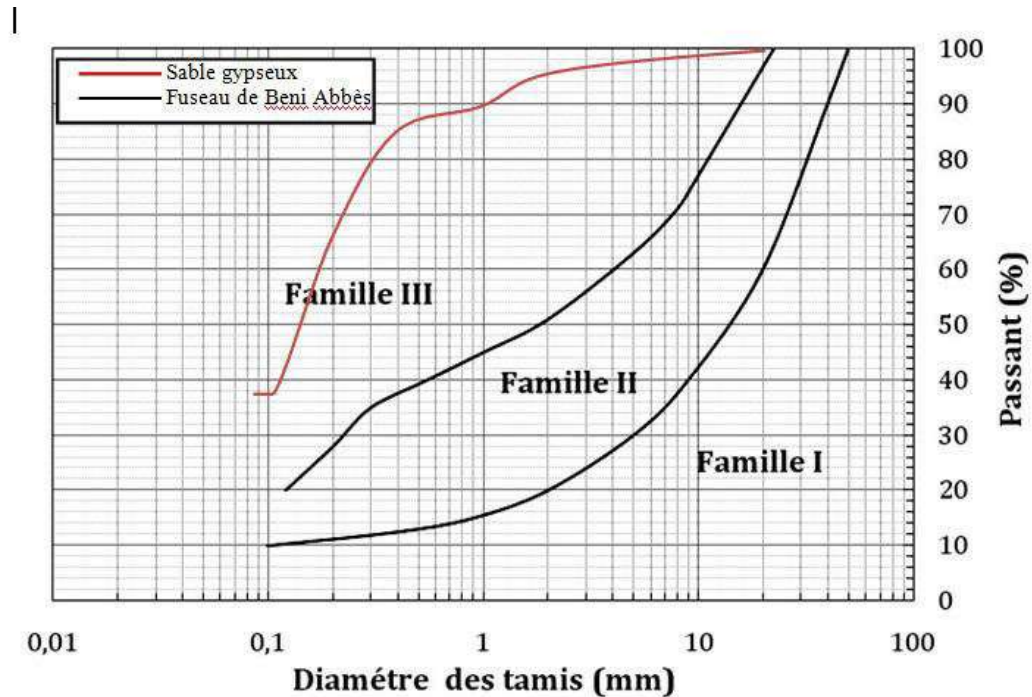


Figure 3.3 : Courbe granulométrique du sable gypseux.

3.2.3 Essai au bleu de méthylène :

L'essai au bleu de méthylène (NF P94-068) permet d'identifier la réactivité de la fraction argileuse (inférieure à $2\mu\text{m}$) présente dans un matériau par mesure de la capacité des éléments fins à absorber le bleu de méthylène.

Cet essai consiste à introduire progressivement du bleu de méthylène dans une suspension de matériau maintenue en agitation. On prélève périodiquement, à l'aide d'une baguette de verre, une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre. Dès qu'une auréole bleutée apparaît autour de la tache, on considère que l'absorption du bleu de méthylène sur les particules d'argiles est terminée (photo 3.3). A partir du volume de bleu de méthylène absorbé et de la quantité de matériau utilisée, souvent 100 g, la valeur du bleu de méthylène « VBS » est définie par la formule suivante :

$$VBS = \frac{\text{volume de bleu de mythlène (Cm}^3\text{)}}{\text{masse sèche de la prise d'essai (gr)}}$$



Photo 3.3 : Appareillage de l'essai au bleu méthylène.

Pour notre matériau, nous avons obtenus une VBS de **0,92**. Cette valeur montre que le matériau est pollué selon la classification retenue pour les sables et applicable aux tufs d'encroûtement (tableaux 3.1)

Tableau3.1 : Classification des matériaux par rapport à la valeur de VBS .

Valeur de VBS	VBS < 0,2	0,2 < VBS < 0,5	0,5 < VBS < 1	VBS > 1
Classification	matériau propre.	matériau légèrement pollué.	matériau pollué	matériau très pollué

Selon le GTR 1992 , le matériau est placé dans la catégorie des sols limoneux (Figure 3.4)

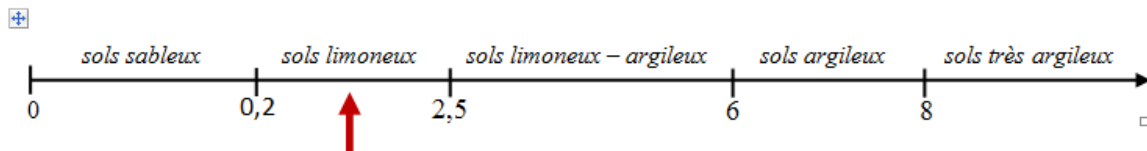


Figure 3.4 : Classification des matériaux en fonction de VBS

3.2.4 Limites d'Atterberg

Les limites des d'Atterberg sont des teneurs en eau correspondantes à des états particuliers d'un sol. On distingue :

- **Limite de liquidité (W_L)** : c'est la teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique. Expérimentalement, Elle est déterminée à l'aide de l'appareil de Casgrande selon la norme [NF P 094 051].
- **Limite de plasticité (W_P)** : c'est la teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états plastique et solide . Expérimentalement, Elle est déterminée par la méthode du rouleau selon la norme [NF P 094 051.]
- **Indice de plasticité (I_p)** :c'est le domaine situé entre les états de liquidité et de plasticité . Il est déterminé par la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité : $I_p = W_L - W_P$.

Les résultats obtenus (tableau 3.2) montrent que notre matériau à une limite de liquidité de l'ordre de 23,70 % et une limite plasticité non mesurable

Tableau3.2 : Résultats de limites d'Atterberg

Limite de liquidité W_L	Limite plasticité W_P	Indice de plasticité I_p
23,70%	Non mesurable	/

3.2.5 Caractéristiques de compactage

La caractérisation des conditions optimales à mettre en œuvre pour réaliser un bon compactage, et en particulier la définition de la teneur en eau correspondante, nécessite une simulation en laboratoire qui permet de définir les conditions opératoires du compactage en place. Cette simulation est faite par l'essai de Proctor modifié (photo. 3.4).



Photo 3.4: Appareil de Compactage

Cet essai a pour but de déterminer pour un compactage normalisé d'une intensité donnée la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale. Il s'effectue selon la norme [NF P 94-093].

L'essai de Proctor (Normal ou modifié) consiste à humidifier un sol à plusieurs teneurs en eau et à le compacter selon un procédé et une énergie conventionnelle. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la densité sèche du sol et on établit la courbe des variations de cette densité en fonction de la teneur en eau dite courbe de Proctor. Cette courbe est caractérisée par une valeur maximale de la densité sèche du sol correspondant à une valeur particulière de la teneur en eau. C'est ces deux valeurs qui sont appelées les caractéristiques ou les paramètres de Proctor.

Le choix de la méthode de compactage (Normale ou Modifiée) dépend de la grosseur des plus gros grains du sol, c'est-à-dire le diamètre D maximal. Si $D \leq 5$ mm, la méthode de compactage «Normal» est autorisée, mais la méthode de compactage «Modifié» est conseillée dans les travaux routiers.

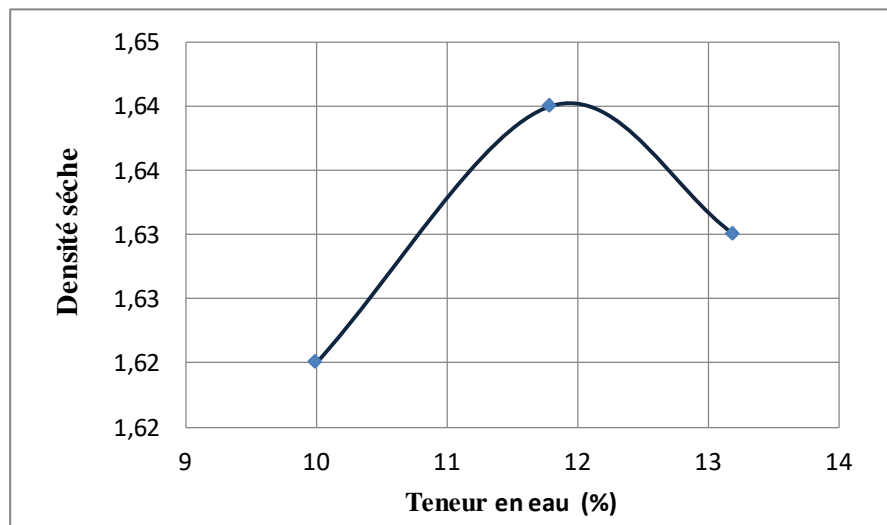


Figure 3.5 : Courbe de Proctor du sableux gypseux.

La courbe de Proctor obtenue (figure 3.5) est caractérisée par une grande pente. Ceci explique la sensibilité du sable gypseux à l'eau du fait de l'existence d'une fraction importante de fines et de sa nature chimique.

Les caractéristiques de compactage obtenues sont : une teneur en eau optimale de **11,8%** et une densité sèche maximale de **1,64**.

3.2.6 Portance

La portance d'un matériau est évaluée par l'essai CBR [NF P 94-78]. Ce dernier consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique de $19,35 \text{ cm}^2$ de section pour faire pénétrer à vitesse constante ($1,27 \text{ mm/mn}$) dans une éprouvette de matériau compacté. Les valeurs particulières des deux forces, ayant provoqué les enfoncements de 2,5 et 5 mm, sont alors rapportées respectivement aux valeurs de 13,35 et 20 KN. L'indice de CBR est par convention la plus grande des deux valeurs $\frac{F_{2,5}}{13,35}$ et $\frac{F_5}{20}$

$F_{2,5}$ = Force à 2,5 mm d'enfoncement.

F_5 = Force à 5 mm d'enfoncement.

Les trois indices qui peuvent être déterminés par l'essai CBR sont : l'indice Portant immédiat (IPI), l'indice CBR Immédiat (I_{CBR}) et l'indice CBR après immersion dans l'eau (I_{CBRim}).

Selon la norme française [NF P 98 115], l'IPI est considéré comme un critère satisfaisant pour assurer la circulation normale des engins sur le chantier. Les valeurs souhaitables de l'IPI ne doivent pas être inférieures à 35 pour la couche de fondation et 45 pour la couche de base. Toutefois, cette norme définit également des valeurs limites inférieures de 25 et 35 pour les mêmes couches citées ci-dessous (Figure 3.6).

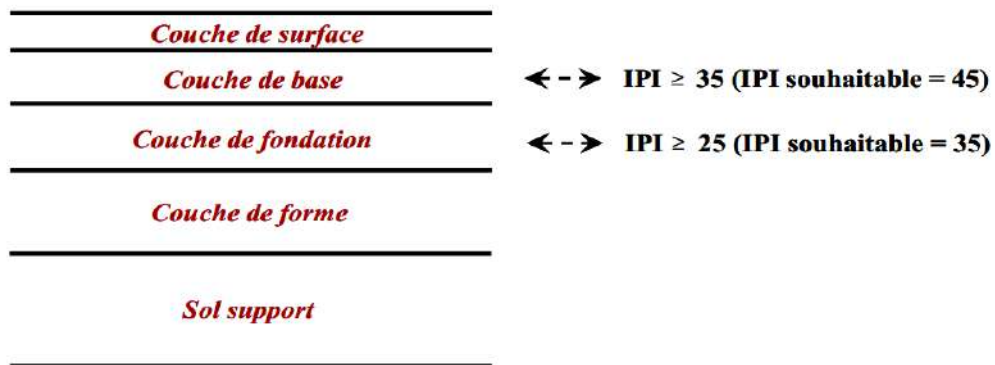


Figure 3.6 : Critère de l'IPI pour les différentes couches de la chaussée norme [NF P 98 115]

Les résultats de l'essai CBR réalisés sur notre matériau compacté dans les conditions de Proctor ont donné un IPI de **53,59** et un I_{CBRim} après immersion de l'ordre **33,8**.

Nous rapportons que l'immersion a été effectuée seulement à 4 heures, telle qu'elle est pratiquée au Laboratoire des Travaux Publics du Sud (LTPS), pour tenir compte du contexte saharien, caractérisé par des précipitations réduites.

Selon la norme [NF P 98 115], l'IPI obtenu montre que notre sable gypseux est acceptable pour une éventuelle utilisation dans les différentes couches de la chaussée. Mais si nous adoptons les spécifications établies pour ce genre de matériau, une cohésion, exprimée par la valeur de la résistance à la compression, doit être assurée.

3.2.7 Résistance à la compression simple (Rc)

La résistance à la compression est considérée parmi les critères de choix des matériaux pour la construction des chaussées sahariennes. Elle est évaluée à l'aide de l'essai de compression simple qui a été adapté par Fenzy (1966). L'essai consiste à apprécier la cohésion au sein du matériau. Il est effectué sur des éprouvettes cylindriques et sur la fraction <5 mm.

Les éprouvettes sont préparées à partir du sable gypseux mélangé à la teneur en eau optimale de Proctor, puis compacté statiquement dans un moule cylindrique à double piston de 50 mm de diamètre et 100 mm de hauteur (photo 3.5).

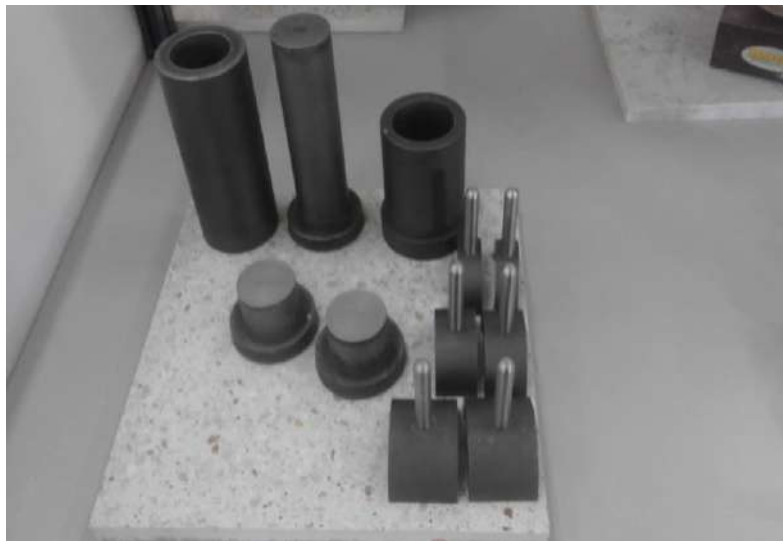


Photo 3.5: *Moule de compression simple.*

Les éprouvettes confectionnées sont conservées dans une étuve à une température de 20 °C pendant de 3,7, 14 et 28 jours à raison de 03 éprouvettes par période. Puis, elles sont écrasées à l'aide d'une presse à une vitesse de 1,04 mm/min (photo 3.6).



Photo 3.6 : *Ecrasement des éprouvettes.*

La courbe de la Figure 3.7 présente l'évolution de la résistance en compression du sable gypseux en fonction de la durée de conservation.

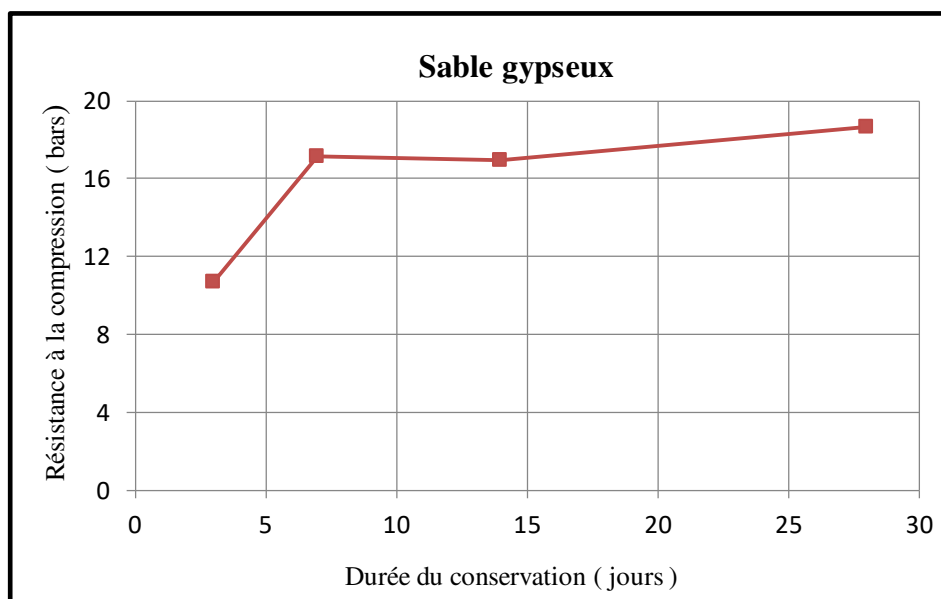


Figure 3.7: *Evolution de la résistance à la compression simple en fonction de la durée de conservation.*

Les résultats obtenus montrent que la résistance à la compression simple du matériau croît remarquablement pour la période de 3 à 7 jours. Ensuite, elle tend vers une valeur presque constante. La résistance atteint les 18 bars à 28 jours. Ces résultats sont cohérents avec ceux trouvés par Morsili, 2007 et Goual, 2012 lors des travaux menés sur deux types de tufs

d'encroûtement respectivement de la région de Hassi Messouad et de la région de Laghouat (Algérie).

D'après la littérature, ce phénomène d'évolution de la résistance avec l'âge des tufs est dû à l'existence d'une prise, évidemment pas comme celles des liants tels que le ciment, la chaux, ...etc., où se produisent des liaisons rigides, souvent irréversible et durable. Cette prise a été attribuée à une dissolution partielle du calcaire et/ou du gypse dans l'eau de compactage, puis sa recristallisation lorsque l'eau s'évapore (Peltier, 1959).

Selon les spécifications établies (Stuillou et Alloul, 1984) pour les tufs d'encroûtement de l'Algérie, l'utilisation de notre sable gypseux est limitée en couche de fondation pour un trafic inférieur de 130 poids lourd /jour (PL/J) - voir annexe B.

3.2.8 Classification du matériau selon le GTR

La caractérisation physico-mécanique effectuée sur le matériau de base a été faite telle qu'elle est pratiquée aux laboratoires des travaux publics algériens. Les résultats obtenus sont synthétisés dans le tableau (3.3).

Tableau3.3: Synthèse des résultats des essais de caractérisation.

Diamètre maximal D_{max}	20 mm
Éléments <2mm	95%
Éléments <0,80 mm	38%
Densité sèche maximale	1,64
Teneur en eau optimale (Wopm)	11,8%
Valeur de bleu de méthylène VBS	0,92
Limite de liquidité	23,70 %
Limite de plasticité	Nom mesurable
Indice portant immédiat (IPI)	53,59
Indice CBR après immersion	33,8
Résistance à la compression simple à 28 jours	18,63 bars

D'après le Guide des Terrassements Routiers (GTR, 1992) , et si l'on se base sur l'activité argileuse (VBS) et la granulométrie dont le diamètre maximal est inférieur de 50 mm et le pourcentage de fine (passant à 0,080mm) est supérieur à 35% , le matériau objet d'étude appartient à la classe A1 où il est considéré comme un sol fin (figure 3.8).

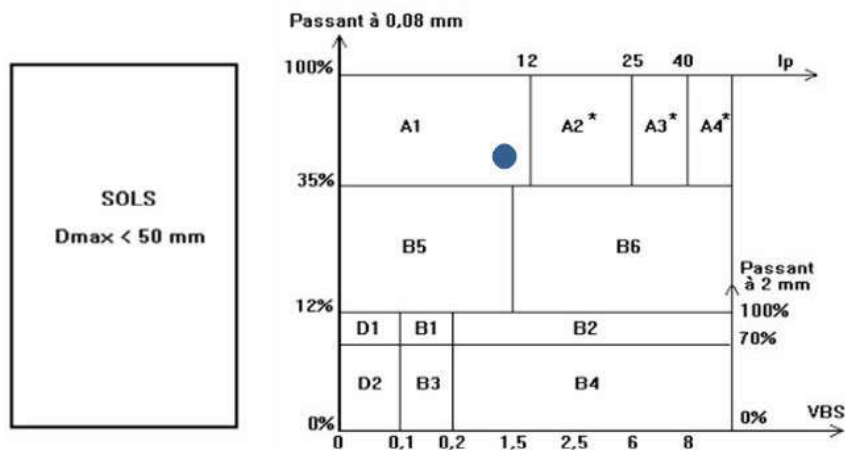


Figure 3.8 : *Abaque de classification (GTR ,1992.)*

3.3 Déchets de brique :

Dans la ville de Touggourt, située à 160 km au Nord-Est de Ouargla, il existe une dizaine 10 briqueteries en production. Chaque année des milliers de tonnes de déchets de briques (briquillons), résultant de la mauvaise cuisson et du cassage de briques lors de diverses opérations de la manutention, sont rejetés ou stockés dans ces briqueteries en occupant un espace important.

Les déchets de briques (photo3.7) utilisés proviennent de la briqueterie SBT installée dans la commune de Touggourt.

Dans cette étude, ces déchets sont exploités sous forme de deux classes granulaires (0/2,5mm et 0/1mm) ont été obtenus après concassage et tamisage (photo3.8).



Photo 3.7 : *Déchets de briques.*



Photo 3.8 : *Déchets de briques concassés.*

L'analyse chimique sommaire des déchets de briques (tableau. 3.4) montre la dominance des insolubles (silice) avec des traces des sulfates et l'absence totale des carbonates.

Tableau3.4 : Résultats d'analyse chimique sommaire de déchets de briques.

CaCO ₃ (%)	CaSO ₄ (%)	SO ₃ (%)	Insoluble (%)	NaCl(%)	Autres (%)
00	5.71	1.06	79 .36	0.39	13,48

3.4 Sable de dunes

Dans le grand Sud de l'Algérie, notamment la région de Ouargla, Les sables, que l'on trouve dans les dunes mouvantes, sont des matériaux très abondants et faciles à extraire. Ils sont pratiquement peu exploitables, malgré les éventuelles caractéristiques qu'il peut présenter. L'utilisation davantage du sable dans le secteur des travaux publics peut contribuer à préserver les matériaux « dits nobles » dont leur exploitation est onéreuse.

Le sable utilisé provient de la Diara de Sidi Khouiled éloignant d'environ de 15 km du chef lieu de la wilaya de Ouargla.

Le sable de dunes généralement a une composition chimique très simple, plus de 95 % de silice, de 1 à 2 % de calcaire et des traces de différents oxydes. Du fait de cette constitution, Il a une couleur blanche légèrement jaune et ocre. Il se dessèche et perd facilement sa cohésion en surface (.Ben Dhia ,1998).

Analyse granulométrique (Figure 3.9) et les caractéristiques physiques (tableau.3.6) montrent que notre sable est mal gradué dit « homométrique », dépourvu des fines. Le diamètre de ses plus gros éléments est égal à 0,63mm, son coefficient d'uniformité C_u est de l'ordre de 2 et la valeur de l'équivalent de sable est d'environ 94,38 % , ce qui illustre la propreté du sable.

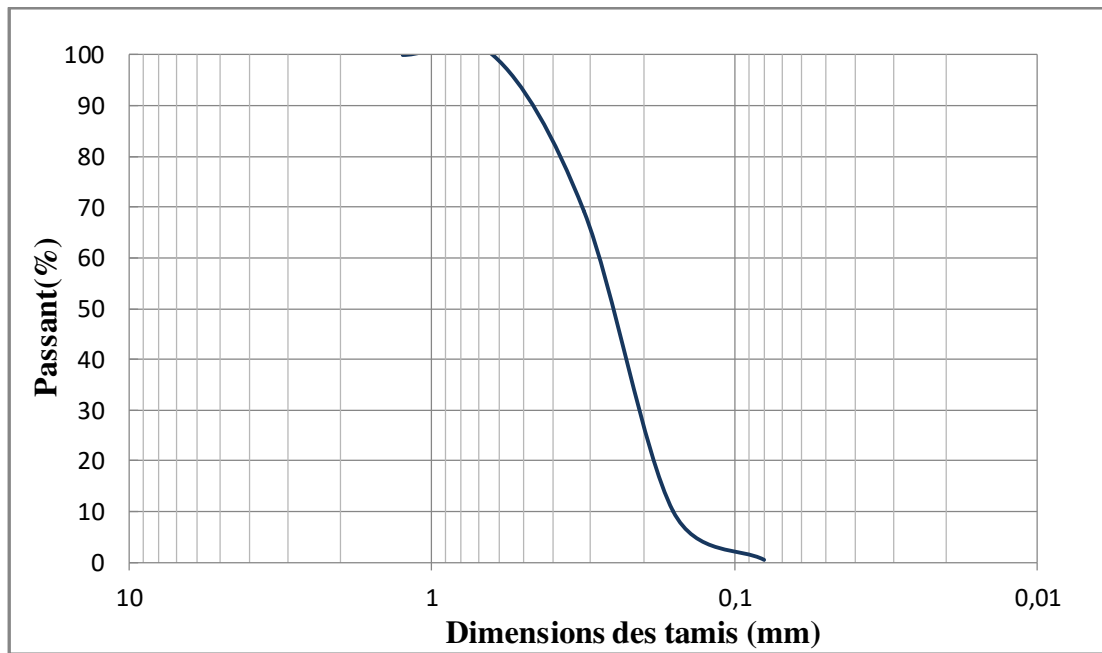


Figure 3.9 : Courbe granulométrique du sable de dunes.

Tableau 3. 5: Caractéristiques physiques de sable de dunes.

	$\gamma_{app}(kg/m^3)$	$\gamma_{abs}(kg/m^3)$	$M_f(\%)$	E.S%	$C_u = d_{60}/d_{10}$
Sable de dunes	1642	2500	1.20	94,38	2

γ_{app} : Masse volumique apparente.

γ_{abs} : Masse volumique absolue.

M_f : Modules de finesse

Esp : équivalent de sable piston

3.5 Produits de traitement utilisés

Dans cette étude, nous avons utilisé de la chaux éteinte et la cendre des sous-produits de palmiers dattiers comme produits de traitement.. Le choix de la chaux est fait pour des raisons économiques et efficacité, tandis que la cendre a été choisie afin de voir sa capacité à stabiliser les matériaux routiers et son pouvoir de former un liant routier au même titre de ce qui a été fait avec la cendre de bois (Tarun et al,2003 ;Vahanen et al,2014), la cendre de papèteries et la cendre de biomasses (Jan,2003)

3.5.1 Cendre des sous produits de palmiers dattiers

Dans les régions sahariennes, le palmier dattier constitue le pivot de l'agriculture. Il offre une large gamme des déchets, estimés à des millions de tonnes par an.

Auparavant, ces déchets étaient exploités par la population saharienne dans divers domaines, à savoir :

- Les troncs d'arbre, utilisés comme moyen de chauffage et de charpentes d'habitation ;
- Les palmes sèches, utilisées comme clôtures, brises vent, dans la confection de couffins, de chapeaux ...etc ;
- Les régimes de dattes comme des balais traditionnels;
- Les liffes (fibres) pour la confection des semelles de sandales.

Avec la modernité qui a envahi la région, l'utilisation de ces sous-produits (photo 3.9) a connu un recul dans leur utilisation et de ce fait, ils se sont retrouvés en abondance dans les palmeraies en affectant le paysage, polluant l'environnement et provoquant des incendies pendant les périodes caniculaires.

Aujourd'hui, l'activité artisanale de la poterie continue d'exploiter ces sous-produits de palmiers dans la cuisson des produits de poterie confectionnés dans des fours traditionnels produisant une quantité importante de cendre.



Photo 3.9: *Certain types de sous-produits de palmiers dattiers.*

La cendre (photo 3.10) utilisée provient d'une fabrique de poterie située à la commune de Nezla, à environ 160 Km de chef lieu de la wilaya d'Ouargla. Il est à noter que nous n'avons exploité que la fraction 0/31.5 de la cendre après l'élimination des imbrûlés.



Photo 3.10 Cendre de sous-produits de palmiers dattiers

Les résultats d'analyse par diffraction des rayons X (figure 3.10)

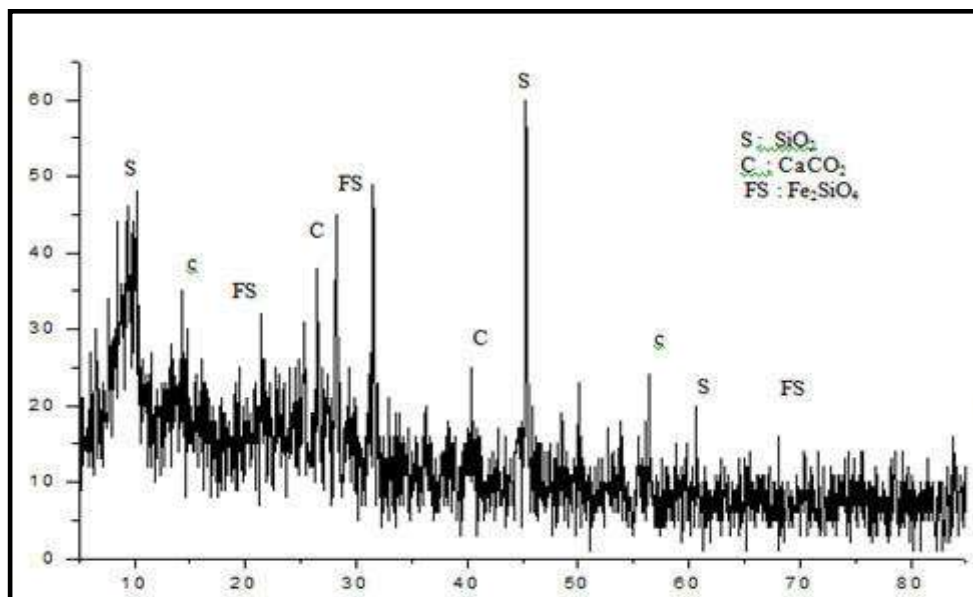


Figure 3.10 : Diffraction des rayons X de la cendre de sous-produits de palmiers dattiers utilisée.

Tableau 3.6 : Analyse minéralogique des fibres calcinées à 400 °C (Kriker ,2004).

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF
%	48.04	6.12	2.51	0.05	4.88	14.21	1.81	2.80	0.42	0.45	18.08

D'après la littérature, l'analyse minéralogique (tableau 3.6) effectuée sur une poudre de fibres après calcination à 400° C, montre que les principaux oxydes (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO) sont présent ,et qu'ils forment souvent les liants classiques, utilisés dans le traitement des matériaux routiers, tels que le ciment, la cendre volante ,fumée de silice ...etc. .

La cendre de liffes (fibres) de palmiers dattiers peut être placée de façon approximative, dans le digramme ternaire ($CaO -Al_2O_3 -SiO_2$) -figure 3.11, dans un domaine proche de la cendre de bois et non loin des laitiers de haut fourneau, ce qui nous laisse dire qu'il existe une certaine compatibilité entre cette cendre et les liants hydrauliques classiques.

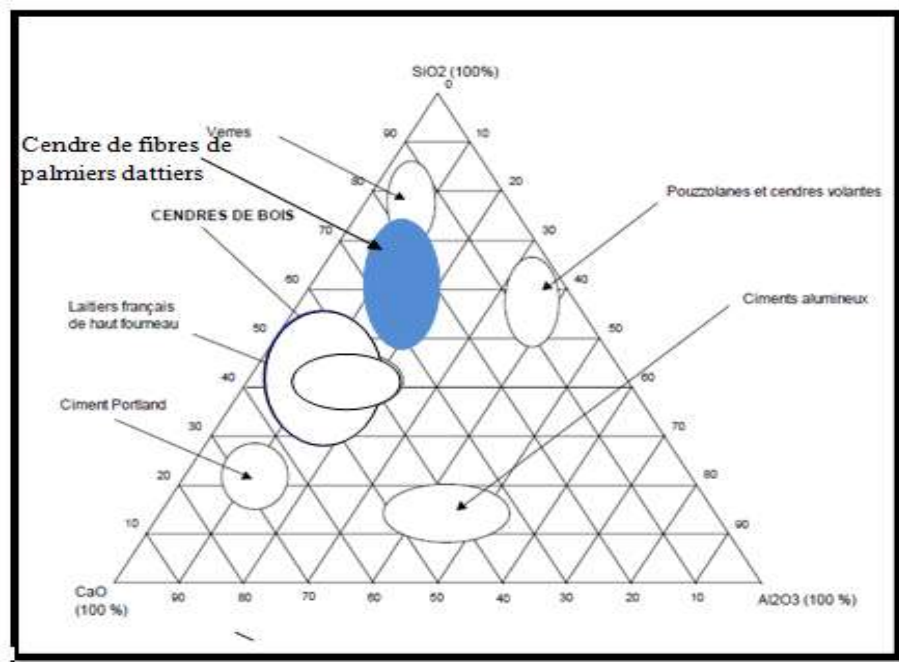


Figure 3.11 : Situation de la cendre des fibres de palmiers dattiers dans le digramme ternaire ($CaO -Al_2O_3 -SiO_2$).

3.5.2 Chaux

Pour le traitement, Nous pouvons utiliser deux catégories : la chaux vive CaO ou la chaux éteinte $Ca(OH)_2$. Une chaux de bonne qualité sera celle qui présente peu d'insolubles et ayant un pourcentage élevé en chaux libre CaO . (Izemmouren et al., 2013)

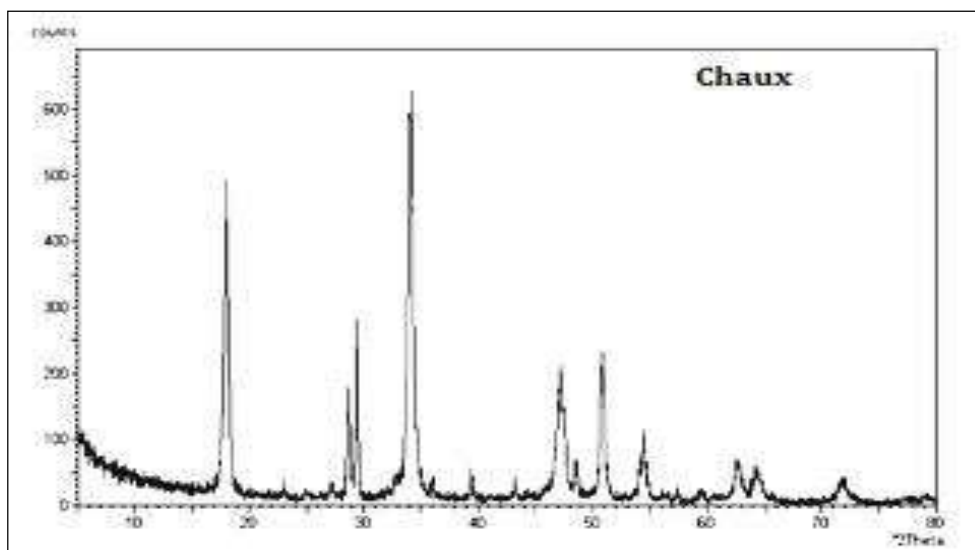


Figure 3.12 : Diagramme de diffraction aux rayons X de la chaux (Goual ,2012)

Tableau3.7: Fiche technique des Propriétés physiques et chimiques de la chaux Saïda

Caractéristiques de base	Chaux
Apparence physique	Poudre blanche sèche
CaO (%)	> 73,3
MgO (%)	<0,5
Fe ₂ O ₃ (%)	< 2
Al ₂ O ₃ (%)	< 1,5
SiO ₂ (%)	< 2,5
SO ₃ (%)	< 0,5
Na ₂ O (%)	0,4 – 0,5
CO ₂ %)	< 5
CaCO ₃ (%)	< 10
Densité spécifique	2
Plus de 90µm (%)	< 5
Plus de 630µm (%)	0
Matériau insoluble (%)	< 1
Densité apparent (g/l)	600-900

3.6 Conclusion

D'après les résultats de caractérisation, Il ressort de ce chapitre les points importants suivants :

- l'analyse chimique sommaire confirme la nature gypseuse de notre matériau de base avec un pourcentage de gypse dépassant les 70% ;
- d'après le guide GTR., le sable gypseux est rangé dans catégorie A1 qui le classe comme un sol fin, En revanche, selon la spécification de Béni Abbès de la technique routière saharienne, Il est situé au- dessous du fuseau qui le classe comme un matériau fin sans squelette ;
- les caractéristiques de compactage sont médiocres avec une densité sèche égale à 1.64 ;
- le matériau de base offre une résistance à la compression simple relativement faible ne dépassant les 20 bars à 28 jours. Cela ne permet pas d'élargir son utilisation en couche de fondation avec un trafic supérieur à 130 PL/J .

4

Chapitre

Comportement du sable gypseux traité

Chapitre 4 : Comportement du sable gypseux traité

4.1 Introduction

Dans les régions sahariennes de l'Algérie, dont Ouargla en fait partie, les matériaux disponibles et utilisés en assise de chaussées, tels que les tufs d'encroûtement, souvent n'obéissent pas à toutes les exigences dictées par les différentes normes établies pour d'autres régions en raison de leurs particularités d'une part, et la spécificité de ces régions, caractérisées par leur climat aride, d'autre part. Ces matériaux, pour être sélectionnés, doivent répondre à plusieurs critères : mécaniques ; économiques et environnementaux.

Sur le plan du comportement mécanique, il est nécessaire de connaître :

- Le comportement du matériau au compactage évalué à l'aide d'essai de Proctor ;
- La portance du matériau estimée par l'essai CBR ;
- Le comportement du matériau en compression simple afin d'apprécier l'évolution de la cohésion au sein du matériau.

Les sables gypseux, parmi les matériaux gypso calcaires disponibles en grande quantité dans la région de Ouargla, caractérisent par des performances mécaniques médiocres qui ne permettent pas d'étendre leur utilisation dans les différentes couches de chaussées. L'amélioration de ces performances peut être obtenue en mélangeant les sables gypseux avec d'autres matériaux ou en les traitant aux liants hydrauliques ou pouzzolaniques à condition que cela reste économique et respectueux de l'environnement.

Dans ce contexte, cette partie expérimentale se concentre sur l'étude du comportement du sable gypseux traité et sur la possibilité d'améliorer les propriétés mécaniques dans le but de valoriser ce matériau local. Pour cela, nous avons procédé à l'étude du comportement mécanique des formules suivantes :

- Sable Gypseux traité à la Chaux (SG-C);
- Mélange Sable Gypseux et Déchés de Briques (MSG-DB) concassés sans traitement et avec traitement à la chaux ;
- Mélange Sable Gypseux et Sable de Dunes (MSG-SD) sans traitement et avec traitement à la chaux puis à la chaux plus la cendre de sous-produits des palmiers dattiers.

4.2 Déroulement de l'étude expérimentale

Dans un premier temps, l'étude est focalisée sur la détermination du mélange optimal, effectuée sur chaque mélange (SG-C, MSG-DB, MSG-SD), qui offre un bon comportement au compactage et une meilleure portance (immédiate et après immersion dans l'eau). Ensuite, un examen de l'évolution de la résistance à la compression simple de ce mélange optimal (non traité et traité) a été réalisé. Les différentes étapes de l'étude sont illustrées sur la Figure 4.1.

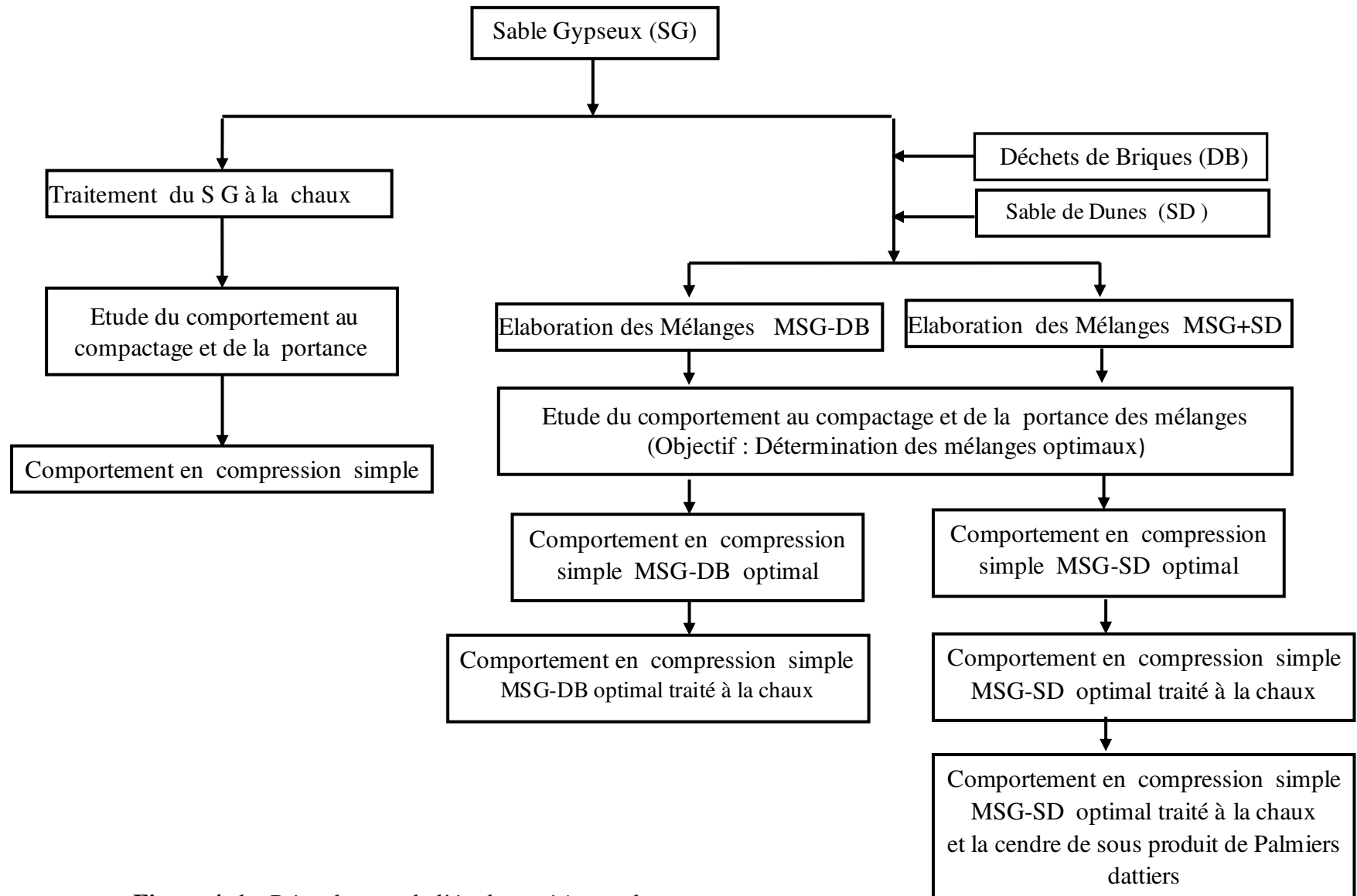


Figure 4.1 : Déroulement de l'étude expérimentale.

4.3 Sable gypseux traité à la Chaux

Actuellement, la technique de traitement des sols aux liants hydrauliques est généralement bien maîtrisée.

Le traitement à la chaux (vive ou éteinte) s'effectue dans le cas des sols fins contenant une forte teneur en argile. La chaux est mieux utilisée lorsque les sols sont très humides. Pour les sols assez secs, la chaux vive ou la chaux éteinte peuvent être utilisées avec complément d'eau nécessaire pour que les réactions chimiques aient lieu dans de bonnes conditions.

Concernant les tufs d'encroûtement, son traitement à la chaux a été l'objet de nombreuses études (Ameroui ,20002 ; Morsili ,2006 ; Goual et al ,2005 ; Goaul , 2012)

Pour notre cas , l'opération du traitement s' effectue en ajoutant des pourcentages bien déterminés de la chaux éteinte (2, 4, 6%) au sable gypseux suivi de l'étude du comportement au compactage , de la variation de la portance (IPI et ICBRim) ainsi que l'évolution de la résistance en compression simple en fonction de la durée de conservation et pour diverses teneurs en eau de confection des éprouvettes .

4.3.1 Comportement au compactage

L'étude de comportement au compactage des matériaux routiers est effectuée à l'aide de l'essai de Proctor modifié qui permet de déterminer les paramètres de compactage, à savoir la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale.

Les différentes courbes de Proctor du sable gypseux SG non traité et traité à la chaux SG-C (2, 4, 6%) sont présentées à la Figure 4.2.

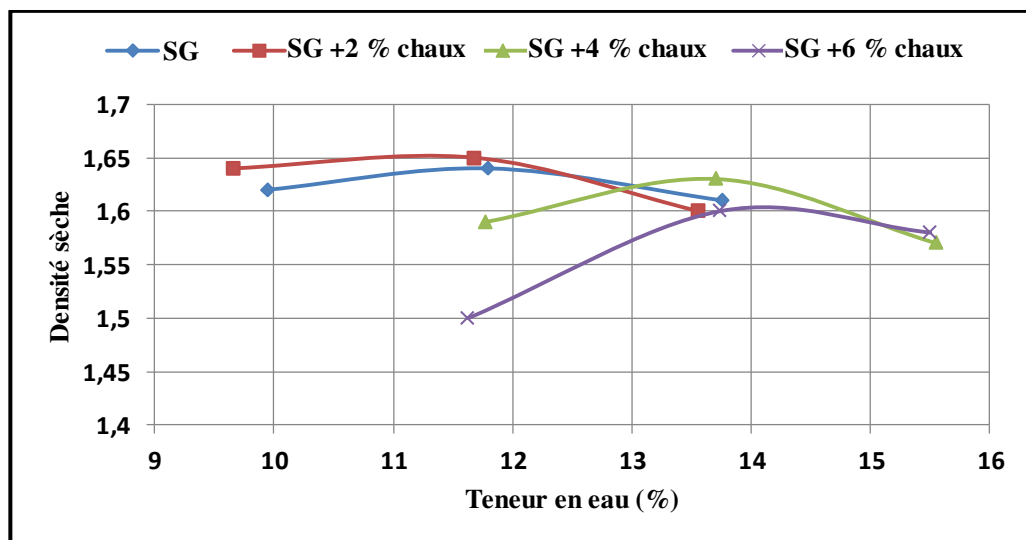


Figure 4 .2 : Courbes de Proctor du sable gypseux traité à la chaux.

Les résultats obtenus montrent que le traitement du sable gypseux à la chaux a modifié la position de la courbe de Proctor qui est décalée vers la droite, provoquant une diminution de la densité sèche maximale et une augmentation de la teneur en eau optimale. Cela signifie que pour une même énergie de compactage, le matériau traité a besoin d'une quantité optimale d'eau plus élevée pour donner une densité maximale inférieure à celle du matériau naturel. Ces résultats concordent avec ceux obtenus lors du traitement des sols à la chaux rapportés dans la littérature (Venuat 1980, GTS 2000) et illustrés à la figure 4.3.

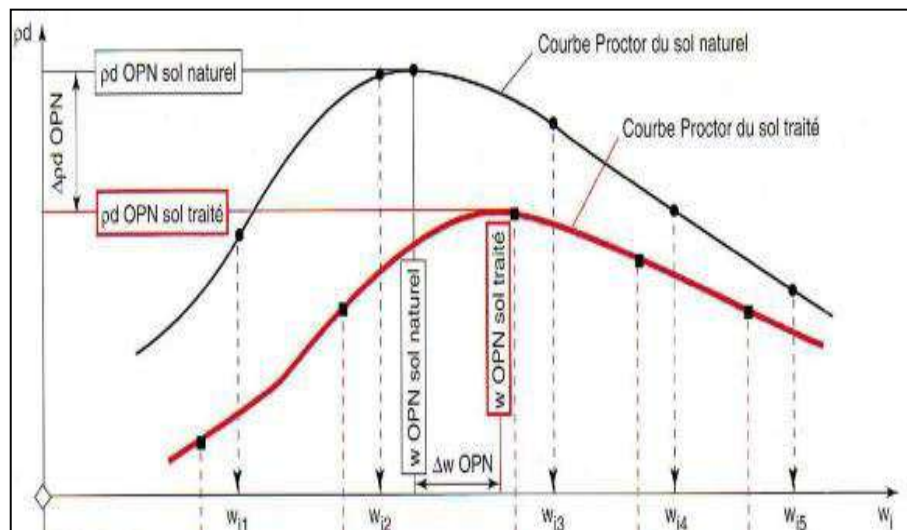
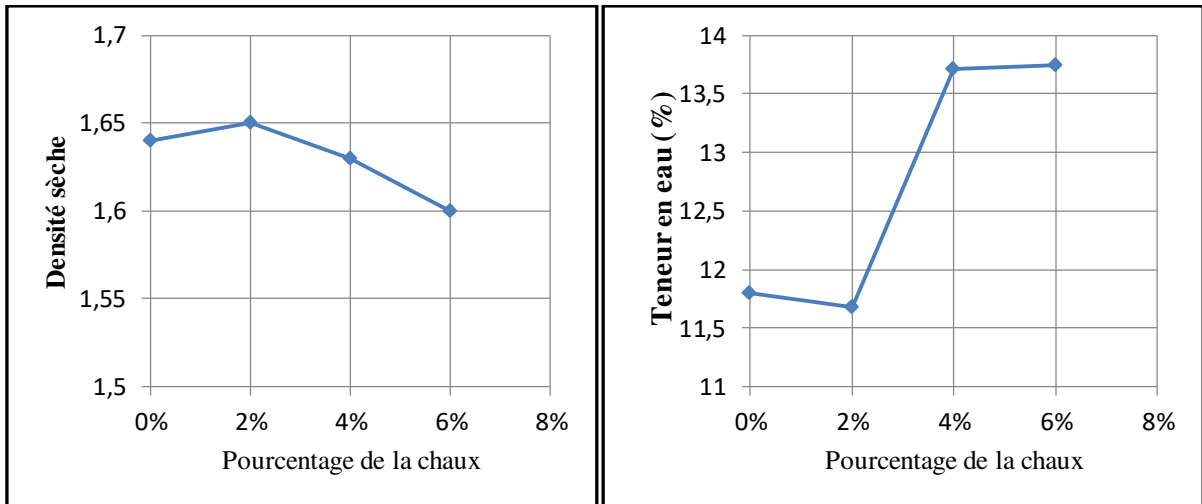


Figure 4.3: Evolution des caractéristiques de l'optimum Proctor suite au chaulage du sol (GTS, 2000).

Il est à noter que, selon les essais de caractérisation, la teneur en eau optimale de sable gypseux seul (non traité) se situe à 11,8% pour une densité sèche maximale de 1,64. Nous avons donc une faible densité sèche comme valeur de référence.

L'ajout de 6% de chaux au SG a augmenté la teneur en eau optimale d'environ 16% (Figure 4.4 a) et a légèrement diminué la densité sèche de 2% par rapport au sable gypseux seul sans traitement (Figure 4.4 b).



a) Teneur en eau optimal.

b) densité sèche maximale.

Figure 4.4 : *Caractéristiques de compactage du SG traité à la chaux.*

L'augmentation de la teneur en eau optimale peut s'expliquer par la réactivation de la chaux qui augmente la température lors de la réaction produite dans le mélange. Notons que plus la réactivité de la chaux est importante, plus elle absorbe de l'eau.

4.3.2 Portance

La figure 4.5 illustre l'effet du traitement du sable gypseux sur l'indice portant immédiat (IPI) et l'indice CBR après 4 heures d'immersion dans l'eau (ICBRim) du sable gypseux traité à la chaux.

Pour les deux cas, nous observons que l'ajout de 6% de chaux a nettement amélioré la portance du SG, d'où une augmentation d'environ 28% de l'IPI et de l'ordre 67% pour l'ICBRim qui à son tour reste supérieure à l'IPI du sable gypseux seul. Cela laisse à dire que la sensibilité du SG, considérée le point faible des matériaux gypseux-calcaires, à l'eau a été améliorée.

A noter que les valeurs d'IPI obtenues sont supérieures au seuil fixe par la norme (NF P 98 115). Ceci permet de dire que le sable gypseux traité est acceptable pour une éventuelle utilisation en assise de chaussées (couche de fondation ou de base).

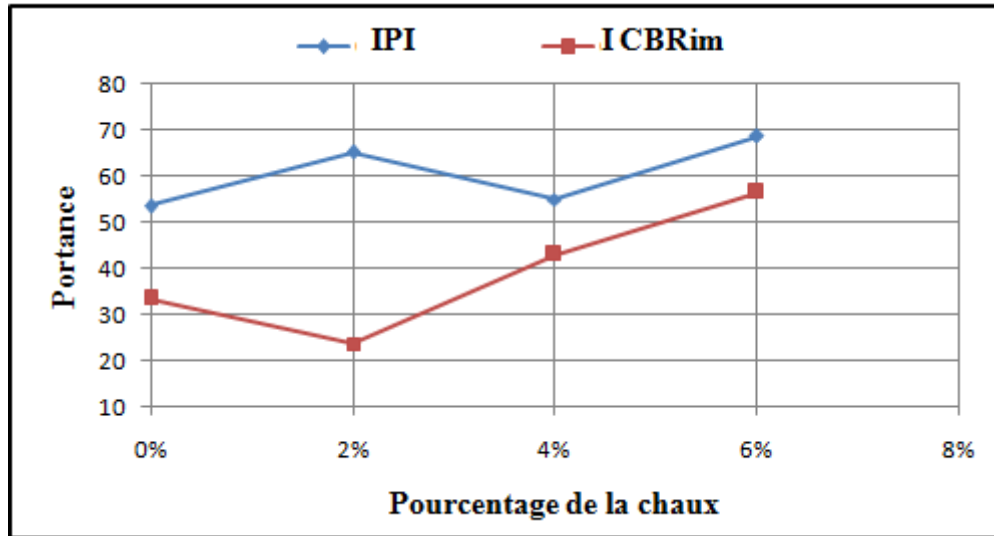


Figure 4 .5: Effet de l'ajout de la chaux sur de l'IPI et ICBRim.

4.3.3 Comportement en compression simple

L'évolution de la résistance à la compression (R_c) est étudiée sur des éprouvettes confectionnées à partir du sable gypseux traité à 6% de chaux, pourcentage qui a donné la meilleure portance, en tenant compte de l'effet des deux paramètres suivants:

- la durée de conservation : les éprouvettes sont conservées à l'étuve à une température de 20° C pendant 3, 7, 14 et 28 jours ;
- la teneur en eau de confection des éprouvettes (W) : 03 teneurs en ont été retenues (12,14,16%).

*Evolution de la résistance à la compression du SG avec la durée de conservation.

La figure 4.6 illustre l'évolution de la résistance à la compression simple en fonction de la durée de conservation pour le sable gypseux à 6 % et non traité.

Les résultats obtenus décèlent que la résistance en compression simple du sable gypseux traité à 6% de chaux est meilleure à celle du matériau non traité presque pour toutes les durées de conservation. La résistance dépasse les 20 bars après 28 jours, soit un gain de résistance d'environ 10% par rapport au sable gypseux seul. Cette croissance de la résistance est due à l'amélioration de la cohésion au sein du sable influencée par l'ajout de la chaux qui a renforcée les liaisons entre les particules du matériau. Ces résultats sont compatibles avec ceux que nous trouvons dans la littérature, ainsi que les travaux effectués sur les tufs d'encroûtements traités.

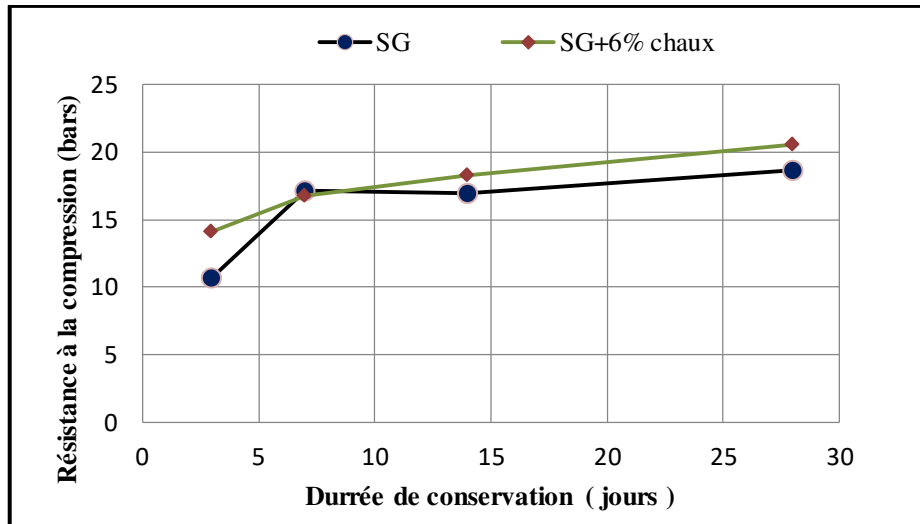


Figure 4 .6 : Evolution de la Rc du sable gypseux traité à 6% de chaux en fonction de la durée de conservation.

Selon une étude expérimentale réalisée par Goual (2012) , à travers laquelle , il a indiqué que l'addition de 8% de chaux à un mélange composé de tuf calcaire et de sable calcaire a amélioré la résistance à la compression , d'où elle atteint une valeur de 7MPa après 28 jours.

Si nous adoptons la spécification de Struillon et Alloul établie pour les tufs d'encroûtement de l'Algérie (annexe c), le sable gypseux traité à 6% de chaux peut être utilisé en couche de fondation pour un trafic compris entre 130 et 300 PL /J contrairement au sable gypseux seul , dont son utilisation est limité en couche de fondation avec un trafic inférieur de 130 PL/J.

***Influence de la teneur en eau de confection des éprouvettes sur la Rc du SG traité**

La résistance en compression simple des matériaux traités aux liants hydrauliques est souvent influencée par la teneur en eaux de confection des éprouvettes, qui est nécessaire à l'hydratation du liant.

Dans ce contexte, des éprouvettes on été confectionnées à partir du sable gypseux traité à 6% de chaux et à différentes teneurs en eau. Les résultats de l'évolution de la résistance en fonction de la durée de conservation sont présentés sur la figure 4.7.

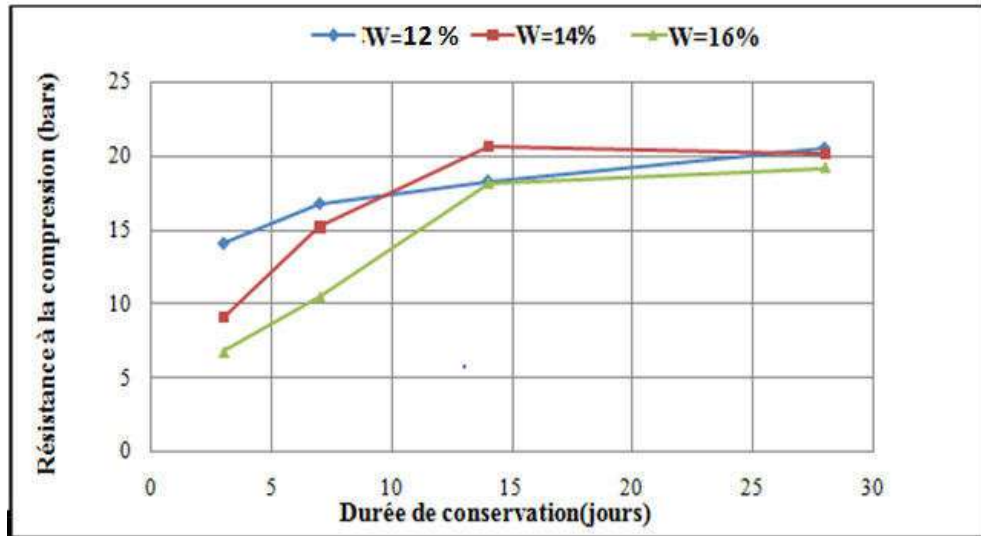


Figure 4.7 : Evolution de la Rc du sable gypseux traité à 6% de chaux pour diverses teneurs en eau de confection des éprouvettes.

Les courbes de Figure 4.7 montrent que la résistance à la compression simple du sable gypseux traité à 6% de chaux progresse positivement jusqu'au 14^{ème} jours, quelle que soit la teneur en eau de confection des éprouvettes. Après cet âge les Rc tendent vers une valeur presque constante.

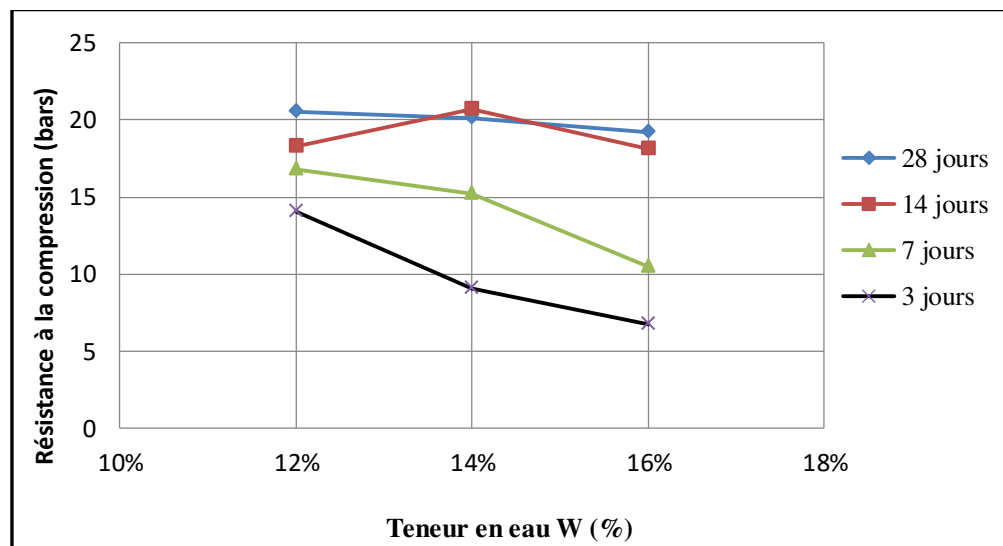


Figure 4.8 : Influence de la teneur en eau de confection des éprouvettes sur Rc du sable gypseux traité à 6% de chaux.

Les courbes de la figure 4.8 montrent globalement que les meilleures résistances sont obtenues pour une teneur en eau comprise entre 12 % et 14% pour toutes les durées de

conservation. Cela signifie qu'il existe une teneur en eau appropriée qui conduit à une hydratation optimale de la chaux et donne donc une résistance maximale.

Egalement, nous remarquons que l'excès de l'eau entraîne la diminution de la résistance, ce que nous constatons lors de l'utilisation d'une teneur en eau de confection égale à 16%.

Ce résultat laisse penser qu'il existe un rapport eau/chaux (E/C) qui influence la résistance de ce matériau routier au même titre que ce qui se passe dans le béton et le mortier.

4.4 Comportement du mélange sable gypseux et déchets de briques (MSG-DB)

Dans cette section, nous avons commencé tout d'abord par l'élaboration des mélanges constitués de sable gypseux et de divers pourcentages déchets de briques appartenant à deux classes granulométriques (0/1mm et 0/2,5mm), obtenues après concassage et tamisage (tableau 4.1). Ensuite, des essais de Proctor modifié et CBR sont réalisés sur ces mélanges dans le but de déterminer le mélange optimal. Enfin, un examen de l'évolution de la cohésion au sein du mélange optimal, seul et traité à la chaux, en fonction de la durée de conservation a été effectué au moyen de l'essai de compression simple.

Tableau4.1: Différents mélanges élaborés MSG-DB.

			Sable gypseux (%)	Déchets de briques (%)	
				Classe0/1	Classe0/2,5
Mélanges	MSG-DB1	MSG-10DB1	90	10	-
		MSG-20DB1	80	20	-
		MSG-30DB1	70	30	-
	MSG-DB2,5	MSG-10DB2,5	90	-	10
		MSG-20DB2,5	80	-	20
		MSG-30DB2,5	70	-	30

4.4.1 Comportement au compactage

Les différentes courbes Proctor pour les deux mélanges étudiés, MS-DB2.5 et MS-DB1, sont illustrées respectivement aux figures 4.9 et 4.10.

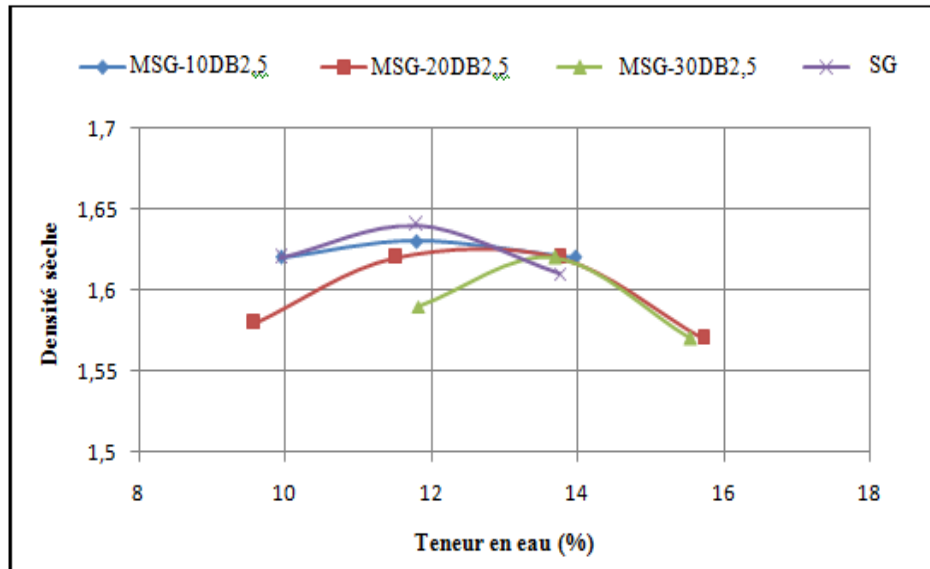


Figure 4.9 : Courbes de Proctor du mélange (MSG-DB2,5).

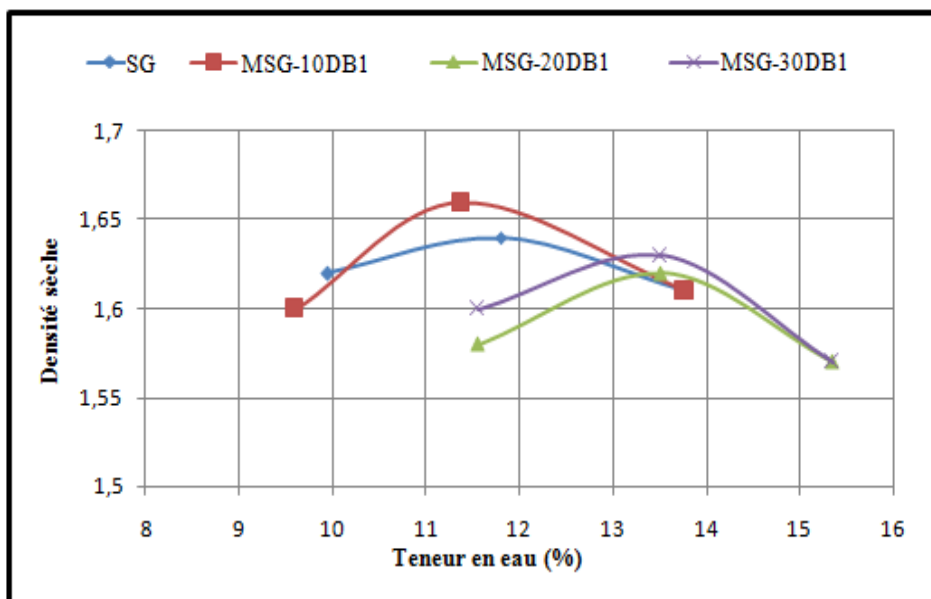


Figure 4.10 : Courbes de Proctor du mélange (MSG-DB1)

Les résultats montrent que les courbes de Proctor des différents mélanges, quelle que soit la classe incorporée, sont décalées vers la droite pour les pourcentages ajoutés 20% et 30%.

Pour les deux cas, les valeurs de la densité sèche maximale sont presque proches. En revanche, les teneurs en eau optimales ont enregistré une augmentation en fonction du pourcentage de déchets de briques. Ceci peut s'expliquer par le besoin d'une quantité d'eau supplémentaire en raison de la nature des déchets de briques qui ont un coefficient d'absorption (A_b) très élevé. Cette importante absorption a été mise en évidence par Barakat(2007), qui a trouvé une différence significative entre les valeurs de A_b d'un sable alluvionnaire naturel classe 0/5 ($A_b = 0,53\%$) et un sable recyclé classe 0/5 de déchets de briques ($A_b = 14,52\%$).

Concernant l'effet du type de classe sur les caractéristiques de compactage, nous remarquons que :

- les densités sèches maximales sont voisines pour tous les mélanges. Elles oscillent entre 1,62 et 1,64 (figure 4.11) ;
- pour les deux mélanges, la teneur en eau optimale croît en fonction du pourcentage de déchets incorporés dans le mélange;
- pour le même pourcentage de déchets, quelle que soit la classe granulométrie introduite, les teneurs en eau optimales prennent des valeurs proches (figure 4.12).

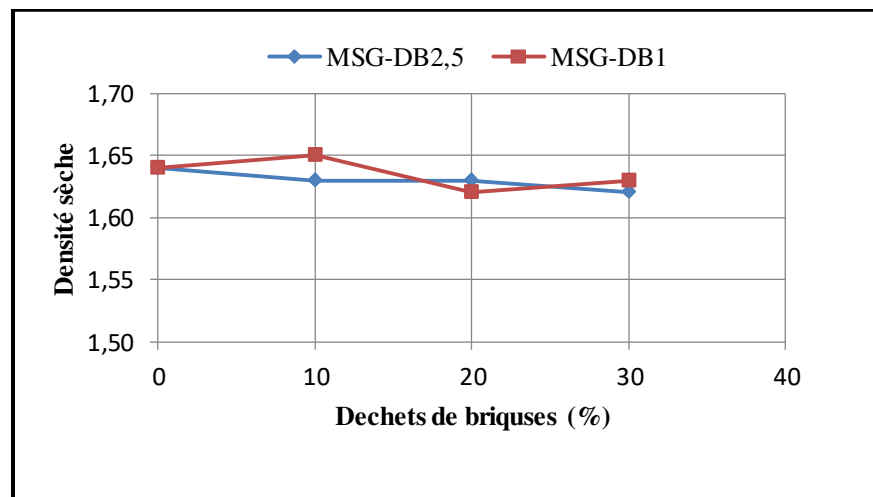


Figure 4.11 : Effet de type de classe sur de la densité sèche maximale.

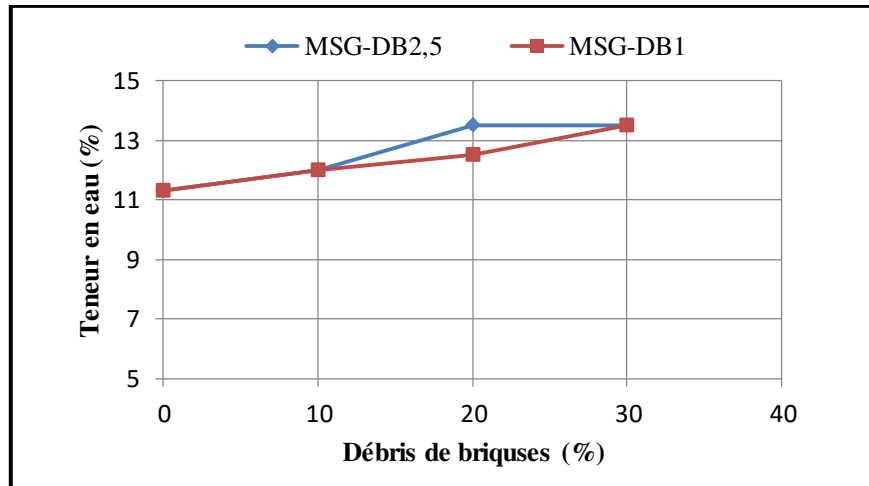


Figure 4.12 : Effet de type de classe sur de la teneur en eau optimale.

4.4.2 Portance

Les résultats de la portance (immédiate et après 04 heures d’immersion), évaluée par l’essai CBR pour les mélanges MSG-DB1 et MSG-DB2,5, sont présentés dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Les résultats de la portance des mélanges MSG-DB

	Mélange sable gypseux+ déchets de briques (MSG-DB)				
	SG + DB classe0/2,5		SG + DB classe0/1		
	IPI	ICBRim		IPI	ICBRim
MSG-0DB2,5	53,59	33,3	MSG-0DB1	53,59	33,3
MSG-10DB2,5	58,31	40,21	MSG-10DB1	56,62	43,24
MSG-20DB2,5	64,39	24,01	MSG-20DB1	57,69	51,9
MSG-30DB2,5	62,95	18,38	MSG-30DB1	46,59	49,87

La variation de l'IPI et de l'ICBRim des différents mélanges MSG-DB2.5 et MSG-DB1 est représentée respectivement sur les figures 4.13 et 4.14.

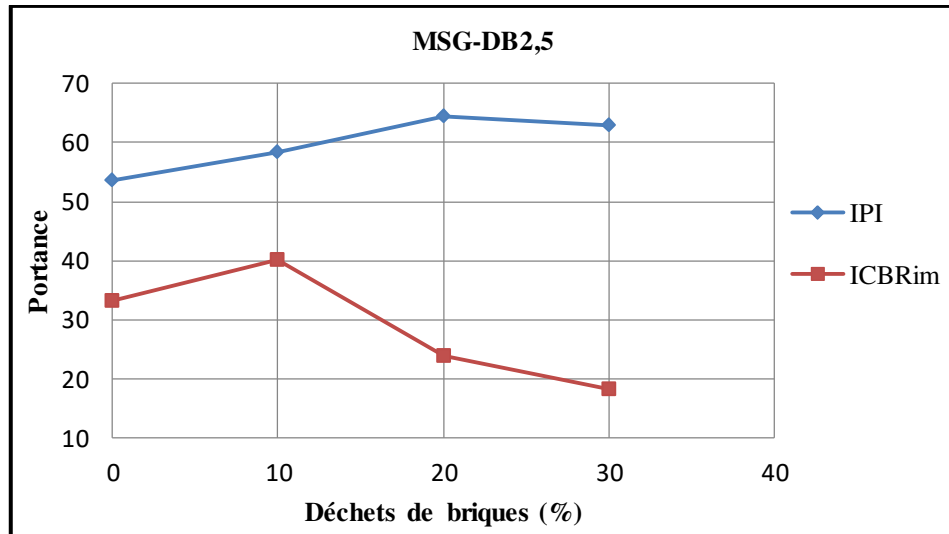


Figure 4.13: Variation de la portance des mélanges MSG-DB2,5.

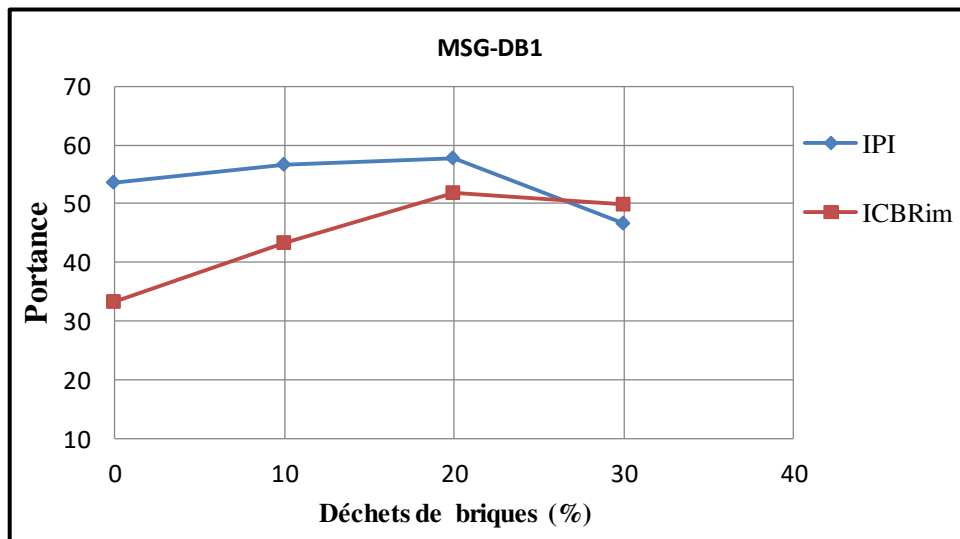


Figure 4.14: Variation de la portance des mélanges MSG-DB1.

Les résultats montrent que :

*** Pour MSG-DB2, 5**

L'IPI des différents mélanges(MSG-DB2,5) est meilleur que celui du sable gypseux (SG) seul .Il atteint sa valeur maximale lors de l'ajout de 20% de déchets (c'est-à-dire pour MSG-20DB2,5) , soit une augmentation de l'ordre de 20,5% .

L'ICBRim maximal est localisé à l'incorporation de 10% (c'est-à-dire pour MSG-20DB2.5). Au-delà de ce pourcentage, l'indice a enregistré une baisse remarquable.

***Pour MSG-DB1**

Les deux indices de ces mélanges (IPI et ICBRim) montrent une amélioration par rapport au sable gypseux seul . Les valeurs maximales sont obtenues avec l’incorporation de 20% de déchets (MSG-20DB1), soit une augmentation de l’ordre de 7% pour IPI et d’environ 55% pour ICBRim .

Cette amélioration de la portance des mélanges est probablement due à la substitution d’un pourcentage de sable gypseux, ayant des particules friables et facilement écrasable lors de l’opération de compactage , par un autre pourcentage de déchets de briques , moins friable et composés essentiellement des particules insolubles (quartz) ,ce qui confère une certaine dureté au mélange.

La diminution de la portance à l’ajout 30% de déchets revient à la tendance des mélanges à prendre le comportement de déchets de brique caractérisés par une faible cohésion.

La figure 4.15 et 4.16 donnent une comparaison entre les indices IPI et ICBRim des mélanges MSG-DB2,5 et ceux de MSG-DB1 afin de voir le l’effet du type de classe incorporée (0 /2 ,5 et 0/1) sur la portance .

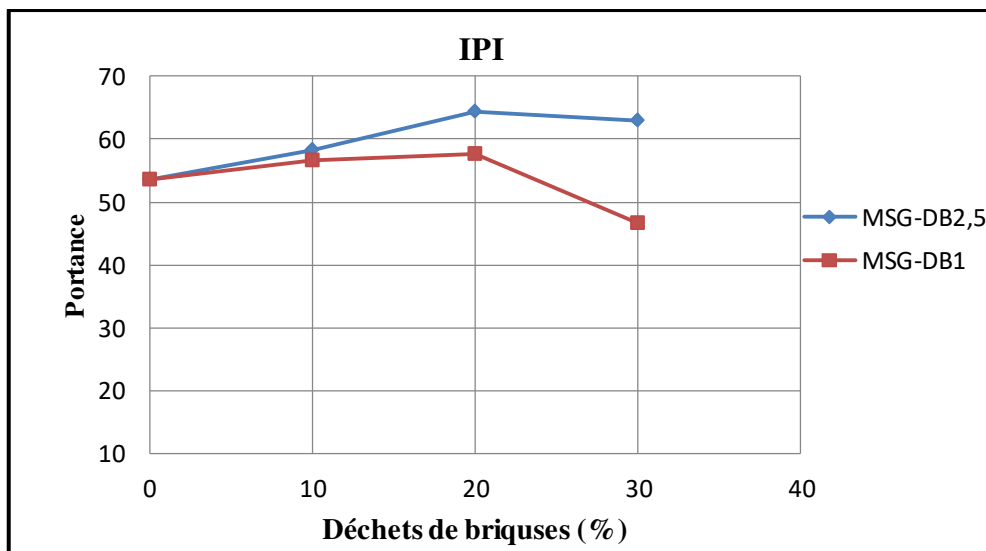


Figure 4.15: Effet du type de classe de déchets sur IPI.

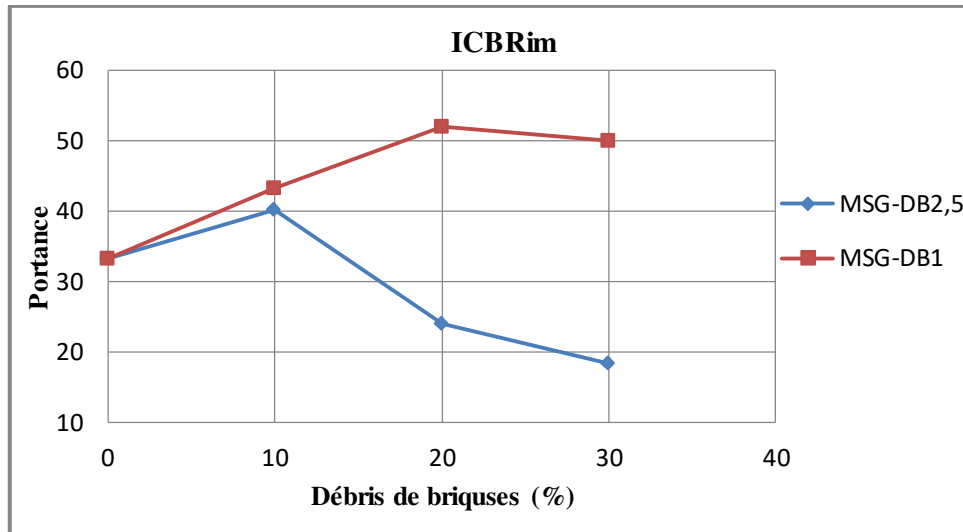


Figure 4.16 : Effet du type de classe de déchets sur ICBRim.

Les résultats illustrent que les meilleurs IPI et ICBRim sont obtenus lorsque nous mélangeons les déchets sous forme de classe (0/1) avec le sable gypseux c'est à dire pour le mélange MSG-DB1.

Pour le mélange MSG-20DB1, lors de l'ajout de 20 % de déchets, les deux indices IPI et ICBRim atteignent leurs valeurs maximales qui sont respectivement de 64,39 et 51,90.

La comparaison entre l'écart de l'IPI et l'ICBRim du sable gypseux seul et celui du mélange MSG-20DB1 révèle une diminution remarquable de cet écart, d'où il vaut 20,29 pour le premier et 5,79 pour le second.

Au vu des résultats obtenus sur la portance des mélanges MSG-DB, nous pouvons considérer que le MSG-20DB1 est le mélange optimal sur lequel l'étude du comportement en compression simple sera examinée.

4.4.3 Comportement en compression simple

L'essai de la résistance à la compression simple (R_c) est effectuée sur le mélange optimal MSG-20 DB1.

Cette résistance est évaluée à partir de l'essai de compression simple qui a été adapté par Fenzy (1966), notamment aux matériaux sahariens. L'essai consiste à apprécier la cohésion du matériau. Il est effectué sur des éprouvettes cylindriques ($\phi = 50$ mm, $H = 100$ mm) et sur la fraction < 5 mm.

Des séries d'éprouvettes sont confectionnées à partir du sable gypseux seul et du mélange optimal (MSG-20 DB1) à différents teneurs en eau. Ensuite, Les éprouvettes sont conservées dans l'étuve à 20°C pendant 3,7,14 et 28 jours .

La figure 4.17 présente l'évolution de la résistance à la compression simple du mélange optimal (MSG-20DB1) en fonction de la durée de conservation.

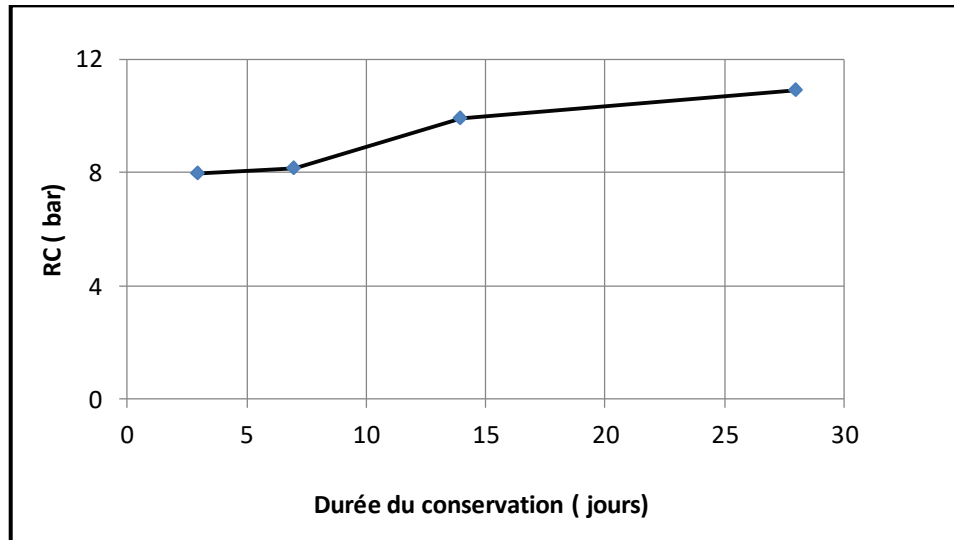


Figure 4.17: Evolution de la Rc du mélange MSG-20DB1 en fonction de la durée de conservation.

Les résultats obtenus montrent que la résistance à la compression simple du mélange MSG-20 DB1 croît en fonction de la durée de conservation. Cette croissance débute à partir du 7^{ème} jours et avec une tendance à l'évolution après 28 jours, d'où la résistance dépasse les 10 bars.

La comparaison de l'évolution de la résistance du mélange optimal à celle de sable gypseux (SG) seul (figure 4.18) illustre que la Rc du MSG-20 DB1, pour toutes les durées, est nettement inférieure à celle du SG, d'où l'écart de la résistance, à 28 jours, entre SG et MSG-20 DB1 est d'environ 8bars, ce qui est considéré important.

Ce que nous pouvons retenir, c'est que l'ajout de déchets de brique sous forme de classe granulaire 0/1 au SG n'arrive pas améliorer la résistance à la compression du mélange. Cette diminution de la résistance est due à la substitution d'un pourcentage du SG par un autre de déchets de briques dotés d'une faible cohésion.

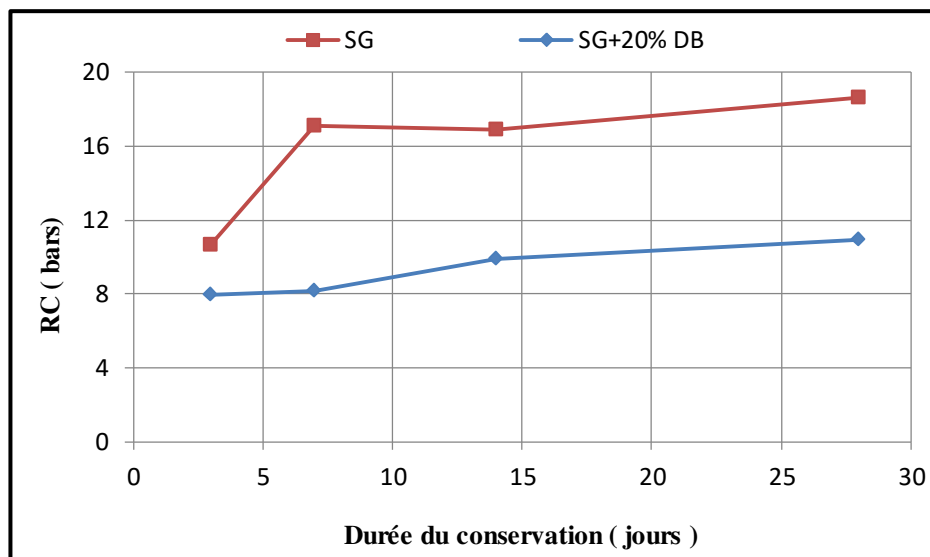


Figure 4.18 : Evolution de la Rc du MSG- 20 DB1 et du sable gypseux en fonction de la durée de conservation.

4.4.4 Traitement du mélange optimal (MSG –20DB1) à la chaux

La résistance à la compression considérée parmi les critères de choix du matériau en construction des chaussées sahariennes. Les résultats obtenus montrent que la résistance du mélange optimal, MSG –20DB1, reste modeste et l'incorporation de ce mélange en assise de chaussée exige de trouver d'autres solutions qui permettent d'améliorer cette caractéristique. A cet effet, nous avons procédé au traitement de ce mélange à la chaux avec un pourcentage de 6 % .

L'évolution de la résistance à la compression simple a été examinée en tenant compte des paramètres suivants :

- la teneur en eau de confection des éprouvettes (12% , 14% et 16%) ;
- la durée de conservation (3, 7 , 14 et 28 jours) .

La figure 4.19 illustre l'évolution de la résistance du mélange optimal (MSG-20DB1) traité à 6% de chaux pour une teneur en eau de confection des éprouvettes égale 12 %, avec une comparaison à celle du mélange non traité ainsi qu'au sable gypseux seul.

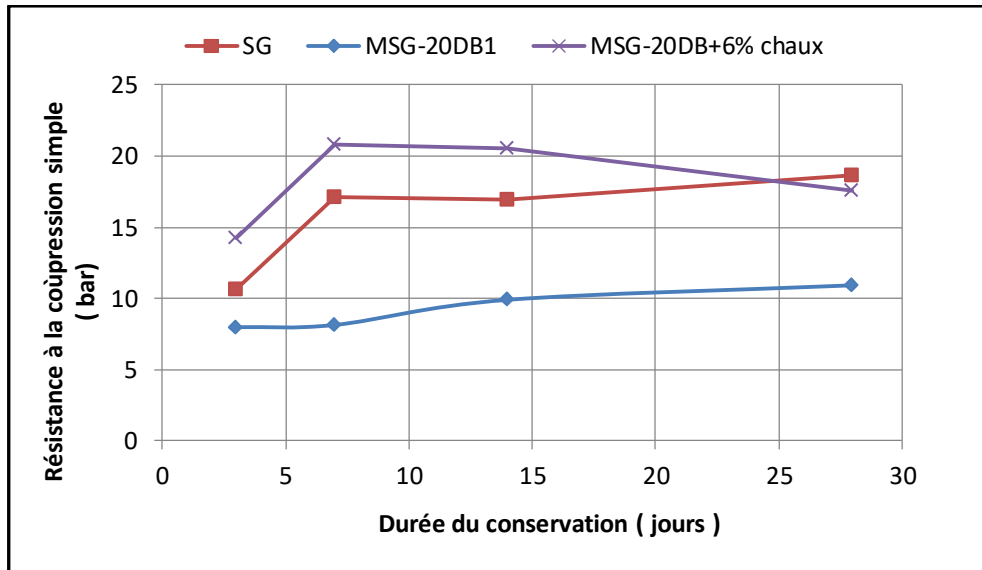


Figure 4.19 : Evolution R_c du mélange optimal traité à 6% de chaux ,sans traitement et sable gypseux en fonction la durée de conservation.

D'après les résultats obtenus , nous constatons que :

- Les résistances du MSG-20DB1 traité à 6% de chaux sont supérieures à celles du mélange optimal non traité pour toutes les durées de conservation et ainsi à celles du sable gypseux à l'exception à 28 jours où nous enregistrons une légère baisse ;
- L' écart entre de la résistance du MSG-20DB1 traité à 6% et celle sans traitement est considérable dès les premiers jours de conservation .Il oscille entre 6 et 10,5 bars , ce qui illustre l'efficacité du traitement à la chaux du mélange optimal ;
- La diminution de la résistance du mélange MSG-20DB1 traité à la chaux à 28 jours peut être expliquée par l' évaporation d'une quantité importante de l'eau issue de la réaction de réactivation de la chaux et à l'ajout du matériaux sec (chaux et déchets de brique) ce qui a entraîné une perte partielle de la cohésion . La quantité d'eaux restante ne permet pas d'hydrater complètement la chaux et la laisse jouer son rôle de liant .

A cet effet, il est utile d'examiner l'évolution de la résistance à la compression du mélange optimal (MSG-20DB1) traité à la chaux en fonction de la durée de conservation à différentes teneurs en eau de confection d'éprouvettes (figures 4.20 et 4.21). .

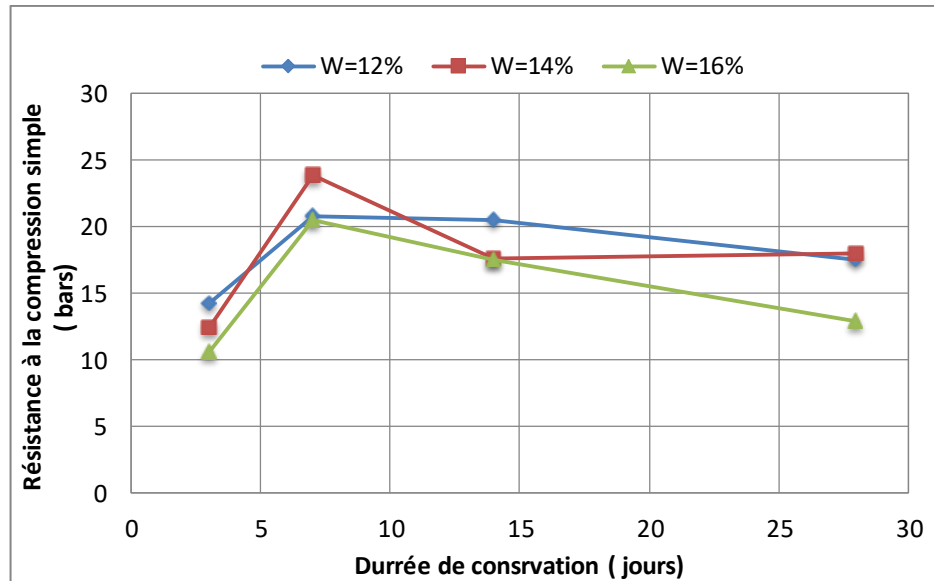


Figure 4.20 : Evolution R_c du mélange optimal (MSG-20DB1) traité à 6% de chaux à différentes teneurs en eau de confection des éprouvettes.

Dans l'ensemble, les meilleures résistances du mélange optimal MSG-20DB1 traité sont obtenues à des teneurs en eau de confection des éprouvettes comprises entre 12% et 14%. Par contre, les résistances minimales sont enregistrées à une teneur en eau égale à 16% (figure 4.20).

Dès les premiers jours de conservation, les courbes de la figure 4.21 montrent que l'excès de l'eau influe négativement sur résistance à la compression. A titre d'exemple, la résistance marque, après 03 jours, une valeur de 14,24 bars pour une teneur en eau de 12% contre une valeur de 10,60 bars pour 16%.

Pour toutes les teneurs en eau de confection, nous observons que la résistance du mélange MSG-20DB1 atteint sa valeur maximale à 7 jours de. Au-delà de cet âge une diminution de la résistance est enregistrée. Ce résultat montre encore fois que il y a toujours une perte de la cohésion avec l'âge pour les raisons évoquées plus haut.

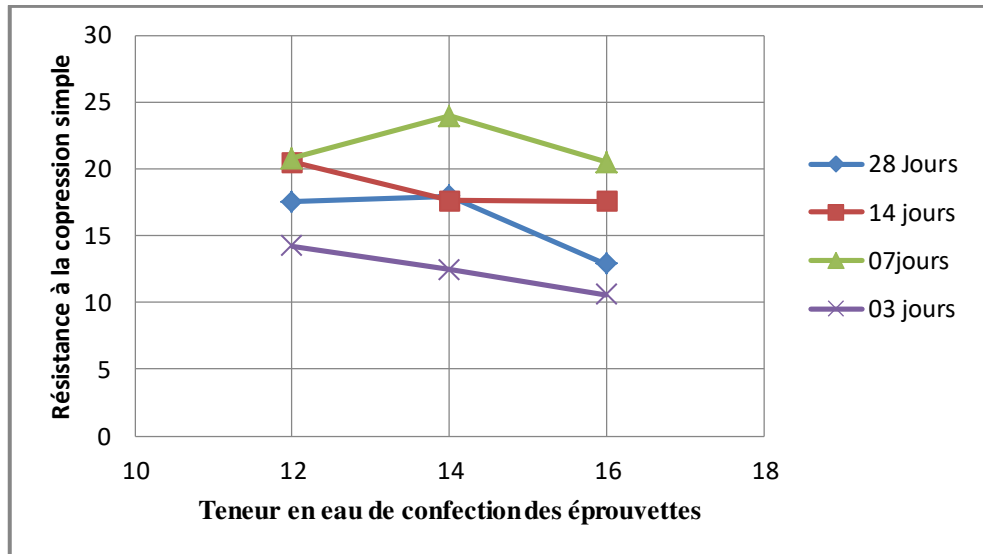


Figure 4.21 : Influence de la teneur de confection sur la résistance du mélange optimal traité à 6% de chaux.

L'ensemble des résultats du comportement en compression simple du mélange MSG-20DB1, qui restent en dessous des attentes, n'empêche pas l'utilisation de ce mélange en couche de forme dans le but d'assurer la circulation des engins de chantier et de recevoir les autres couches de la chaussée.

4.5 Comportement du mélange sable gypseux et sable de dunes (MSG-SD)

Toujours dans le but de limiter l'utilisation des matériaux gypse-calcaire, qui sont des ressources naturelles non renouvelables, et d'améliorer leurs performances mécaniques dans le cas où le besoin nous obligerait à les utiliser, l'association de ce matériau avec d'autres granulats a fait l'objet de plusieurs études et recommandations réalisées par des spécialistes de la géotechnique routière (Ben Dhia, 1983; Colombien, 1988; Morsli et al., 2007, Goual et al, 2011; Goual, 2012; Cherrak et al 2015).

Dans cette section, nous tentons d'examiner le comportement mécanique d'un mélange composé de sable gypseux et de sable de dunes.

D'une manière similaire à ce qui a été fait avec les déchets de briques, Tout d'abord, nous déterminons, à travers l'essai de Proctor modifié et l'essai CBR, le mélange optimal parmi les mélanges élaborés (tableau 4. 3). Ensuite, des essais de compression simple sont effectués sur le mélange optimal seul et traité afin de voir l'évolution la résistance et par conséquent la cohésion en fonction de la durée de conservation, suivis d'un traitement du

mélange optimal à la chaux puis un traitement mixte à la chaux et à la cendre de sous-produits de palmiers dattiers.

Tableau4.3: Différents mélanges élaborés MSG-SD.

		Sable gypseux (%)	Sable de dunes (%)
Mélanges	MSG-10SD	90	10
	MSG-20 SD	80	20
	MSG-30 SD	70	30

Dans cette phase, l'étude est focalisée sur :

- l'examen du comportement au compactage et la variation de la portance (IPI et ICBRim) des mélanges MSG-SD ;
- l'examen de l'évolution de la résistance en compression simple du mélange optimal, non traité et traité, en fonction de la durée conservation et à des différentes teneurs en eau de confection des éprouvettes préparées à partir des mélanges suivants :
 - ✓ mélange optimal MSG-SD ;
 - ✓ mélange optimal MSG-SD traité à 6% de chaux ;
 - ✓ mélange optimal MSG-SD traité à 6% de chaux plus à la cendre de sous produits de palmiers dattiers – CSPD- (4%,8% et 12%).

4. 5.1 Comportement au compactage

La figure 4.22 présente les courbes de Proctor des mélanges MSG-10SD, MSG-20SD et MSG-30SD.

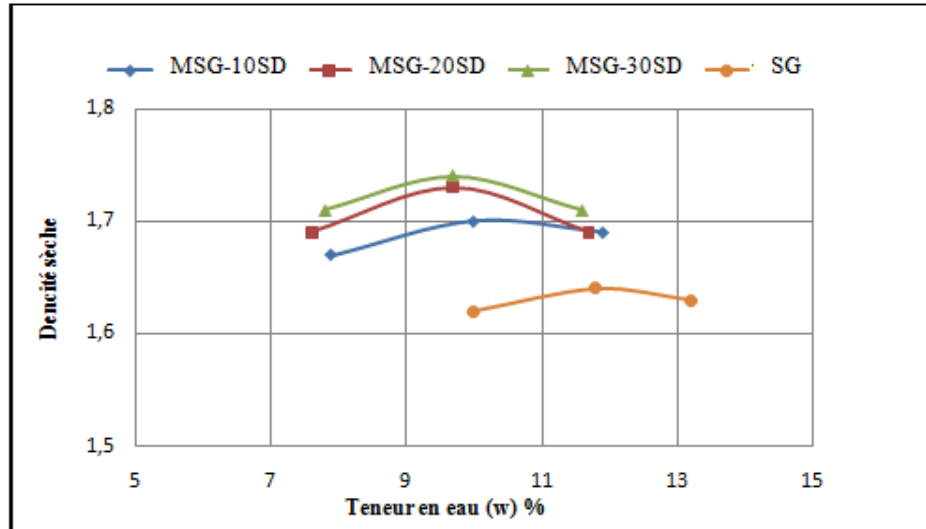


Figure 4.22 : Courbes de Proctor des différents mélanges MSG-SD.

Les résultats montrent que le fait de mélanger le sable gypseux avec le sable de dunes, les coordonnées de Proctor (la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale) sont décalées vers la gauche en augmentant la densité sèche maximale et en réduisant la teneur en eau optimale.

Ce comportement des mélanges peut être assimilé à celui d'un matériau compacté à différentes énergies que l'on retrouve dans littérature. Tout se passe comme on a fait le compactage du sable gypseux seul à des énergies de plus en plus élevées (figure 4.23).

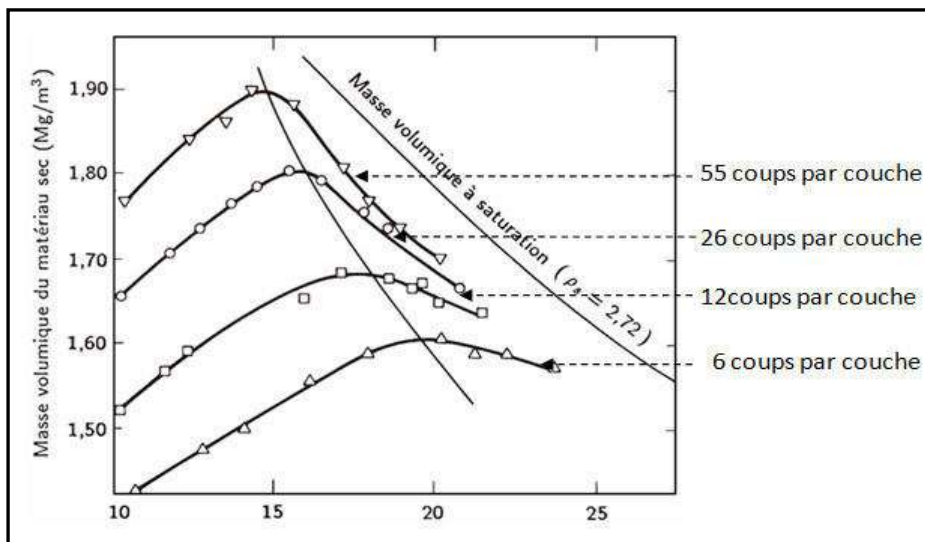


Figure 4.23: Courbe de compactage des échantillons compactés en laboratoire suivant l'essai Proctor modifié à différentes énergies de compactage (Holtz et Kovacs, 1991).

Les figures 4.24 et 4.25 illustrent respectivement la variation de la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale en fonction du pourcentage du sable de dunes introduit dans les mélanges MSG-SD.

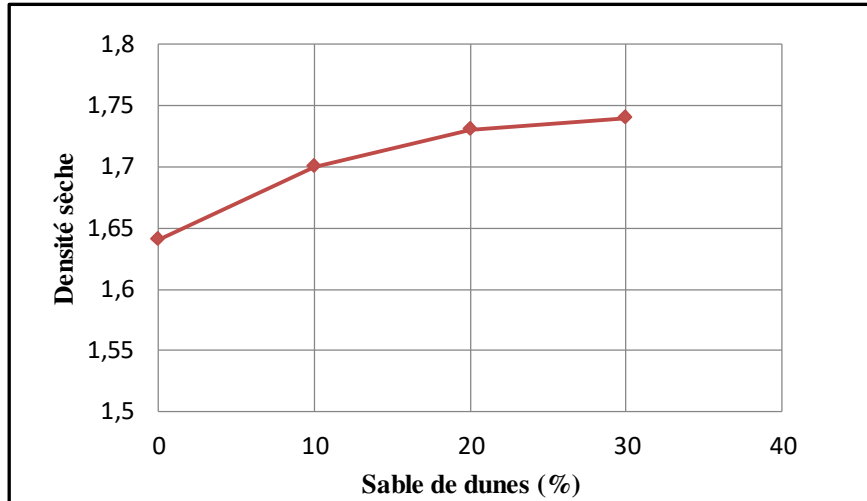


Figure 4.24 : Variation de la densité sèche maximale des mélanges MSG-SD en fonction du pourcentage de SD incorporé.

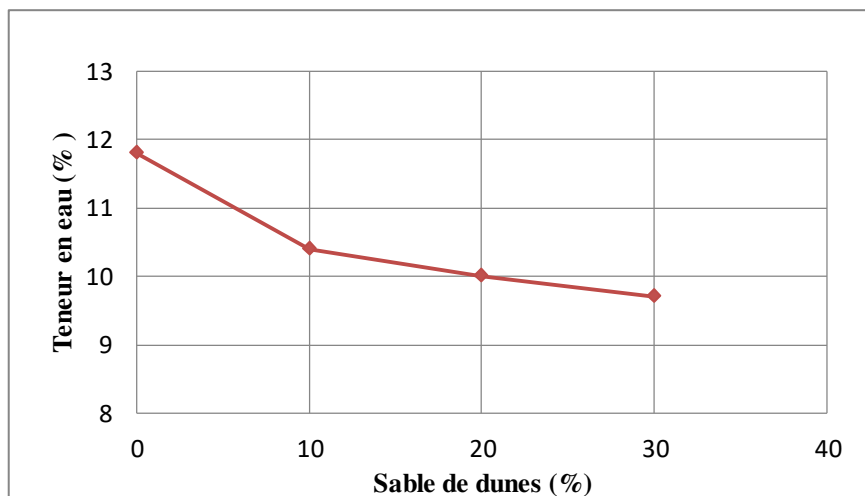


Figure 4.25: Variation de la teneur en eau optimale des mélanges MSG-SD en fonction du pourcentage de SD incorporé.

L'incorporation du sable de dunes à un pourcentage de 30% dans le mélange a augmenté la densité sèche maximale, soit supérieure de 6% à celle du sable gypseux seul, (figure 4.24) et a diminué la teneur en eau optimale d'environ de 21% (figure 4.25).

Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus par Morsili (2007), lors des études réalisées sur un mélange composé de tuf calcaire de la région de Bechar, située au Sud

Ouest de l'Algérie, et de sable de dunes. L'explication qui a été donnée à l'augmentation de la densité sèche est la réduction du taux de fines et leur remplacement par des particules de sable de dunes qui, de par leur forme et leur taille, agissent comme un lubrifiant.

Au fur et à mesure que le pourcentage de sable de dunes augmente, ce dernier lubrifie les particules du matériau de base et facilite leur mouvement en les orientant pour former une structure plus dense.

4.5.2 Portance

Les résultats de la portance (immédiate et après 04 heures d'immersion) pour les mélanges MSG-SD sont présentés dans le tableau 4.4

Tableau 4.4: Résultats de la portance des mélanges MSG-SD

	Indice portant immédiat IPI	Indice CBR après 4 h d'imbibition ICBRim
Sable gypseux	53.59	33.8
MSG-10SD	61,91	32,49
MSG-20SD	57,78	44.25
MSG-30SD	50,33	30,01

La figure 4.26 présente la variation de l'IPI et l'ICBRim en fonction du pourcentage d'incorporation dans le mélange (MSG-SD).

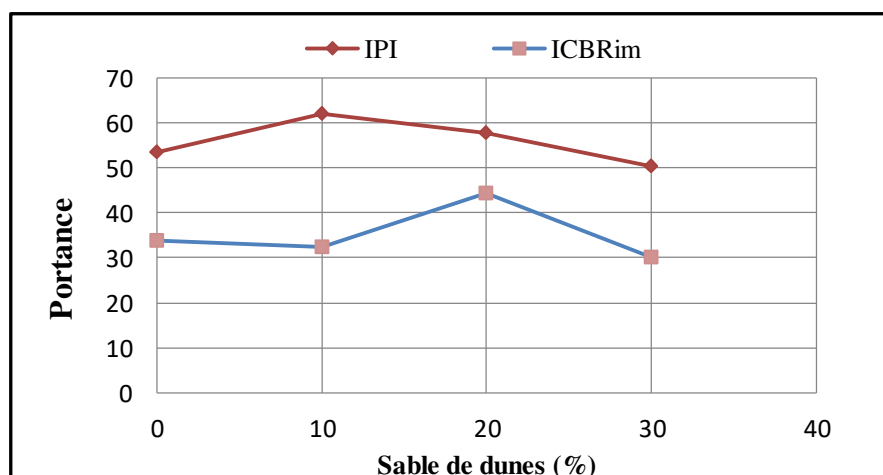


Figure 4.26 : Variation de la portance (IPI et ICBRim) en fonction du pourcentage du sable de dunes incorporé dans le mélange MSG-SD.

Les résultats montrent que l'incorporation du sable de dunes jusqu'à 20% améliore globalement la portance. La valeur maximale de l'IPI a été enregistrée à 10%, tandis que, celle d'ICBRim est localisée à 20%.

Avec l'ajout de 30% de sable, les deux indices enregistrent une diminution baisse qui peut être justifiée par la réduction du taux de particules gypseuse et son remplacement par un autre du sable de dunes qui devient prépondérant dans le mélange.

Ce comportement est similaire à celui qui a été obtenu par Morsili (2007) lors de l'étude de l'évolution l'indice portant ICBR d'un mélange composé de tuf calcaire de la région de Béchar et de sable de dunes, où la meilleure portance a été constatée à l'ajout de 25 % de sable de dunes.

Le bon comportement au compactage et l'amélioration de la portance (immédiate et après immersion) lors de l'introduction de 20 % de sable de dunes dans le mélange (MSG-SD) par rapports à celui du sable gypseux seul, nous permet d'adopter le mélange (MSG-20SD) comme mélange optimal.

4. 5.3 comportement en compression simple du mélange optimal MSG-20SD

Dans cette section, nous examinons l'évolution de la résistance à la compression simple en fonction de la durée de conservation et à des différentes teneurs de confection des éprouvettes constituées à partir des mélanges suivants :

- Mélange optimal MSG-20SD ;
- Mélange optimal traité à la chaux ;
- Mélange optimal MSG-20SD traité à la chaux +à la cendre sous produit de paliers dattier (CSPD).

La figure 4.27 illustre l'évolution de la résistance à la compression simple (R_c) du MSG-20SD en fonction de la durée de conservation avec une comparaison à celle du sable gypseux seul (SG)

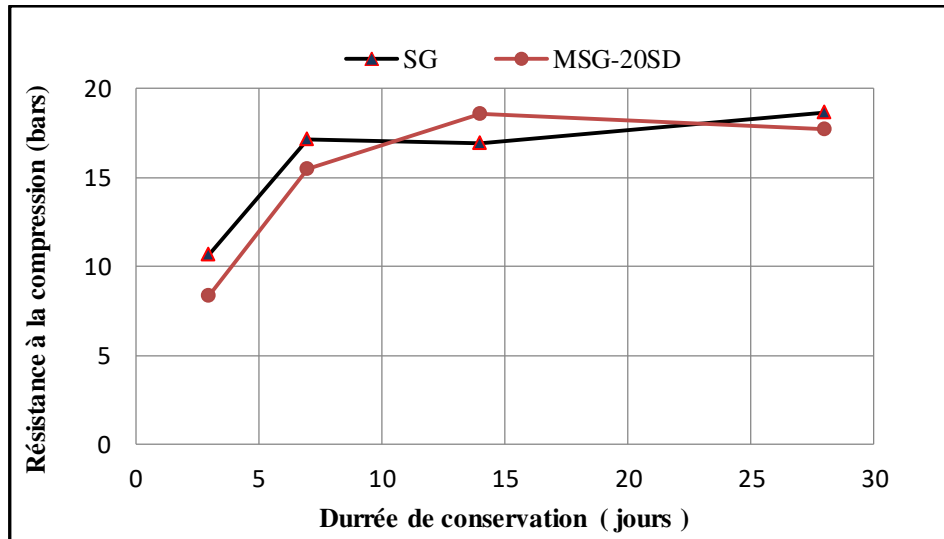


Figure 4.27 : Evolution de la Rc du MSG-20SD et SG en fonction de la durée de conservation.

Les résultats obtenus montrent une augmentation de la résistance à la compression du mélange optimal pour la période comprise entre 03 et 14 jours. En revanche, entre 14 et 28 jours, la résistance marque une légère diminution par rapport à celle du sable de gypse seul. Cette diminution est due à la perte partielle de cohésion du mélange provoquée par la substitution d'un pourcentage de sable de gypse par un autre de sable de dunes doté d'une cohésion relativement faible.

4.5.4 Mélange optimal traité à la chaux

L'incorporation du sable de dunes dans le mélange MSG-20SD n'arrive pas à améliorer efficacement la résistance à la compression simple. Il semble qu'un traitement soit utile pour pallier cette insuffisance.

La figure 4.28 présente l'évolution de la résistance à la compression en fonction de la durée de conservation du mélange optimal traité à 6% de chaux comparée avec celle du sable gypseux seul.

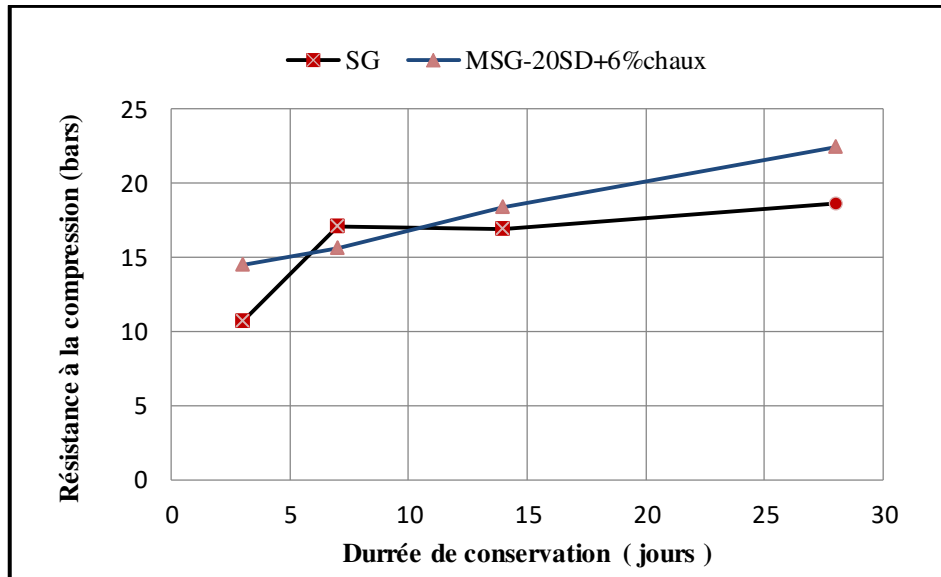


Figure 4.28: Evolution de la Rc du MSG-20SD traité à 6% de chaux et SG en fonction la durée de conservation.

Nous constatons que l'introduction de 6% au MSG-20SD améliore la résistance à la compression. A 28 jours, Rc du mélange traité dépasse les 20 Bars, soit 28% supérieure à celle de sable gypseux seul.

4.5.5 Traitement du Mélange optimal MSG-20SD à la chaux + à la cendre de sous produits de palmiers dattiers (CSPD)

Objectif de ce traitement mixte (chaux + CSPD) du mélange optimal est de voir la valeur ajoutée à la résistance en associant ces deux produits, en s'inspirant de ce qui a été fait avec la cendre de bois (Tarun et al, 2003 ; Vahanen et al, 2014) et des cendres de biomasse (janvier 2003) activées à la chaux utilisées pour le traitement des matériaux routiers.

La figure 4.29 présente l'évolution de la résistance à la compression du mélange optimal traité à 6% de chaux en fonction des pourcentages de CSPD (4% , 8 % et 12%) pour une teneur de confection des éprouvette de 12% et pour différentes durées de conservation.

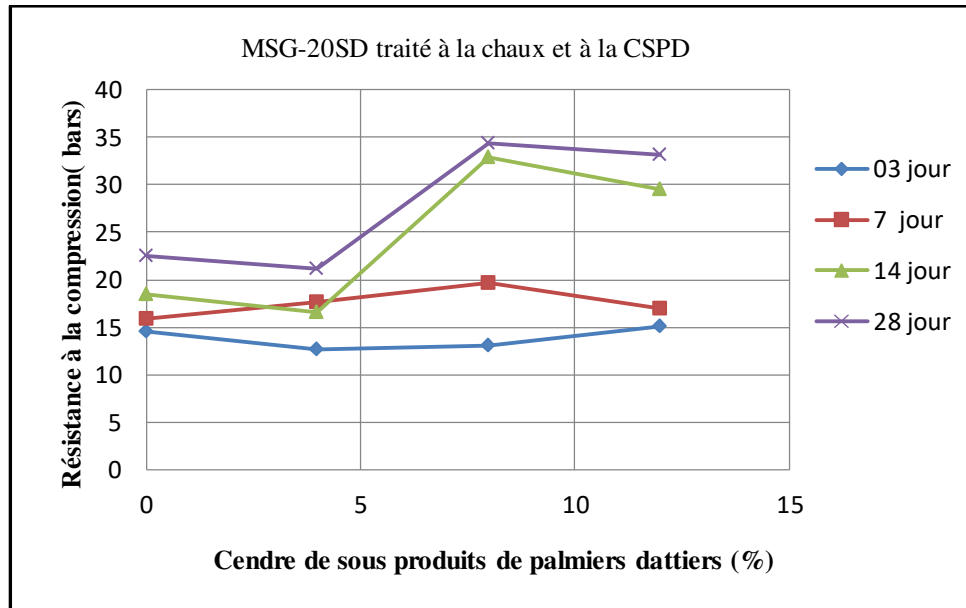


Figure 4.29 : Evolution de la R_c du MSG-20SD traité à 6% de chaux en fonction de pourcentage de CPSD.

D'après ces résultats, nous observons une augmentation considérable de la résistance à la compression simple du mélange optimal traité à 6% de chaux et successivement 8% et 12% de CPSD par rapport au mélange sans ajout de cendres. Cette amélioration est clairement remarquable à partir du 14^{ème} jour.

La valeur maximale de la résistance est atteinte à l'ajout de 8% de CPSD d'où elle est supérieure d'environ 47% à celle de mélange optimal traité à la chaux seulement. Cette amélioration de la résistance peut être justifiée par l'augmentation de la compacité des éprouvettes due au comblement des vides par la cendre, caractérisée par ses particules ultrafines, d'une part, et l'éventuelle réaction produite entre la chaux et la cendre en donnant de nouveaux composés dotés de propriétés liantes d'autre part.

Les travaux menés par Khellou et al. (2016) dont l'objectif est d'étudier l'effet de l'ajout de cendres issues de sous-produits de palmier dattiers seuls, en tant que correcteur granulaire, sur la résistance à la simple compression d'un tuf gypso-calcaire de la région d'Ouargla (figure 4.30) ont montré que la résistance maximale est obtenue à l'ajout de 8% de CPSD.

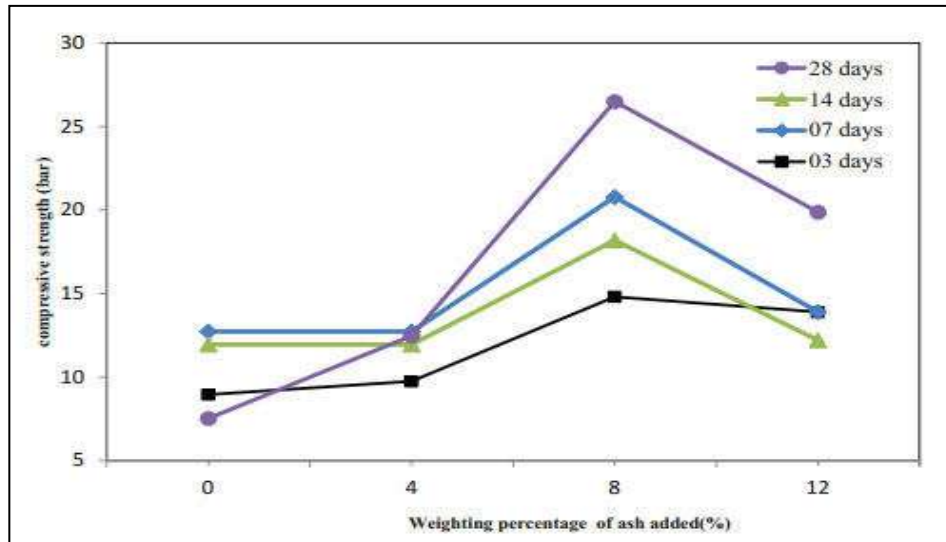


Figure 4.30: Evolution de RC d'un tuf gypso-calcaire en fonction du pourcentage de cendre (CSPD) à différents âges Khellou et al.(2016).

- **Evolution de la résistance en fonction de la durée de conservation**

La figure 4.31 présente l'évolution de la résistance à la compression du mélange optimal traité à 6% de chaux et des différents pourcentages de cendre (4, 8 et 12%), pour une teneur de confection des éprouvettes égale 12%.

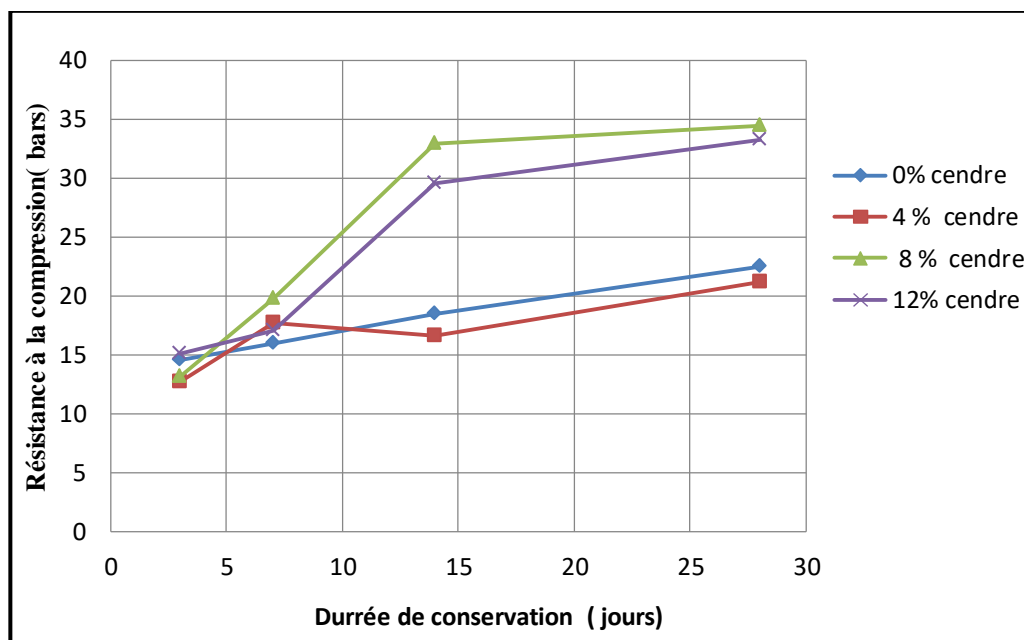


Figure 4.31 : Evolution de la Rc du MSG-20SD traité à 6% de chaux en fonction de la durée de conservation pour différents pourcentages de CSPD.

Les résultats obtenus montrent que la résistance à la compression du MSG-20SD traité à de chaux + la cendre s'améliore avec la durée de conservation, quelque soit le pourcentage de CSPD ajouté. Les meilleures résistances sont obtenues à 28 jours.

Ce traitement mixte a préservé la caractéristique spécifique des matériaux traités aux liants, qui est l'accroissement de la résistance en fonction de l'âge. Préliminairement, on peut dire que l'association de la chaux et la cendre de sous-produits de palmiers dattiers peut former un liant.

- **Effet de la teneur en eau de confection des éprouvettes**

La résistance des matériaux traités aux liants hydrauliques ou pouzzolaniques est souvent influencée par la quantité d'eau ajoutée, de la même manière que ce qui se passe avec les mortiers et le béton lorsque l'on fait varier la quantité d'eau de gâchage.

Dans ce contexte, des séries d'éprouvettes ont été confectionnées à partir du mélange optimal (MSG-20SD) traité avec 6% de chaux et respectivement avec 8% et 12% de cendre pour des teneurs en eau différentes (12%, 14%, 16%). Les résultats de l'évolution de la résistance à la compression sont représentés sur les figures 4.32 et 4.33.

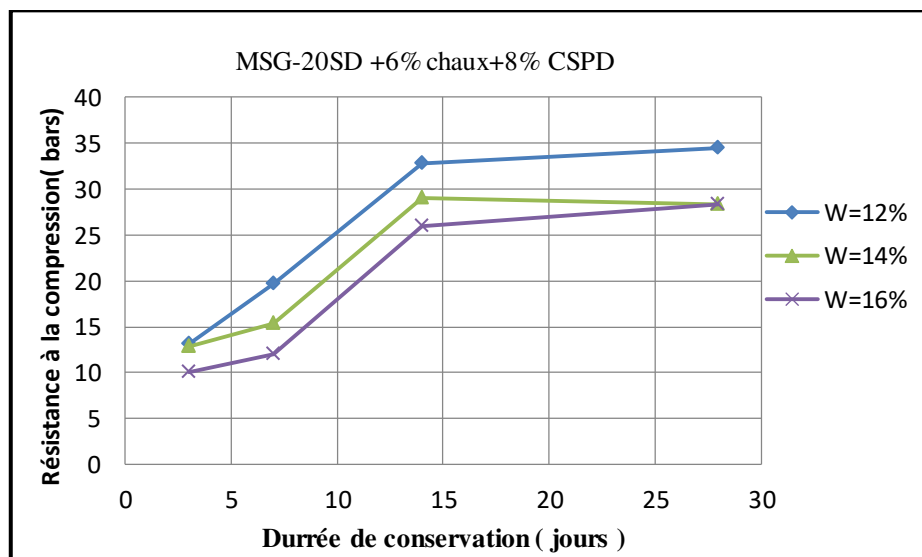


Figure 4.32 : Evolution R_c du mélange optimal MSG-20SD traité 6% de chaux et 8% de cendre pour différentes teneurs en eau de confection.

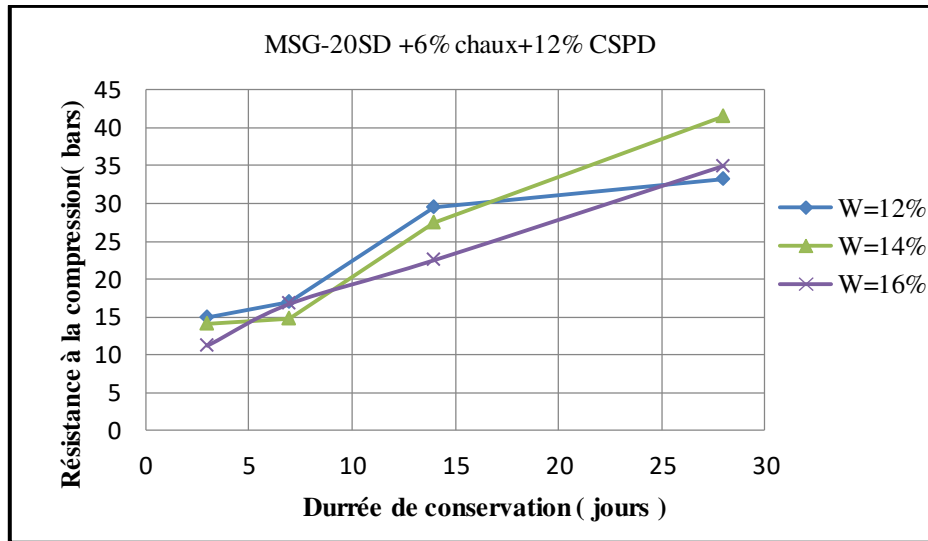


Figure 4.33: Evolution R_c du mélange optimal MSG-20SD traité à 6% de chaux et à 12% de cendre pour différentes teneur en eau de confection.

D'après les courbes tracées des figures 4.32 et 4.33, nous notons que la tendance à l'amélioration de la résistance du mélange traité avec la durée de conservation est toujours maintenue pour toutes les teneurs en eau de confection adoptées.

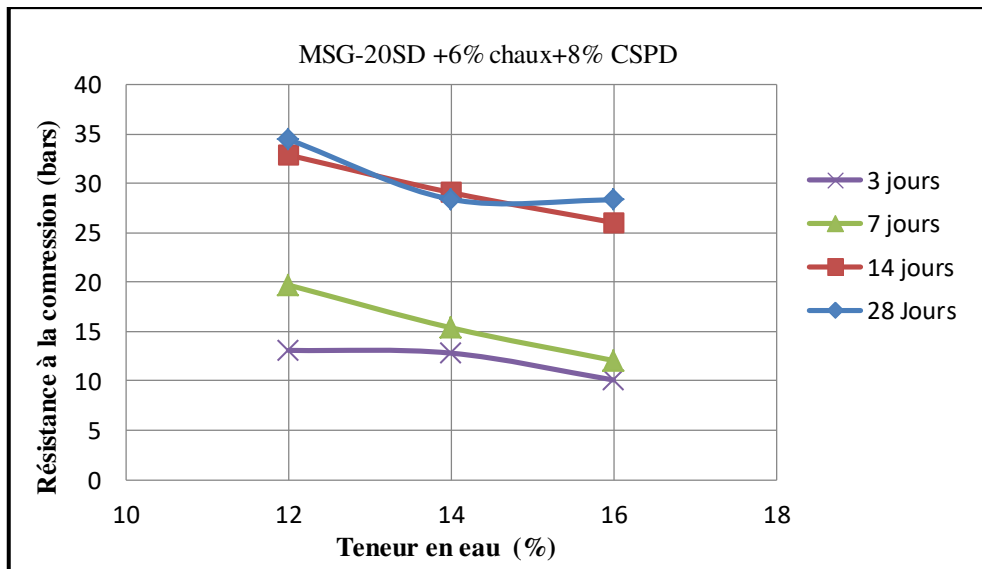


Figure 4.34: Influence de la teneur d'eau de confection des éprouvettes sur R_c du mélange MSG-20SD traité à 6% de chaux et 8% de CSPD.

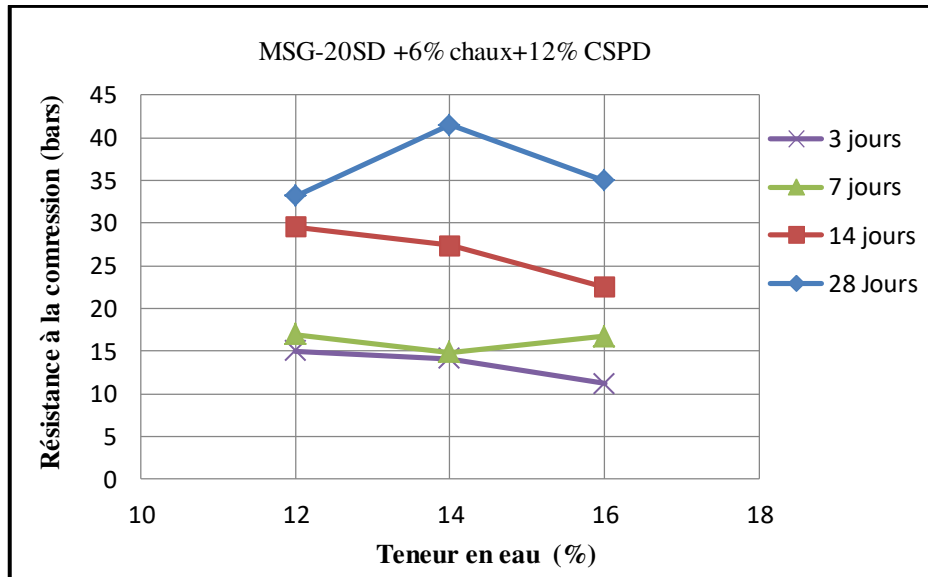


Figure 4.35: Influence de la teneur d'eau de confection des éprouvettes sur R_c du mélange MSG-20SD traité à 6% de chaux et 12% de CSPD.

La figure 4.34 montre que, à 28 jours, la résistance maximale du MSG-20SD traité à 6% chaux +8% CSPD est enregistrée pour une teneur en eau de confection de 12% contre 14% pour celle du MSG-20SD traité à 6% chaux +12% CSPD (figure 4.35). Cependant, la résistance minimale est constatée pour une teneur en eau de 16% pour les deux cas. Cela illustre le besoin d'une quantité d'eau appropriée proportionnelle au pourcentage de la cendre contribuant à la bonne hydratation des ajouts et fournissant une meilleure résistance au mélange, et que l'excès de l'eau conduit à la diminution de la résistance.

Ce résultat permet de dire que la résistance est conjointement liée au pourcentage de CSPD et à la teneur en eau de confection (W), c'est-à-dire qu'il existe une relation entre la résistance et le rapport W / CSPD de la même manière que cela se produit les bétons et les mortiers où le rapport E / C affecte la résistance.

La figure 4.36 donne une comparaison entre les résistances à la compression simple des différentes formules (SG, MSG-20SD, MSG-20SD+6% chaux, MSG-20SD + 6%chaux+12% CSPD).

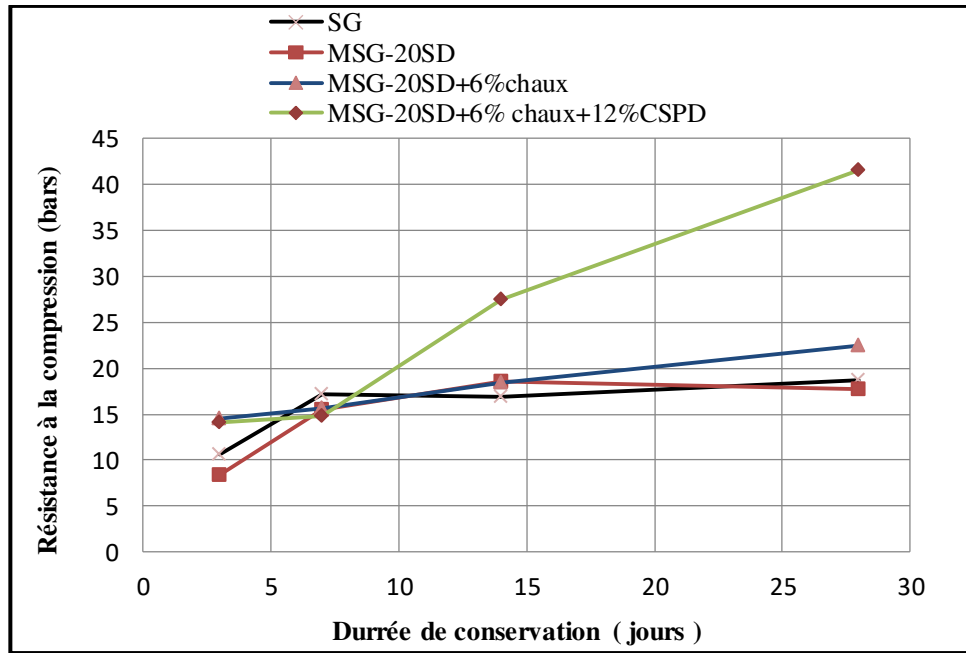


Figure 4.36: Résistance à la compression pour les différentes formules.

Les courbes de la figure 4.36 montrent que pendant la période de 3 à 7 jours, les résistances de toutes les formules ont des valeurs proches. A partir du 14^{ème} jour, il existe une différence significative entre la résistance du mélange optimal traité à la chaux et CSPD et celle obtenue par les autres formules. A 28 jours, la valeur de résistance du MSG-20SD + 6% chaux + 12% CSPD est le double celle de du SG seul et est environ 84% plus élevée que celle du mélange optimal traité à la chaux (MSG-20SD + 6% chaux)

Ces résultats démontrent qu'il existe une réaction entre la chaux et la cendre de sous-produits des palmiers dattiers qui est responsable de l'augmentation de la résistance. Cela nous permet d'envisager la possibilité que la chaux + cendre forme un liant routier.

5 Conclusion

Dans cette partie expérimentale, nous avons étudié le comportement des mélanges : sable gypseux + la chaux ; sable gypseux + déchets de briques ; sable gypseux+ sable de dunes dans l'objectif de réduire l'utilisation de sable gypseux qui est une ressource naturelle non renouvelable, de valoriser le sable de dunes et de recycler les déchets de briques.

Les principaux résultats obtenus montrent que :

- les caractéristiques mécaniques (paramètres de Proctor, portance et résistance à la compression simple) du sable gypseux traité à la chaux ont été améliorées ;
- l'ajout de 20 % de déchets de briques ayant une granulométrie de 0/1 mm au sable

gypseux, c'est-à-dire pour le mélange optimal MSG-20DB1, a permis d'augmenter la portance pour les deux cas immédiat et après immersion dans l'eau, mais n'arrive pas à améliorer la résistance à la compression simple ;

- le traitement du mélange MSG-20DB1 à la chaux a augmenté la résistance à la compression ;
- l'association de sable gypseux avec du sable de dunes à un pourcentage de 20 %, c'est-à-dire pour le mélange optimal MSG-20SD ,a donné une portance satisfaisante qui lui permet d'utiliser en couche de forme ou en couche de fondation.
- Le traitement mixte (chaux et cendre de sous produits de palmiers dattiers) du mélange SGM-20SD a augmenté la résistance à la compression simple, d'où un écart considérable entre celle-ci et celle du sable gypseux et aussi avec celle des autres mélanges (SGM-10SD, SGM-20SD).

Conclusion Générale
et
Recommandations

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux de la région d'Ouargla, en vue de leur utilisation en construction routière saharienne, ainsi que le recyclage des déchets et sous produits industriels. Il vise à :

- améliorer les performances mécaniques des sables gypseux, ayant de mauvaise qualité en comparaisant à d'autres types de tufs d'encroûtement. Cela se fait en les traitant d'abord à la chaux, puis en les combinant successivement avec des déchets de brique et du sable de dunes ;
- valoriser d'autres ressources naturelles de la région, tel que le sable de dunes et recycler les déchets inertes, tel que les déchets de brique ;
- tester la capacité liante des cendres des sous-produits de palmiers dattier, en l'utilisant comme produit de traitement en s'inspirant de ce qui a été fait avec les cendres de bois et de biomasses .

L'étude du comportement mécanique effectuée au moyen l'essai Proctor modifié, de l'essai de portance CBR et l'essai de compression simple de différentes formulations (SG + chaux, MSG-DB et MSG-SD) a permis de conclure ce qui suit :

- La caractérisation physico-mécanique réalisée sur le sable gypseux a révélé ses limites d'utilisation dans les différentes couches de chaussées de moyen et fort trafic. Ainsi, le recours à son traitement au liant ou à son association avec d'autres matériaux pourrait être une solution à cette insuffisance;
- La portance (L'IPI ,ICBRim après immersion dans l'eau) et la résistance à la compression simple du sable gypseux traité à la chaux avec un pourcentage économique ont globalement enregistré une certaine amélioration qui permet d'envisager son utilisation comme une couche de forme ou couche de fondation pour une chaussées à faible et moyen trafic;
- L'effet de la teneur en eau de confection des éprouvettes sur la résistance à la compression simple du sable gypseux traité à la chaux montre l'existence d'une teneur en eau appropriée qui donne la meilleure résistance;
- L'ajout de déchets de briques concassées aux sables gypseux sous forme deux classes granulaires 0/1 et 0/2,5 a influencé les paramètres de compactage .Il a augmenté la teneur en eau optimale et diminué la densité sèche maximale ;

- La meilleure portance du sable gypseux a été obtenue lors de l'incorporation de déchets de briques sous forme de classe granulaire 0/1. Sa valeur maximale est enregistrée à l'ajout de 20% de déchets, c'est-à-dire pour le mélange MSG-20DB1 qui représente le mélange optimal ;
- La résistance à la compression simple du mélange optimal MSG- n'a pas montré de progression avec la durée de conservation vue à la perte partielle de la cohésion dans le mélange ;
- L'opération du traitement du mélange optimal MSG-20DB1, réalisée dans le but d'améliorer la cohésion et par conséquent la résistance à la compression, s'est avéré avoir un effet positif. Ce que nous jugeons satisfaisant pour une utilisation en assises de chaussées sahariennes au regard des exigences techniques recommandées ;
- L'association du sable gypseux et du sable de dunes a permis de réduire la teneur en eau optimale d'augmenté la densité sèche maximale du mélange ;
- La portance du mélange sable gypseux - sable de dunes (MSG-SD) a été améliorée. Les meilleur indices de IPI et ICBRim après immersion sont enregistrés à l'incorporation de 20% du sable de dunes, c'est-à-dire pour le mélange MSG-20SD;
- L'essai à la compression simple sur le mélange optimal MSG-20SD a montré une diminution de la résistance avec la durée de conservation;
- Le traitement mixte du mélange optimal MSG-20SD à la chaux et à la cendre de déchets de palmiers dattiers (CSPD) a permis d'augmenter la résistance à la compression simple avec la durée de conservation. A 28 jours, la résistance de ce mélange a dépassé les 40 bars. Elle est nettement supérieure a celle du mélange non traité ,et encore plus élevé que celle de sable gypseux seul et sable gypseux traité à la chaux ;
- Les performances mécaniques du mélange MSG-20SD traité à la fois à la chaux et à la cendre, répondent généralement aux spécifications usuelles en technique routière saharienne ;
- Le procédé du traitement à la cendre des sous-produits du palmier dattier s'est avéré efficace pour augmenter la capacité de liaison du matériau, améliorant ainsi la résistance à la compression simple, et avec l'ajout de faibles pourcentages. Il pourrait être envisagé pour la stabilisation des sols et des matériaux routiers.

Recommandations

Les résultats obtenus en laboratoire démontrent la possibilité d'améliorer les propriétés mécaniques des sables gypseux en les combinant avec le sable de dunes ou les déchets de briques, ou en les traitant à la cendre sous produits de palmiers. Cependant, la validation définitive de ces résultats nécessite la réalisation de planches d'essai sur site, comme suite logique à ce travail.

L'amélioration des performances mécaniques des sables gypseux pourrait se faire en ajoutant d'autres agrégats, naturel ou recyclé, ainsi que par l'utilisation d'autres produits de traitement tels que les cendres de boues des stations d'épuration.

Les informations sur les cendres issues des sous produits de palmiers dattiers sont rares dans les littératures. Par conséquent, une étude spécifique et approfondie de leurs propriétés physico-chimiques est nécessaire afin de comprendre mieux leur capacité liante

Enfin, Un axe de recherche peut être mené par les spécialistes dans le but de valoriser énergétiquement sous produits de palmiers dattier au même titre que les autres déchets (boues de station d'épuration, ordures ménagères...) afin de limiter l'usage des énergies dites fossiles non-renouvelables.

Références
bibliographiques

Références bibliographiques

- Alloul, B., 1981-** Etude géologique et géotechnique des tufs calcaires et gypseux d'Algérie en vue de leur valorisation routière – Thèse de docteur de 3ème cycle de l'Université de Paris VI.
- Alloul B., Traore A. et Dembele I. 2006** -The Transaharian in Algeria: A road for developing countries in Africa - IAEG paper number 739.
- ADEME,2001** - Etude de valorisation des cendres de chaufferies bois ,Paris 92 p
- ADMEM ,2011-**Matériaux routiers franciliens : Amélioration des techniques de tri des déchets du BTP sur les installation de recyclage des bétons de déconstruction.
- Améraoui, Z., 2002-** Les tufs d'encroûtements, utilisation dans la géotechnique routière. Thèse de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger.
- Aubert G.,1960** - Les sols de la zone aride- étude de leur formation, de leurs caractères, de leur utilisation et de leur conservation-Colloque de Paris communication N°5 UNESCO
- Auvray C., 2003-** Vieillessement et comportement rhéologique du gypse, Thèse de doctorat de l'I.N.P.L., Spécialité : Génie civil – Hydrosystèmes Géotechnique, 279 p.
- BARKAT A., 2007-** Valorisation des déchets de briques dans la réalisation des ouvrage en béton , Thèse de magistère ,Université Kasdi Merbah ,Ouargla , Algérie
- Ben Dhia M.H.,1983-**Les tufs et encroûtements calcaires dans la construction routière . Thèse de docteur de 3ème cycle, Université de Paris VI.
- Ben Dhia, M.H., 1998** - Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière en milieu saharien .Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 213, pp. 33-42.
- Ben Akacha M., Bouaziz S. et Sghari A. , 2005** - Processus de formation de la croûte calcaire villafranchienne dans la plateforme orientale de Tunisie . Journées Internationale des Géosciences de l'Environnement.
- Benchetrit M., 1956** - Les sols d'Algérie Revue de géographie alpine, Volume 44, Numéro 4
- Boudlal O. et Melbouci B. 2010** -'Recyclage des granulats de démolition (brique et béton) dans les corps de chaussées. Revue Technologique et Scientifique COST (ENSET-Oran) ISSN 1112-5187. Revue N°8, Janvier 2010
- Boulaine, J.,1961** - Les facteurs de formation des sols méditerranéens. Sols Africains. Vol.VI n°s 2 et 3
- Boyadgiev T.G., 1974** - Contribution to the Knowledge of Gypsiferous Soils. The Euphtates pilot irrigation projet, Raqqua. Dossier, A.G.O.N./ SF, Syr. 67, 522, FAO Rome
- Briot, P., 1976** – Introduction à l'étude des calcrêtes. Rapport DEA. Pédologie et aménagement des sols. Paris, 25 p.

Brown C.N.,1956 -The origin of Caliche on the north-eastern Llano Estacado,Texas. J. Geol.57:491-511

Bureau P., Roderer P., 1961- Contribution à l'étude des sols gypseux de la partie Sud du golf de Gabes. Bulletin de l'Association Française d'étude des sols, numéro spécial, pp:150-176.

Carpenter M., 1997-Terminologie de la pédologie français-anglais .SFT. ; Société française des traducteurs, France.

Capot-Rey R. 1955 "Les sols d'Algérie d'après Mr J. H. Durand" Annales de Géographie, Volume 64, Numéro 341

Chehma A., et Longo, HF, 2001- Valorisation des Sous-produits du Palmier Dattier en Vue de leur Utilisation en Alimentation du Bétail ,*Rev. Energ. Ren. : Production et Valorisation – Biomasse* .

Cherrak M., Morsli M., Boutemour R. et Bali A,2015.- Valorization of the Use of Calcareous Tuff and Dune Sand in Saharan Road Design," *Journal of Civil Engineering and Architecture* 9 665-676

Colombier, G.,1988 -Tufs et encroûtements calcaires : Utilisations routières. Synthèse, ISTED.

Coque R., 1962 - La Tunisie présaharienne. Etude géomorphologique. Arm.Colin Ed.,Paris. Thèse d'état, 488p.

Coque R. , 1964 - A propos des croûtes gypseuses de la Tunisie méridionale "Annales de Géographie, t. 73, n°395.

Durand, J. H., 1953-Etude géologique, hydrogéologique et pédologique des croûtes en Algérie. Serv. Etud. Sci. Pédol. S.E.S. Alger. 209 p

Durand, J.H., 1956 - Les croûtes calcaires d'Afrique du nord étudiées à la lumière de la bio-rhexistase. S.E.S. Alger, 3-19.

Durand, J.H., 1963 - Les croûtes calcaires et gypseuses en Algérie : formation et âge. Bull. Soc. Géol. France, 7, 5; 959-968.

Durant, J. H., 1959- Les sols rouges et les croûtes en Algérie – Publ. Dir. Et Equip. Rural Ser. Et. Scient. Etude générales n°7, 188 p.

El Moudni E.S. ,Monkade M.,Lahlou K , 2009 -Valorisation d'un mélange de cendres d'une centrale thermique et de scories d'aciérie dans les chaussées routières- Déchets Sciences & Techniques , revue francophone d'écologie industrielle - N° 56 - 4^e Trimestre

Ernesto S. ,2010 -Valorisation des sédiments marins contaminés solidification/ stabilisation `a base de liants hydrauliques et de fumée de silice. Thèse de doctorat, université de CAEN. 229p .

Fischesser R., 1950 - Le gypse : Propriétés physiques et chimiques cours minéralogie. Document « Lambert industries 1972 », 15p.

- F.A.O, 1990** - Management of Gypsiferous soils. FAO soils .Bulletin n° 62, F.A.O, Rome
- Fenzy, E., 1966** - Particularité de la technique routière au Sahara. Revue générale des routes et aérodromes, N° 411, p. 57-71.
- Florea N., Al-Joumaa Kh., 1998** - Genesis and classification of gypsiferous soils of the middle Euphrates Floodplain, Syria. Geoderma 87: pp67-85
- Gardner L.R. 1972**- Origin of Mormon Mesa Caliche, Clark County, Nevada. Geol. Soc. Amer.Bull., 83 : 143-156.
- Gausson C. 1991** -Les poussières sahariennes. - J. Libbey Eurotext - Aupelf/Uref, Coll. Sciences en marche, Paris.
- Gautier Y, 2004** - Les climats méditerranéens comme intersection des régions arrosées en hiver et sèches en été. Ed. Du monde, Encyclopædia Universalis.
- Guide cendres, 2010**- Guides d'utilisation des matériaux lorrains en technique routière, les travaux publics, UNICEM, CETE de l'est LRPC Nancy, CTR et UNPG ,33 p.
- Goual I., Goual M., Taibi S. et Abou-Bekr, N.** - Behaviour of Unsaturated Tuff- Calcareous Sand Mixture on Drying-Wetting and Triaxial Paths- Geomechanics and Engineering Vol. 3, No. 4 (2011) 267-284 267 ,2011.
- Goual, I., Goual, M.S., Taibi S., & Abou-Bekr N., 2012**-. Amélioration des propriétés d'un tuf naturel utilisé en technique routière saharienne par ajout d'un sable calcaire. European Journal of Environmental and Civil Engineering, ISBN 978-2-7462-2946-4
- GTR, 1992**-Réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique, LCPC-SETRA, 204 p
- GTS, 2000** -Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique LCPC-SETRA, 240p.
- Halitim, A.,1988** - Sols des régions arides d'Algérie. O.P.U. Alger. 384 p
- Hamrouni, A., 1975**- Routes économiques et routes à faible circulation. XVème Congrès mondial de la route, Mexico.
- Herrero J., Boixadera J., 2002** - Gypsic Soils. Encyclopedia of Soil Science., pp:635-639.
- Holtz, R.D. & Kovacs. W.D, 1991**- *Introduction à la géotechnique*, Montréal : Éditions de l'École polytechnique de Montréal, 2005, 808p
- Horta De Os., 1979** - Les encroûtements calcaires et les encroûtements gypseux en géotechnique routière. Service des publications du laboratoire de M.D.S., Bas SONATRACH,Blida, Algérie.110p. .
- Jan R, Danielle, S., Jacob, H., 2005**-Utilization of ashes from biomass combustion and gasification”, *European Biomass Conference & Exhibition*.

Khellou A. , Kriker A. et A.Hafssi A., 2013 - Modélisation Statistique des Propriétés Physico-mécaniques des Matériaux Sablo-gypso-Calcaires de La Région de Ouargla. Annales des Sciences et Technologie ,Vol.5, N°1.

Khellou A., 2011 ,Modélisation du Comportement des Matériaux Sable- Gypso-Calcaire. Thèse de magistère ,Université Kasdi Merbah ,Ouargla , Algérie

Kriker A., 2005 -Caractérisation des Fibres de Palmier Dattier Et Propriétés des Bétons et Mortiers Renforcés par ces Fibres en Climat Chaud . Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, ENP- Alger - Algérie.

Kulke H. ,1974.- Zur Geologie der Kalk und Gipsknisten Algeriens. Geol. Rdsch. 63; 3 : 970-998.

LIANG.Y.2012 -Co-valorisation de sédiments et de sols fins par apport de liants et de fibres Thèse de doctorat, Université de CAEN. P194

LOZET J., MATHIEU C., 1990 - dictionnaires de science du sol .Ed technique de document .Lavoisier. 384p

LTP- Sud Oaurgla ,1996 - Recueil de normes pour la réalisation des essais sur chantier.

Madani D. 2008 -Relation entre le couvert végétal et les conditions édaphiques en zone déficit hydrique. Mémoire de magistère université de Batna.

Marnezy A., 2004 - Les roches blanches : gypse et anhydre en Haute-Maurienne. Université de liège.Fiche environnement- commission formation éducation du C.I.S.

Morsli, M., 2007 -Contribution à la valorisation des tufs d'encroûtement en technique routière saharien, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, ENP- Alger - Algérie.

Netterberg, F., 1969 -The geology and engineering properties of South African calcretes. Ph.D. Thesis, University of Witwatersrand, Johannesburg.

Netterberg, F., 1975- Self-stabilization of road bases: fact or fiction? 6th conference of Africa on Soil Mechanics and foundations engineering Durbin.

Netterberg, F., 1978 - Prospecting for calcrete materials in South and Southwest Africa. On civile ingenieur in Suid- Africo.

O'Donoghue M., 1997-Roches et Minéraux. Ed. Fontaine- Paris, Guide d'identification,218p

Padmini A.K., Ramamurthy K. et Mathews M.S. 2009- Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete, Construction and Building Materials, 23 (2), pp 829-836

Pilon, I., Laquerre, M. ,1999- Guide d'information sur le recyclage des matériaux secs. RECYC-QUÉBEC, 124 p.

Pouget M., 1968-Contribution à l'étude des croûtes et encroûtements gypseux de nappe dans le sud tunisien.Cah.ORSTOM .pédologie n°3-4, pp : 310-365.

Pouget, M., 1980a- Les relations sol-végétation dans les steppes sud-algéroises. Thèse de

doctorat d'état, Université d'Aix-Marseille III, 555 p.

Pouget, M., 1980b-Les sols à croûtes calcaires dans les steppes algériennes :Quelques aspects morphologiques et esquisse d'une évolution actuelle. Cah; ORSTOM Sec. Pedol. 18, 3. 4, 235-236.

PREDIS ,2002 - Guides techniques régionaux relatifs à la valorisation des déchets et co-produits industriels. PREDIS Nord-Pas-de-Calais,199 p

Quelet R., 1964 -Précis de chimie .Tome II. Chimie Minérale. Ed. Presses Universitaires de Paris., 253p.

Rafai N.,2008 - Les composantes de la matrice cimentaire (Rappels et interactions); Revue ciments, Bétons, Plâtre, Chaux; Paris-France, Verre Presse Services éd; N°890, pp. 60-66.

Rakotoarisoa Z., 2003- Prédiction du comportement environnemental des résidus de procédés thermiques (RPT) utilisés comme matériaux de travaux publics, Thèse de doctorat soutenue à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 254 p

Rohleder, J.; Kroker, E, 2001-Calcium Carbonate: From the Cretaceous Period Into the 21st Century. Springer Science & Business Media. ISBN 3-7643-6425-4

Ruellan, A., 1963 - Les horizons d'individualisation et d'accumulation du calcaire dans les sols du Maroc. ORSTOM, Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire, Rabat, Maroc.

Ruellan, A., 1967- Individualisation et d'accumulation du calcaire dans les sols et dépôts au quaternaires du Maroc. cahiers ORSTOM.

Ruellan, A., 1970-Les sols à profil calcaire différencié des plaines de basse Moulouya (Maroc), Thèse de doctorat Fac. Des sciences de Strasbourg, France.

Ruellan, A., 1971-Les sols à profils calcaires différenciés dans les plaines de la basse Moulouya (Maroc Oriental), Cah. ORSTOM n° 54, 302 p.

Ruellan, A.,1976-Morphologie et répartition des sols calcaires dans les régions méditerranéennes et désertiques. Ann. Agr. (INA) vol VI, n° 1, 11-39.

Ruellan, A., 1980- L'accumulation du calcaire dans les sols. Cristallisation, déformation, dissolution des carbonates. Université Bordeaux III, 401-411.

Vogt, T., 1979- Microsilicification dans des croûtes calcaires de milieu aride. Quelques remarques. Rech. Géogr. A Strasbourg, n° 12, 81-86.

Vogt, T., 1984- Croûte calcaire : type et genèse. Exemple d'Afrique du nord et de France méditerranéenne. Thèse de doctorat d'état, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 228 p.

Vanhanen, H.Dahl O., et Joensuu S., 2013 -Utilization of Wood ash as a Road Construction Material–Sustainable Use of Wood Ashes,” International Conference on Final Sinks.

Senol A., Edil B., Sazad M., Shafique-Bin., Acoste H., Benson C., 2006 -Soft subgrde, stabilization by using various fly ash Resources, Conservation and Rycyling, Volume 46, Issu 4 April 2006, Pages 365-37.

SEGUI P., 2011- Elaboration de liants hydrauliques routiers à base de pouzzolane naturelle ou de cendre volante de papeterie - thèse de université de Toulouse p 207.

SNPP et Drire (1988) - La pouzzolane : l'avenir en projection. Plaquette d'information, Syndicat Nationaldes Producteurs de Pouzzolane et DRIRE Auvergne, 9 p.

Stengel P., Gelin S., 1998 - Sol : Interface fragile. Ed., INRA, Paris,213p.

Struillou, L, Alloul, B., 1984-Valorisation routière des tufs d'encroûtements en Algérie. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Symposium International sur les Granulats. pp 465-469 ISTED.

Trichet J., 1963- Description d'une forme d'accumulation de gypse par voie éolienne dans le Sud tunisien. Bull. Soc. Géol. France, pp :617-628.

Vieillefon J. 1979 - Contribution à l'amélioration de l'étude analytique des sols gypseux . ORSTOM, sér. pédol, vol XVII, N° 3, 195-223.

Warren J.K., 1982-. The hydrological setting, occurrence and significance of gypsum in late quaternary salt lakes in South Australia. Sedimentology, 29, pp: 609-637.

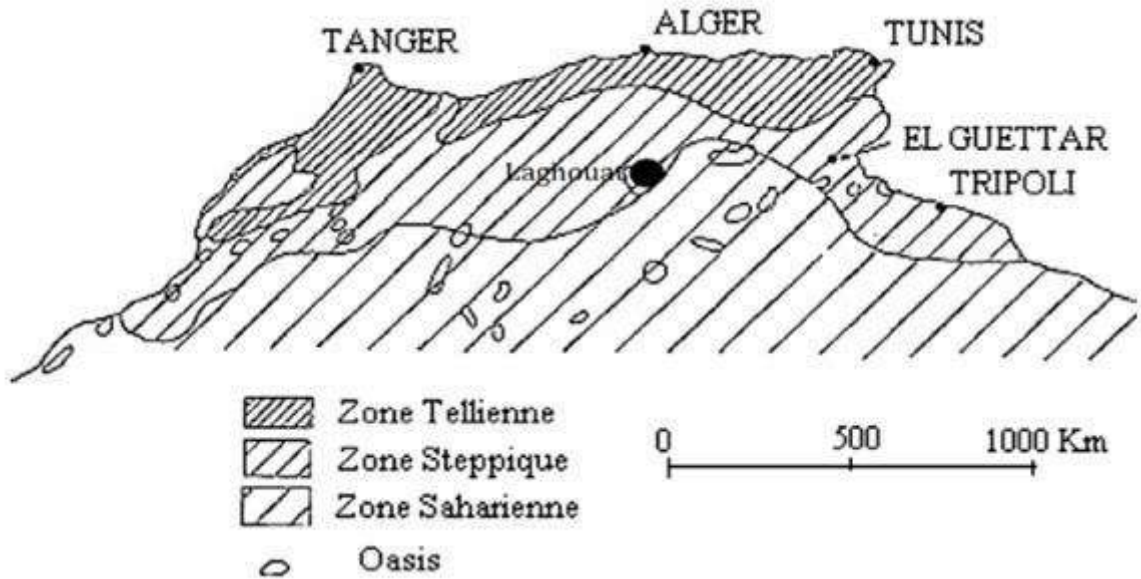
Watson A.,1988.-Desert gypsum crusts as palaeoenvironmental indicators: A micropetrographic study of crusts from southern Tunisian and the central Namib Desert. Journal of Arid Environments, 15, pp: 19-42

Watson A., 1985-Structure,chemistry and origins of gypsum crusts in southern Tunisia and the central Namib Desert. Journal of the International Association of Sedimentologists, 32, N°6, pp: 855-875.

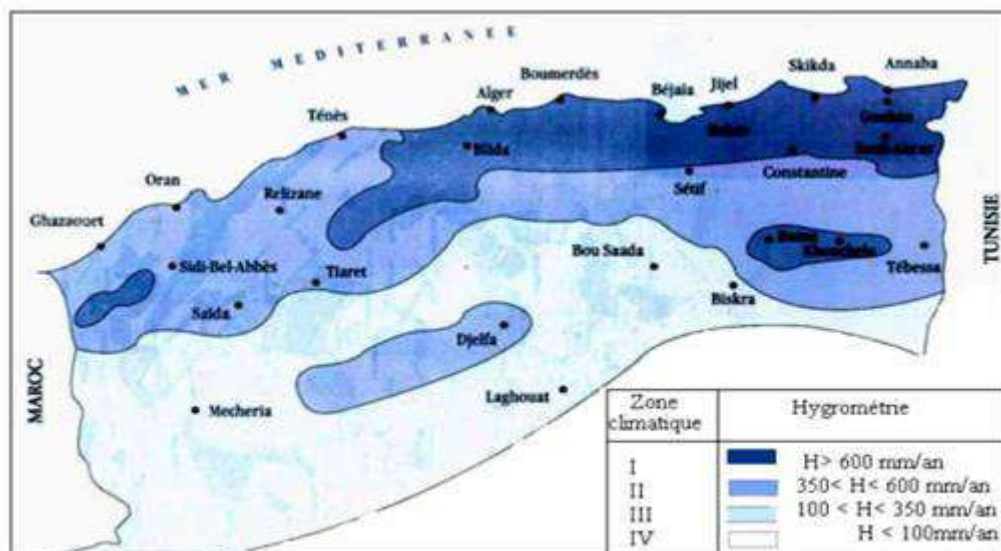
Yuzer E., 1982.- Propriétés géotechniques des évaporites et formations évaporitiques de Turquie.Bull. Ass. Int. Géol. Eng., n°25, pp: 107-110.

Annexe

Annexe A.1: Topographié du Magherb (Hadjiat,1997)



Annexe A.2 : Carte pluviométrique pour l'Algérie (ANRH, 1993)



La carte pluviométrique de l'Algérie montre que la pluviométrie s'étale entre les zones côtières arrosées et les zones sahariennes arides. On distingue:

Zone I : Méditerranéenne humide $H \geq 600$ mm/an

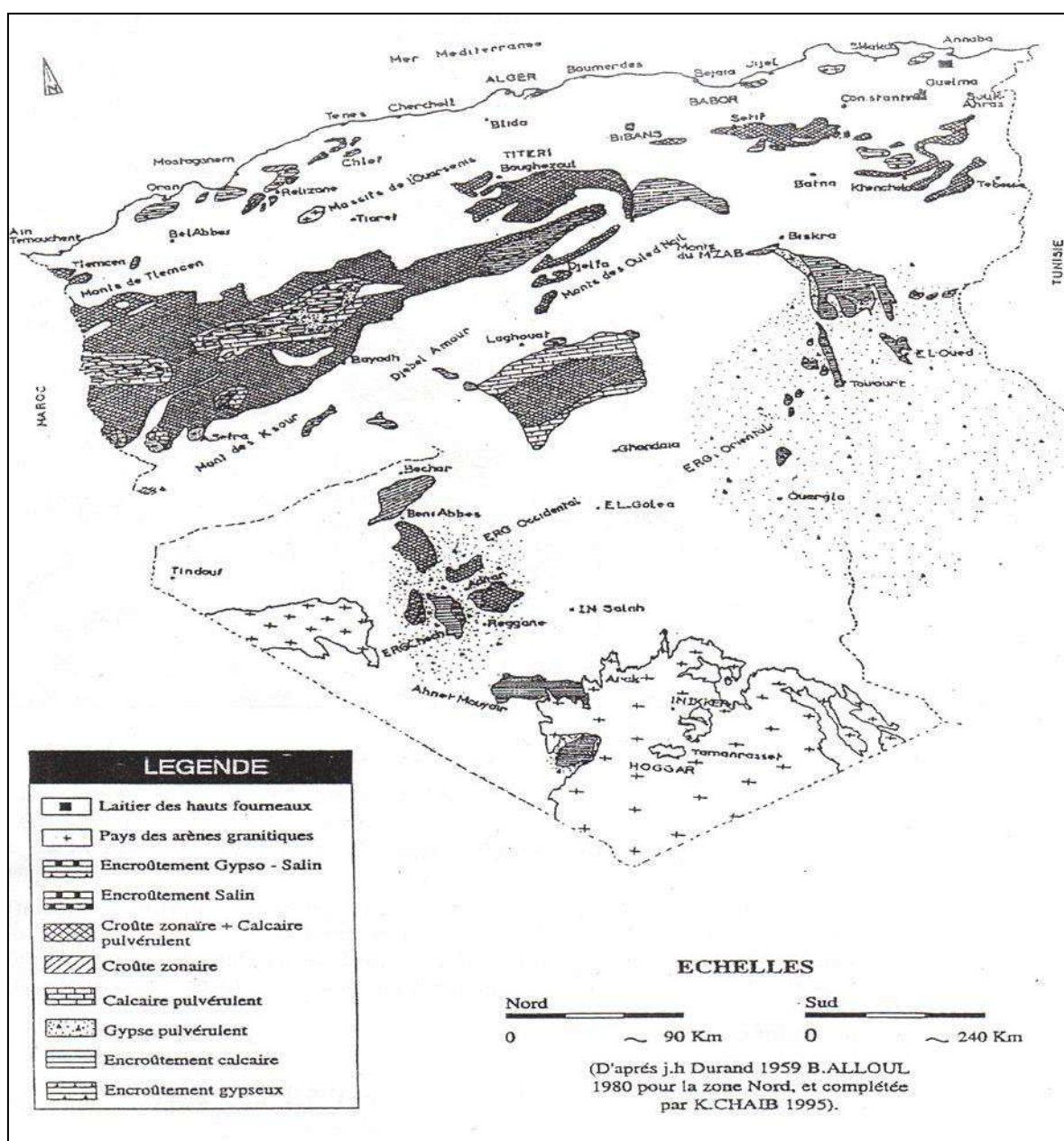
Zone II : Méditerranéenne subhumide $350 \leq H < 600$ mm/an

Zone III : Semi-aride ou steppique $100 \leq H < 350$ mm/an

Zone IV : Aride ou désertique $H < 100$ mm/an

H : est la hauteur moyenne des précipitations annuelles.

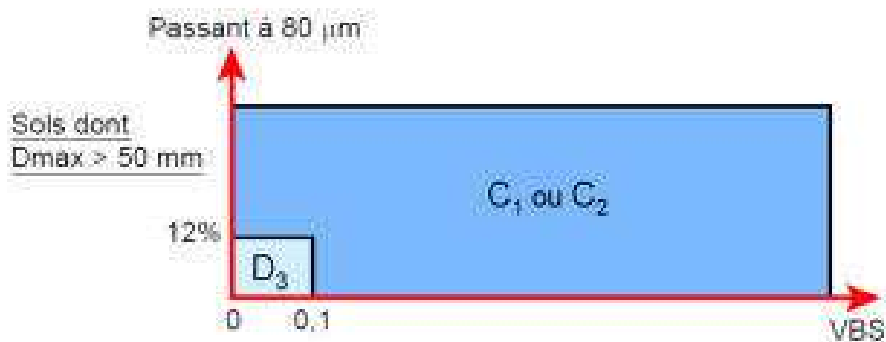
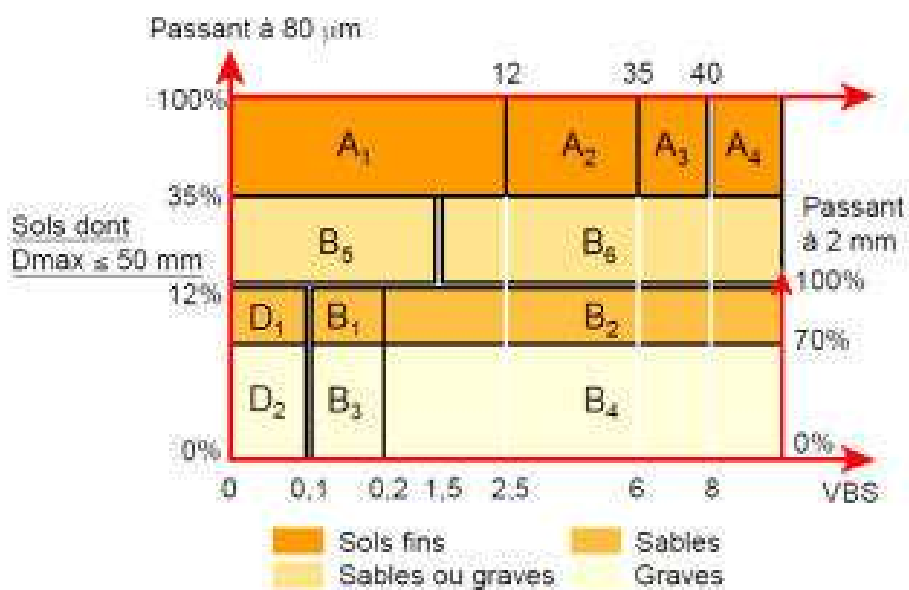
Annexe.A.3 : Répartition des encroûtements calcaires et gypseux en Algérie.



Annexe B : Classification GTR

Une classification de matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières et donne par le GTR (SetraLCPC, 1992), permet de classer les en fonction d'un certain nombre de paramètres cité supra :

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



Annexe B : Propositions de spécifications pour l'Algérie par STRUILLOU et ALLOUL

			poids	lourd	/jour		
			< 130	130 300	300 600	600 1200	> 1200
Zone II sup- humide H=350 à 600 mm de pluie avec bon drainage exigé	% < 80 µm max	BF	30	30	30	30	30
	% > 4 mm min	BF	30	30	30	30	30
	% > 12,5 mm min	BF	10	10	10	10	10
	LA max. sur > 12,5 mm sec	B	100	55	35		
		F	100	100	100	100	100
	IP max. sur < 0,4 mm	BF	10	10	10	10	10
	CBRe à 4 j d'immersion min	BF	40	70	80	90	100
	% CaCO ₃ min. sur < 1 mm	B	70	70	70		
F		60	60	60	60	60	
% CaSO ₄ max. sur < 1 mm	BF	tr	tr	tr	tr	Tr	
Zone III semi-aride H= 100 à 350 mm de pluie par an sans exigence- de bon drainage	% < 80 µm max	BF	30	30	30	30	30
	% > 4 mm min	BF	30	30	30	30	30
	% > 12,5 mm min	BF	10	10	10	10	10
	LA max. sur > 12,5 mm sec	B	100	100	55	35	
		F	100	100	100	100	35
	IP max. sur < 0,4 mm	BF	13	13	13	13	13
	CBRe à 4 j d'immersion min	BF	40	70	80	90	100
	% CaCO ₃ min. sur < 1 mm	B	70	70	70	70	
F		60	60	60	60	60	
% CaSO ₄ max. sur < 1 mm	BF	05	05	05	05	05	
Zone IV aride H<100 mm de pluie par an sans exigences de bon drainage	Rc (MPa) min. sur < 5 mm ; (y _d = 0,95. y _d opm ; 48 h à 55°C)	B	2,5	03	3,5		
		F	1,5	02	2,5	03	3,5
	IP max. sur < 0,4 mm	BF	16	16	16	16	16
	CBRe à 4 j d'immersion min	BF	30	60	70	80	90
	% (CaCO ₃ + CaSO ₄) min Sur < 1 mm	B	70	70	70		
		F	60	60	60	60	60
%NaCL max. sur < 1 mm	BF	03	03	03	03	03	

Caractéristiques à viser si possible, en Algérie pour le choix des tufs d'encroûtements, suivant la zone climatique et le trafic prévu.

■ Tufts d'encroûtement déconseillés ; B : pour couche de Base ; F : pour couche de fondation ; traces : Rc (Mpa) : compression simple sur cylindres (5*10 cm) séchés 48 h à 55°C ; Ip indice de plasticité ; granulométrie sous eau après 48h dans l'eau : compactage CBR à 55 cops/couche à W_{opm} puis 4 jours d'immersion ; la Los Angeles sur granulométrie A.

Annexe D: classes de trafic selon le guide technique SETRA

La classe de trafic (T_i) est déterminée à partir du trafic poids lourds journalier moyen (MJA) de la voie la plus chargée pendant l'année de mise en service.

on distingue donc, six classes de trafic en fonction du nombre total de poids lourds :

- soit par voie de circulation,
- soit sur la voie la plus chargée,
- soit sur la voie concernée,

Les classes de trafic Poids Lourds (PL)	La Moyenne Journalière Annuelle (MJA)
T0	$T0 \geq 750$ PL/jour/sens
T1	$300 \text{ PL/jour/sens} \leq T1 < 750 \text{ PL/jour/sens}$
T2	$150 \text{ PL/jour/sens} \leq T2 < 300 \text{ PL/jour/sens}$
T3	$50 \text{ PL/jour/sens} \leq T3 < 150 \text{ PL/jour/sens}$
T4	$25 \text{ PL/jour/sens} \leq T4 < 50 \text{ PL/jour/sens}$
T5	$T5 < 25 \text{ PL/jour/sens}$

Tableau D. 1 : LES CLASSES DE TRAFIC POIDS LOURDS PAR JOUR ET PAR SENS

Ces classes de trafic définissent deux grandes catégories de routes (Figure D.1).

- les voiries à faible trafic regroupant toutes les classes de t_6 à t_{3+} ,
- les voiries à moyen et fort trafics regroupant toutes les classes de T_3 à T_0 .

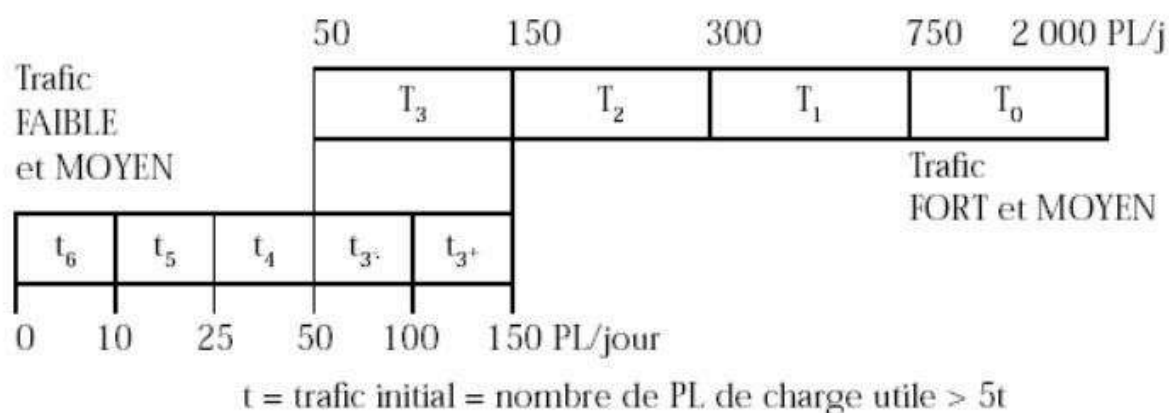


Figure D.1 Classification du trafic selon le « SETRA »

Résultats de la résistance à la compression simple

	3 jours		7 jours		14 jours		28 jours	
	Rc moyenne (bars)	Ecart type	Rc moyenne (bars)	Ecart type	Rc moyenne (bars)	Ecart type	Rc moyenne (bars)	Ecart type
Sable gypseux								
Wopm	10,67	1,07	17,48	0,50	16,92	1,87	18,63	2,29
Sable gypseux traité à 6% de chaux								
12,00	14,06	4,04	16,77	1,56	18,31	0,91	20,55	0,30
14,00	9,10	1,42	15,20	0,84	20,66	1,37	20,16	2,41
16,00	6,78	0,27	10,49	0,37	18,13	0,97	19,20	1,84
Mélange optimal MSG-20DB1								
Wopm	7,98	0,83	8,14	0,61	9,90	1,14	10,92	1,82
Mélange optimal MSG-20DB1 traité à 6% chaux								
12,00	14,24	2,73	20,77	2,27	20,52	2,29	17,52	5,24
14,00	12,47	1,76	23,93	2,20	17,63	0,59	17,98	0,85
16,00	10,60	1,67	18,45	1,52	17,56	0,45	15,04	4,61
Mélange optimal MSG-20SD								
Wopm	8,35	0,91	15,52	0,76	18,57	0,83	17,45	1,36
Mélange optimal MSG-20SD traité à 6% de chaux								
12,00	14,49	1,29	15,90	0,53	18,41	0,61	22,48	1,85
14,00	12,02	1,29	13,70	1,82	17,73	1,50	16,95	1,11
16,00	7,53	1,38	8,72	0,23	16,09	1,02	21,12	0,33

Mélange optimal MSG-20SD traité à 6% de chaux +4% de CSPD								
12,00	12,63	0,81	17,70	1,40	16,63	1,89	21,16	3,34
14,00	11,42	0,75	18,63	0,45	16,56	1,07	24,77	4,01
16,00	7,39	1,13	18,63	0,81	14,67	1,97	19,98	0,62
Mélange optimal MSG-20SD traité à 6% de chaux +8% de CSPD								
12,00	13,10	0,89	19,70	0,61	32,86	3,24	34,44	2,59
14,00	12,81	0,06	15,38	3,49	29,06	2,69	28,38	4,19
16,00	10,10	0,97	12,06	0,75	26,02	6,39	28,31	2,16
Mélange optimal MSG-20SD traité à 6% de chaux +12% de CSPD								
12,00	15,02	0,45	16,98	0,76	29,56	2,04	33,18	1,43
14,00	14,13	0,47	14,84	1,62	27,91	2,04	41,50	6,40
16,00	11,20	1,10	16,74	0,45	22,52	5,13	34,97	2,23

**Annexe E :Lieu d'extraction de la cendre de sous-produits
de palmiers dattiers**

