

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Ahmed Draïa - Adrar

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département De Génie Civil



THESE DE DOCTORAT LMD

Filière : Génie civil

Spécialité : Géo-matériaux

Présenté et soutenue publiquement par :

Mr : TAYEBI Abdallah

Le : 27/06/2026

Thème

**Valorisations des matériaux locaux des zones arides :
Tuf, Sable de dune et déchets en construction routière. Application à la région
d'Adrar**

Devant le jury composé de :

BENNACER Lyacine	Professeur, Université d'Adrar	Président
AKACEM Mustapha	MCA, Université d'Adrar	Directeur de thèse
MOULAY OMAR Hassan	MCA, Université d'Adrar	Co-Directeur de thèse
DJAFARI Driss	MCA, Université d'Adrar	Examineur
KEBAILI Nabil	MCA, Université de Ouargla	Examineur

Année Universitaire 2025 / 2026

Dédicaces

Je dédie cette thèse,

À mon père,

*pour ses conseils précieux, son soutien constant et les valeurs de
persévérance et d'intégrité qu'il m'a inculqué.*

À ma mère,

*pour son amour inestimable, sa patience infinie, ses prières
sincères et son encouragement permanent tout au long de mon
parcours.*

*À mon épouse et à mes enfants : Hadjer, Fatima, Hafsa,
Khaled, Mohammed Elaïde et Younes, sources de mon bonheur,
de ma motivation et de mon équilibre.*

*À mes chers frères et à ma sœur Zahra, pour leur affection, leur
soutien et leur présence bienveillante.*

*À tous mes amis, qui ont contribué, de près ou de loin, à la
réussite de ce travail par leur aide et leurs encouragements.*

Remerciements

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements, en premier lieu, à mon directeur de thèse, Monsieur AKACEM Mustapha, Maître de conférences A à l'Université d'Adrar, pour avoir accepté de diriger ce travail durant ces années de doctorat. Je lui exprime toute ma reconnaissance pour son accompagnement scientifique, sa disponibilité, sa rigueur méthodologique et ses conseils avisés, qui ont grandement contribué à l'aboutissement de cette thèse.

J'adresse également mes vifs remerciements à Monsieur MOULAY OMAR Hassan, Maître de conférences A à l'Université d'Adrar et co-directeur de cette thèse, pour son suivi attentif, son soutien constant, ses orientations pertinentes et la qualité de ses remarques scientifiques tout au long des différentes phases de cette recherche.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude aux membres du jury de soutenance pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer ce travail. Je remercie particulièrement Monsieur BENNACER Lyacine, Professeur à l'Université d'Adrar, pour avoir accepté de présider le jury. J'adresse également mes sincères remerciements à Monsieur DJAFARI Driss, Maître de conférences A à l'Université d'Adrar, et à Monsieur KEBAILI Nabil, Maître de conférences A à l'Université de Ouargla, pour avoir accepté d'examiner cette thèse et pour le temps qu'ils ont consacré à son évaluation. Je leur suis reconnaissant pour leurs observations, leurs remarques constructives et l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail. Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à l'Université d'Adrar, et plus particulièrement au Laboratoire LDDI, pour m'avoir accueilli et offert un cadre scientifique et institutionnel favorable à la réalisation de mon projet de doctorat.

Mes remerciements s'adressent aussi à l'ensemble des responsables et du personnel des laboratoires ayant contribué, directement ou indirectement, au bon déroulement de ce travail de recherche, notamment :

- Le laboratoire LTPS, unités de Ghardaïa et d'Adrar ;
- Le laboratoire LTPO, unités de Béchar et d'Adrar.

Enfin, j'adresse mes plus profonds remerciements à ma mère, à mon épouse pour son soutien indéfectible et ses encouragements constants, à mes enfants, à mon frère, à mes sœurs ainsi qu'à l'ensemble de ma famille pour leur patience, leur compréhension et leur appui moral tout au long de ces années de doctorat.

ملخص

في ظل التحديات البيئية المتزايدة المرتبطة بالاستغلال المكثف للموارد الطبيعية وتراكم مخلفات البناء والهدم، بات البحث عن حلول مستدامة في هندسة الطرق ضرورة ملحة، لا سيما في المناطق الصحراوية. في الجزائر، يُستخدم التوف على نطاق واسع في بناء الطرق الصحراوية نظرًا لتوافره وانخفاض تكلفته. مع ذلك، لا يزال استخدامه في حالته الطبيعية محدودًا بسبب حساسيته للماء وتدهور خصائصه الميكانيكية.

تهدف هذه الدراسة إلى تحسين الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للتيف المحلي من خلال الاستفادة من مخلفات البناء، وتحديدًا مخلفات الطوب الأحمر والطوب اللبن، لاستخدامها في طبقات الأساس والطبقات التحتية للأرصفة. تم تطبيق برنامج تجريبي معلمي، شمل اختبارات توزيع حجم الجسيمات، وحدود أتربيرغ، واختبار بروكتور المعدل، ومؤشر قدرة تحمل كاليفورنيا (CBR)، واختبار مقاومة الضغط البسيط، لتقييم تأثير نسب الاستبدال المختلفة على سلوك الخلطات.

تُظهر النتائج أن دمج مخلفات الطوب الأحمر أو الطوب اللبن في التيف يُحسن بشكل ملحوظ البنية الحبيبية، ويقلل من اللدونة، ويزيد من قابلية الدمك وقدرة تحمل الأحمال. تم الحصول على أفضل أداء عند استخدام نسب استبدال تتراوح بين 20% و30% لكلا نوعي الخلطات، مع زيادة في الكثافة الجافة القصوى وتحسن ملحوظ في قيم نسبة تحمل كاليفورنيا (CBR) ومقاومة الضغط غير المحصور.

تؤكد هذه النتائج أن إعادة تثمين التيف مع مخلفات الطوب يمثل حلاً واعدًا من الناحية التقنية والبيئية والاقتصادية، مناسباً لبناء البنية التحتية للطرق في المناطق الصحراوية، ومتوافقاً مع مبادئ التنمية المستدامة والاقتصاد الدائري.

الكلمات المفتاحية: التيف، مخلفات الطوب الأحمر، مخلفات الطوب الأدوبي، الطرق الصحراوية، المواد المحلية، التثمين، التنمية المستدامة.

Résumé

Face aux défis environnementaux croissants liés à l'exploitation intensive des ressources naturelles et à l'accumulation des déchets de construction et de démolition, la recherche de solutions durables en ingénierie routière est devenue une nécessité, en particulier dans les régions sahariennes. En Algérie, le tuf est largement utilisé dans la technique routière saharienne en raison de sa disponibilité et de son faible coût. Toutefois, son utilisation à l'état naturel reste limitée en raison de sa sensibilité à l'eau et de la dégradation de ses performances mécaniques.

La présente étude vise à améliorer les propriétés physiques et mécaniques du tuf local par la valorisation de déchets de construction, représentés par les déchets de briques rouges et les déchets de briques en adobe, en vue de leur utilisation dans les couches de fondation et de sous-fondation des chaussées. Un programme expérimental de laboratoire a été mis en œuvre, comprenant des essais granulométriques, les limites d'Atterberg, l'essai Proctor modifié, l'indice de portance CBR et l'essai de résistance à la compression simple, afin d'évaluer l'influence des différents taux de substitution sur le comportement des mélanges.

Les résultats montrent que l'incorporation des déchets de briques rouges ou en adobe dans le tuf améliore significativement la structure granulaire, réduit la plasticité et augmente l'aptitude au compactage ainsi que la capacité portante. Les meilleures performances ont été obtenues pour des taux de substitution compris entre **20 % et 30 %** pour les deux types de mélanges, avec une augmentation de la densité sèche maximale et une amélioration notable des valeurs du CBR et de la résistance à la compression simple.

Ces résultats confirment que la co-valorisation du tuf avec les déchets de briques constitue une solution technique, environnementale et économique prometteuse, adaptée à la construction des infrastructures routières en régions sahariennes et conforme aux principes du développement durable et de l'économie circulaire.

Mots clés : Déchets de briques d'adobe, Déchets de briques rouges, Développement durable, Matériaux locaux, Routes sahariennes, Tuf, Valorisation.

Abstract

Faced with growing environmental challenges linked to the intensive exploitation of natural resources and the accumulation of construction and demolition waste, the search for sustainable solutions in road engineering has become a necessity, particularly in Saharan regions. In Algeria, tuff is widely used in Saharan road construction due to its availability and low cost. However, its use in its natural state remains limited due to its sensitivity to water and the degradation of its mechanical performance.

This study aims to improve the physical and mechanical properties of local tuff by valorizing construction waste, specifically red brick and adobe brick waste, for use in the foundation and sub-foundation layers of pavements. An experimental laboratory program was implemented, including particle size distribution tests, Atterberg limits, the modified Proctor test, the CBR bearing capacity index, and the unconfined compressive strength test, to evaluate the influence of different substitution rates on the behavior of the mixtures.

The results show that incorporating red brick or adobe waste into tuff significantly improves the granular structure, reduces plasticity, and increases compactability and load-bearing capacity. The best performance was obtained with substitution rates between 20% and 30% for both types of mixtures, with an increase in maximum dry density and a notable improvement in CBR and unconfined compressive strength values.

These results confirm that the co-valorization of tuff with brick waste constitutes a promising technical, environmental, and economic solution, suitable for the construction of road infrastructure in Saharan regions and consistent with the principles of sustainable development and the circular economy.

Keywords: Adobe brick waste, Local materials, Red brick waste, Sustainable development, Saharan roads, Tuff, Valorization

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 01 : Valorisation Durable Des Matériaux En Zones Arides.....	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 Valorisation Des Matériaux Locaux En Zones Arides : Contexte, Enjeux Et Applications.....	6
1.2.1 Enjeux stratégiques de la valorisation en zones arides	6
1.2.2 Expériences internationales en matière de valorisation	6
1.2.2.1 Afrique du Nord.....	6
1.2.2.2 Sahel africain.....	6
1.2.2.3 Moyen-Orient.....	6
1.2.3 Valorisation des matériaux locaux en Algérie	7
1.2.3.1 Contexte national	7
1.2.3.2 Typologie des matériaux locaux exploités	7
1.2.3.3 Normes et spécifications techniques	7
1.2.3.4 Retombées économiques et environnementales.....	7
1.2.4 Valorisation des matériaux locaux dans un contexte hyperaride : Cas de la wilaya d’Adrar	8
1.2.4.1 Contexte géographique et climatique	8
1.2.4.2 Ressources géologiques locales	8
1.2.4.3 Utilisation dans les projets routiers	8
1.2.4.4 Valorisation dans la construction traditionnelle et moderne	8
1.2.4.5 Retombées socio-économiques	9
1.2.4.6 Limites et perspectives	9
1.2.4.7 Impacts économiques et environnementaux de la valorisation des matériaux locaux	9
a. Impact économique à l’échelle nationale	9
b. Impact économique à l’échelle locale (Cas d’Adrar)	10
c. Impact environnemental	10
d. Limites environnementales et mesures d’atténuation.....	10
1.2.5 Conclusion	11
1.3 Valorisation Des Déchets De BTP En Construction Routière.....	11
1.3.1 Introduction	30
1.3.2 Nature et classification des déchets de BTP	11
1.3.2.1 Déchets inertes	12

1.3.2.2 Déchets industriels non dangereux	12
1.3.2.3 Déchets dangereux	12
1.3.3 Valorisation des déchets non réutilisables du BTP dans le domaine de la construction routière.	12
1.3.4 Déchets en Algérie (Émergence d'une réelle politique environnementale) :	13
1.3.5 Sources De Déchets Utilisés En Génie Civil	13
1.3.5.1. Les déchets de construction et de démolition :	13
1.3.5.2. Les sous-produits de l'industrie.	14
1.3.6 La gestion des déchets :	15
1.3.6.1 La collecte des déchets :	15
1.3.6.2 Le tri des déchets :	15
1.3.6.3 Valorisation Des Déchets Inertes :	16
1.3.6.4 Réutilisation :	16
1.3.6.5 Recyclage :	16
1.3.6.6 Elimination Des Déchets Inertes :	16
1.3.6.7 L'enfouissement technique :	16
1.3.7 Elaboration Des Granulats Recyclés :	16
1.3.8 Matériaux De Chaussées :	17
1.3.9 Enjeux environnementaux et économiques.....	17
1.3.10 Filières de recyclage des déchets de BTP	17
1.3.11 Défis et limites du recyclage.....	18
1.3.12 Perspectives et recommandations	18
1.3.13 REVUE DE LITTERATURE :	18
1.4 Conclusion	22
Chapitre 2 : GÉNÉRALITÉS SUR LES TUFs ET SABLES DE DUNES.....	24
2.1 Introduction.....	24
2.2. LES TUFs.....	24
2.2.1 Rappels géologiques	24
2.2.3 Définitions des tufs	25
2.2.4 Formation et distribution des encroûtements calcaires	25
2.2.4.1 Répartition mondiale.....	25
2.2.4.2 Genèse des encroûtements calcaires	26
2.2.5 Classification et typologie :	28
2.2.6 Les Tufs en technique routière.....	30

2.2.6.1 Traitement des tufs :	30
2.2.6.2 Présentation des spécifications existantes	30
2.2.7 Caractéristiques géotechniques et mécaniques des tufs calcaires et gypso-calcaires	32
2.2.7.1 Granulométrie	33
2.2.7.2 Pollution des fines argileuses	33
2.2.7.3 Limites d'Atterberg	34
2.2.7.4 Équivalent de sable (ES)	34
2.2.7.5 Essai au bleu de méthylène	35
2.2.7.6 Essais de compactage et de portance	35
a Essai Proctor modifié	35
b Essai CBR (California Bearing Ratio)	36
c Essai de résistance à la compression simple	37
2.2.8 Conclusion	38
2.3 LES SABLES :	38
2.3.1 Définition	38
2.3.2 Origine des sables	39
2.3.3 Différents types de sable	40
2.3.3.1 Les sables provenant d'un processus de production : Sables artificiels	40
2.3.3.2 Les sables naturels	40
2.3.3.3 Sables du Sahara	41
2.3.4 Définition d'un sable de dunes :	42
2.3.5 Intérêt de sable de dune	42
2.3.5.1 Les aspects économiques	42
2.3.5.2 Les aspects techniques	42
2.3.6 Processus de formation des dunes	43
2.3.7 Localisation des dunes de sable	43
2.3.8 Les différentes formes d'accumulations sableuses	45
2.3.8.1. Les nebkas	45
2.3.8.2. Barkhanes	46
2.3.8.3. Dunes en forme de parabole	46
2.3.8.4. Dunes de forme longitudinale	47
2.3.8.5. Les dunes en forme de dôme	47
2.3.8.6. Pyramides ou étoiles dunes	48

2.3.9 Les différents milieux de la dune :	48
2.3.9.1 Les dunes mobiles :	49
2.3.9.2 Les dunes noires (arbres) :	49
2.3.9.3 La dune verte (également connue sous le nom d'avant-dune ou de dune embryonnaire)	49
2.3.9.4. La dune blanche ou jaune :	50
2.3.9.5. La dune grise :	51
2.3.9.6 La dune brune (aussi appelée dune boisée ou frange forestière).....	51
2.4 REVUE DE LITTERATURE :	52
2.5 Conclusion	61
Chapitre 3 : CARACTERISATION DES MATERIAUX	64
3.1-INTRODUCTION :	64
3.2-TUF CALCAIRE :	64
3.3 CARACTERISATION GEOTECHNIQUE :	65
3.3.1. ANALYSES CHIMIQUES SOMMAIRES :	65
3.3.2 ANALYSE GRANULOMETRIQUE.....	66
3.3.3 QUALITE DES FINES	68
3.3.3.1 LIMITES D'ATTERBERG	68
3.3.3.2 ESSAI AU BLEU DE METHYLENE :	69
3.3.3.3 EQUIVALENT DE SABLE (Es) [Nf P 18 – 598].....	70
3.3.4 LES ESSAI DE COMPACTAGE ET DE PORTANCE	71
3.3.4.1 ESSAI PROCTOR MODIFIE [NF P 94- 093].....	71
3.3.4.2 ESSAI CBR.....	72
3.3.5 RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE (RC).....	74
3.3.6 CLASSIFICATION DU MATERIAU	76
3.4 LES DECHETS	76
3.4.1 DECHETS DE BRIQUES ROUGE	77
3.4.1.1 Matériaux locaux.....	77
3.4.2 DECHETS DE BRIQUES D'ADOBE.....	79
3.4.2.4 ANALYSE GRANULOMETRIQUE.....	80
3.4.2.5 ESSAI PROCTOR MODIFIE	81
3.5 Conclusion :	82
Chapitre 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	85
4.1 Introduction.....	85

4.2 Déroulement de l'étude expérimentale	85
4.3 Mélange de tuf avec des déchets de briques rouges.....	87
4.3.1 Comportement au compactage.....	87
4.3.2 La Portance	89
4.3.3 Essai de compression simple.....	91
4.3.4 Conclusion Concernant Les Mélanges De Tuf Et DBR.....	94
4.4 La Mélange De Tuf Avec Déchet De Brique D'adobe	94
4.4.1 Comportement au compactage.....	95
4.4.1.1 Caractéristiques de compactage du tuf et de l'adobe.....	95
4.4.1.2 Comportement au compactage du mélange T-DBA	96
4.4.2 La Portance	97
4.4.3 Essai de compression simple.....	99
4.4.4 Conclusion Concernant Les Mélanges De Tuf Et DBR.....	102
4.5 Conclusion	102
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES.....	104
Références bibliographiques.....	109
Annexe I	114
Annexe II	119

Liste des figures

Chapitre 1 :		
Valorisation Durable Des Matériaux En Zones Arides		
Figure 1.1	Influence de la teneur en ciment sur les valeurs UCS	19
Figure 1.2	Influence de la teneur en fibres sur les valeurs UCS	19
Figure 1.3	Courbe granulométrique des deux matériaux utilisés	21
Figure 1.4	Courbe Proctor de l'adobe	21
Figure 1.5	Effet des résidus de sable sur la résistance à la compression	21
Chapitre 2 :		
Généralités Sur Les Tufs Et Sables De Dunes		
Figure 2.1	Répartition des encroûtements calcaires dans le monde	25
Figure 2.2	Schéma de formation des tufs calcaires	26
Figure 2.3	Encroûtement calcaire mûr	27
Figure 2.4	Exemple de courbes Proctor modifié et CBR	36
Figure 2.5	Épaisseur de l'accumulation de sable dans le Grand Erg Oriental	44
Figure 2.6	Répartition surfacique des édifices dunaires dans le Grand Erg Occidental	45
Figure 2.7	Budget sédimentaire du Grand Erg Occidental	45
Figure 2.8	Nebkha	46
Figure 2.9	Barkhane	46
Figure 2.10	Dune parabolique	47
Figure 2.11	Dunes longitudinales	47
Figure 2.12	Dune en dôme	48
Figure 2.13	Dune pyramide (étoile)	48

Figure 2.14	Dune noire	49
Figure 2.15	Dune verte	50
Figure 2.16	Dune blanche	50
Figure 2.17	Dune grise	51
Figure 2.18	D'une brune	52
Figure 2.19	Évolution de l'indice de portance des mélanges en fonction de la compacité	53
Figure 2.20	Influence du taux d'incorporation de sable sur l'indice de portance	53
Figure 2.21	Influence du degré de compactage sur la résistance à la compression	53
Figure 2.22	Influence du taux d'ajout de sable sur la résistance à la compression	53
Figure 2.23	Comportement hydromécanique du mélange 65T35DS sous cycles de séchage–humidification	54
Figure 2.24	Variation de l'indice de portance des mélanges (GT–DS)	56
Figure 2.25	Évolution de la résistance à la compression du MGT-20DS traité et non traité	56
Figure 2.26	Effet de l'incorporation de sable dunaire sur la capacité portante	57
Figure 2.27	Résistance à la compression du tuf traité au ciment	57
Figure 2.28	Résistance à la compression du mélange tuf + 20 % sable traité au ciment	57
Figure 2.29	Domaine des formulations validant $UCS \geq 2$ MPa	59
Figure 2.30	Courbes contrainte–déformation de la formulation optimale	59
Chapitre 3		
Caractérisation des matériaux		
Figure 3.1	Tuf calcaire d'Oued Zin	64
Figure 3.2	Localisation de la carrière de tuf d'Oued Zin	65

Figure 3.3	Diffraction gramme DRX du tuf étudié	66
Figure. 3.4	Courbes de distribution granulométrique du tuf	67
Figure. 3.5	Classification des matériaux en fonction de VBS	70
Figure. 3.6	Outils utilisés dans l'essai Proctor	71
Figure. 3.7	Courbe de Proctor du tuf Oued zin	72
Figure. 3.8	Appareil CBR	73
Figure. 3.9	Moule de compression simple	75
Figure. 3.10	Soumission des échantillons à une force de compression	75
Figure. 3.11	La teneur en eau des éprouvettes en fonction du temps	76
Figure. 3.12	Résistance à la compression simple en fonction du temps	76
Figure. 3.13	Déchets de brique	77
Figure. 3.14	Localisation de Sarl Timadnine Briquetterie	77
Figure. 3.15	Déchets de briques rouges broyés	78
Figure. 3.16	Diffraction des rayons X de déchets de briques rouge	79
Figure. 3.17	Échantillon de briques d'adobe	79
Figure. 3.18	Lieu de prélever l'échantillon de brique d'adobe	79
Figure. 3.19	Diffraction des rayons X de déchets de briques d'adobe	80
Figure. 3.20	Courbes de distribution granulométrique du l'Adobe	81
Figure. 3.21	Courbe de Proctor de l'adobe	82
Chapitre 4		
RESULTATS ET DISCUSSION		
Figure 4.1	Déroulement de l'étude expérimentale	86
Figure 4.2	Courbes Proctor des différents mélanges (T-BRW)	87

Figure 4.3	Variation de la Densité sèche en fonction du pourcentage de DBR	88
Figure 4.4	Variation de la teneur en eau optimale en fonction du pourcentage de DBR	88
Figure 4.5	Illustration de certaines phases de l'essai CBR	89
Figure 4.6	Évolution de la charge en fonction de la pénétration	90
Figure 4.7	Influence du taux d'incorporation des déchets de briques rouges sur l'indice CBR du tuf	90
Figure 4.8	Appareil d'essai de résistance à la compression non confinée (UCS) : cadre de charge et moules fendus	91
Figure 4.9	Étapes d'essai de résistance à la compression non confinée (UCS)	92
Figure 4.10	Effet de l'âge sur la résistance à la compression des mélanges	93
Figure 4.11	Effet des déchets de briques rouges sur la résistance à la compression simple des mélanges	93
Figure 4.12	Courbes de compactage du tuf (a) et des déchets de briques d'adobe (b)	96
Figure 4.13	Comportement au compactage de divers mélanges de tuf et d'adobe	96
Figure 4.14	Variation de la Densité sèche maximale des mélanges (T-ABW) en fonction de la teneur en déchets de briques d'adobe	97
Figure 4.15	Illustration de certaines phases de l'essai CBR	98
Figure 4.16	Évolution de la charge en fonction de la pénétration	98
Figure 4.17	Influence du taux d'incorporation des déchets de briques d'adobe sur l'indice CBR du tuf	99
Figure 4.18	La mise en charge et rupture des cylindres UCS	100
Figure 4.19	Effet de l'âge sur la résistance à la compression des mélanges	101
Figure 4.20	Effet des déchets de briques d'adobe sur la résistance à la compression simple des mélanges	101

Liste des tableaux

Chapitre 1 : Valorisation Durable Des Matériaux En Zones Arides		
Tableau 1.1	Comparaison des coûts estimatifs pour la construction routière avec matériaux locaux et importés	10
Tableau 1.2	Usage possible des granulats recyclés (tiré de planète TP, SD).	13
Chapitre 2 : Généralités Sur Les Tufs Et Sables De Dunes		
Tableau 2.1	Récapitule la chronologie des formations au Maghreb	28
Tableau 2.2	Classification des encroûtements calcaires en fonction de la teneur en CaCO ₃	29
Tableau 2.3	Comparaison des différentes spécifications d'utilisation des tufs	31
Tableau 2.4	Exemple de spécifications granulométriques des tufs calcaires	33
Tableau 2.5	Spécifications minimales d'ES pour la construction routière	34
Tableau 2.6	Plages de valeurs de l'essai Proctor modifié pour les tufs calcaires	36
Tableau 2.7	Résultats typiques de l'essai CBR pour des tufs calcaires	36
Tableau 2.8	Évolution de la résistance à la compression simple des tufs calcaires en fonction de la durée de conservation à l'air libre	37
Tableau 2.9	Caractéristiques géotechniques et mécaniques de quelques tufs d'encroûtements calcaires (Algérie et Tunisie)	37
Tableau 2.10	Données expérimentales pour les trois tests (T1, T2 et T3)	59
Tableau 2.11	Résumé d'une revue de la littérature portant sur certaines études antérieures	60

Chapitre 3 Caractérisation des matériaux		
Tableau 3.1	Résumé des résultats d'analyse chimique de tuf	66
Tableau 3.2	Paramètres géotechniques.	67
Tableau 3.3	Classification des sols en fonction de l'indice de plasticité	69
Tableau 3.4	Les Résultats de l'essai CBR immédiat du tuf	73
Tableau 3.5	Résumé des résultats d'analyse chimique de brique rouge	78
Tableau 3.6	Résumé des résultats d'analyse chimique de brique d'adobe	80
Chapitre 4 RESULTATS ET DISCUSSION		
Tableau 4.1	Différents mélanges préparés T-DBR	87
Tableau 4.2	Différents mélanges préparés T-DBA	95

Liste des notations et abréviations

Symbole	Signification
CBR	California Bearing Ratio (indice de portance)
γ_d	Masse volumique sèche
γ_{dOPM}	Masse volumique sèche maximale (Proctor modifié)
WOPM	Teneur en eau optimale (Proctor modifié)
I_p	Indice de plasticité
WL	Limite de liquidité
WP	Limite de plasticité
ES	Équivalent de sable
VB	Valeur au bleu de méthylène
UCS	Unconfined Compressive Strength
R_c	Résistance à la compression simple
$CaCO_3$	Carbonate de calcium
SO_4^{2-}	Sulfates
Cu	Coefficient d'uniformité
Cc	Coefficient de courbure
SD	Sable dunaire
T	Tuf
DBR	Déchets de briques rouges
DBA	Déchets de briques d'adobe

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Introduction générale

Dans un contexte mondial marqué par la raréfaction progressive des ressources naturelles, l'accumulation croissante des déchets de construction et de démolition, ainsi qu'une prise de conscience accrue des impacts environnementaux, la recherche de matériaux d'infrastructure durables est devenue une priorité majeure en ingénierie civile. La construction routière conventionnelle repose principalement sur l'utilisation de granulats naturels et de sols de carrière, dont l'extraction et la transformation entraînent une consommation énergétique élevée, des émissions importantes de gaz à effet de serre et des impacts environnementaux significatifs (Arulrajah et al., 2013). Par conséquent, l'intégration de ressources locales et de matériaux recyclés constitue aujourd'hui un axe de recherche essentiel pour répondre simultanément aux exigences techniques et environnementales (Arulrajah et al., 2013 ; Pereira & Vieira, 2022).

Les activités de construction et de démolition représentent l'une des principales sources de déchets solides, générant de grandes quantités de béton, de briques, d'enrobés et de déblais d'excavation (Lafayette et al., 2018 ; Silva et al., 2019). Historiquement, ces déchets étaient majoritairement stockés en décharge, contribuant à l'épuisement des ressources et à la dégradation de l'environnement. Toutefois, de nombreuses études ont démontré que les déchets de construction peuvent être valorisés dans la fabrication de matériaux de construction, notamment comme substituts partiels des granulats naturels ou des liants, tout en maintenant des performances mécaniques satisfaisantes (Arulrajah et al., 2014 ; Mohammadinia et al., 2015). Ces matériaux recyclés sont de plus en plus utilisés en géotechnique et en ingénierie routière, contribuant à la réalisation de couches de chaussée plus durables et respectueuses de l'environnement (Al-Obaydi et al., 2022).

De nombreux sous-produits et déchets recyclés, tels que les cendres volantes, les laitiers industriels, le verre concassé, les poussières de carrière et les déchets de briques, ont été étudiés comme matériaux alternatifs durables (Cabalar & Alosman, 2021 ; Gul & Mir, 2022 ; Zeybek et al., 2025). Ces matériaux peuvent améliorer le comportement au compactage, augmenter la capacité portante et réduire les phénomènes de gonflement des sols problématiques (Cabalar & Omar, 2023 ; Boutouba et al., 2019). Parmi ces déchets, la valorisation des résidus de briques a suscité un intérêt particulier en raison de leur disponibilité abondante et de leurs similitudes minéralogiques avec les granulats naturels, notamment dans les régions où les briques en terre sont largement utilisées (Derabla & Bourema, 2016 ; Subramanian et al., 2025).

Parallèlement, les matériaux géologiques locaux ont été largement étudiés comme ressources potentielles pour la construction routière dans les régions arides et semi-arides. En Algérie saharienne, les dépôts naturels de tuf couvrent de vastes superficies et sont exploités dans la construction routière depuis le milieu du XX^e siècle (Morsli et al., 2007). Le tuf, disponible sous formes calcaire, gypseuse ou mixte, présente une cohésion naturelle après compactage et séchage, phénomène souvent qualifié « auto-stabilisation » (Goual et al., 2012 ; Morsli, 2007). Cette

Introduction générale

particularité a permis la réalisation de milliers de kilomètres de routes économiques dans le cadre de la Technologie Routière Saharienne (TRS) (Fenzy, 1966).

Cependant, malgré ses avantages, le tuf brut présente des limitations importantes, notamment une faible résistance à l'eau. Sous conditions humides, ses performances mécaniques se dégradent rapidement, entraînant des fissurations et une perte de portance sous trafic (Goual et al., 2012 ; Morsli et al., 2007). Ainsi, l'utilisation du tuf non traité est déconseillée pour les chaussées à trafic élevé. Afin de pallier ces limitations, plusieurs solutions ont été proposées, telles que l'ajout de sable dunaire, l'incorporation de liants hydrauliques ou l'utilisation de sous-produits industriels (Akacem et al., 2020 ; Khellou et al., 2021). Bien que ces méthodes améliorent les performances mécaniques, elles peuvent engendrer des coûts élevés et des impacts environnementaux liés à la production des liants.

Parallèlement à la valorisation du tuf, les briques en adobe constituent une ressource abondante dans les régions sahariennes, mais génèrent également d'importants volumes de déchets à la suite de la démolition des constructions traditionnelles (Elias et al., 2016). Ces déchets sont généralement mis en décharge, bien qu'ils présentent un potentiel de valorisation élevé en raison de leur granulométrie fine et de leur composition riche en fractions limono-argileuses (Mei et al., 2023). Toutefois, les limitations mécaniques de l'adobe, notamment sa faible résistance et sa sensibilité à l'eau, restreignent son utilisation directe. Néanmoins, son association avec des matériaux plus résistants, tels que le tuf, offre une voie prometteuse de co-valorisation (Zaidi et al., 2022 ; Gandia et al., 2019).

Les recherches récentes portant sur la combinaison de matériaux locaux et de déchets de construction ont mis en évidence des résultats encourageants en matière d'amélioration des performances géotechniques et de réduction de l'impact environnemental des infrastructures routières (Moulay Omar et al., 2022 ; Pereira & Vieira, 2022). Toutefois, la co-valorisation directe du tuf avec différents types de déchets de briques, notamment les briques en adobe et les briques rouges issues de la démolition (DBR), demeure encore insuffisamment explorée dans le contexte de la construction routière. Cette lacune est particulièrement marquée en Algérie, où ces matériaux sont abondants et présentent des propriétés complémentaires. En effet, le tuf assure la structure granulaire et la résistance mécanique, tandis que les fines issues des briques en adobe ou des briques rouges contribuent à améliorer la compacité, la densité et la distribution granulométrique des mélanges (Cabalar et al., 2019).

Dans ce cadre, l'originalité des études repose sur une approche de double co-valorisation visant à répondre simultanément à deux problématiques majeures : l'épuisement progressif des ressources non renouvelables de tuf et l'impact environnemental lié à l'élimination des déchets de briques, qu'ils soient en adobe ou en briques rouges. Cette approche est particulièrement pertinente pour les régions arides et désertiques de l'Algérie, où le développement de technologies routières durables est devenu une nécessité urgente. Ainsi, les études évaluent les caractéristiques physiques et mécaniques des mélanges tuf-déchets de briques à travers un programme expérimental en

Introduction générale

laboratoire comprenant des essais de compactage Proctor modifié, de portance CBR (California Bearing Ratio) et de résistance à la compression simple. L'objectif principal est d'identifier des taux de substitution optimaux permettant d'améliorer les performances géotechniques des matériaux de chaussée tout en réduisant la dépendance au tuf naturel. Les résultats obtenus apportent des éléments scientifiques solides en faveur de l'intégration des déchets de briques, qu'ils soient en adobe ou en briques rouges, au tuf comme solution durable, économiquement viable et respectueuse de l'environnement pour la construction routière en zones désertiques.

Chapitre 1 :
Valorisation Durable Des Matériaux En Zones
Arides

Chapitre 01 : Valorisation Durable Des Matériaux En Zones Arides**1.1 Introduction**

Les zones arides et semi-arides, représentant près de 41% du territoire terrestre et hébergeant approximativement 38% des habitants mondiaux, sont marquées par un manque d'eau persistant, une végétation rare et des conditions météorologiques extrêmes. Ces contraintes naturelles posent d'importants défis à la conception et à la construction des infrastructures, particulièrement en ce qui concerne les routes et les bâtiments (Goudie, 2013). Dans ces régions caractérisées par des variations thermiques importantes et un environnement rigoureux, les initiatives d'aménagement doivent prendre en compte des solutions conformes aux particularités géotechniques et climatiques locales.

De plus, l'industrie du bâtiment et des travaux publics (BTP) est l'un des plus gros consommateurs de ressources naturelles au niveau mondial. Il est aussi à l'origine d'une production énorme de déchets solides, évaluée à des milliards de tonnes chaque année, provenant essentiellement des opérations de construction, démolition et rénovation (Akhtar & Sarmah, 2018). Traditionnellement, ces résidus comprenant principalement du béton, des briques, de la céramique, des métaux, du bois, du verre et des plastiques étaient destinés aux sites d'enfouissement, ce qui entraînait une occupation significative du terrain et des conséquences environnementales notables. Toutefois, face aux défis du développement durable et aux buts de diminution des gaz à effet de serre, le recyclage et la réutilisation des déchets de construction sont devenus une préoccupation majeure dans plusieurs pays (R. Silva et al., 2017).

Dans ce cadre, l'exploitation des matières locales se présente comme une option à la fois durable et intelligente, particulièrement adaptée aux zones arides. Elle implique l'utilisation efficace des ressources géologiques locales, comme les tufs calcaires, gypso-calcaires, sables siliceux ou graves naturelles, dans les zones de construction pour minimiser les frais de transport, les temps d'achèvement et l'impact environnemental des projets (Ben Dhia, 1983 ; Colombier, 1988). Cette méthode aide aussi à réduire la dépendance vis-à-vis des matières importées, dont la disponibilité est de plus en plus restreinte en raison de l'épuisement croissant des ressources naturelles et de l'augmentation des coûts énergétiques.

Les expériences réalisées aux quatre coins du monde, y compris en Afrique du Nord, au Sahel et au Moyen-Orient, ont prouvé que le recours à des matériaux locaux non seulement facilite l'adaptation aux conditions géotechniques et climatiques propres, mais contribue également à l'épanouissement socio-économique des régions concernées (Paute et al., 1994 ; Cissé et al., 2010 ; AlKarni & ElKholi, 2012). Dans le contexte algérien, où plus de quatre-vingts pourcents du territoire se trouvent en zone aride, cette perspective représente une dimension clé des stratégies d'aménagement, notamment dans les zones sahariennes (Goual, 2012). Les recherches effectuées par le CTPP et les laboratoires régionaux ont d'ailleurs démontré les qualités notables des matériaux sahariens, en particulier les tufs calcaires et les sables siliceux (Alloul, 1981 ; Boukezzi, 1997 ; Morsli, 2007).

Dans ce contexte, l'utilisation de matériaux locaux, combinée au recyclage des déchets de construction, semble être une stratégie indispensable pour faire face aux enjeux environnementaux, économiques et techniques liées aux infrastructures dans les zones arides. Même si l'emploi de ces matériaux n'est pas nouveau, il suscite aujourd'hui un nouvel engouement à cause de l'augmentation vertigineuse des coûts énergétiques, de la diminution des ressources naturelles et des stratégies axées sur la résilience face au changement climatique et le développement durable.

1.2 Valorisation Des Matériaux Locaux En Zones Arides : Contexte, Enjeux Et Applications

1.2.1 Enjeux stratégiques de la valorisation en zones arides

L'approche de valorisation repose sur trois piliers principaux :

- Disponibilité et accessibilité : Les matériaux locaux sont généralement présents en abondance à proximité des zones d'aménagement, ce qui réduit les délais et coûts d'approvisionnement (Alloul, 1981).
- Adaptabilité environnementale : Les matériaux issus de l'environnement local présentent souvent une meilleure compatibilité avec les conditions climatiques et pédologiques de la région (Morsli, 2007).
- Développement socio-économique : Leur exploitation favorise la création d'emplois locaux et renforce les compétences techniques au sein des communautés (Boukezzi, 1997).

La valorisation n'est toutefois pas exempte de défis : variabilité des propriétés géotechniques, sensibilité à l'eau de certains matériaux, et nécessité d'adapter les méthodes de mise en oeuvre pour garantir la durabilité (Goual, 2012).

1.2.2 Expériences internationales en matière de valorisation

1.2.2.1 Afrique du Nord

Dans les régions arides du Maroc et de la Tunisie, l'utilisation des tufs calcaires et des matériaux gypso-calcaires dans la construction routière est courante (Paute et al., 1994). Les techniques employées incluent la stabilisation à la chaux pour améliorer la résistance mécanique et réduire la plasticité, ainsi que l'utilisation de couches de protection contre l'humidité.

1.2.2.2 Sahel africain

Au Mali et au Niger, les graves latéritiques sont exploitées pour les couches de fondation, souvent associées à des stabilisations au ciment. L'enjeu majeur reste la durabilité en saison humide, ce qui impose des essais de portance et de résistance systématiques (Cissé et al., 2010).

1.2.2.3 Moyen-Orient

En Arabie Saoudite, où les conditions hyperarides prédominent, les projets routiers intègrent des matériaux sableux locaux stabilisés au bitume ou au ciment, optimisant ainsi leur résistance à l'érosion éolienne et à la déformation thermique (Aiban, 1994; AlKarni & ElKholi, 2012).

Ces expériences démontrent que la valorisation des matériaux locaux dans les zones arides repose sur une adaptation technique au contexte climatique et géologique spécifique de chaque région.

1.2.3 Valorisation des matériaux locaux en Algérie

1.2.3.1 Contexte national

L'Algérie, par sa superficie de 2,38 millions de km², est composée à plus de 80 % de zones arides et hyperarides, incluant le Sahara algérien qui constitue la plus grande étendue désertique d'Afrique du Nord (ONM, 2020). Ces régions se caractérisent par une rareté des ressources hydriques, des variations thermiques extrêmes et une faible densité de population. Dans ce contexte, l'acheminement de matériaux de construction depuis le Nord du pays représente un coût logistique et économique considérable.

Ainsi, la valorisation des matériaux locaux est devenue une priorité stratégique des politiques nationales d'aménagement. Depuis les années 1980, des organismes tels que le CTTTP (Centre Technique des Travaux Publics) et les laboratoires régionaux des ponts et chaussées ont multiplié les études sur les performances des matériaux sahariens, notamment les tufs calcaires, les gypso-calcaires et les sables siliceux (Alloul, 1981; Colombier, 1988; Goual, 2012).

1.2.3.2 Typologie des matériaux locaux exploités

Les principaux matériaux utilisés dans les zones arides algériennes sont :

- **Tufs calcaires et gypso-calcaires** : souvent utilisés pour les couches de fondation et de base des chaussées, grâce à leur disponibilité et à leur facilité d'extraction (Ben Dhia, 1983; Boukezzi, 1997).
- **Sables siliceux** : exploités pour la fabrication de mortiers et bétons légers, parfois stabilisés avec de la chaux ou du ciment.
- **Graves naturelles** : présentes dans certaines vallées sèches et utilisées après tri granulométrique. Les études montrent que la variabilité granulométrique et la sensibilité à l'eau sont deux paramètres critiques à prendre en compte avant utilisation (Morsli, 2007).

1.2.3.3 Normes et spécifications techniques

En Algérie, la caractérisation géotechnique des matériaux suit les normes internationales (NF, ASTM) avec quelques adaptations spécifiques aux conditions climatiques et à la nature des gisements (CTTP, 2001). Les spécifications incluent :

- Essais Proctor modifié pour déterminer la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale.
- Essais CBR (California Bearing Ratio) pour évaluer la portance avant et après immersion.
- Essais Los Angeles et Micro-Deval pour mesurer la résistance à l'usure et à l'abrasion.

1.2.3.4 Retombées économiques et environnementales

L'utilisation des matériaux locaux dans les projets routiers et de bâtiment au Sahara algérien permet :

- Réduction des coûts de transport de 30 à 60 % par rapport à l'importation de granulats du Nord.
- Baisse de l'empreinte carbone liée à la logistique.

- Création d'emplois locaux dans l'extraction, le traitement et la mise en œuvre des matériaux. (Goual, 2012), le recours aux matériaux locaux dans la wilaya d'Adrar a permis, sur certains projets routiers, d'économiser jusqu'à 40 % du budget initialement prévu.

1.2.4 Valorisation des matériaux locaux dans un contexte hyperaride : Cas de la wilaya d'Adrar

1.2.4.1 Contexte géographique et climatique

La wilaya d'Adrar, située à l'extrême sud-ouest de l'Algérie, couvre une superficie d'environ 427 000 km², ce qui en fait l'une des plus vastes subdivisions administratives du pays (ONM, 2020). Elle se caractérise par un climat hyperaride :

- Précipitations annuelles inférieures à 50 mm ;
- Températures estivales dépassant fréquemment 48 °C ;
- Fortes amplitudes thermiques journalières ;
- Vents de sable fréquents contribuant à l'érosion éolienne.

Ces conditions extrêmes imposent des contraintes sévères sur les infrastructures et nécessitent des solutions constructives adaptées utilisant des ressources disponibles localement et résistantes aux conditions climatiques.

1.2.4.2 Ressources géologiques locales

La région d'Adrar dispose d'une variété de matériaux exploitables pour la construction et les travaux publics :

1. Tufs calcaires et gypso-calcaires — Gisements présents dans plusieurs zones (Reggane, Aoulef, Timimoun). — Utilisés principalement en couches de fondation et sous-couches routières (Boukezzi, 1997; Goual, 2012).
2. Sables siliceux — Grande pureté chimique, utilisés dans la fabrication de blocs de béton et mortiers légers. — Nécessitent parfois une stabilisation à la chaux ou au ciment pour réduire la sensibilité à l'eau.
3. Argiles locales — Disponibles en quantités limitées, employées pour la fabrication de briques crues (adobes) dans la construction traditionnelle.

1.2.4.3 Utilisation dans les projets routiers

Les projets routiers dans la wilaya d'Adrar intègrent largement les matériaux locaux pour réduire les coûts et accélérer l'exécution des travaux :

- Tufs calcaires : employés dans la réalisation des assises et couches de base, après caractérisation par essais Proctor modifié et CBR.
- Sables stabilisés : utilisés dans les couches de roulement légères et pour la stabilisation de pistes rurales.
- Expérimentations : mise en œuvre de mélanges tuf-sable stabilisés à 3–5 % de ciment, offrant une meilleure résistance à la compression simple (jusqu'à 2,5 MPa après 28 jours) (Goual, 2012).

1.2.4.4 Valorisation dans la construction traditionnelle et moderne

Dans les zones rurales d'Adrar, les techniques traditionnelles de construction, telles que les ksour en briques d'adobe, utilisent exclusivement des matériaux locaux (terre, sable, fibres végétales).

Ces techniques, bien que simples, offrent une excellente isolation thermique et une faible empreinte environnementale (MESLI, 2017).

Dans les projets modernes, la combinaison des matériaux locaux avec des techniques contemporaines de stabilisation permet d'obtenir :

- Des blocs de béton à base de sable local ;
- Des panneaux composites intégrant des fibres de palmier dattier et du tuf broyé ;
- Des solutions de revêtement routier économique adaptées aux pistes sahariennes.

1.2.4.5 Retombées socio-économiques

La valorisation des matériaux locaux à Adrar présente plusieurs avantages :

- Réduction des coûts logistiques : économies estimées entre 35 % et 50 % sur le transport par rapport aux matériaux importés du Nord.
- Création d'emplois locaux dans l'extraction, le concassage, la stabilisation et la mise en œuvre.
- Renforcement des savoir-faire traditionnels et adaptation aux normes techniques modernes.

1.2.4.6 Limites et perspectives

Malgré les avantages, certaines contraintes freinent encore la généralisation de l'utilisation des matériaux locaux à Adrar :

- Variabilité importante des propriétés mécaniques selon la provenance du gisement.
- Sensibilité à l'eau de certains tufs et sables nécessitant des stabilisations coûteuses.
- Manque d'équipements locaux pour le traitement et la mise à niveau des matériaux.

Les perspectives incluent :

- L'implantation d'unités mobiles de traitement et stabilisation.
- La mise en place de normes locales adaptées aux matériaux sahariens.
- Le développement de partenariats entre laboratoires universitaires et entreprises locales pour optimiser les formulations et les procédés.

1.2.4.7 Impacts économiques et environnementaux de la valorisation des matériaux locaux

a. Impact économique à l'échelle nationale

L'utilisation des matériaux locaux dans les zones arides algériennes contribue à réduire considérablement les coûts des projets. Selon les données du CTPP (2001) et les études de Goual (2012) :

- Les coûts de transport peuvent représenter jusqu'à 60 % du budget total lorsqu'il s'agit d'importer des granulats depuis le Nord du pays.
- L'exploitation de gisements locaux réduit ces coûts de 30 à 50 % selon la distance et la disponibilité du matériau.
- Les économies générées permettent de réinvestir dans d'autres aspects des projets, comme l'amélioration des couches de roulement ou la mise en place de dispositifs de drainage adaptés.

Tableau 1.1 – Comparaison des coûts estimatifs pour la construction routière avec matériaux locaux et importés

Type de matériau	Source	Coût transport (DA/m ³)	Coût extraction + préparation (DA/m ³)	Coût total estimé (DA/m ³)
Tuf calcaire local	Adrar	300 – 500	800 – 1000	1100 – 1500
Granulat importé du Nord	Chlef/Oran	2000 – 3000	900 – 1100	2900 – 4100
Sable stabilisé local	Timimoun	200 – 400	700 – 900	900 – 1300

Source : Adapté d'après CTTTP (2001) et Goual (2012)

b. Impact économique à l'échelle locale (Cas d'Adrar)

À Adrar, l'exploitation des matériaux locaux génère :

- Des emplois directs dans l'extraction, le concassage, le transport et la mise en œuvre.
- Des emplois indirects liés à la maintenance des engins, au commerce de fournitures et aux services logistiques.
- Un soutien à l'économie circulaire par la réutilisation des déchets de taille et des surplus de production.

Selon une étude menée par la Direction des Travaux Publics d'Adrar (2019), le recours aux matériaux locaux dans les projets routiers a permis une économie budgétaire moyenne de 37 % sur 10 projets majeurs entre 2015 et 2019.

c. Impact environnemental

L'exploitation et l'utilisation des matériaux locaux présentent plusieurs bénéfices environnementaux :

- Réduction des émissions de CO₂ liées au transport :
Moins de transport longue distance = moins de carburant consommé.
Par exemple, remplacer un granulat importé du Nord par un tuf calcaire local permet d'éviter jusqu'à 0,15 tonne de CO₂ par m³ transporté sur 1500 km (ONM, 2020).
- Préservation des ressources non renouvelables :
En utilisant les gisements locaux de manière raisonnée, on évite l'épuisement prématuré des carrières du Nord.
- Réduction de l'empreinte écologique des chantiers :
Les matériaux locaux nécessitent souvent moins de transformation industrielle, réduisant ainsi la consommation énergétique globale (Ben Dhia, 1983).

d. Limites environnementales et mesures d'atténuation

Bien que l'utilisation des matériaux locaux soit globalement bénéfique, elle présente certains risques environnementaux :

- Dégradation paysagère liée à l'exploitation des carrières à ciel ouvert.
- Production de poussières pendant l'extraction et le concassage.

- Risque de surexploitation de certains gisements facilement accessibles.

Mesures proposées :

- Mise en place d'un plan de gestion environnementale pour chaque carrière.
- Reboisement ou réhabilitation progressive des zones exploitées.
- Limitation de l'extraction aux besoins réels des projets.

1.2.5 Conclusion

L'étude de la valorisation des matériaux locaux en zones arides met en évidence le potentiel considérable qu'offrent ces ressources pour le développement durable des infrastructures. Les expériences menées à l'échelle internationale et nationale démontrent que leur utilisation contribue significativement à la réduction des coûts de construction, à la diminution de l'empreinte carbone, et à la création d'emplois locaux (CTTP, 2001 ; Goual, 2012 ; ONM, 2020).

Cependant, malgré ces avantages, plusieurs contraintes subsistent : variabilité géotechnique des gisements, sensibilité à l'eau de certains matériaux et manque d'équipements adaptés pour leur traitement (Morsli, 2007). Ces limites soulignent la nécessité de renforcer la recherche appliquée, la normalisation, et la coopération entre institutions techniques et industrielles (UNESCO, 2015 ; ONU-Habitat, 2018).

En définitive, la valorisation des matériaux locaux ne se résume pas à une simple solution de substitution économique ; elle constitue une démarche intégrée visant à harmoniser développement, environnement et durabilité, tout en affirmant une véritable autonomie technique régionale adaptée aux réalités climatiques sahariennes (Colombier, 1988 ; Goudie, 2013).

1.3 Valorisation Des Déchets De BTP En Construction Routière

1.3.1 Définitions

Les déchets sont définis comme « les résidus, matériaux, substances ou débris résultant d'un processus de production, de fabrication, d'utilisation ou de consommation ». (Laquerre & Pilon, 1999).

Selon l'article 3 de la loi algérienne n° 01-19 du 12 décembre 2001, on définit « tous les résidus d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, ainsi que toute substance, produit ou bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, envisage de se défaire ou est tenu de se défaire ou de l'éliminer ».

L'emploi des résidus et sous-produits en ingénierie routière est déjà en cours dans divers pays, où ils sont principalement utilisés comme :

Matériaux de remblai ; Matériaux fondamentaux (schistes à charbon, laitier de haut fourneau) ; Granulats prévus pour la fabrication de bétons bitumineux (laitier de haut fourneau) ; Liants hydrauliques, qui sont un mélange de cendres volantes et de chaux ou ciment.

1.3.2 Nature et classification des déchets de BTP

Les déchets de BTP se distinguent par leur grande hétérogénéité. On peut les regrouper en plusieurs catégories (Vegas et al., 2011)

1.3.2.1 Déchets inertes

Ces déchets ne subissent aucune transformation physique, chimique ou biologique notable ; ils sont indécomposables, incombustibles et n'occasionnent aucune réaction physique ou chimique. Ils ne sont pas biodégradables et ne portent pas atteinte aux autres substances avec lesquelles ils sont en contact d'une façon qui pourrait engendrer une pollution environnementale ou nuire à la santé humaine. (Directive 1999/31/CE).

Ces déchets, provenant principalement des sites de construction et d'infrastructures ou des industries de production de matériaux de construction, sont autorisés à être stockés dans les installations de classe 3.

Les déchets suivants sont particulièrement concernés : les bétons, tuiles et céramiques, briques, débris de verre, terres et granulés non contaminés et non mixés, enrobés bitumineux... etc. (Hamzaoui et al., 2024).

1.3.2.2 Déchets industriels non dangereux

On considère un déchet comme banal s'il est traité par les mêmes méthodes que celles utilisées pour les déchets domestiques. Ces déchets ne sont pas inertes et non plus toxiques. Ils rassemblent tous les déchets non dangereux générés par les industries, les compagnies commerciales, artisanales, de services et administratives, ainsi que celles de la métallurgie, plasturgie, peinture, chimie et pétrochimie. Il s'agit des résidus d'emballage, des défauts de production non polluants (chute, rebut), des déchets de maintenance et des équipements obsolètes.

On les considère comme des déchets ménagers et ils subissent des processus similaires : recyclage, valorisation énergétique, entreposage. (Malladi et al., 2024).

1.3.2.3 Déchets dangereux

Ils peuvent causer des désagréments pour l'homme et la nature, et exhiber une ou plusieurs caractéristiques dangereuses (explosif, combustible inflammable, irritant, infectieux, mutagène, écotoxique...) ce qui nécessite de prendre certaines mesures spécifiques. Ils sont soumis à une surveillance administrative rigoureuse (production, stockage, transport, élimination).

1.3.3 Valorisation des déchets non réutilisables du BTP dans le domaine de la construction routière.

L'enrobé et le béton sont des composites constitués de matériaux minéraux tels que les graviers, gravillon, sable et bitume. Les déchets qui comprennent l'argile et la pierre se composent également de matériaux minéraux tels que la tuile, la céramique, le verre et le ballast de voie. Tous ces débris apparaissent sous forme de décombres lors des travaux de construction ou démolition sur les sites du BTP. Ces déchets inertes peuvent être collectés, broyés et employés comme granulats selon leur taille, pour servir de fondation routière, comme matériaux de remblai, pour

l'aménagement paysager ou pour diverses autres applications dans le secteur de la construction. (tableau 1.2.) (Hamzaoui et al., 2024).

Tableau 1.2 : Usage possible des granulats recyclés (tiré de planète TP, SD).

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 hydrauliques (parpaings, canalisation) - Béton prêt à l'emploi
40/70 à 60/120	- Ballast de voie
0/125	- Aménagements décoratifs

1.3.4 Déchets en Algérie (Émergence d'une réelle politique environnementale) :

L'Algérie vit actuellement un développement économique et démographique sans précédent. L'urbanisation rapide, généralement désordonnée, a été provoquée par l'importante croissance de la population, entraînant une multiplication des habitations précaires. Cela n'a pas été sans répercussions sur l'environnement. Face à l'ampleur des défis écologiques, le gouvernement algérien a opté en 2001 pour la mise à disposition d'un montant significatif, se chiffrant autour de 970 Md, dans le but d'atteindre les objectifs énoncés dans le Plan National d'Actions pour l'environnement et le Développement Durable (PNAE-DD), planifié jusqu'en 2010.

Des modifications sont en cours dans le secteur environnemental, notamment grâce à l'évolution du cadre législatif et institutionnel.

Le Plan National d'actions pour l'environnement et le Développement Durable (PNAEDD) définit les différents programmes environnementaux du pays pour la période de 2001 à 2010, en lien avec la politique environnementale.

Ces politiques bénéficient du soutien du Fonds National de l'environnement et de dépollution (FEDEP), qui aide particulièrement les entreprises industrielles à réduire ou éliminer leur pollution. Il participe aussi à l'établissement de structures pour la collecte, le traitement et le recyclage des déchets. En outre, un nouveau système fiscal écologique basé sur le principe du pollueur payeur a pour but d'inciter à des comportements plus soucieux de l'environnement.

1.3.5 Sources De Déchets Utilisés En Génie Civil

On trouve généralement deux grandes catégories de déchets issus de la production, souvent mobilisées dans le secteur du génie civil. Les résidus issus des chantiers et des opérations de démolition ainsi que les coproduits de l'industrie.

1.3.5.1. Les déchets de construction et de démolition :

On estime que les débris de construction et de démolition constituent près de 30 % du total des déchets (en tonnes par an) produits par la région. La majeure partie de ce gisement considérable de débris se génère pendant les travaux, tandis qu'une fraction réduite provient de matériaux neufs non employés. Le type de déchets générés diffère grandement selon la sorte de travaux ou de bâtiment. Ces déchets sont principalement de nature inerte. Il serait que 75 à 80 % des débris de construction et de démolition sont recyclés, principalement utilisés comme matériaux de remblai. (Loi n° 92-646 du 13 juillet 1992).

En Algérie, les résidus provenant des chantiers et des démolitions, souvent catégorisés comme déchets industriels, demeurent largement méconnus et leur volume est évalué à plusieurs millions de tonnes chaque année (Sperandio, 2001). D'après l'analyse menée par Bedjou, on évalue que les déchets générés par le secteur du bâtiment atteignent 2,2 millions de tonnes chaque année.

L'utilisation de ces matériaux, actuellement envisagée suite à leur dépollution et recyclage, a rapidement été jugée prioritaire, du fait qu'elle offre au moins trois bénéfices importants tels que les économies de :

- décharges (capacité de stockage des déchets inertes) ;
- extraction de granulats (ressources naturelles pour la construction) ;
- acheminement.

Dans le secteur des Travaux Publics, les matières sont principalement issues de la démolition d'immeubles résidentiels ou industriels, de structures en béton et de revêtements routiers. Les entreprises de Travaux Publics ne privilégient pas toujours les catégories susceptibles d'inclure des composants présentant un risque de causer des perturbations sur nos infrastructures (comme les plâtres pouvant provoquer des phénomènes de gonflement, par exemple). (Sperandio, 2001).

Le recyclage des débris de construction, qui requiert des équipements coûteux, se fait principalement dans l'objectif de les remplacer par des matériaux naturels pour la production de granulats ou de graves utilisables dans diverses techniques :

- de terrassement ;
- routières ;
- ferroviaires ;
- aéroportuaires ;
- de plateformes industrielles, etc.

On utilise donc le recyclage des matériaux issus de démolition pour compenser les manques de matériaux naturels, particulièrement lors de travaux à proximité ou dans les grandes métropoles. Par conséquent, les sites de production sont généralement situés près des grandes métropoles ou à proximité de centres industriels.

1.3.5.2. Les sous-produits de l'industrie.

L'industrie représente la principale source de co-produits et de déchets employés dans le secteur du génie civil. Des volumes colossaux de déchets s'accumulent en continu, entraînant une

occupation massive des terres et une diminution des espaces disponibles, sans oublier la pollution de notre environnement et ses répercussions inévitables.

Le génie civil se positionne comme un secteur clé pour la valorisation des déchets industriels, offrant des bénéfices pratiques et économiques immédiats, car de nombreux sous-produits et résidus peuvent faire office de substituts aux matières premières naturelles et à une vaste palette de matériaux de construction (Allal & Sayagh, 2001).

Dans le domaine du génie civil, on retrouve divers sous-produits et déchets employés :

❖ **Laitier de haut fourneau :**

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit issu de la transformation du minerai de fer en fonte primaire. Le laitier est alors lentement refroidi à l'air, donnant naissance à un matériau cristallin et compact désigné sous le nom de « laitier refroidi à l'air », tandis qu'un refroidissement rapide associé à des jets d'eau génère un matériau léger connu sous le terme de « laitier expansé ».

Le laitier refroidi à l'air est adapté en tant que granulats pour le béton. L'analyse comparative de la résistance à la compression du béton fabriqué à partir de granulats de laitier de haut fourneau par rapport à celui fabriqué avec du gravier et du calcaire concassé révèle que le béton à base de laitier est plus résistant (Ramachandran, 1981). On peut utiliser les fines de laitier en substitution au sable sans aucun inconvénient. La résistance aux sulfates, la stabilité volumique et la résistance à la corrosion par les solutions de chlorure font que le béton armé de laitier est adapté pour diverses utilisations. Le volume de laitier expansé fabriqué est nettement inférieur à celui du laitier refroidi à l'air. On utilise le laitier expansé pour produire du béton léger dont la densité apparente varie entre 800 et 950 kg/m³.

❖ **Laitier d'acier :**

Ce laitier est obtenu par l'élimination des impuretés présentes dans la fonte brute. Il est riche en phosphate ou en calcium et renferme du silicate bicalcique métastable ; c'est pourquoi il est exclusivement employé comme matériau de remblai pour les routes. Habituellement, ce produit laitier est entreposé en tas pendant une durée pouvant aller jusqu'à un an avant son utilisation.

1.3.6 La gestion des déchets :

Il s'agit de toutes les actions liées à la collecte, le tri, le transport, le stockage, la valorisation et l'élimination des déchets, y compris la supervision de ces processus. Sur la base de cette définition, on peut identifier diverses opérations dans le système de gestion des déchets en vigueur en Algérie :

1.3.6.1 La collecte des déchets :

Il s'agit de l'action de collecte et/ou de rassemblement des déchets pour les acheminer vers un endroit où ils seront traités.

1.3.6.2 Le tri des déchets :

Il s'agit du tri des déchets en fonction de leur type pour leur traitement, comme le papier, le plastique, etc.

1.3.6.3 Valorisation Des Déchets Inertes :

L'évaluation de la matière consiste à exploiter les déchets dans le but de les valoriser et de les réinsérer dans l'économie. Elle englobe la réutilisation, le réemploi, la régénération et le recyclage des matériaux. (Ramachandran, 1981).

1.3.6.4 Réutilisation :

Dans le cadre de démolition, les briques qui ont été récupérées peuvent être nettoyées et réemployées sur le même lieu de travail ou dans d'autres endroits. De plus, certaines briques anciennes possèdent une haute valeur architecturale et sont prisées pour les travaux de restauration historique. Dans le cadre de projets de construction, le béton pré-mélangé en surplus peut être employé pour créer des bordures de parkings, des jardinières ou encore pour l'aménagement paysager.

1.3.6.5 Recyclage :

Le recyclage est une méthode qui vise à réintégrer les déchets dans le processus de production, en substituant totalement ou partiellement une matière première naturelle. Il s'illustre par la nécessité d'un nouveau traitement que le matériau doit subir, ce qui le différencie de la réutilisation (Ramachandran, 1981).

On peut broyer la brique, le béton et le mortier pour les réutiliser en tant que granulats dans la couche de fondation routière, comme remplissage, pour l'aménagement paysager et pour d'autres usages dans le secteur de la construction.

1.3.6.6 Elimination Des Déchets Inertes :

Le dernier aspect d'un plan de gestion des déchets inertes porte sur leur élimination contrôlée, avec l'objectif que le produit final soit en principe un déchet ultime. Ce déchet peut provenir ou non du processus de traitement d'un autre déchet. Il ne peut plus être traité compte tenu des conditions techniques et économiques actuelles. Cela implique l'extraction de la partie pouvant être valorisée (Hueber, 2001).

1.3.6.7 L'enfouissement technique :

Les déchets spéciaux ultimes sont ceux qui ne peuvent plus être traités selon les conditions techniques et économiques actuelles, en particulier par la récupération des éléments valorisables ou par la réduction de leur dangerosité et de leur pollution. Les déchets acceptés dans un centre d'enfouissement technique (CET) sont principalement des déchets solides, minéraux, avec un potentiel polluant constitué de métaux lourds peu mobilisables. Ils présentent une réactivité très faible, une évolutivité très faible et une solubilité très limitée.

1.3.7 Elaboration Des Granulats Recyclés :

On peut convertir les déchets inertes en agrégats recyclés pour une utilisation en remblai de différents types, en couches de forme sur les sites de travaux publics ou encore comme granulats destinés au béton.

La création de granulats recyclés à partir de déchets de démolition et de construction implique de réduire les morceaux les plus volumineux à l'aide d'un brise-roches hydraulique, de couper les éléments longs avec une cisaille, puis de concasser les matériaux selon la taille de granulométrie

souhaitée. Cette dernière phase peut être précédée d'un criblage si nécessaire. En général, la production de granulats recyclés repose sur trois catégories d'installations :

Installation fixe : une installation avec un ou plusieurs concasseurs de grande capacité.

Installation semi-mobile : une installation transportable dotée de 1 ou 2 concasseurs de grande capacité.

Installation mobile : une petite installation transportable équipée d'un concasseur de faible capacité.

1.3.8 Matériaux De Chaussées :

On observe une augmentation du recyclage et de la réutilisation des matériaux de chaussée, à l'instar des déchets de construction et de démolition, ou encore pour la réalisation de divers remblais.

Il est également techniquement faisable de réutiliser une grande portion des enrobés (couches de roulement). Cependant, cette approche qui pourrait considérablement diminuer l'extraction de granulats de haute qualité (généralement siliceux), reste rare à cause du coût élevé des granulats recyclés ; elle est seulement envisageable pour des projets de grande envergure.

1.3.9 Enjeux environnementaux et économiques

Le recyclage des déchets de BTP présente plusieurs avantages :

- **Réduction de la consommation de ressources naturelles** : chaque tonne de granulats recyclés utilisée permet d'économiser une quantité équivalente de granulats naturels (Duan & Poon, 2014).
- **Diminution des impacts environnementaux** : le recyclage limite les dépôts en décharges et réduit les émissions de CO₂ liées à la production de matériaux neufs (Akhtar & Sarmah, 2018).
- **Avantages économiques** : la valorisation locale des déchets réduit les coûts liés au transport et à l'extraction des matières premières ((R. Silva et al., 2017).
- **Contribution à l'économie circulaire** : les déchets deviennent des ressources réutilisables, favorisant un cycle de vie plus durable dans la construction.

1.3.10 Filières de recyclage des déchets de BTP

Plusieurs filières de valorisation ont été mises en place dans différents pays :

- **Recyclage des bétons et briques** : concassage et transformation en granulats recyclés, utilisés comme remblais, couches de fondation ou comme substituts aux granulats naturels.
- **Valorisation des métaux** : recyclage quasi intégral de l'acier et de l'aluminium, matériaux ayant une forte valeur marchande.
- **Réutilisation du bois** : production de panneaux, biomasse énergétique, ou compostage.
- **Recyclage des plastiques et verres** : intégration dans de nouveaux matériaux de construction (isolants, pavés, blocs composites).

Selon Eurostat (2020), le taux moyen de valorisation des déchets de construction et de démolition atteint environ **70 % en Europe**, mais il reste très variable selon les pays.

1.3.11 Défis et limites du recyclage

Malgré ses avantages, le recyclage des déchets de BTP rencontre plusieurs obstacles :

- **Variabilité de la qualité des matériaux recyclés**, qui dépend de la nature et du traitement des déchets (Kou & Poon, 2012).
- **Coûts élevés du tri et du traitement**, surtout lorsque les filières industrielles ne sont pas développées.
- **Normes techniques parfois restrictives**, qui limite l'utilisation de matériaux recyclés dans certaines applications structurelles.
- **Manque de sensibilisation et de formation** des acteurs du BTP sur les pratiques de recyclage.

1.3.12 Perspectives et recommandations

Pour renforcer le recyclage des déchets de BTP, plusieurs actions sont nécessaires :

- Développer des **normes adaptées** favorisant l'intégration des matériaux recyclés dans le béton, les mortiers et les infrastructures routières.
- Mettre en place des infrastructures de tri et de traitement proches des zones urbaines.
- Encourager l'innovation technologique, notamment dans le recyclage avancé (géopolymères, bétons écologiques).
- Promouvoir des politiques publiques incitatives (subventions, fiscalité verte, quotas d'utilisation de matériaux recyclés).

1.3.13 REVUE DE LITTÉRATURE :

1) Déchets de construction et de démolition (DCD) utilisés dans des mélanges de sols renforcés pour des applications routières (Construction and demolition waste (CDW) used in reinforced soil mixtures for pavement applications) (Lukiantchuki et al., 2019)

Objectif de l'étude

Cette étude a pour objectif d'évaluer le potentiel de réutilisation des déchets de construction et de démolition (CDW) dans des mélanges sol-déchets destinés aux couches d'assise et de fondation des chaussées. L'accent est mis sur l'amélioration des propriétés mécaniques à travers l'ajout de faibles teneurs en ciment et en fibres de polypropylène, tout en réduisant la consommation de sols naturels.

Matériaux et méthodologie

Les matériaux utilisés comprennent un sol naturel sableux argileux (SC selon l'USCS) et des déchets de construction composés principalement de béton, de mortier cimentaire et de sols recyclés. Les CDW ont été concassés et tamisés avant incorporation.

Les mélanges étudiés portent sur des proportions 50/50 et 75/25 (sol/CDW), avec des ajouts de ciment (3,5 % et 7,0 %) et de fibres de polypropylène (0,25 % et 0,50 %).

Le programme expérimental comprend :

- La caractérisation granulométrique et les essais de compactage Proctor standard,
- Des essais de résistance à la compression simple (UCS),
- Des essais de traction indirecte (TS),
- Des essais triaxiaux cycliques pour la détermination du module de résilience (MR).

Les distributions granulométriques et les courbes de compactage, tandis que l'influence du ciment et des fibres sur l'UCS est illustrée par les Figures 1.4 et 1.5.

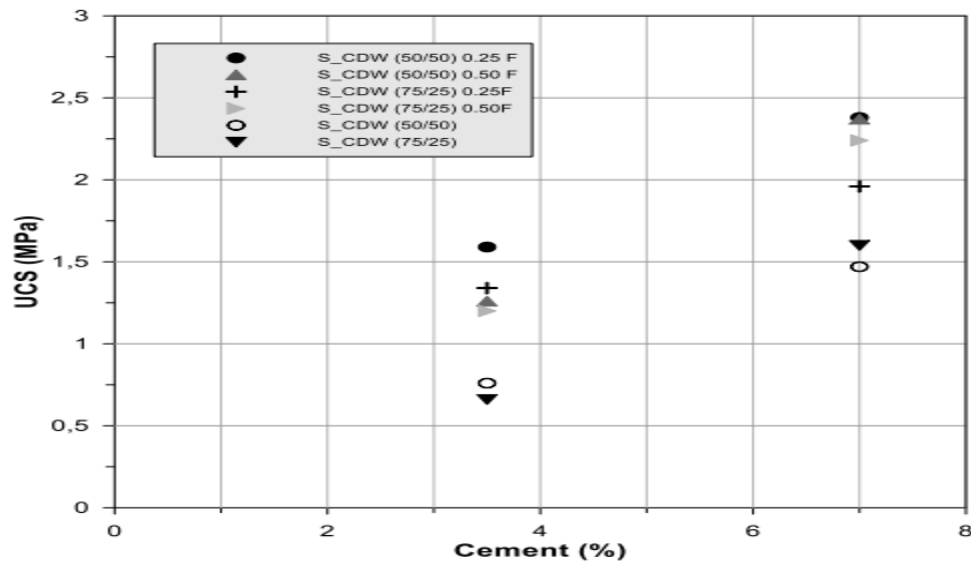


Figure 1.1 Influence de la teneur en ciment sur les valeurs UCS. (Lukiantchuki et al., 2019)

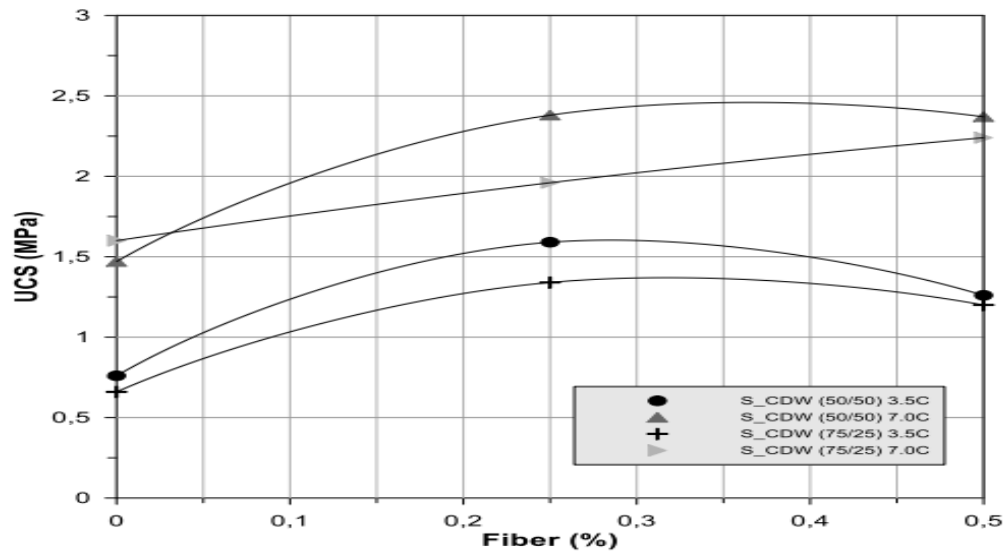


Figure 1.2 Influence de la teneur en fibres sur les valeurs UCS. (Lukiantchuki et al., 2019)

Résultats principaux

- Les mélanges contenant 50 % de CDW présentent les meilleures performances mécaniques en compression simple.
- L'augmentation de la teneur en ciment entraîne une hausse significative de l'UCS pour toutes les compositions.
- L'ajout de fibres améliore la résistance pour une teneur optimale de 0,25 %, tandis qu'un dosage plus élevé (0,50 %) peut entraîner une diminution des performances.
- Le module de résilience augmente avec la contrainte de confinement, mais l'effet des fibres sur le MR reste limité.
- Les résultats montrent qu'il est possible de réduire jusqu'à 50 % l'utilisation du sol naturel sans compromettre les performances mécaniques requises pour les chaussées.

Apport scientifique

Cette étude démontre la faisabilité technique de l'utilisation des CDW dans les couches de chaussée, en mettant en évidence des formulations optimales combinant sol, déchets, ciment et fibres. Elle apporte une contribution importante à la valorisation des déchets de construction en géotechnique routière et fournit des références expérimentales pour la conception de matériaux de chaussée plus durables.

2) Co-valorisation des résidus de sable et de tuf dans la construction routière (Co-valorization of Tuff and Sandy Residues in Roads Construction) (Moulay Omar et al., 2022)

Objectif de l'étude

Cette recherche vise à évaluer la co-valorisation du tuf calcaire et des résidus sableux issus des stations de concassage pour la conception de matériaux routiers adaptés aux régions arides algériennes. L'objectif principal est d'identifier une formulation optimale satisfaisant les exigences mécaniques des couches de fondation et de base, sans recours à des liants hydrauliques.

Matériaux et méthodologie

Les matériaux étudiés sont un tuf calcaire local extrait dans la région d'Adrar et des résidus sableux (< 3 mm) provenant d'installations de concassage. Des mélanges ont été élaborés avec des taux de substitution du tuf par les résidus sableux variant de 0 % à 50 %.

Le programme expérimental comprend :

- La caractérisation physique et granulométrique selon les fuseaux sahariens (Figures 1.6),
- Les essais Proctor modifié pour déterminer la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale,
- Des essais de résistance à la compression simple (UCS) à différents âges de séchage (Figure 1.7),
- Des essais CBR immédiats pour l'évaluation de la portance (Figure 1.8).

Les résultats sont comparés aux recommandations de la Technique Routière Saharienne (TRS) et du CTPP.

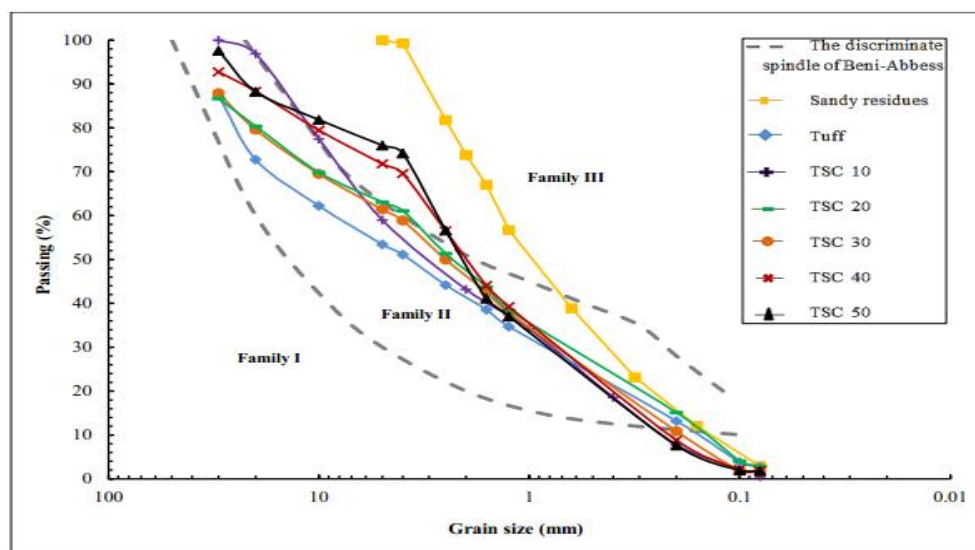


Figure 1.3 Courbe granulométrique des deux matériaux utilisés selon fuseau de Beni-Abbes (Omar et al., 2022)

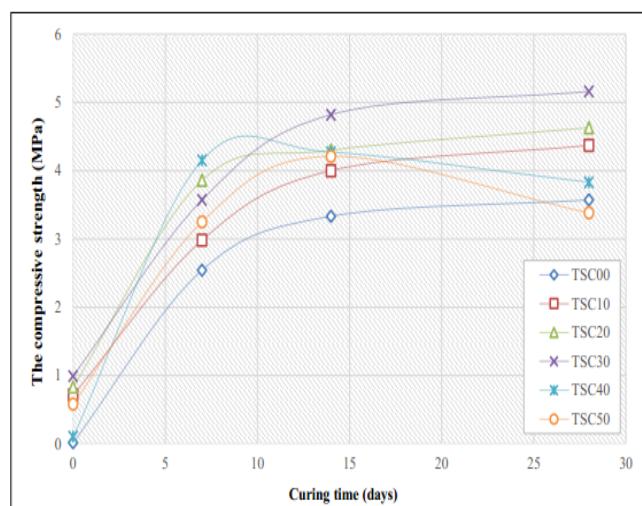


Figure 1. 4 Effet du temps de cure sur la résistance à la compression des mélanges
Résultats principaux

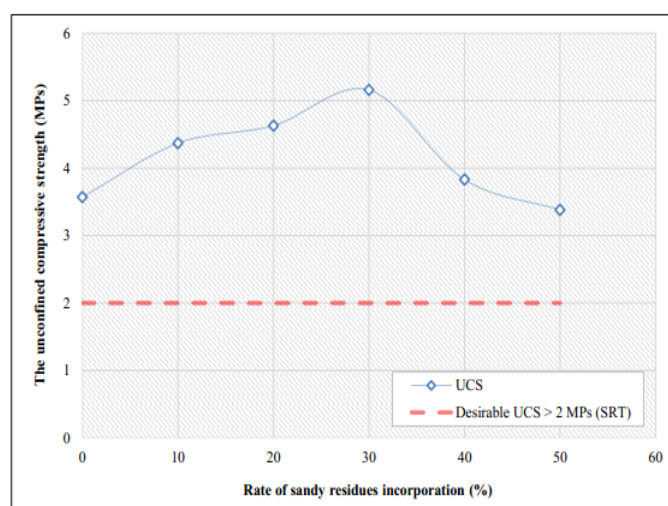


Figure 1. 5 Effet des résidus de sable sur la résistance à la compression simple des mélange

- L'ajout de résidus sableux améliore la compacité du tuf jusqu'à un taux optimal d'environ 30 %, correspondant à une densité sèche maximale élevée.
- La résistance à la compression simple augmente rapidement au jeune âge en raison du séchage, atteignant une valeur maximale de 5,16 MPa pour le mélange 70 % tuf – 30 % résidus sableux.
- Le CBR reste supérieur au seuil requis par la TRS pour des taux de substitution inférieurs ou égaux à 30 %, puis diminue au-delà.
- L'amélioration des performances est attribuée au remplissage des vides entre les grains de tuf par les fines sableuses, augmentant le nombre de contacts intergranulaires.

Apport scientifique

Cette étude met en évidence une solution de co-valorisation efficace de matériaux locaux abondants dans les régions sahariennes. Elle démontre qu'un mélange optimisé 70–80 % tuf / 20–30 % sable permet d'obtenir des performances mécaniques compatibles avec les exigences routières, tout en réduisant les coûts, l'impact environnemental et la dépendance aux matériaux normalisés.

1.4 Conclusion

L'analyse de la valorisation des matériaux locaux dans les régions désertiques révèle le potentiel immense que ces ressources présentent pour le progrès durable des infrastructures. Les études réalisées sur le plan mondial et national prouvent que leur utilisation participe fortement à la baisse des frais de construction, à la réduction de l'empreinte de carbone et à l'établissement d'emplois sur place. (CTTP, 2001 ; Goual, 2012 ; ONM, 2020).

Parallèlement, le recyclage des déchets issus du secteur du bâtiment et des travaux publics s'impose comme une nécessité pour concilier l'expansion de l'industrie de la construction avec la préservation de l'environnement. Cette approche permet de limiter l'exploitation des ressources naturelles, de réduire les effets écologiques et de promouvoir une économie circulaire durable. Cependant, malgré ces avantages, plusieurs contraintes continuent, notamment la variabilité géotechnique des gisements, la sensibilité à l'eau de certains matériaux, ainsi que le manque d'équipements adaptés pour leur traitement (Morsli, 2007). À cela s'ajoute la nécessité de mettre en place un cadre réglementaire approprié, de renforcer les capacités techniques et de sensibiliser les différents acteurs de la filière afin de favoriser une adoption à large échelle de ces solutions. Ces défis soulignent l'importance de consolider la recherche appliquée, la normalisation et la coopération entre les institutions techniques et industrielles (UNESCO, 2015 ; ONU-Habitat, 2018).

En définitive, la valorisation des matériaux locaux, associée au recyclage des déchets de BTP, constitue une solution prometteuse pour répondre aux défis économiques et environnementaux des régions sahariennes. Cette approche permet de préserver les ressources naturelles tout en améliorant la durabilité des infrastructures routières. Toutefois, son développement nécessite un renforcement de la recherche, de la normalisation et de la collaboration entre les différents acteurs. Son adoption à grande échelle contribuera à une construction plus durable et mieux adaptée aux spécificités des zones arides.

Chapitre 2 :
GÉNÉRALITÉS SUR LES TUFS ET SABLES DE
DUNES

Chapitre 2 : GÉNÉRALITÉS SUR LES TUFES ET SABLES DE DUNES**2.1 Introduction**

Dans les régions arides et sahariennes, la disponibilité limitée des matériaux granulaires traditionnels pour la construction routière a conduit à une recherche accrue de ressources locales abondantes et économiques. Parmi celles-ci, le tuf et les sables éoliens occupent une place de choix.

Le tuf, formation superficielle encroûtée résultant de la précipitation de carbonate de calcium, se distingue par sa légèreté, sa facilité d'extraction et ses qualités mécaniques lorsqu'il est bien compacté (Boukezzi, 1997; Horta, 1979). Les sables éoliens, quant à eux, couvrent de vastes étendues du Sahara et se caractérisent par une granulométrie fine, une propreté élevée et une très faible plasticité (CTTP, 2003).

Cependant, utilisés séparément, ces deux matériaux présentent des limites : le tuf peut être friable et sensible à l'eau, tandis que le sable éolien manque de cohésion. Leur association contrôlée permet de combiner leurs avantages respectifs : le tuf apporte la cohésion et la résistance, et le sable améliore la compacité et réduit la plasticité (Cherrak et al., 2015; Paute et al., 1994).

Ce chapitre présente les aspects géologiques, physiques et géotechniques de ces matériaux ainsi que les résultats des études menées sur leur co-valorisation dans le domaine routier saharien, dans la perspective d'un usage durable et économique adapté aux conditions climatiques extrêmes.

2.2. LES TUFES**2.2.1 Rappels géologiques**

Les tufs calcaires représentent une ressource en matériaux particulièrement intéressante et économique dans de nombreux pays à climat aride ou semi-aride au relief plat, notamment en Algérie, Tunisie, Colombie, Argentine, etc. (Alloul, 1981; Goudie, 2013). Les premières études portant sur les encroûtements remontent à plus d'un siècle et conjuguent des approches pédologiques, géologiques et géotechniques selon la spécialité des auteurs (Alloul, 1981; Renou, 1848). Renou (1848) décrit la « croûte » calcaire comme un enduit recouvrant tous les terrains, difficile à expliquer géologiquement. Les premières descriptions des croûtes calcaires, reprises et détaillées par Alloul (1981), évoquent une couverture blanche continue caractéristique des zones arides d'Algérie.

Moret (1962) distingue les tufs volcaniques (projections stratifiées par l'eau) et les tufs sédimentaires (incrustations issues de sources calcaires)(Moret, 1962), tandis que le Dictionnaire Hachette (1997) les décrit comme une « roche poreuse, souvent pulvérulente d'origine sédimentaire ou éruptive »(Travers, 1997).

En Afrique du Nord, l'appellation « tuf » désigne en fait des encroûtements calcaires, gypseux ou mixtes – sous l'influence des mots « taffeza » (arabe) ou « tifikert » (berbère), signifiant croûte ou tartre (Horta, 1979).

2.2.3 Définitions des tufs

Dans la littérature, les tufs/encroûtements sont des formations superficielles, tendres, friables, poreuses, légères et de teinte claire, généralement d'âge Quaternaire et issues de processus de dissolution-précipitation (Ben Dhia, 1983; Hamrouni, 1975; Horta, 1979).

On distingue essentiellement :

Tufs calcaires : abondants en climat sec. Goudie (2013) les définit comme des matériaux terrestres composés essentiellement de carbonates de calcium (CaCO_3), existant sous formes poudreuses, nodulaires ou très indurées, résultant de cimentation, accumulation ou remplacement de sols par du calcaire (Alloul, 1981; Hamrouni, 1975; Horta, 1979).

Tufs gypseux : analogues, mais à base de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), fréquents dans les régions très arides. Leur dureté est faible.

Tufs mixtes : tufs calcaires gypsifiés ou gypseux calcifiés, variables selon la prédominance carbonatée ou sulfatée (De Os Horta, 1980). Leur usage est déconseillé en zone subhumide (Guettouche et al., 2006).

2.2.4 Formation et distribution des encroûtements calcaires

2.2.4.1 Répartition mondiale

Les encroûtements calcaires sont présents dans les régions plates à climat aride/semi-aride : Méditerranée espagnole, grandes plaines d'Amérique du Nord/Sud, Afrique du Nord (Hamadas, plateaux algériens, plaine de Djefara, dépressions du Kenya, Namibie...), Moyen-Orient, Inde, Australie (Colombier, 1988). En Algérie, ils couvrent $\sim 300\,000\text{ km}^2$ (Durand, 1959).

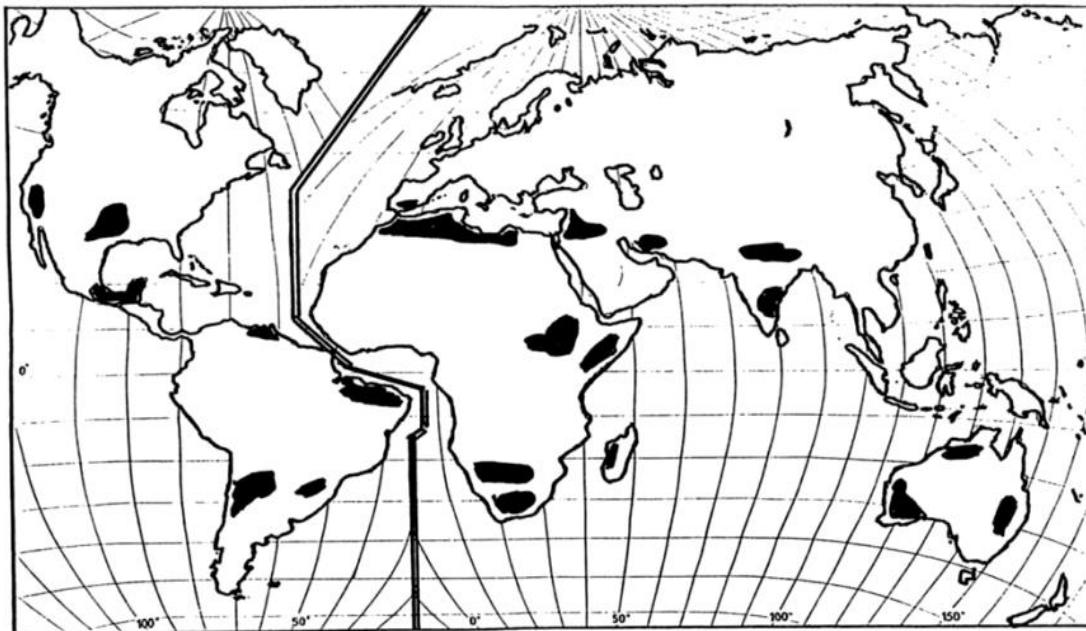


Figure 2.1 Répartition des encroûtements calcaires dans le monde (Colombier, 1988).

2.2.4.2 Genèse des encroûtements calcaires

Trois hypothèses expliquent leur origine :

- Ascensum : remontée capillaire et évaporation en surface.
 - Descensum : lessivage et accumulation à la base de l'horizon lavé.
 - Sédimentaire : dépôts par ruissellement laminaire (Mathieu et al., 1976 ; Alloul, 1981).
- C'est l'hypothèse sédimentaire qui fait aujourd'hui consensus (Colombier, 1988), avec transport de CaCO_3 dissous lors de précipitations, sa solubilisation étant favorisée par le CO_2 et basse température (Ben-Dhia, 1983).

Réactions chimiques principales :

- $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$ (acide carbonique)
- $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ (dissolution)
- $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ (précipitation)

Le dépôt s'effectue par infiltration et évaporation, favorisées par la succion capillaire liée à l'évaporation/végétation (Netterberg, 1978).

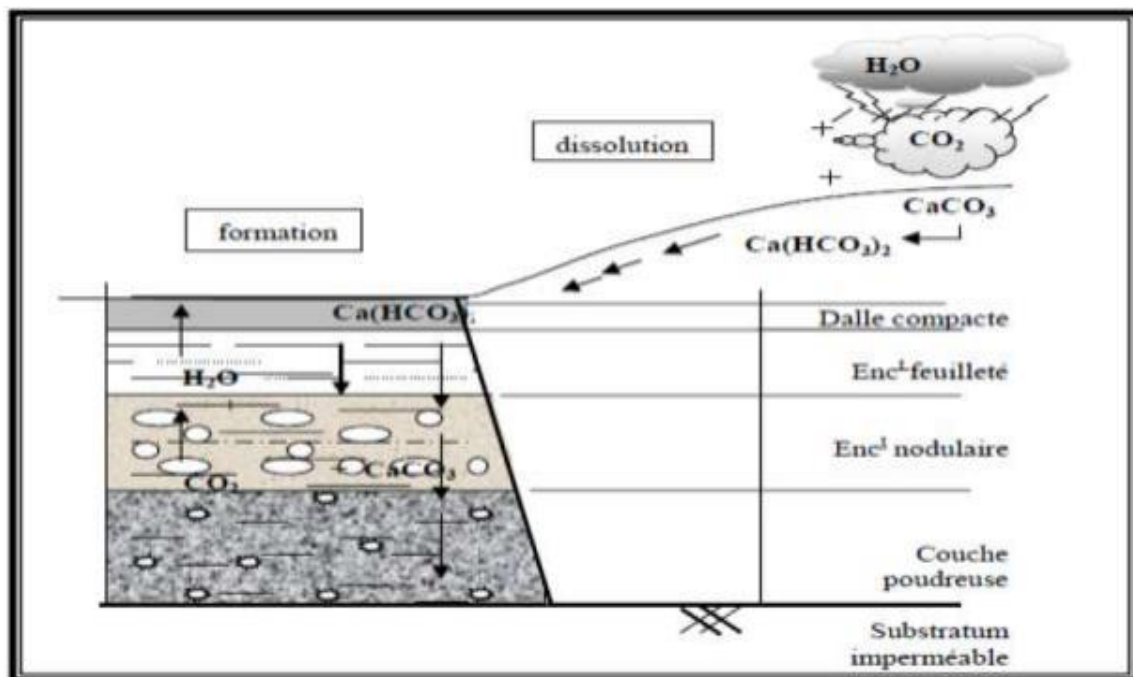


Figure 2.2 Schéma de la formation des tufs calcaires (Colombier, 1988).

En ce qui concerne les stades de développement, le calcaire se dépose d'abord de manière intermittente, sous forme de blocs friables et de nodules compacts. Avec le temps, la concentration en carbonates augmente progressivement, devenant continue et masquant la couleur initiale du sol. À ce stade, des phénomènes pédologiques transforment les horizons du sol jusqu'à l'apparition d'un encroûtement mûr.

La différenciation des horizons se fait ainsi :

- Horizon A : Terre végétale sombre, d'épaisseur variable, parfois absente en cas d'érosion.
- Horizon B (horizon d'accumulation) : Riche en calcaire (40 à 90 %), de couleur blanchâtre, constitué d'une dalle compacte, d'une croûte feuilletée et d'une zone nodulaire. Cet horizon est utilisé en tant que matériau routier.
- Horizon C : Matériau d'origine faiblement enrichi en calcaire, contenant quelques nodules.

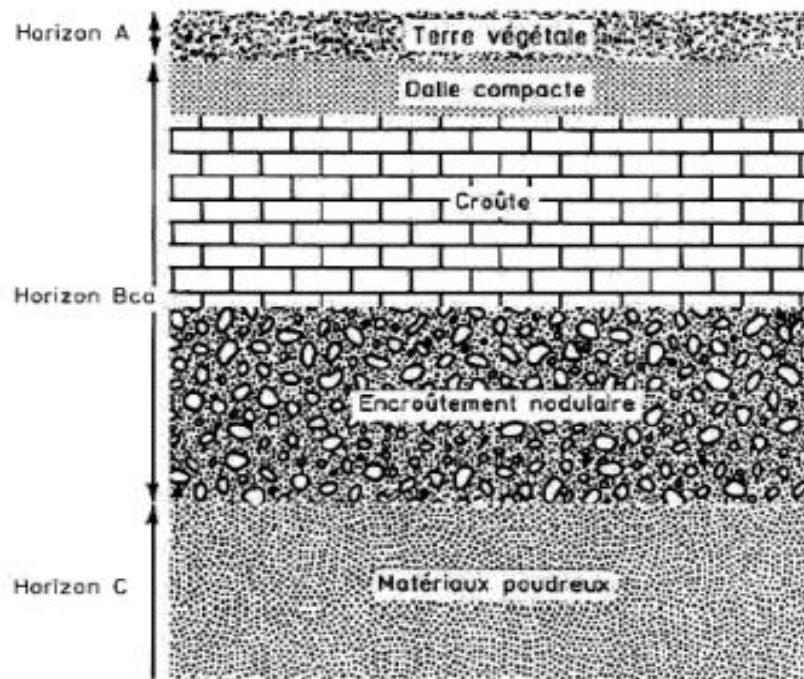


Figure 2.3 Encroûtement mûr (Colombier, 1988)

Les encroûtements peuvent avoir des âges très variés : les plus jeunes datent de 15 à 20 000 ans, tandis que les encroûtements mûrs atteignent plusieurs centaines de milliers d'années (principalement du Quaternaire, de l'âge Villafranchien à l'actuel). En Algérie, ils sont particulièrement développés et épais dans les zones semi-arides, surtout ceux d'âge moulouyen à salétien, périodes marquées par l'alternance de phases humides et sèches.

Tableau 2.1 récapitule la chronologie des formations au Maghreb (Alloul, 1981).

			Niveaux eustatiques	Étages continentaux (pluviaux)	Encroûtements
00	Holocène	Actuel Récent	Mellahien supérieur	Gharbien	Accumulations diffusées
20.0000	Holocène	Actuel Récent	Mellahien inférieur	Soltanien	Accumulations discontinues
100.000	Pléistocène	Supérieur	Ouljien Monastirien	Tensifien	Carapaces fréquentes
			Anflatien	Amirien	Carapaces rares
	Pléistocène	Moyen	Maarifien	Salétien	Carapaces assez développées
2.000000 3.000000	Pléistocène	Ancien		Moulouyen – Villafranchien	Carapaces épaisses avec dalle

2.2.5 Classification et typologie :

Les accumulations calcaires dans les sols peuvent se présenter sous trois formes

1. Principales, en fonction des conditions du milieu :
 - Distributions diffuses
 - Faible teneur en calcite, invisible à l'œil nu.
2. Concentrations discontinues
 - Teneur en calcaire plus élevée (40–60 %).
 - Forme de nodules durs (1 à quelques cm³) ou d'amas friables facilement écrasables.
3. Concentrations continues
 - Teneur en CaCO₃ > 60 %.
 - Formation des encroûtements calcaires (croûtes, dalles, pellicules rubanées).

- Deux types : encroûtements non feuilletés et encroûtements feuilletés, exploités comme granulats routiers.

Selon Ruellan et De Os Horta, dans un profil de sol la répartition va du bas vers le haut des formes diffuses aux formes continues, avec un passage progressif, phénomène également observable en surface.

En Algérie, malgré de nombreuses études, la distribution précise des carbonates dans le profil reste encore mal connue.

Avec la formation de l'encroûtement, la perméabilité diminue ; la cristallisation se concentre en surface, favorisée par les alternances de sécheresse et d'humidité qui provoque le feuilletage des croûtes et le durcissement des dalles compactes.

La classification proposée par Ruellan (1970) est proche de celle de Netterberg, observée également en Afrique du Sud, Australie et Amérique du Nord, ce qui lui confère une portée quasi universelle (Netterberg, 1978; Ruellan, 1970).

Tableau 2.2 – Classification des encroûtements calcaires en fonction de la teneur en CaCO_3 (Ruellan, 1970).

Catégorie	Dénomination	Description	Teneur en CaCO_3	Épaisseur	Rapports mutuels
Encroûtements non feuilletés	Encroûtements massifs	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.
Encroûtements non feuilletés	Encroûtements nodulaires	Structure nodulaire et 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.
Encroûtements feuilletés	Croûtes	Feuillets superposés et discontinus d'encroûtement massif ou nodulaire d'épaisseur millimétrique à centimétrique croissant du bas en haut	> 70 %	Quelques centimètres à > 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 les remplacer entièrement. Des pellicules rubanées sont souvent associées à la dalle compacte et tapissent surface et fissures.

Suite du tableau 2.2

Encroûtements feuilletés	Dalles compactes	Feuillets de croûte pétrifiés, épaisseur de quelques centimètres à plusieurs décimètres	> 70 %	Quelques centimètres à plusieurs dm	Associées au sommet des croûtes ; peuvent les remplacer entièrement ; pellicules rubanées fréquentes tapissant la surface supérieure et les fissures.
--------------------------	------------------	---	--------	-------------------------------------	---

2.2.6 Les Tufs en technique routière

Les tufs d'encroûtements calcaires représentent une ressource précieuse, économique et adaptée pour la construction routière dans les régions arides et semi-arides. Malgré des caractéristiques géotechniques parfois modestes (comparées aux normes des pays tempérés), ils se comportent très bien lorsqu'ils sont utilisés comme assises de chaussée.

En Algérie, depuis plus de 50 ans, ces matériaux ont permis de construire des milliers de kilomètres de routes économiques — notamment pour le désenclavement — comme sur la RN 1 entre Laghouat et Ghardaïa, couvrant aujourd'hui tout le réseau routier des zones sèches.

Principales utilisations :

- Granulats non liés pour routes à trafic faible ou moyen.
- Assises de chaussées : couches de base et de fondation (usage le plus courant).
- Autres emplois : accotements, couches de forme, pistes agricoles.

Une innovation importante remonte à 1956, où les ingénieurs ont appliqué une fine couche de tuf calcaire sur un macadam traditionnel, assurant une tenue excellente face à un trafic élevé. Ensuite, les tufs à squelette (proches des graves concassées) ont été privilégiés, avant que l'usage ne s'étende aux tufs sans ossature, avec de bons résultats lorsqu'une sélection rigoureuse et une mise en œuvre soignée sont respectées.

Un exemple notable est le renforcement de la liaison Tamanrasset – In Guezzam (150 km sur la Transsaharienne), appelée Route de l'Unité Africaine, favorisant le développement régional et les échanges africains.

2.2.6.1 Traitement des tufs :

Il est recommandé uniquement dans des situations spécifiques, par exemple :

- zones soumises à des infiltrations ou à des ruissellements fréquents ;
- matériaux ne répondant pas totalement aux critères techniques.

2.2.6.2 Présentation des spécifications existantes

L'abondance des tufs calcaire a conduit de nombreux pays à en faire un usage courant en technique routière, en établissant des normes géotechniques basées sur l'expérience terrain. En Algérie, les tufs sont classés en trois catégories selon leur friabilité (Carlos et De Os Horta, 1979) :

- Tufs à squelette (L.A. < 35 %) : privilégiés car proches des graves classiques concassées.
- Tufs friables (L.A. entre 35 % et 55 %) : les plus courants, faciles à extraire et à mettre en œuvre.

- Tufs pulvérulents (L.A. > 55 %) : faciles à extraire mais difficiles à utiliser. La teneur en carbonate de calcium est limitée à 70 %, et les tufs à squelette sont recommandés pour les couches de chaussée. Aujourd'hui, le choix repose aussi sur la portance CBR, l'indice de plasticité et la granulométrie.

Les règles d'utilisation varient selon les pays, avec des spécifications différentes selon les caractéristiques techniques et le niveau d'exigence. Par exemple, en Argentine (province de la Pampa), les tufs calcaires destinés à des couches de base pour un trafic léger sont soumis à des exigences sur la granulométrie, les limites d'Atterberg, l'indice CBR immergé et le coefficient Los Angeles. En Tunisie, ces matériaux sont utilisés en couche de base ou de fondation sous revêtements bitumineux ou couches traitées. En Afrique du Sud, des spécifications existent également pour tenir compte des particularités locales.

En Algérie, la Technique Routière Saharienne (TRS) a donné lieu à plusieurs synthèses et propositions de spécifications depuis les années 1980. Struillou et Alloul (1984) ont précisé les domaines d'application des différentes catégories de tuf selon l'emplacement de la route, le trafic et les propriétés granulométriques, mécaniques (dureté, portance) ainsi que la teneur en sulfates et carbonates. Seuls les sables gypseux exigent une cohésion minimale.

En 2001, le CTTP a intégré dans son catalogue des instructions précises sur l'utilisation des tufs en couches de chaussée, avec des critères similaires relatifs à la granulométrie, aux limites d'Atterberg, aux taux de carbonate et sulfates, ainsi qu'une résistance minimale en compression simple pour certains matériaux.

Cependant, les spécifications algériennes ont évolué de manière non linéaire : certaines notions de cohésion, présentes dans la TRS originelle, sont désormais réservées aux seuls sables gypseux. Les critères relatifs aux teneurs en sulfate et carbonate varient selon les auteurs, et la comparaison avec d'autres pays utilisateurs montre des approches différentes.

Le tableau I.3 présente un récapitulatif des différentes spécifications utilisées dans plusieurs pays pour les tufs calcaires.

Tableau 2.3 : Comparaison des différentes spécifications d'utilisation des tufs (AKACEM, 2017).

Caractéristique	Couche	Algérie (TRS 1966)	Algérie (Struillou et Alloul 1984)	Algérie (CTTP 2001)	Tunisie	Argentine	Afrique du Sud
D max (mm)	F	/	/	20 - 40	< 40	< 38	19 - 53 (selon le trafic)
	B				< 20	< 20	
% < 80µm max	F	< 30	≤ 30	22 - 32	< 20	5 - 20	/
	B				22 - 32	3 - 10	
Indice CBR Après immersion	F	/	40 - 100 Zone II et III	/	/	> 40	60 - 100 (selon le trafic)

Suite du tableau 2.3

	B		30 - 90 Zone IV (selon trafic)			> 80	
ICBR Immédiat	/	/	> 40	/	/	/	/
Coefficient Los Angeles max	F	/	100	/	/	/	/
	B		35 - 100 (selon trafic)			> 45	
% Carbonate CaCO ₃	F	/	> 60	45	> 40		/
	B		> 70		> 50		
% < 0,425 mm max	/	/	/	36 - 52	10 -30(lu sur fuseau)	10 - 30	15 - 55
Limite de liquidité	/	/	/	< 40		< 30	25 - 40 (selon le trafic)
Indice de plasticité	/	< 13	< 10 Zone IV < 13 Zone III < 16 Zone IV	< 15	< 10	< 6	8 - 15 (selon le trafic)
% Sulphates CaSO ₄	/	/	Trace Zone II 5 Zone III	/	< 3	/	/
Rc (MPa) 28 j	/	> 2	/	/	/	/	/

La comparaison des spécifications internationales des tufs calcaires (tableau I.3) reste difficile, car les critères retenus diffèrent selon les pays. Même lorsque le contexte d'utilisation (climat, trafic, fonction) est similaire, le niveau d'exigence varie.

Afin d'établir des normes uniformes, il serait bénéfique d'incorporer l'idée de zone climatique suggérée par Struillou et Alloul, compte tenu de la sensibilité du tuf à l'eau, ainsi que de considérer le volume de circulation — un aspect non inclus dans les spécifications tunisiennes. Les spécifications à venir devraient étendre l'application du tuf au-delà des seules couches de fondation et de base, pour englober les accotements, les couches de forme ainsi que les chaussées non revêtues ou simplement protégées par un revêtement superficiel. Pour l'indice de plasticité et le CBR après immersion, les critères actuels sont plutôt clairement établis. Par contre, tous les pays utilisateurs devraient prendre en compte d'autres facteurs essentiels :

- Teneur en carbonate de calcium,
- Valeur au bleu de méthylène,
- Résistance en compression simple (mesurée après 4 jours à 55 °C).

La fixation de ces seuils nécessiterait des études conjointes et des observations de terrain pour parvenir à des valeurs de référence fiables (Colombier, 1988).

2.2.7 Caractéristiques géotechniques et mécaniques des tufs calcaires et gypso-calcaires

Les tufs calcaires et gypso-calcaires constituent des matériaux largement utilisés dans les travaux routiers et géotechniques, notamment dans les régions semi-arides et arides d'Afrique du Nord.

Leur abondance, leur facilité d'extraction et leurs propriétés mécaniques adaptées en font des candidats intéressants pour la construction de couches de chaussées et autres infrastructures. Ce chapitre présente une synthèse des principales caractéristiques géotechniques et mécaniques de ces matériaux, en s'appuyant sur diverses études menées en Algérie, en Tunisie et au Maroc (Alloul, 1981; Améraoui, 2002; Boukezzi, 1997; Goual, 2012). L'objectif est de fournir une vision intégrée permettant de mieux comprendre leur comportement et d'optimiser leur utilisation dans les projets d'ingénierie.

2.2.7.1 Granulométrie

La granulométrie des tufs est extrêmement variable selon la nature du matériau d'origine et le procédé d'extraction. Les tufs peuvent se présenter sous forme de blocs friables, de nodules durs ou encore de matériaux fins. Avant tout tamisage, les échantillons sont généralement immergés dans l'eau pendant 12 à 24 heures afin de désagréger les mottes. Cette opération permet de simuler les conditions les plus défavorables en matière de friabilité.

Les courbes granulométriques des tufs calcaires sont généralement continues, avec une allure proche de celles des sables. Selon Colombier (1988), les fuseaux granulométriques varient fortement en fonction de l'origine du matériau et des procédés de mise en œuvre. L'évolution granulométrique au compactage est considérée comme un phénomène important, influencé à la fois par la dureté du matériau et par les engins utilisés.

Tableau 2.4 Exemple de spécifications granulométriques des tufs calcaires

Type de tuf	Granulométrie (mm)	Observation
Tuf calcaire – Classe 1	0/40	Squelette dur
Tuf calcaire – Classe 2	0/20	Matériau fin

Des études menées sur des tufs calcaires 0/40 mm de dureté moyenne (Ben-Dhia, 1983 ; Colombier, 1988) montrent que :

- La granulométrie évolue au début du compactage, puis tend à se stabiliser.
- L'allure de la courbe granulométrique d'origine est conservée.
- La teneur en fines augmente de moins de 10 %, et le passant à 2 mm croît de 10 à 20 %.

Ces observations indiquent que même si les tufs se fragmentent légèrement sous l'effet du compactage, leur structure granulométrique globale reste relativement stable.

2.2.7.2 Pollution des fines argileuses

Lorsqu'on envisage l'utilisation des tufs calcaires ou gypso-calcaires dans la construction de couches de chaussées, il est essentiel de connaître leur degré de pollution par des particules fines argileuses. Une teneur excessive en argile rend le matériau sensible à l'eau et aux déformations

permanentes sous l'effet des charges de trafic, compromettant ainsi sa durabilité (Alloul, 1981 ; Colombier, 1988).

L'évaluation de cette pollution repose généralement sur trois essais géotechniques principaux : les limites d'Atterberg, l'équivalent de sable, et l'essai au bleu de méthylène.

2.2.7.3 Limites d'Atterberg

L'essai des limites d'Atterberg est le plus couramment utilisé pour déterminer l'indice de plasticité (I_p), indicateur de la teneur en argile et de sa nature. Pour les tufs calcaires et gypso-calcaires, les valeurs de I_p varient généralement entre des valeurs inférieures à 5 % (non mesurables) et 25 %, avec une plage typique de 8 à 15 % pour les encroûtements murs (Alloul, 1981 ; Boukezzi, 1997). Des études montrent que les matériaux fortement calcaires présentent des indices de plasticité plus faibles (par exemple, $I_p = 6$ % pour un $\text{CaCO}_3 \approx 87$ %), en raison d'un faible pourcentage d'argile fibreuse. Cette faible plasticité est bénéfique car elle confère une certaine cohésion au matériau, sans excès qui le rendrait inapte à l'usage routier, notamment en climat subhumide ou semi-aride (Améraoui, 2002).

2.2.7.4 Équivalent de sable (ES)

L'essai d'équivalent de sable (ES) est utilisé pour estimer la proportion de fines présentes dans le matériau. Les valeurs obtenues pour les tufs calcaires varient généralement entre 10 % et 60 % (Colombier, 1988 ; Goual, 2012).

Cet essai a surtout une valeur comparative entre plusieurs échantillons :

- Les valeurs faibles (< 30 %) indiquent un matériau riche en fines argileuses, donc plus sensible à l'eau.
- Les valeurs élevées (> 50 %) reflètent une faible pollution argileuse et une meilleure aptitude à l'usage routier.

Selon les recommandations du HREEM, les valeurs minimales d'ES pour les matériaux routiers sont les suivantes :

Tableau 2.5 Spécifications minimales d'ES pour la construction routière (HREEM, cité par Colombier, 1988)

Matériaux	ES minimum (%)
Graves pour couche de base	30
Agrégats pour route mixte	35
Agrégats pour enrobés denses	45
Agrégats pour béton bitumineux	55
Sable pour béton	80

2.2.7.5 Essai au bleu de méthylène

L'essai au bleu de méthylène (VB) mesure la surface spécifique des argiles présentes dans le matériau. Pour les tufs calcaires, les valeurs typiques varient entre 0,2 et 1,5 g de bleu pour 100 g de matériau (Colombier, 1988).

Ces résultats indiquent que les fines calcaires réagissent peu à l'essai, et que la valeur de VB reflète surtout la teneur en argiles actives. Ainsi :

- $VB < 0,2$: matériau propre
- $0,2 < VB < 0,5$: légèrement pollué
- $0,5 < VB < 1,0$: pollué
- $VB > 1,0$: très pollué (Colombier, 1988)

La faible réactivité observée pour les tufs calcaires à forte teneur en CaCO_3 confirme leur faible activité argileuse, ce qui est favorable à leur utilisation en couches de fondation routière (Ben-Dhia, 1983).

2.2.7.6 Essais de compactage et de portance

Le compactage et la portance constituent deux paramètres essentiels pour évaluer l'aptitude des tufs calcaires et gypso-calcaires à être utilisés en construction routière. Ces essais permettent de déterminer les conditions optimales de mise en œuvre et la résistance mécanique du matériau face aux charges appliquées (Alloul, 1981 ; Colombier, 1988 ; Goual, 2012).

a. Essai Proctor modifié

L'essai Proctor modifié (NF P 94-093) est couramment utilisé pour déterminer la densité sèche maximale (γ_{OPM}) et la teneur en eau optimale (W_{OPM}) des matériaux destinés aux couches d'assises de chaussées. Étant donné le caractère friable et évolutif des tufs, il est recommandé de ne pas réutiliser le même échantillon pour plusieurs mesures à différentes teneurs en eau (Ben-Dhia, 1983).

Les résultats obtenus par divers auteurs montrent :

- γ_{OPM} généralement comprise entre 1,70 et 2,10 t/m³ (17 à 20 kN/m³), pouvant atteindre 2,20 t/m³ dans certains cas (Boukezzi, 1997).
- W_{OPM} variable selon la teneur en fines, généralement comprise entre 8 et 15 %, mais pouvant dépasser 20 % pour des tufs très tendres.
- Les matériaux non plastiques ($I_p < 5$) présentent des courbes OPM relativement plates, indiquant une faible sensibilité de la densité à la variation de la teneur en eau.
- En présence d'argile ($I_p > 10$), les courbes sont plus pointues, et la densité chute rapidement dès que la teneur en eau s'écarte de l'optimum (Améraoui, 2002).

Tableau 2.6 Plages de valeurs de l'essai Proctor modifié pour les tufs calcaires

Paramètre	Plage observée	Référence principale
γ_d OPM (t/m ³)	1,70 – 2,10 (jusqu'à 2,20)	Colombier (1988), Goual (2012)
W OPM (%)	8 – 15 (jusqu'à 20)	Ben-Dhia (1983)
Forme de la courbe OPM	Plate ($I_p < 5$) / Pointue ($I_p > 10$)	Alloul (1981)

b Essai CBR (California Bearing Ratio)

L'essai CBR, normalisé (NF P 94-078), mesure la résistance du matériau au poinçonnement et sert directement au dimensionnement des chaussées. Il peut être réalisé immédiatement après compactage (CBR_{imm}) ou après immersion de 4 jours (CBR_{imb}).

Les résultats typiques pour les tufs calcaires :

- CBR_{imm} : 50 à 150 (voire 180 pour des tufs très durs).
- CBR_{imb} : 30 à 100, la baisse par rapport à la valeur immédiate dépendant de la teneur en argile.

Un squelette granulaire dur et une courbe granulométrique bien étalée permettent d'obtenir des valeurs élevées de CBR.

Tableau 2.7 Résultats typiques de l'essai CBR pour des tufs calcaires

Localisation du gisement	CBR _{imm}	CBR _{imb}	Référence
Ain Oussera (Algérie)	85	68	Alloul (1981)
Mazaghran (Algérie)	33	60	Boukezzzi (1997)
Khenis (Tunisie)	80,4	73	Ben-Dhia (1983)

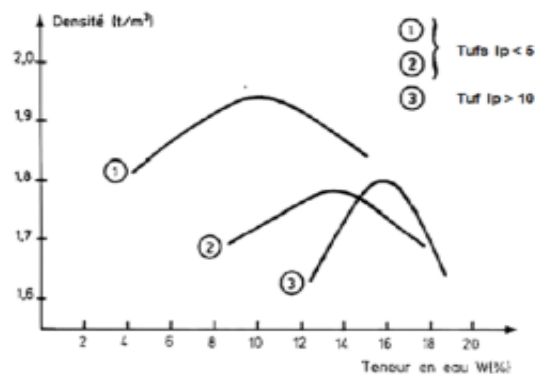


Figure 2.4 Exemple de courbes Proctor modifié et CBR (d'après Colombier, 1988, cité par Goual, 2012)

c Essai de résistance à la compression simple

L'essai de résistance à la compression simple a été introduit pour la première fois par FENZY (1957), cité par Alloul (1981). Il est appliqué à l'ensemble des matériaux sahariens, en particulier sur la fraction inférieure à 5 mm.

La procédure consiste à effectuer un compactage statique des échantillons aux conditions optimales de l'essai Proctor modifié, à l'aide d'une presse. Les éprouvettes sont préparées à l'aide d'un moule cylindrique de 5 cm de diamètre et 10 cm de hauteur. Après démoulage, elles sont séchées à l'étuve à une température de 60°C pendant 48 heures avant de procéder à leur écrasement.

Le tableau 2.8 illustre l'évolution de la résistance à la compression simple des tufs calcaires en fonction de la durée de conservation à l'air libre (Akacem, 2017 ; Boukezzi, 1997).

Tableau 2.8 – Évolution de la résistance à la compression simple des tufs calcaires en fonction de la durée de conservation à l'air libre (AKACEM, 2017; Boukezzi, 1997; Moulay Omar et al., 2022)

Âge de conservation	Tafraoui – Rc (MPa)	Aïn El Beïda – Rc (MPa)	Adrar (Berbaa) – Rc (MPa)
02 heures	0,50	0,20	0,13
1 jour	1,23	0,60	–
3 jours	2,33	1,00	–
7 jours	2,37	1,00	0,186
14 jours	2,60	1,03	2,82
28 jours	2,96	1,07	3,54

Par ailleurs, Akacem (2017) a proposé une synthèse récapitulative des principales caractéristiques géotechniques et mécaniques de plusieurs tufs d'encroûtements calcaires en Algérie et en Tunisie (voir tableau 1.3).

Tableau 2.9 Caractéristiques géotechniques et mécaniques de quelques tufs d'encroûtements calcaires (Algérie et Tunisie)

Site / Pays	% < 0,4 mm	% < 80 µm	Ip (%)	VB (%)	ES (%)	WOPM (%)	γd OPM (t/m³)	ICBR immédiat
Aïn Oussera (*) – Algérie	22	21	13	–	16	15,3	1,72	85
Sidi Khettab (*) – Algérie	62	28	10	–	13	9,3	1,98	68

Suite du tableau 2.9

Mazaghran (*) – Algérie	32	19	8	–	17	8,2	2,06	33
Tafraoui (**) – Algérie	40	27	10	0,71	30	9,0	2,10	60
Aïn El Beïda (**) – Algérie	40	26	23	0,29	37	11,0	1,85	57
Khenis (***) – Tunisie	55	10	–	0,09	35	11,0	1,80	80,4
El Bibane (***) – Tunisie	43	27	–	0,05	23	12,5	1,83	73

(*) Alloul, 1981 (**) Boukezzi, 1997 (***) Ben Dhia, 1983

2.2.8 Conclusion

L'étude des tufs et encroûtements calcaires met en évidence leur double intérêt scientifique et technique. Du point de vue géologique, ils constituent un témoin privilégié des processus d'aridification et d'évolution pédologique des sols du Quaternaire (Alloul, 1981 ; Colombier, 1988). D'un point de vue géotechnique, leur structure poreuse, leur teneur variable en carbonates et leur comportement sous compactage en font des matériaux économiquement avantageux et adaptés à la construction routière dans les régions arides (Boukezzi, 1997 ; Goual, 2012).

Les recherches menées en Algérie, en Tunisie et dans d'autres régions sahariennes montrent que, malgré une variabilité naturelle de leurs propriétés, les tufs peuvent être exploités efficacement à condition d'un tri granulométrique rigoureux, d'un contrôle de la teneur en argiles et d'une mise en œuvre soignée. Leur emploi contribue ainsi à la valorisation des ressources locales et à la durabilité des infrastructures.

En conclusion, les tufs représentent bien plus qu'un simple matériau de substitution : ils incarnent une ressource stratégique pour le développement durable des zones arides, alliant connaissance géologique, ingénierie géotechnique et économie de proximité.

2.3 LES SABLES :

2.3.1 Définition

Le sable est défini comme la fraction granulaire des matériaux pierreux dont la taille des grains se situe généralement entre 80 µm et 5 mm. Cette définition, bien que globalement admise, peut varier selon les classifications et les normes en vigueur. D'après (CHAUVIN, 1987), il s'agit de matériaux dont le diamètre maximal ne dépasse pas 6,3 mm, avec une proportion de particules inférieures à 80 µm n'excédant pas 30 %.

Dans le langage courant, le terme sable désigne des particules dont les dimensions sont comprises entre 0 et 5 mm, à l'exclusion des fillers. Cette appellation s'applique aussi bien aux sables naturels, très répandus dans de nombreuses régions du monde, qu'aux sables de concassage, issus de la fragmentation mécanique des roches.

La définition granulométrique du sable n'est pas unique : elle dépend des contextes historiques, des normes nationales et surtout de l'usage prévu.

De manière générale, le terme sable désigne un ensemble meuble de grains non cohérents, dont la taille varie entre 0,062 mm et 5 mm. D'un point de vue géologique, il combine deux aspects fondamentaux :

- Un aspect granulométrique, relatif à la taille des particules ;
- Un aspect minéralogique, lié à la nature des minéraux constituant les grains.
- Chaque particule élémentaire est désignée par le terme grain de sable.

Le sable peut être :

- Naturel, lorsqu'il provient de la désagrégation progressive des roches sous l'effet des agents d'érosion ;
- Artificiel, lorsqu'il est obtenu par concassage et criblage de roches massives on parle alors de sable de concassage (ou sable de carrière), caractérisé par des grains anguleux et à surface rugueuse.
- Sa composition chimique et minéralogique varie d'un site à un autre, selon la nature des roches d'origine et les processus de formation (BENYOUB, 2011).

2.3.2 Origine des sables

Les sables que nous observons sont issus d'un processus de décomposition chimique ou mécanique des roches (Chauvin, 1987), suivi par un déplacement qui explique leurs propriétés physico-chimiques. Les sables que l'on trouve sont issus d'un processus généralement complexe d'érosion et de sédimentation. Cela implique, sur divers échelons, une fragmentation locale des différentes roches, suivie d'un déplacement par voie d'eau et parfois par vent. Les divers processus de transformation de la roche solide en sable sont assez intenses pour éliminer la plupart des minéraux, ne laissant que les plus robustes ; c'est pourquoi une majorité des formations sablonneuses est composée de quartz qui tend à dominer davantage à mesure que la taille des grains diminue. Généralement, les particules comprises entre 0,2 mm et 0,5 mm sont constituées de plus de 75% de quartz. D'après leur mode de déplacement et leur importance, ces grains de sable peuvent avoir diverses apparences (Chauvin, 1987) : des grains émoussés et brillants (érosion causée par l'eau) ; des grains sphériques et mats (érosion due au vent) ; des grains qui ne sont pas érodés. Outre le quartz, on observe également des résidus rocheux et de feldspath dans la portion plus grossière ; ce dernier est présent en petite quantité, sous forme d'argile dérivée de la décomposition du réseau minéral par hydrolyse. Dans un contexte tropical, il se distingue particulièrement par une action chimique violente. Les sulfates et les carbonates peuvent intégrer

la composition habituelle des sables, surtout dans les régions sèches où le niveau de précipitations est faible et l'évaporation importante, car ils proviennent de la cristallisation des sels dissous en solution due à l'évaporation. En fonction de leur histoire géologique, les sables présentent une variété de disparités : taille des grains, composition, caractéristiques et nature des particules infinitésimales, composition chimique, minéralogique et pétrologique, forme des grains, robustesse, présence de matières humiques, etc. Dans le cadre d'une utilisation routière, tous ces éléments n'ont pas la même importance, et les éléments les plus pertinents seront considérés lors des classifications fonctionnelles.

2.3.3 Différents types de sable

On identifie deux types de sables, naturels et ceux issus d'un processus de production, en se référant à divers critères.

2.3.3.1 Les sables provenant d'un processus de production : Sables artificiels

Ces matériaux sont générés par un processus de fabrication de granulats et pourraient être disponibles en surplus par rapport à la production désirée (gravier ou gravillon). Ils peuvent être :

- Des sables roulés issus du criblage primaire d'une quelconque variété.
- Généralement, ce sont des sables de concassage, un surplus provenant de l'extraction d'une carrière ou d'une ballastière.

L'emploi de sables concassés dans les méthodes routières connaît une progression constante.

Note : D'autres produits industriels qui ne sont pas exactement conformes à ces définitions possèdent des caractéristiques qui les rapprochent de ces sables (cendres volantes silico-alumineuses) ; leurs techniques d'analyse et d'utilisation sont comparables.

2.3.3.2 Les sables naturels

Les sables naturels sont des matériaux présents en abondance dans certaines régions. Ils résultent d'un processus complexe d'érosion et de sédimentation. Leur formation se déroule en plusieurs étapes successives : d'abord la décomposition sur place des différentes roches, ensuite leur transport par divers agents naturels, et enfin leur dépôt sous des formes variées selon le milieu de sédimentation.

Parmi les principaux types de sables naturels, on trouve les sables marins, formés par des éléments de petite taille qui, faiblement affectés par l'action fluvatile, parviennent jusqu'à la mer où ils se déposent après un long frottement. Ces sables se caractérisent par des grains fins et anguleux. Dans les régions littorales, on rencontre également les sables marins littoraux, à granulométrie généralement uniforme et à grains fins, pouvant contenir des quantités variables de minéraux rares et parfois riches en calcaire.

Les sables fluvatiles, pour leur part, proviennent des fleuves et des rivières, où ils sont transportés puis déposés avant d'atteindre la mer. En raison de la courte distance de transport, leurs grains sont souvent plus grossiers, mal concassés, de forme anguleuse et à surface très rugueuse.

Enfin, les sables éoliens sont constitués de grains transportés et déposés par le vent. Ils se rencontrent dans de vastes zones désertiques, notamment dans le sud algérien, sous forme de dunes. Leur granulométrie est relativement uniforme, de taille moyenne (autour de 0,5 mm), et leurs grains sont arrondis et polis en raison des nombreux chocs subis lors du transport. La vitesse du vent, son pouvoir de portance ainsi que la distance parcourue sont les principaux facteurs qui déterminent la taille et la forme de ces grains.

2.3.3.3 Sables du Sahara

Le Sahara regorge de sable, qui est parfois le seul matériau présent sur de grandes étendues. D'après Ben Dhia (1998), les sables du Sahara se manifestent sous diverses formes en fonction de leur provenance géologique et des conditions dans lesquelles ils se sont déposés.

Les dépôts alluvionnaires comprennent les sables de rivière que l'on trouve soit dans les oueds à flux régulier situés sur le flanc de l'Atlas (dépôts contemporains), soit dans les lits d'anciens oueds dont le cours remonte à des périodes géologiques plus reculées. Ces sables, présentant une granulométrie assez diverse et contenant entre 15 et 30 % de petites particules, sont couramment employés dans le domaine de la construction routière, en particulier pour les couches fondamentales et intermédiaires selon la méthode du sable-argile. Les gros sables, souvent graveleux, sont utilisés pour la fabrication d'enrobés à froid ou à chaud en fonction de la quantité de matériaux grossiers présents.

Les dunes sahariennes, également appelées sables éoliens, sont constituées de grains de sable fins à très fins, présentant une granulométrie serrée ou extrêmement uniforme.

Les sables de regs sont issus de formations en surface qui s'étendent sur de grandes zones planes ou légèrement ondulées. Le vent a agi pour éliminer les particules fines, laissant derrière une surface enrichie en éléments plus gros — cailloux, graviers et sable grossier — qui sont répartis de manière ordonnée.

Les diverses formations continentales de sols fins, comme les sables argileux du continental intercalaire (souvent désigné sous le nom d'albien), qui sont visibles dans des régions telles que Reggane, Adrar, In Salah et sur le plateau du Tahouratine, font partie des sables géologiques en place. Elles se situent principalement à la lisière ouest et sud du Sahara central et oriental.

On observe aussi des sables gypseux, qui renferment des quantités variables de gypse. Ces matériaux peuvent être issus de formations géologiques existantes ou de dépôts alluvionnaires, et sont couramment employés dans le secteur routier.

Pour finir, dans des régions telles que les plateaux situés entre Ouargla et Hassi Messaoud, on note la présence d'une combinaison de pierres calcaires semi-dures et de sable gypso-calcaire sous une couche de calcaire superficiel relativement solide. Ce matériau de remblais a servi à la construction de la route Ouargla-Hassi Messaoud, même si les sables gypso-calcaires n'ont pas encore été utilisés en tant que tel.

2.3.4 Définition d'un sable de dunes :

Les sables éoliens, appelés également sable de dunes ou sables dunaires, constituent des formations sableuses déposées sous forme d'édifices dunaires caractérisés par une succession de crêtes et de couloirs évoquant des vagues. Ces sables se rencontrent dans plusieurs régions désertiques, notamment dans le sud algérien, où ils occupent de vastes territoires. Leur dépôt et leur répartition résultent principalement de l'action du vent : la vitesse et l'intensité de celui-ci déterminent le triage granulométrique, la distance de transport ainsi que le mode d'accumulation des particules.

Selon M.F. (Zoght, 1979), la teinte dorée des dunes s'accroît avec le temps, chaque grain s'oxydant progressivement au contact de l'air. Toutefois, la couleur du sable dépend avant tout de la composition minéralogique de ses constituants, et notamment de la proportion de minéraux lourds colorés tels que l'amphibole, le pyroxène, la topaze ou le zircon (Banna & Bedjou, 2004). Les sables rencontrés dans les dunes mouvantes sont formés de particules siliceuses très homogènes et de petite taille, généralement arrondies et polies par l'action répétée du vent. Ces sables s'accumulent sous forme de dunes de hauteurs très variables, parfois colossales. D'après (FOOKE & HIGGINBOTHAM, 1968), cités par Ben Dhia (1998), le Sahara se compose d'environ 40 % de montagnes désertiques, 15 % de plaines désertiques et 30 % de dunes sableuses, le reste étant constitué de sebkhas, de chotts et d'autres formations superficielles.

Le Sahara, à lui seul, couvre près du tiers du continent africain. Ces données mettent en évidence l'importance stratégique du sable dans les régions sahariennes, tant par son omniprésence que par son rôle potentiel dans le développement des infrastructures. Comme le souligne (KHangaoui, 2013), la rareté des ressources locales adaptées à la construction routière rend indispensable la valorisation des sables dunaires, matériau abondant et incontournable dans toute étude géotechnique menée en milieu désertique.

2.3.5 Intérêt de sable de dune

L'intérêt de l'utilisation de ces granulats locaux se manifeste à deux niveaux : technique et économique.

2.3.5.1 Les aspects économiques

Les avantages sont clairs, étant donné que l'emploi du sable de dune assure une économie significative en termes de transport des matériaux, compte tenu de sa disponibilité universelle et en quantité sans fin. De plus, son extraction engendre quasiment aucun coût additionnel et son intégration aux autres matériaux sur le site de construction se réalise sans difficulté. (GUERMITI, 2013).

2.3.5.2 Les aspects techniques

Le sable peut participer à la densification des substances. Cela permet également d'améliorer leurs propriétés géotechniques en augmentant le frottement interne et en renforçant la portance. Il peut être employé pour réduire la plasticité des matériaux de fond. (GUERMITI, 2013).

2.3.6 Processus de formation des dunes

Les dunes se créent dans des régions où le sable est en quantité et n'est pas stabilisé par la végétation (désert, plage, lit de rivière à sec). Le vent érode et transporte le sable (déflation). Il est déplacé à basse altitude par le biais de la saltation, puis il s'accumule lorsque la force du vent diminue (versant au vent). Une dune peut se mouvoir grâce à l'érosion sur le versant exposé au vent et l'accumulation sur le versant en opposition. Une dune est une amasse de sable créé par le vent et l'influence des vagues, qui est ensuite recouverte de végétation. Les dunes sont des formations dynamiques qui subissent continuellement des modifications de forme.

La formation d'une dune nécessite la présence d'obstacles, comme des rochers ou des arbres, qui ralentissent le vent et favorisent l'accumulation de sable transporté selon les phases suivantes :

- Dépôt de particules de sable à l'avant de l'obstacle suite au choc, suivi d'une phase ultérieure où ces particules s'accumulent.

- Le courant d'air se scinde en deux bras qui passent devant un obstacle où l'air se rassemble autour de ce dernier.

- Fait grandir les bras jusqu'à ce qu'ils touchent deux éléments de nuance sable.

Et continuer à se développer dans les dunes en absorbant davantage de particules de sable que la taille de la dune elle-même. Pour interrompre la scène, puis progressivement, et lorsqu'il évoque la dune qu'il a atteinte au stade de maturité, elle ne peut plus être chargée de grains (Banna & Bedjou, 2004).

2.3.7 Localisation des dunes de sable

On trouve les dunes de sable dans le sud du pays. Ils se trouvent dans une région présaharienne. On retient les sables provenant des dunes continentales (Mainguet & Jacqueminet, 1984). Ces dunes se composent de multiples regroupements de sables fins amassés dans des zones spécifiques du Sahara (Figure 2.5). On note deux grandes régions géographiques où l'on observe une accumulation significative de sables de dunes. On parle ici du Grand Erg Occidental et du Grand Erg Oriental (Banna & Bedjou, 2004).

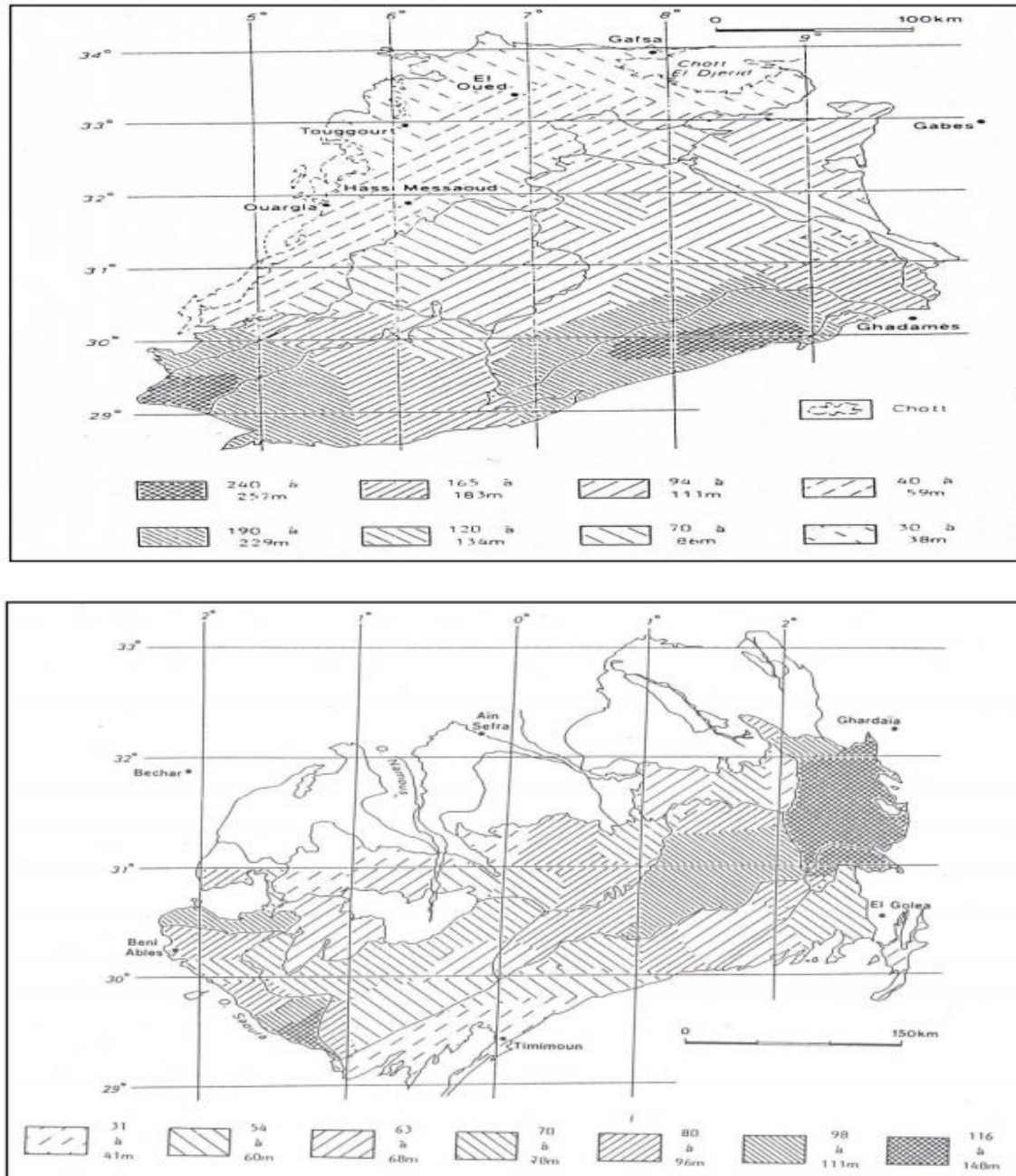


Figure 2.5 : Épaisseur de l'accumulation de sable dans le grand Erg Oriental (Mainguet & Jacqueminet, 1984)

Il convient de noter que les ghourds et les dômes représentent plus de 30% de la surface totale de l'erg, tandis que les cordons longitudinaux ne couvrent que 13% de cette même surface (Figure 2.6). Le Grand Erg Occidental présente un équilibre ; l'enlèvement du sable est à peu près équivalent à son apport, comme le montre le bilan sédimentaire qui indique que plus de 51% de la surface erg affiche un solde positif (figure.2.7). Selon Dubief J. (1953), le Grand Erg Occidental présente une stabilité relativement notable (Dubief, 1953).

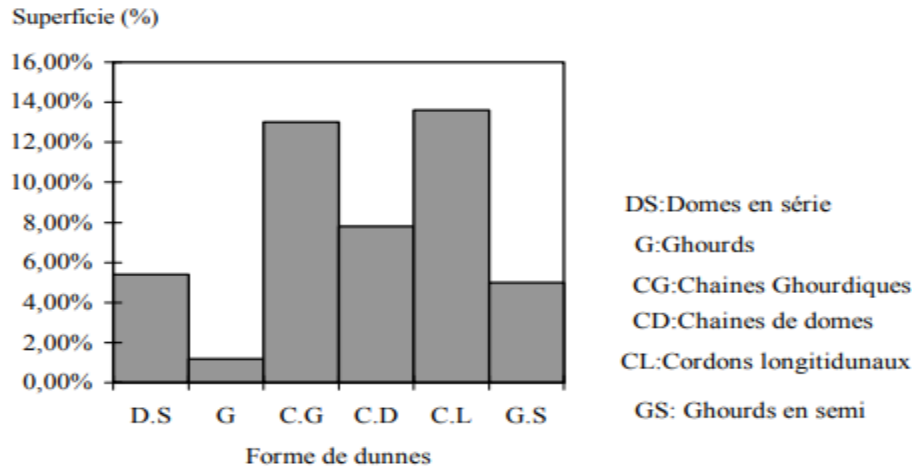


Figure. 2.6 Grand Erg Occidental. - Superficie occupée par les édifices dunaires (Dubief, 1953).

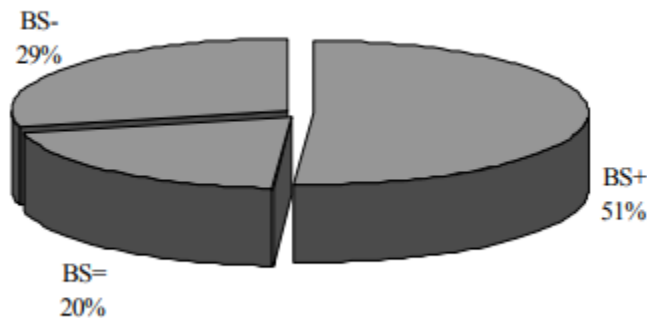


Figure. 2.7 Pourcentage du budget sédimentaire dans le Grand Erg Occidental (Dubief, 1953).

2.3.8 Les différentes formes d'accumulations sableuses

En fonction de la structure et des dimensions des accumulations, la dune ou la formation sableuse portera un nom distinctif.

En outre, en fonction des conditions environnementales, ces accumulations peuvent être isolées ou regroupées en champs de dunes. (Derruau, 1987)

2.3.8.1. Les nebkas

Ces dernières indiquent la direction du vent actif le plus récent et ne sont visibles que derrière les obstacles, spécifiquement dans les zones où la végétation est clairsemée. Concernant la taille de l'obstacle, leur longueur ne dépasse pas 50 cm et leur hauteur est de 20 cm au maximum (Figure 2.8). Le développement de ces formations est entravé par la direction variable des vents qui déplace sans cesse la couche de sable déposée lors de la dernière tempête, ce qui freine leur expansion en dimension. (AMEL, 2003)



Figure 2.8 : Nebkha (Leghrieb, 2012)

2.3.8.2. Barkhanes

Des dunes en forme de croissant, pouvant monter jusqu'à dix mètres de haut et avoir un diamètre de 30 à 50 mètres, sont régulièrement observées. La direction dans laquelle se déplacent les barkhanes est déterminée par l'orientation de leurs cornes (Figure 2.9), (Derruau, 1987). Les barkhanes sont des dunes en forme de croissant qui exhibent une concavité abrupte du côté face au vent.



Figure 2.9 : Barkhane (Leghrieb, 2012)

2.3.8.3. Dunes en forme de parabole

Ce type de dune est associé à une participation en sable plus importante par rapport aux barkhanes et peut s'étendre sur plusieurs centaines de mètres (Figure 2.10).

Ces structures de dunes seraient pratiquement perpendiculaires au parcours des vents prédominants, cependant avec une variabilité directionnelle plus subtile, ce qui favorise l'agencement des dunes par leurs côtés lors des changements directionnels du vent (BOUDAD,

2003). Les dunes paraboliques ont une structure incurvée, mais à la différence des barkanes, leur face convexe est orientée vers le sens du vent.

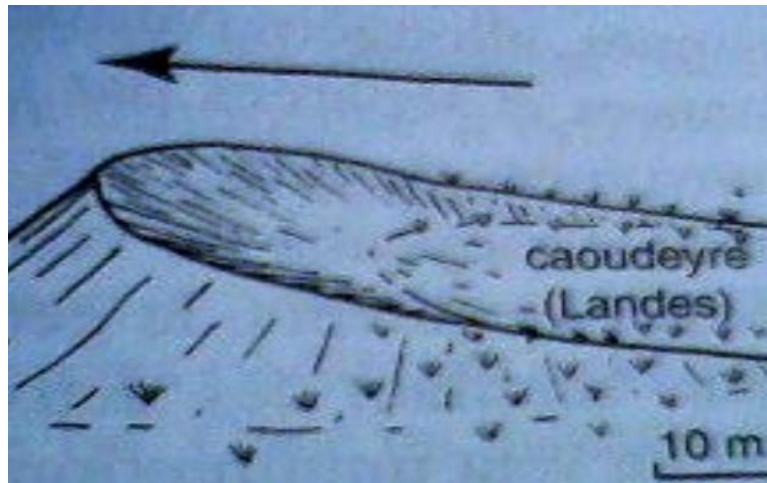


Figure 2.10 : Dunes en forme de parabole (Leghrieb, 2012)

2.3.8.4. Dunes de forme longitudinale

Les dunes en forme de seif (dunes longitudinales) sont droites (voir Figure 2.11) et s'étendent dans le sens du vent. (BOUDAD, 2003).

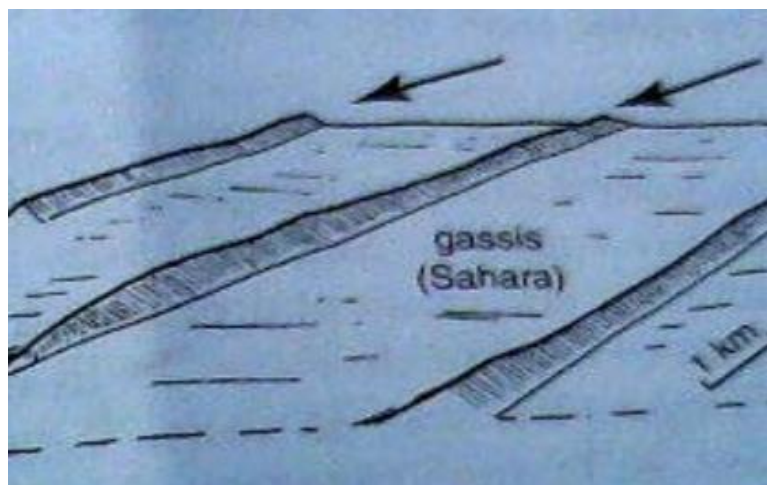


Figure 2.11 : Dunes de forme longitudinale (Leghrieb Y, 2012)

2.3.8.5. Les dunes en forme de dôme

Les dunes en dômes (figure 2.12) présentent une configuration circulaire et aplatie sans une nette dissymétrie morphologique, malgré leur origine liée à un vent directionnel unique et puissant. (Belhaj & Khatteli, 1994)

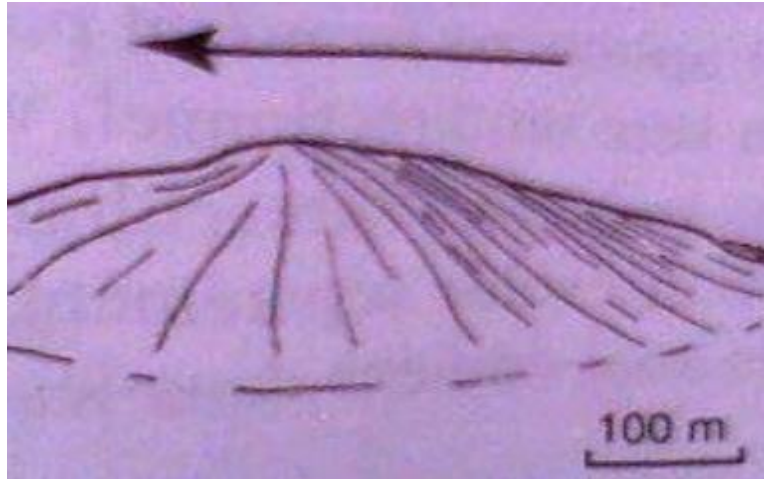


Figure 2.12 : Les dunes en forme de dôme (Leghrieb Y, 2012)

2.3.8.6. Pyramides ou étoiles dunes

Ce sont des formes pyramidales qui se forment dans les régions où le vent n'encourage pas un sens particulier. Ils peuvent atteindre une hauteur de 100 mètres (Figure 2.13). Selon Derruau (1967), on appelle leurs bras zemoula et leurs teintes intermédiaires oued.

Les dunes en forme d'étoile sont constituées de minimum trois arêtes presque droites qui se rejoignent à un point culminant.

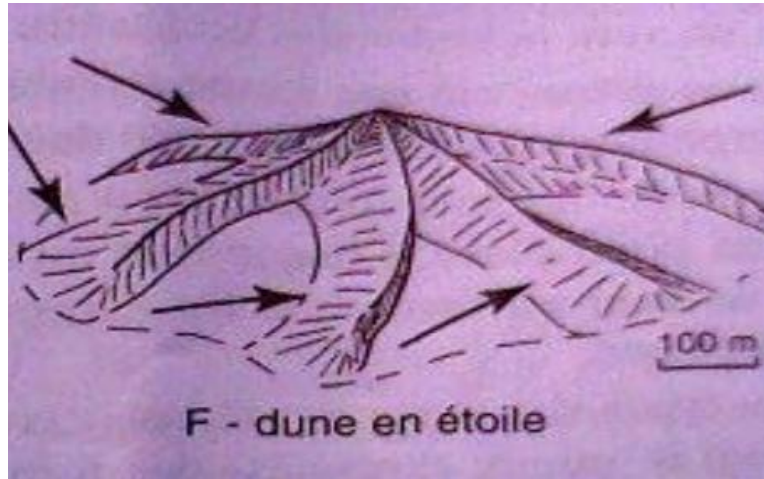


Figure 2.13 : Pyramides ou étoiles dunes. (Leghrieb Y, 2012)

2.3.9 Les différents milieux de la dune :

Les dunes sont composées de milieux différents, On distingue différents types de dunes :

2.3.9.1 Les dunes mobiles :

Les dunes « reliques » qui sont solidement ancrées par la végétation, telles que les dunes Grises (mousses, lichens, argousiers, etc.), se distinguent des dunes blanches non fixées ou à peine fixées par la végétation (oyats, chiendents des sables, etc.). (Balhachemi & Berrafa, 2017).

2.3.9.2 Les dunes noires (arbres) :

Ce sont des dunes fossiles recouvertes par des dépôts sédimentaires autres que le sable (Balhachemi & Berrafa, 2017) (Figure 2.14).



Figure 2.14 : Sable de dune noire

2.3.9.3 La dune verte (également connue sous le nom d'avant-dune ou de dune embryonnaire)

Végétation pionnière sur les dunes en formation ou à la base d'une dune mobile, composée de colonies clairsemées de psammophytes tels que le chiendent des sables, la Renouée maritime, le Pourpier de mer, la Soude brûlée, le Cakilier maritime, le Panicaut maritime, l'Euphorbe maritime et le liseron des dunes (Balhachemi & Berrafa, 2017).

Ces plantes favorisent l'envahissement par des champignons saprophytes et fixent le sable, conduisant à la création de monticules de sable nouvellement formés appelés nebkas. Cette dynamique peut entraîner son développement sous la forme d'une accumulation subhorizontale située à la base de la dune (banquette surélevée de quelques décimètres par rapport au sommet de la plage) (Balhachemi & Berrafa, 2017).

En général, cette dune est de caractère transitoire, qu'elle soit déplacée par les vagues de tempête ou qu'elle se transforme en une autre structure plus développée. La dune de limite est le point où l'emplacement des obstacles initiaux ne peut plus être déterminé. (Balhachemi & Berrafa, 2017) (Figure 2.15).



Figure 2.15 : Sable de dune verte

2.3.9.4. La dune blanche ou jaune :

C'est une portion de la dune côtière mouvante où pousse l'Oyat, une plante stabilisatrice qui peut prospérer sur un sol à faible salinité (maximum 2 %), et qui est couramment liée à d'autres espèces spasmophiles comme le Panicaud des dunes, l'Achillée maritime, la giroflée des dunes, le chou marin, le liseron des dunes et le gaillet des sables, sans omettre mentionner le Lis maritime. Cette région comprend un glacis externe ou une falaise de sable et un plateau de dunes, caractérisés par des formes de déflation (siffle-vent qui pourrait se transformer en couloir ou en plaque de déflation, Caoudeyre, d'une parabolique) ainsi que des zones d'accumulation significatives (tuc, poudrières).

La dune vive est précédée d'une dune semi-fixée, qui se distingue par une accumulation limitée de sables transportés par les vents (ceux-ci étant principalement arrêtés par la dune blanche) et l'expansion d'une végétation dense en nappe. (Balhachemi et Berrafa, 2017) (Figure 2.16).



Figure 2.16 : Sable de dune blanche

2.3.9.5. La dune grise :

Cette région de la dune qui se trouve sous le vent représente la pente interne de la dune blanche, où des végétaux herbacés fixateurs prennent place en succession aux espèces pionnières. Avec le temps, cela se transforme progressivement en une pelouse densément couverte de mousses et de lichens (associés à l'immortelle des dunes, à la linairé des sables, à la rose pimprenelle, à l'œillet des dunes, à l'ophrys passion (it), à la canche blanchâtre (en), à la luzerne marine, au raisin de mer, au chardon champêtre, au thym serpolet et aux orobanches) qui enrichit le sable en matière organique et humus.

On observe habituellement, à la fois dans cette dune et derrière elle, des dépressions naturelles ou créées par l'homme (par exemple, des étangs de chasse ou des sites d'extraction de sédiments) qui sont au moins temporairement connectées à la nappe phréatique. (Balhachemi & Berrafa, 2017) (Figure 2.17).



Figure 2.17 : Sable de dune grise

2.3.9.6 La dune brune (aussi appelée dune boisée ou frange forestière)

La pelouse est progressivement substituée par des prairies peuplées d'espèces pré-forestières (comme le saule des dunes et les rosier), puis par des buissons et fourrés (tels que l'ajonc et le prunellier), ainsi que des arbustes (espèces consolidatrices succédant aux fixatrices, comme l'argousier, l'églantier, le sureau, le troène...), pouvant même aboutir à un boisement littoral. (Balhachemi & Berrafa, 2017) (Figure 2.18).



Figure 2.18 : Sable de dune brune

2.4 REVUE DE LITTÉRATURE :

1. Valorisation de l'utilisation du tuf calcaire et du sable dunaire dans la conception des routes sahariennes (Valorization of the Use of Calcareous Tuff and Dune Sand in Saharan Road Design) (Cherrak et al., 2015)

-Objectif de l'étude

Cette étude cherche à valoriser l'emploi conjoint du tuf calcaire et du sable éolien par l'élaboration de mélanges aux proportions variables (0 à 35 % de sable), afin d'évaluer l'effet sur la plasticité, la compacité, la portance et la résistance mécanique dans le contexte des couches de chaussée.

-Matériaux et méthodologie

Des essais de granulométrie, limites d'Atterberg, Proctor modifié, CBR (non immergé et immergé) et résistance à la compression simple ont été effectués sur différentes compositions (0, 5, 15, 25 et 35 % de sable). Les propriétés physiques et chimiques du tuf et du sable de Ouargla ont été caractérisées au préalable.

-Résultats principaux

- L'ajout de sable diminue la teneur en eau optimale et augmente la densité sèche maximale jusqu'à une proportion d'environ 25 %.
- Le sable réduit la plasticité du matériau tout en améliorant le **CBR** et la résistance à la compression (Figure 2.20 et Figure 2.21).
- Les meilleures performances sont observées pour un mélange contenant environ 25 % de sable compacté à 96 % du Proctor modifié.

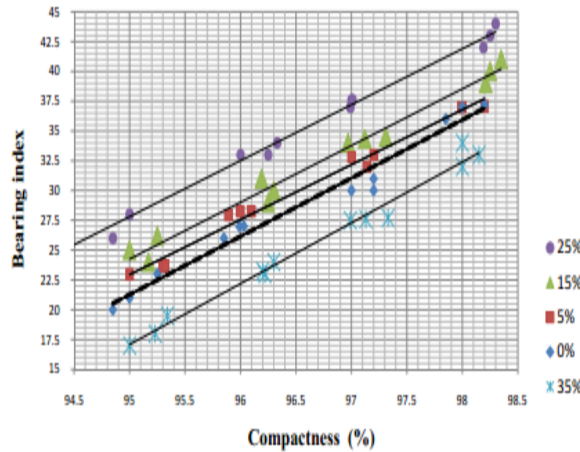


Figure 2.19 Évolution de l'indice de portance des mélanges en fonction de la compaction. (Cherrak et al., 2015)

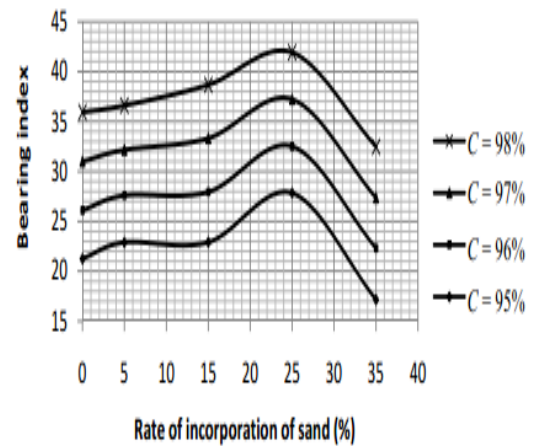


Figure 2.20 Influence du taux d'incorporation de sable sur l'indice de portance à différents degrés de compaction. (Cherrak et al., 2015)

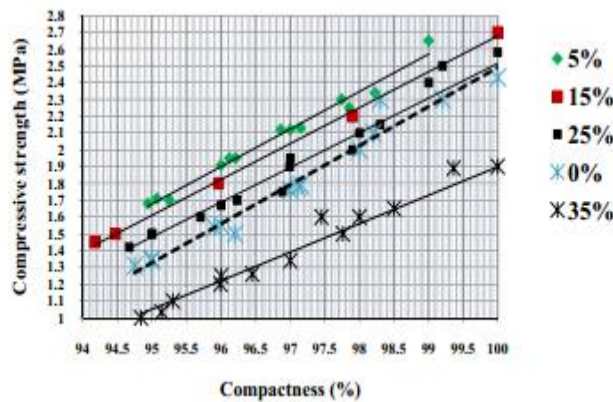


Figure. 2.21 Influence du degré de compactage sur la résistance à la compression. (Cherrak et al., 2015)

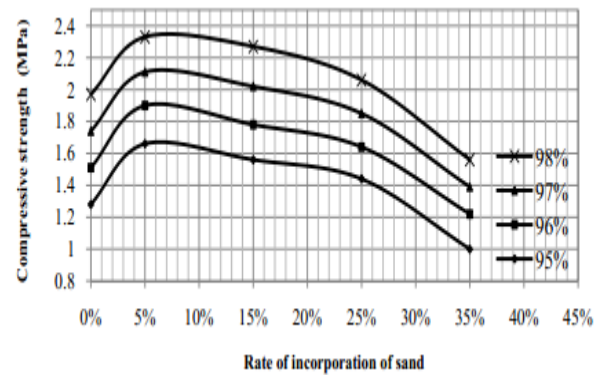


Figure. 2.22 Influence du taux d'ajout de sable sur la résistance à la compression pour différents degrés de compactage. (Cherrak et al., 2015)

-Apport scientifique

L'étude démontre qu'une proportion modérée de sable améliore la structure granulaire et réduit la sensibilité à l'eau des tufs calcaires, tout en maintenant une bonne portance. Elle fournit des équations empiriques reliant la teneur en sable aux paramètres mécaniques clés.

2. Comportement hydromécanique, des petites déformations jusqu'à la rupture, des tufs amendés par du sable dunaire – application à la conception des chaussées en zones sahariennes (Hydro-mechanical behavior from small strain to failure of tuffs amended with dune sand – application to pavements design in Saharan areas) (Daheur et al., 2021)

- Objectif de l'étude

Cette recherche vise à analyser le comportement hydromécanique d'un mélange composé de 65 % de tuf calcaire et 35 % de sable éolien (65T35DS), sous différentes conditions d'aspiration et d'humidité, depuis les déformations faibles jusqu'à la rupture, dans le but d'optimiser son utilisation dans la conception des chaussées en zones sahariennes.

- Matériaux et méthodologie

Préparation des échantillons selon l'essai Proctor Optimum modifié (MPO) et mesure de la succion initiale à l'aide de papier filtre.

Essais de traction-traction sous plafond de succion contrôlé (osmose et solution saline saturée), suivis d'essais triaxiaux à faibles déformations avec mesure du module d'élasticité par vélocimétrie des ondes longitudinales et capteurs de déformation.

Le tableau récapitule les propriétés géotechniques initiales du mélange (classification GC selon LPC/USCS), les Figures 2.20 illustrent les courbes de traction-traction standard.

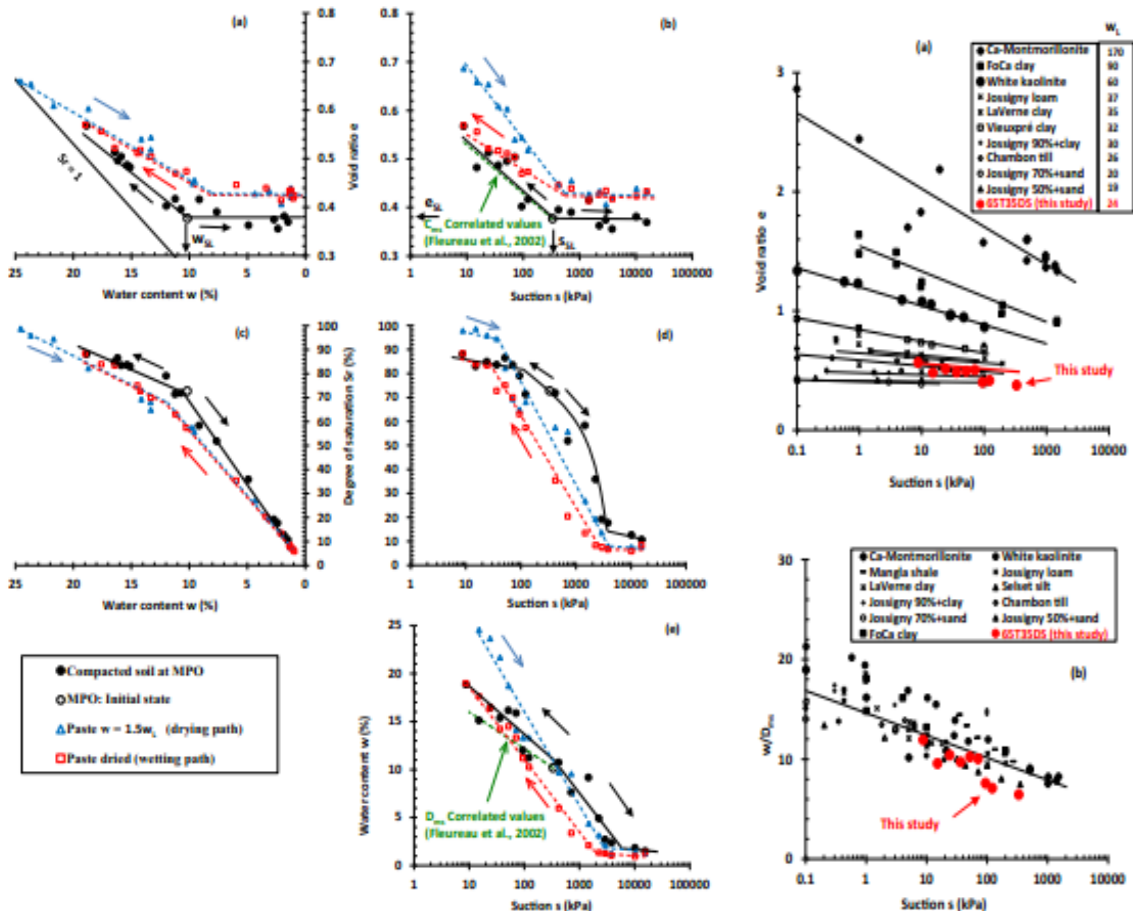


Figure. 2.23 Comportement hydromécanique du mélange 65T35DS sous cycles de séchage-humidification et positionnement sur les corrélations de Fleureau et al. (2002) (Daheur, 2021)

-Résultats principaux

- La rigidité du matériau augmente considérablement avec la succion : le module d'élasticité peut être multiplié par 10 selon le degré de saturation.
- L'effet de la succion est prédominant sur la cohésion apparente et la résistance au cisaillement.
- Le comportement montre une hystérèse marquée entre séchage et humidification.
- À la teneur en eau optimale (MPO), le matériau satisfait les exigences des structures routières sahariennes, en conservant une stabilité appréciable même en conditions très sèches.

-Apport scientifique : Cette étude propose un cadre expérimental permettant de relier les variables hydriques (succion et teneur en eau) aux propriétés mécaniques, et offre des relations pratiques pour prédire **E**, **ϕ** et **c** en fonction de l'état hydrique des mélanges tuf-sable utilisés dans les routes désertiques.

3. Étude des propriétés mécaniques d'un mélange de tuf gypseux et de sable dunaire en vue de son utilisation dans la construction routière saharienne (Study of the Mechanical Properties of Gypsum Tuff – Dune Sand Mixture for Use in Saharan Road Construction) (Khellou et al., 2021)

-Objectif de l'étude

L'objectif de cette recherche est de réduire la dépendance au **tuf gypseux**, abondant mais sensible à l'eau, en le combinant avec du **sable éolien** (10–30 %) pour améliorer ses performances en couches de fondation routière.

-Matériaux et méthodologie

Des mélanges GT-DS (90/10, 80/20, 70/30) ont été élaborés et testés selon le Proctor modifié, le CBR (immédiat et après immersion) et la résistance à la compression simple, conformément aux normes françaises et algériennes.

-Résultats principaux

- L'ajout de sable accroît la densité sèche maximale et diminue la teneur en eau optimale jusqu'à 30 %.
- Le CBR s'améliore sensiblement jusqu'à environ 20 % de sable, puis diminue légèrement au-delà (figures 2.26).
- La résistance à la compression montre une légère baisse après 28 jours, ce qui justifie l'ajout ultérieur d'un traitement à la chaux pour améliorer la durabilité (figures 2.27).

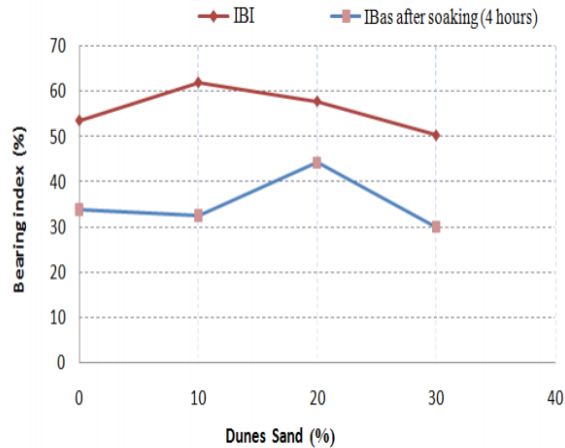


Figure. 2.24 Variation de l'indice de portance des mélanges (GT-DS) en fonction du pourcentage de DS incorporé

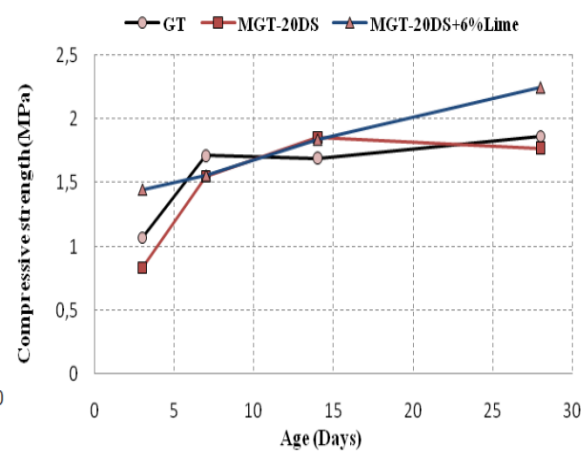


Figure. 2.25 Évolution de la résistance à la compression du MGT-20DS, du MGT-20DS traité avec 6 % de chaux et du GT seul en fonction de l'âge

-Apport scientifique

Cette étude met en évidence la faisabilité technique du mélange tuf gypseux–sable éolien, tout en recommandant l'incorporation de la chaux pour stabiliser la microstructure et renforcer la résistance mécanique à long terme.

4. Étude de l'effet de l'ajout de sable dunaire au tuf sur une route saharienne (Study of the Effect of Adding Dune Sand to Tuff in Saharan Road Construction) (Akacem et al., 2022)

-Objectif de l'étude

Analyser l'effet de l'ajout de sable éolien (10–40 %) au tuf calcaire d'Adrar sur la compacité, la portance (CBR) et la résistance à la compression, avec une évaluation complémentaire de l'impact d'un faible pourcentage de ciment comme stabilisant.

-Matériaux et méthodologie

Des essais Proctor modifié, CBR et compression simple ont été réalisés sur plusieurs compositions, en parallèle avec des analyses de limites d'Atterberg et de valeur au bleu (VB). Les courbes Proctor et les résultats mécaniques ont été présentés graphiquement.

-Résultats principaux

- L'ajout de sable augmente la densité sèche maximale et réduit la teneur en eau optimale jusqu'à environ 20 %.
- Le CBR s'améliore significativement jusqu'à 20–35 % de sable, en raison d'une meilleure compaction et d'un remplissage des vides (Figure 2.28).

- La plasticité et la teneur en fines diminuent, ce qui améliore la stabilité mécanique et la résistance à l'eau.
- Le traitement du tuf seul et du mélange tuf + 20 % de sable éolien avec 2 à 4 % de ciment montre une nette amélioration de la résistance à la compression.
- Pour le tuf d'Adrar, la résistance passe de 5 à 20 bars, indiquant qu'un **dosage optimal de 4 % de ciment** est le plus efficace (Figure 2.29, 2.30).
- Le mélange tuf-sable présente également un gain similaire, confirmant l'intérêt du traitement cimentaire pour ces matériaux sahariens.

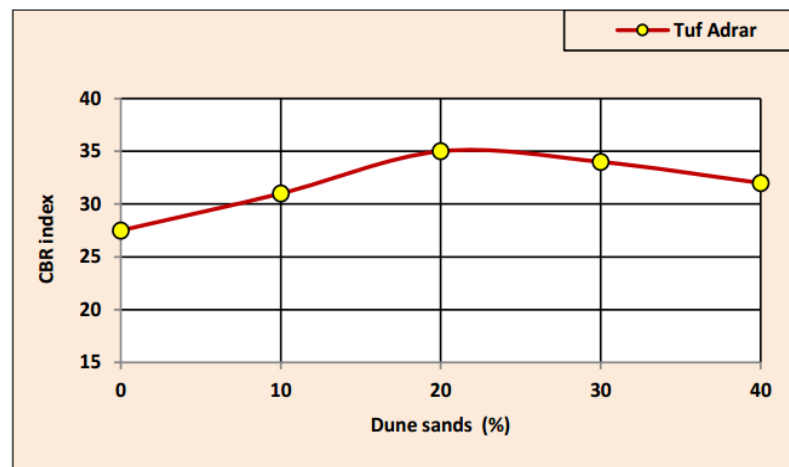


Figure 2.26 Effet de l'incorporation de sable dunaire sur la capacité portante des différents mélanges. (Akacem et al., 2022)

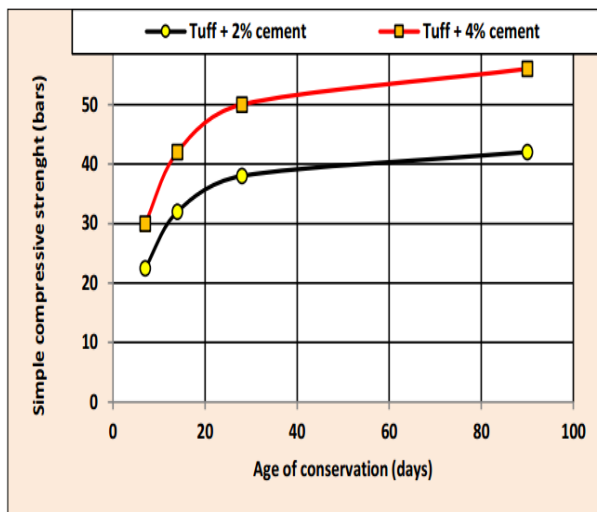


Figure 2.27. Résistance à la compression du tuf de la région d'Adrar traité au ciment. (Akacem et al., 2022)

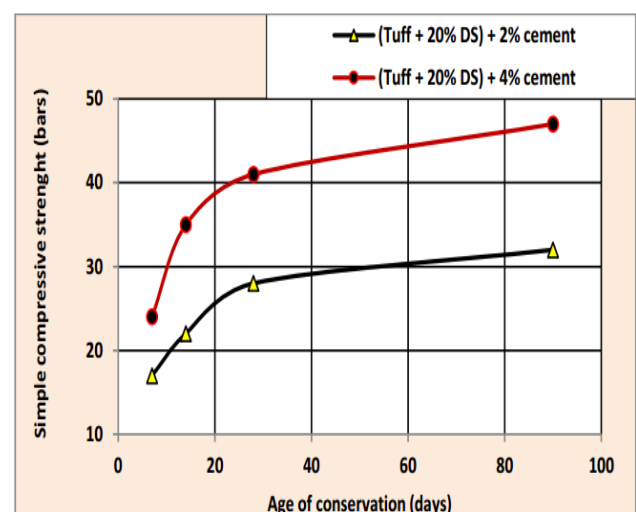


Figure 2.28. Résistance à la compression (tuf + 20 % de sable dunaire) traité au ciment. (Akacem et al., 2022)

-Apport scientifique

L'étude met en évidence la pertinence d'une proportion d'environ **20 % de sable** pour optimiser simultanément la portance et la compacité, tout en réduisant la sensibilité hydrique. Elle ouvre la voie à une éventuelle stabilisation légère au ciment pour accroître la durabilité des couches de base routières.

5. Optimisation d'un matériau de mélange à base de sable dunaire pour la conception des chaussées (Optimization of dune sand-based mixture material for pavement design) (Moulay Omar et al., 2022)

-Objectif de l'étude

Cette recherche a pour but d'optimiser les formulations de mélanges basés sur le **sable éolien** combiné avec le **tuf et des déchets de carrière**, à l'aide d'une approche statistique de **plan d'expériences (Design of Experiments – DOE)**, pour répondre aux exigences de résistance et de granulométrie des matériaux routiers en climat aride.

-Matériaux et méthodes

- Définition des gammes de composition : sable 30–73 %, tuf 10–50 %, résidus de carrière 10–30 %, eau 7–9 % (tableau 3).
- Mise en œuvre de 51 formulations sélectionnées à l'aide de l'algorithme D-optimal (tableau 4) et analyse de la résistance à la compression uniaxiale (UCS) dans des conditions de compactage/séchage contrôlées ; construction de modèles quadratiques pour l'UCS, C_u et C_c avec validation par ANOVA (R^2_{adj} et $Q^2 > 0,95$).

-Principaux résultats

- Le plan d'expériences a permis d'identifier des gammes de composition atteignant une UCS jusqu'à environ 4,3 MPa dans la plage expérimentale, cette dépendance s'étendant aux matériaux à faible granulométrie avec une teneur en sable atteignant environ 54,5 % lorsque le critère d'UCS est appliqué.
- Formulation optimale proposée : environ 46 % de sable dunaire, 36 % de tuf, 11 % de déchets de carrière et 7 % d'eau – conforme aux recommandations de conception pour les chaussées désertiques (figures 2.24 et 2.25).
- L'analyse statistique démontre la fiabilité des modèles (tableaux ANOVA et indice Q^2) et l'efficacité de la méthode DOE pour optimiser le compromis entre résistance et granulométrie (tableau 9).

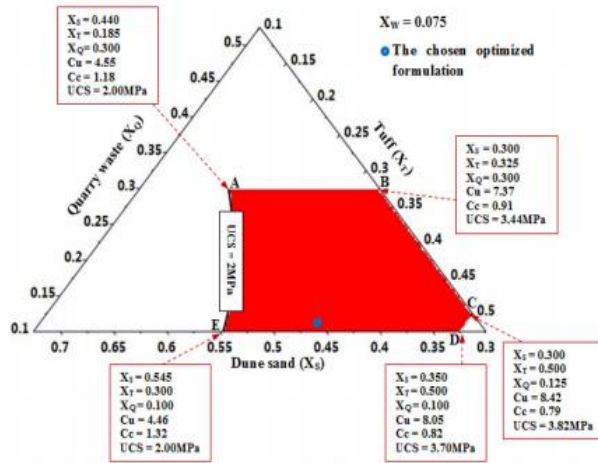


Figure 2.29 Domaine des formulations validant UCS 2 MPa. (Moulay Omar et al., 2022)

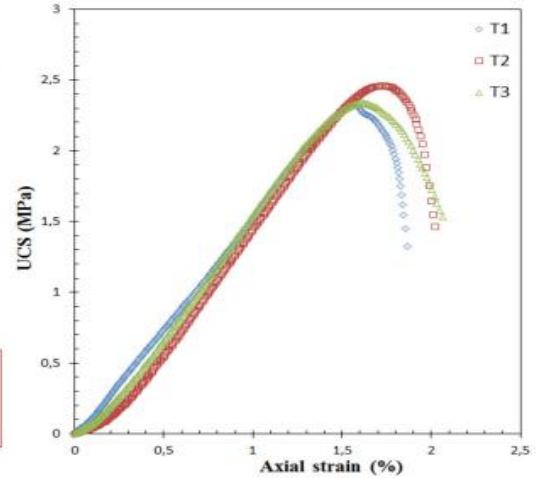


Figure 2.30 Courbes contrainte-déformation de la formulation optimale. (Moulay Omar et al., 2022)

Tableau 2.10 Données expérimentales pour les trois tests (T1, T2 et T3) réalisés avec la formulation optimisée ($X_S = 0,46$, $X_T = 0,355$, $X_Q = 0,11$, $X_W = 0,075$) ; statistiques sur les données expérimentales et les valeurs prédites pour UCS, Cu et Cc.

Tableau 2.10 Données expérimentales pour les trois tests (T1, T2 et T3) (Moulay Omar et al., 2022).

Essai	UCS (MPa)				Coefficient d'uniformité (Cu)		Coefficient de courbure (Cc)	
	Exp	Valeur moyenne	Standard deviation	Écart-type	Exp	Écart-type	Exp	Écart-type
T1	2.32	2.37	0.062	2.62	5.13	5.14	1.12	1.13
T2	2.46	—	—	—	—	—	—	—
T3	2.34	—	—	—	—	—	—	—

-Apport scientifique : L'étude met en avant l'intérêt du DOE pour optimiser les matériaux locaux en fonction de contraintes mécaniques et granulométriques. Elle offre un outil de prédiction utile pour la conception rationnelle de chaussées à faible coût en milieu désertique.

Tableau 2.11 Résumé d'une revue de la littérature portant sur certaines études antérieures

Article	Objectif	Méthodologie	Résultats	Apport scientifique
1. Valorisation de l'utilisation du tuf calcaire et du sable dunaire dans la conception des routes sahariennes (2015)	Valoriser le tuf calcaire par ajout progressif de sable (0–35 %) pour améliorer la compacité, réduire la plasticité et renforcer la portance (CBR).	Essais granulométriques, limites d'Atterberg, Proctor modifié, CBR (sec et immergé), résistance à la compression sur différents pourcentages de sable.	Diminution de la teneur en eau optimale et augmentation de la densité sèche maximale jusqu'à 25 % de sable ; amélioration notable du CBR et de la résistance à la compression.	Mise en évidence du rôle correcteur du sable sur la granulométrie et la plasticité ; proposition de proportion optimale (≈ 25 %) pour les couches de fondation.
2. Comportement hydromécanique, des petites déformations jusqu'à la rupture, des tufs amendés par du sable dunaire – application à la conception des chaussées en zones sahariennes (2021)	Étudier le comportement hydromécanique d'un mélange de tuf (65 %) et de sable éolien (35 %) soumis à différentes conditions de succion et d'humidité afin d'évaluer son aptitude aux chaussées sahariennes.	Échantillons compactés à l'optimum Proctor modifié, essais de séchage-humidification à succion contrôlée, essais triaxiaux et mesures de déformation à petites contraintes.	Rigidité fortement influencée par la succion (E multiplié par 10 selon la saturation) ; hystérèse entre séchage et humidification ; stabilité satisfaisante à l'état sec.	Cadre expérimental reliant succion et comportement mécanique des mélanges tuf–sable ; relations empiriques pour E, ϕ , c en fonction de l'état hydrique.
3. Étude des propriétés mécaniques d'un mélange de tuf gypseux et de sable dunaire en vue de son utilisation dans la construction routière saharienne (2021)	Réduire la dépendance au tuf gypseux en le combinant avec du sable (10–30 %) pour améliorer ses propriétés mécaniques et sa durabilité en chaussées.	Mélanges GT–DS (90/10, 80/20, 70/30) testés selon Proctor modifié, CBR (immédiat et après immersion) et résistance à la compression simple.	Densité sèche maximale accrue, teneur en eau réduite ; CBR optimal à ≈ 20 % sable ; légère baisse de la résistance à 28 j compensée par traitement à la chaux.	Validation expérimentale de la co-valorisation tuf gypseux–sable ; recommandation de stabilisation à la chaux pour renforcer la durabilité mécanique.

Suite du tableau 2.11

4. Étude de l'effet de l'ajout de sable dunaire au tuf sur une route saharienne (2022)	Examiner l'effet de l'ajout de sable (10–40 %) au tuf calcaire d'Adrar sur la compacité, la portance (CBR) et la résistance à la compression.	Essais Proctor modifié, CBR, compression simple, limites d'Atterberg et valeur au bleu sur plusieurs mélanges ; observation des courbes de compaction et de performance.	Augmentation de la densité sèche maximale et diminution de w_{opt} jusqu'à 20 % sable ; CBR accru (20–35 %) ; baisse de la plasticité et meilleure stabilité hydrique.	Définition d'un taux optimal d'environ 20 % de sable ; amélioration simultanée de la compacité et de la portance ; proposition d'une stabilisation légère au ciment pour la durabilité.
5.Optimisation d'un matériau de mélange à base de sable dunaire pour la conception des chaussées (2022)	Optimiser les formulations de mélanges sable–tuf–déchets de carrière–eau pour satisfaire les critères de résistance (UCS) et de granulométrie (C_u , C_c).	Utilisation du Design of Experiments (DOE) avec 51 compositions testées ; analyses UCS et paramètres granulométriques modélisés par équations polynomiales (ANOVA).	Résistance UCS maximale $\approx 4,3$ MPa ; formulation optimale : 46 % sable, 36 % tuf, 11 % résidus de carrière, 7 % eau ; modèles prédictifs fiables ($R^2 > 0,95$).	Démonstration de l'efficacité du DOE pour la mise au point rationnelle de matériaux locaux ; outils de prédiction pratiques pour la conception d'infrastructures routières durables.

2.5 Conclusion

L'étude conjointe du tuf et du sable éolien met en évidence la complémentarité remarquable de leurs propriétés. Le tuf, matériau carbonaté ou gypseux, offre une bonne résistance et une cohésion appréciable, tandis que le sable, propre et bien classé, contribue à améliorer la densité sèche et la stabilité du mélange (Boukezzi, 1997; Cissé et al., 2010).

Leur combinaison judicieuse permet d'obtenir un matériau présentant à la fois une portance élevée, une faible sensibilité à l'eau et une meilleure aptitude au compactage (Cherrak et al., 2015; CTPP, 2001). Les recherches menées en Afrique du Nord et au Sahel confirment qu'une proportion

modérée de sable (environ 20 à 30 %) intégrée au tuf donne les meilleures performances mécaniques (Daheur et al., 2021; Paute et al., 1994).

Ainsi, le mélange tuf-sable éolien constitue une solution technique rationnelle pour la construction routière dans les zones arides, répondant à la fois aux impératifs de durabilité, de disponibilité locale et de réduction des coûts. Cette approche s'inscrit pleinement dans une démarche de valorisation des matériaux naturels et de développement durable des infrastructures sahariennes.

Chapitre 3 :

Caractérisation des matériaux

Chapitre 3 : CARACTERISATION DES MATERIAUX**3.1-INTRODUCTION :**

Ce chapitre se consacre essentiellement à la détermination du matériau de base. Les caractéristiques physico-mécaniques et chimiques sont établies par l'intermédiaire de tests standardisés effectués dans les laboratoires des travaux publics en Algérie, avec une adaptation spécifique pour prendre en compte l'environnement saharien.

Cette caractérisation repose sur l'identification 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 critères majeurs pour définir le type de matériau ;
- les spécificités du Proctor (taux d'humidité optimal et densité sèche maximale) ;
- l'indice CBR.

La caractérisation des autres matériaux et produits utilisés est réalisée de façon sommaire en fonction des moyens à disposition.

3.2-TUF CALCAIRE :

Le tuf calcaire (figure 3.1) est un type de tuf d'encroûtement. Il est extrait d'un gisement qui se trouve dans la wilaya d'Adrar, à environ 1 500 kilomètres au sud-ouest d'Alger.



Figure. 3.1 Tuf Oued Zin

Le tuf étudié (Figure. 3.1) a été extrait d'une carrière située à 11 km de l'Université Ahmed Draïa dans la région d'Adrar, en direction d'Oued Zin à droite, comme illustré à la Figure 3.2.



Figure. 3.2 Localisation de Carrière de tuf oued Zin

3.3 CARACTERISATION GEOTECHNIQUE :

3.3.1. ANALYSES CHIMIQUES SOMMAIRES :

Elle est réalisée à la base des normes NF P15-461, BS 1377 et NF P94-048, pour la détermination des taux d'insoluble (le quartz principalement), du taux de gypse, du taux de carbonate et de la teneur en sels. Ils sont effectués sur la base des normes NF P15-461.

Selon le tableau 4.1, l'analyse chimique du tuf a montré que le carbonate de calcium (CaCO_3) prédominait et constituait plus de 50 % du matériau. Les caractéristiques du tuf bénéficient de cette forte teneur en carbonate de calcium.

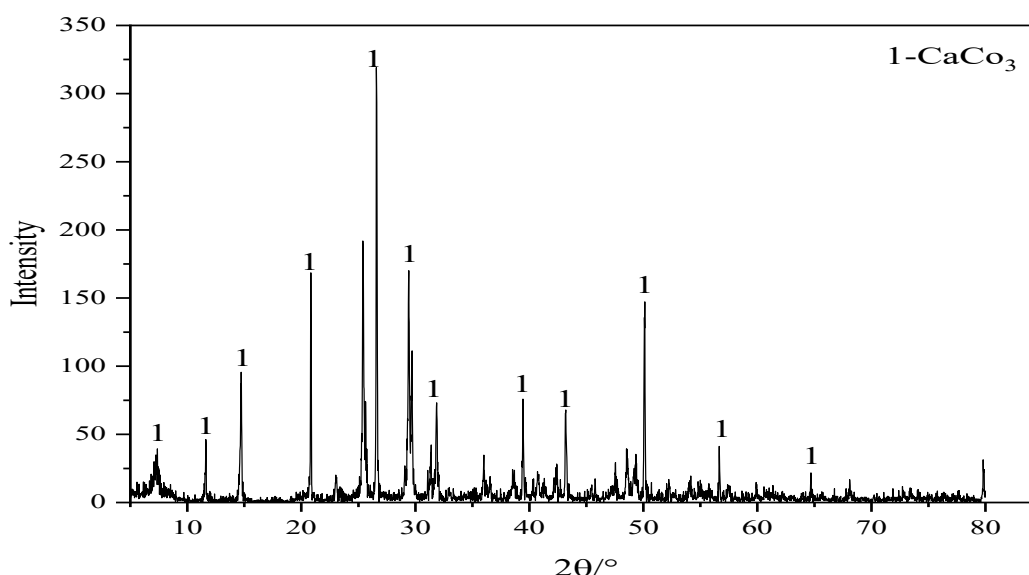
La technique de diffractométrie des rayons X fournit des renseignements précis sur la composition et la structure cristalline des substances. On peut envisager, fait que les matériaux cristallins se présentent comme des regroupements de plans d'atomes.

Qu'on appelle plans réticulaires. Les distances interréticulaires d représentent des propriétés qui distinguent ces plans. Quand un matériau cristallin est exposé à un faisceau de rayons X monochromatiques parallèles, ses couches atomiques servent de réseau tridimensionnel. Le rayonnement X subit une diffraction à des angles précis en fonction des distances entre les réseaux. Le processus de diffusion des rayons X par les cristaux est le fruit d'un processus combiné de diffusion, d'interférence et de la loi de Bragg. Pendant l'analyse par diffraction sur la surface exposée du matériau, les rayons X diffractés sont recueillis grâce à un détecteur de rayons X (figure 3. 3). Le diffractogramme du matériau analysé est obtenu à partir du signal capté. Les distances interréticulaires des diverses familles de plans cristallins qui composent les phases présentes dans le matériau peuvent être calculées en utilisant la loi de Bragg et en mesurant les angles associés aux sommets de diffraction. Cela permet de définir la structure cristallographique du matériau.

Les résultats de l'analyse DRX (figure 3.3) montrent que le tuf contient un pourcentage élevé de carbonate de calcium (CaCO_3). Ceci concorde avec les résultats du tableau 3.1.

Tableau 3.1. Résumé des résultats d'analyse chimique

Echantillons	Carbonate de Calcium% (CaCO ₃)	Sulfate (mg/kg)	Chlure (%)	L'insolubles (%)
Tuf Oued Zin	53,7	27634	0,43	43,11

**Figure 3.3.** Diffraction des rayons X de tuf de l'Oued Zin

3.3.2 ANALYSE GRANULOMETRIQUE

L'analyse granulométrique, réalisée conformément à la norme NF P 94-056 (AFNOR, 1992), évalue la distribution granulométrique et les pourcentages massiques des différentes fractions granulaires de l'échantillon. La figure 3.4 montre que la majeure partie du tuf appartient à la deuxième famille selon le mandrin saharien de Beni Abbès, ce qui le classe comme un matériau de classe II, c'est-à-dire qu'il ressemble à du gravier non traité.

Le tuf étudié est composé d'environ 43 % de fraction sableuse (< 2 mm) et 21 % de fraction fine (< 0,80 mm).

La courbe indique $D_{60} = 17$, $D_{30} = 0,3$ et $D_{10} = 0,003$.

$C_u = 17 / 0,003 = 5666,66$; $C_c = (0,3 \times 0,3) / (17 \times 0,003) = 1,76$. Nous en concluons que la distribution granulométrique est bien graduée. D'après les résultats des tests présentés dans le tableau 3.2 et les classifications du GTR, de la norme NF P 94 11-300 et du Système uniforme de classification des sols (USCS), le tuf d'Oued Zin est classé par le GTR comme un sol grossier et fin (C1A2ts). Dans le système USCS, il est classé comme une argile graveleuse (GM).

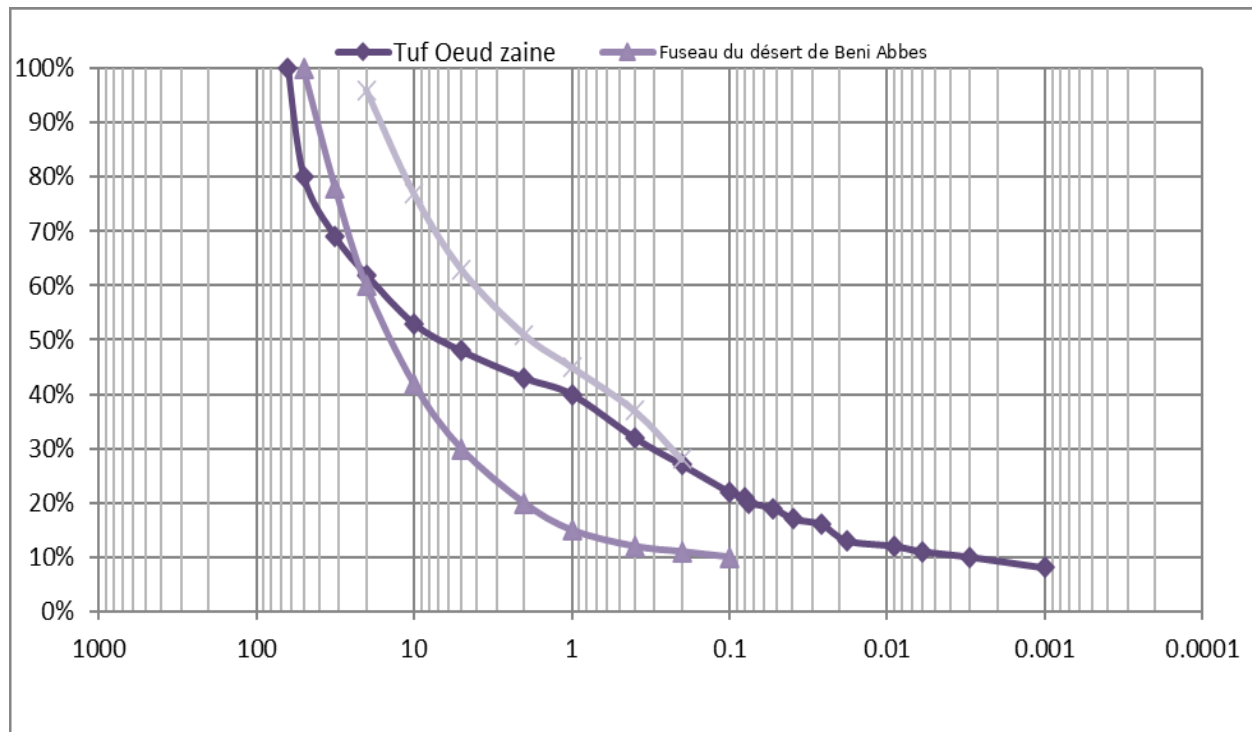


Figure. 3.4. Courbes de distribution granulométrique du tuf

Tableau 3.2. Paramètres géotechniques.

Paramètre	Tuf	Brique d'adobe	Unité
Grains < 80 µm	21	09	%
Grains < 2 mm	43	88	%
Limite de liquidité (WL)	35,1	19,97	%
Limite de plasticité (Wp)	25,7	16,67	%
Indice de plasticité (Ip)	9,4	3,3	%

Suite du tableau 3.2

γ_{apa}	17,1	14,67	kN/m ³
γ_{abs}	25,15	25,6	kN/m ³
Équivalent de sable	12,62	7,62	%
γ_d OPM modifié	19,1	20,3	kN/m ³
WOPM modifié	9,96	9,5	%
ICBR	67,94	/	%
Résistance à la compression simple à 28 jours	37, 42	/	bars (kg/cm ²)
Valeur du bleu de méthylène	0,4	1,6	-

3.3.3 QUALITE DES FINES

Les fines argileuses sont principalement problématiques : une quantité excessive d'argile rendra le matériau vulnérable à l'eau et susceptible de subir des déformations permanentes avec le trafic. L'évaluation de leur qualité se fait sur la base des limites d'Atterberg, Valeur du bleu de méthylène et du test équivalent au sable.

3.3.3.1 LIMITES D'ATTERBERG

Les constituants de moins de 400 μm présents dans un sol sont identifiés à l'aide des limites d'Atterberg et de l'indice de plasticité, conformément aux standards NFP 94-051 et NFP 94-054. Les limites d'Atterberg représentent des teneurs en eau associées à des états spécifiques d'un sol. On fait la distinction entre :

- Limite de liquidité (WL) : c'est la quantité d'eau présente dans un sol altéré à l'intersection des phases liquide et plastique. Elle est déterminée expérimentalement à l'aide de l'instrument de Casagrande conformément à la norme [NF P 094 051].
- Limite de plasticité (WP) : il s'agit de la quantité d'eau présente dans un sol modifié à l'étape de transition entre les états plastique et solide. Elle est expérimentalement déterminée en utilisant la technique du rouleau conformément à la norme [NF P 094 051].
- Indice de plasticité (I_p) : c'est la zone située entre les états liquide et plastique. Il est défini par l'écart entre la limite de liquidité et la limite de plasticité : $I_p = WL - WP$.

Les données recueillies (tableau 3.2) indiquent que notre matériau présente une limite de liquidité approximativement de 35,1 %, et une limite de plasticité de 25,7, ce qui donne un indice de plasticité de 9,4. Selon le tableau 3.3, notre matériau présente une faible teneur en argile.

Tableau 3.3 – Classification des sols en fonction de l'indice de plasticité (SETRA-LCPC 1992).

Indice de plasticité	Caractéristique
$I_p \leq 12$	Faiblement argileux
$12 < I_p \leq 25$	Moyennement argileux
$25 < I_p \leq 40$	Argileux
$I_p > 40$	Très argileux

3.3.3.2 ESSAI AU BLEU DE METHYLENE :

L'épreuve au bleu de méthylène (NF P94-068) sert à déterminer la réactivité de la fraction argileuse (inférieure à 2 μm) contenue dans un matériau en évaluant la capacité des particules fines à retenir le bleu de méthylène.

Cette expérience vise à incorporer graduellement du bleu de méthylène dans une suspension de matière que l'on maintient en mouvement. Nous prélevons régulièrement une goutte de la suspension à l'aide d'une tige en verre et la plaçons sur un papier filtre. Dès l'apparition d'une auréole bleue autour de la tâche, on estime que l'absorption du bleu de méthylène par les particules d'argile est achevée. 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 :

$$VBS = \frac{\text{volume de bleu de mythlène (cm3)}}{\text{masse sèche de la prise d'essai (gr)}}$$

Connaissant la valeur du bleu déterminée sur l'une des fractions les plus fines 0/d, on peut calculer celle de la fraction globale 0/D, selon la formule suivante :

$$VBS_{(0/D)} = VBS_{(0/d)} \cdot \frac{Cd}{100}$$

Où :

$VBS_{(0/D)}$: valeur du bleu du sol

$VBS_{(0/d)}$: valeur du bleu de la fraction 0/2

Cd : proportion de 0/d dans la fraction total 0/D.

Concernant notre matériau, une VBS de 0,4 a été obtenue. Selon le GTR 1992, le matériau est placé dans la catégorie des sols limoneux (Figure 3.5)

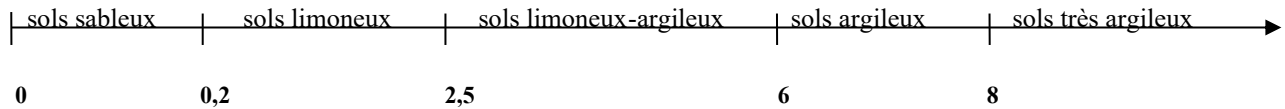


Figure 3.5 : Classification des matériaux en fonction de VBS

3.3.3.3 EQUIVALENT DE SABLE (ES) [Nf P 18 – 598]

L'analyse est réalisée sur la fraction granulométrique qui passe à travers une maille de 5 mm. Cela consiste à insérer dans un tube contenant un agent flocculant la fraction de 0 à 5 mm du matériau en question. Ensuite, après un mélange mécanique de 20 minutes, l'éprouvette est mise en position verticale, sans aucune perturbation, afin de permettre la décantation. Pour finir, nous procédons à l'évaluation de la hauteur du sédiment « h₁ » et celle du flocculant « h₂ ».

La formule suivante donne le coefficient ES : $ES = \frac{h_2}{h_1} \cdot 100$

Les valeurs que l'on obtient varient entre 0 et 100 et ne représentent pas une mesure directe de la quantité d'argile, mais fournissent une valeur empirique.

Par exemple :

- Pour une valeur de 100, le matériau est très propre. Cet essai perd sa pertinence si la valeur est inférieure à 20.

Ce test concerne les matériaux routiers faiblement plastiques qui contiennent une faible proportion d'éléments fins.

Pour le tuf de Bechar, il est identique à : ES= 12,62%.

Ce résultat n'a aucune importance, il laisse penser qu'il y a une proportion assez importante d'argile, ce qui reste incertain. Parce qu'une proportion des calcaires fins, dont la teneur est significative, sera emprisonnée dans le flocculant, les assimilant à des argiles. Cela entraîne la formation d'un flocculant plus conséquent et un faible coefficient E.S.

3.3.4 LES ESSAIS DE COMPACTAGE ET DE PORTANCE

3.3.4.1 ESSAIS PROCTOR MODIFIÉ [NF P 94- 093]

Le principe fondamental réside dans le fait que lorsque l'on procède à la compaction d'un sol avec une intensité uniforme, mais en variant les niveaux d'humidité, il est généralement constaté que la densité sèche γ_d atteint un maximum.

Au départ, l'objectif était de déterminer la capacité de compactage des sols fins dans le cadre de grands terrassements.

L'élargissement de l'application aux sols routiers a requis la conduite de tests utilisant des énergies de compactage plus élevées. Par conséquent, l'emploi de matériaux présentant une granulométrie plus élevée a engendré la nécessité de concevoir des dimensions de moules d'essai plus adéquates pour ces granulométries accrues.

Les raisons fondamentales justifiant la distinction entre les deux essais (figure 3.6) sont les suivantes :

* L'Essai Proctor normal (PN), qui recourt à l'utilisation du moule Proctor ($\phi = 101,5$).

* L'Essai Proctor modifié (PM), basé sur l'utilisation du moule CBR ($\phi = 152$ mm).



Figure 3.6 Outils utilisés dans l'essai Proctor

On a généralement recours à l'épreuve standard pour la masse de remblai.

Nous appliquons le proctor modifié pour les couches de formes ainsi que pour les couches de revêtement routier. Dans le cadre de notre étude axée sur l'utilisation du tuf comme matériau de revêtement routier, nous avons effectué le test Proctor modifié.

Graphiquement, la courbe Proctor illustre l'évolution de la densité sèche γ_d en lien avec le taux d'humidité, et elle sert à déterminer le taux d'humidité idéal qui fournit la densité sèche maximale. Le graphique Proctor modifié de notre échantillon montre une courbe plutôt aplatie (figure 3.7), ce qui indique que la densité à sec est peu réactive au contenu en eau.

Les caractéristiques de compactage obtenues sont : un taux d'humidité optimal de 9,8 % et une densité sèche maximale de 1,91 g/cm³.

Dans de multiples contextes, les densités OPM oscillent entre 1,7 et 2 t/m³, tandis que les niveaux d'humidité fluctuent de 8 à 15 %. C'est environ exact pour notre matériau.

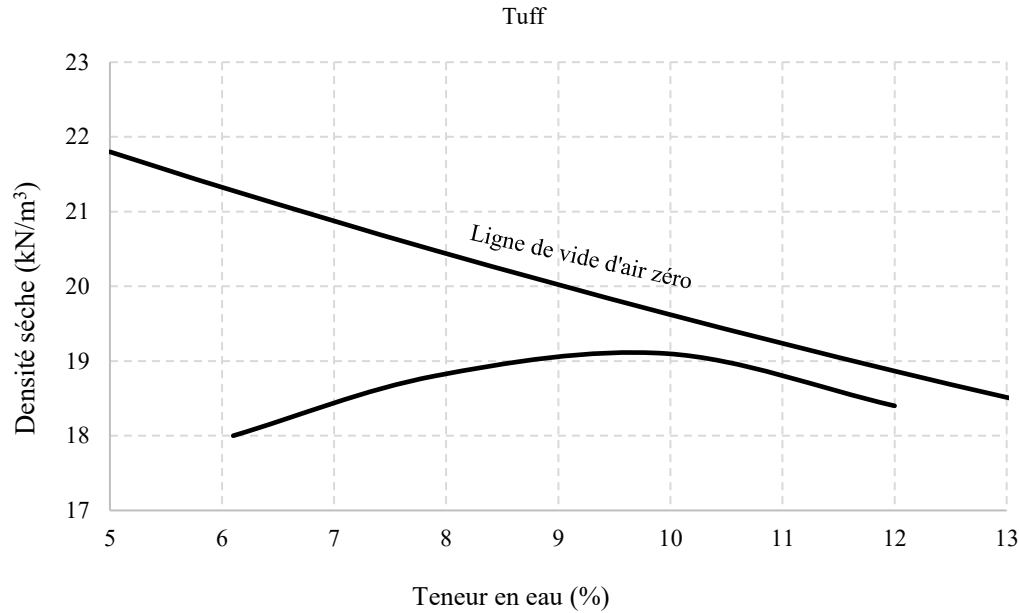


Figure 3.7: Courbe Proctor du tuf Oued zin.

3.3.4.2 ESSAI CBR

L'indice CBR est évalué en laboratoire conformément à la norme NF EN 13286-2 (Standard AFNOR, 2010). L'indice CBR (ICBR) sert à déterminer l'épaisseur des couches qui composent le corps d'une chaussée. On le définit dès la fin du compactage ou après une immersion de quatre jours.



Figure 3.8 Appareil CBR

Le test implique le poinçonnage dans le moule CBR d'échantillons compactés avec une énergie de compactage de 55 coups par couche, à des niveaux d'humidité correspondant au pic du test Proctor modifié (figure 3.8). On trace ensuite les courbes illustrant la variation de pression exercée par le piston en fonction de sa progression dans l'échantillon à une vitesse de 1,27 mm/min. L'indice CBR correspond à la plus grande valeur entre les contraintes d'enfoncement de 2.5mm et 5mm, soit $\text{Max } \{P(2.5) / 0.70 ; P(5) / 1.05\}$.

Tableau 3.4. Résultats de l'essai CBR immédiat du tuf

Enfoncement	Lecture	Lecture corrigée	Force (kg)	pression (kg/cm ²)
0.625	0.045	1.0125	103.275	5.262420382
1.25	0.11	2.475	252.45	12.86369427
2	0.24	5.4	550.8	28.06624204
2.5	0.3	6.75	688.5	35.08280255
5	0.61	13.725	1399.95	71.33503185
7.5	0.89	20.025	2042.55	104.0789809
10	1.12	25.2	2570.4	130.9757962
12.5	1.35	30.375	3098.25	157.8726115

D'après le tableau 3.4 ICBR est la plus grande des deux valeurs suivantes :

$$\frac{\text{Pression à 2.5 mm d'enfoncement}}{0,7} = 50,12$$

$$\frac{\text{Pression à 5 mm d'enfoncement}}{1,05} = 67,94$$

La valeur CBR (CBR= 67,94) montre que le tuf répond aux recommandations liées à la portance des chaussées.

3.3.5 RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE (RC)

En 1957, Fenzy a de façon empirique mis en place ce test dans l'objectif d'apprécier la cohésion des matériaux locaux exposés à des conditions de sécheresse. L'objectif de la recherche est de suivre l'évolution du phénomène de renforcement au cours du temps, aussi appelé auto-stabilisation (Netterberg, 1975).

Le test est réalisé sur des échantillons constitués de matériaux ne dépassant pas 5 mm de diamètre, comprimés en fonction du degré d'humidité optimal et de la densité sèche maximale établie par le test Proctor modifié.

Voici comment se déroule la procédure de préparation des échantillons : L'eau est régulièrement intégrée aux matières presque sèches (séchage en four à 105 °C). Lors de la création de l'échantillon, une attention particulière est portée à la formation des agglomérats (état du tuf). Donc, nous avons effectué un malaxage manuel en plusieurs phases grâce à un criblage utilisant un tamis de 5 mm de diamètre pour parvenir à une combinaison homogène. Selon la norme NF P 98-230-2, l'agglomérat est comprimé de manière statique dans un moule cylindrique à piston double (illustration 3.9), ayant un diamètre de 50 mm et une hauteur de 100 mm. Les éprouvettes qui ont été extraites du moule sont mises à sécher à l'air libre pendant une durée de 3, 7, 14 et 28 jours.



Figure 3.9 Moule de compression simple.

-Procédure d'expérimentation.

À la suite de chaque période de conservation, les tubes sont exposés à une force de compression exercée parallèlement à l'axe du cylindre, avec une vitesse de 1,14 mm/min jusqu'à leur rupture (figure 3.10). Lisez la plus grande valeur de force de compression simple sur l'appareil pour chaque période.

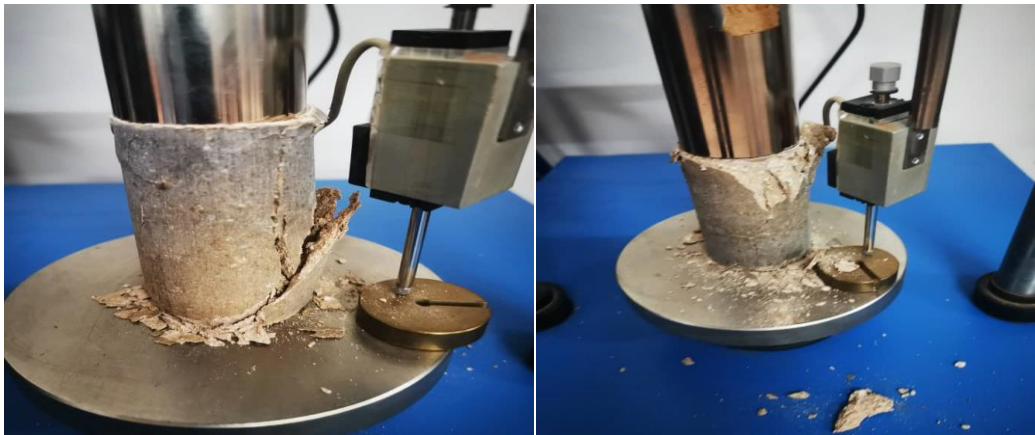


Figure 3.10 Soumission des échantillons à une force de compression

Les résultats montrent que la résistance à la compression augmente rapidement aux jeunes âges (moins de 3 jours), ce qui s'explique par la diminution rapide de la teneur en eau due au séchage accéléré des surfaces (Figure 3.11). Après le troisième jour, la perte d'eau de la masse interne des échantillons devient de plus en plus lente, expliquant le lent développement de la résistance mécanique. L'échantillon de tuf atteint sa valeur maximale au jour 28, à environ 3,74 MPa (figure 3.12), ce qui correspond à une teneur en eau proche de zéro. De ces résultats, on peut conclure que la cohésion des matériaux étudiés augmente avec l'évaporation de la quantité d'eau utilisée pour comprimer les matériaux.

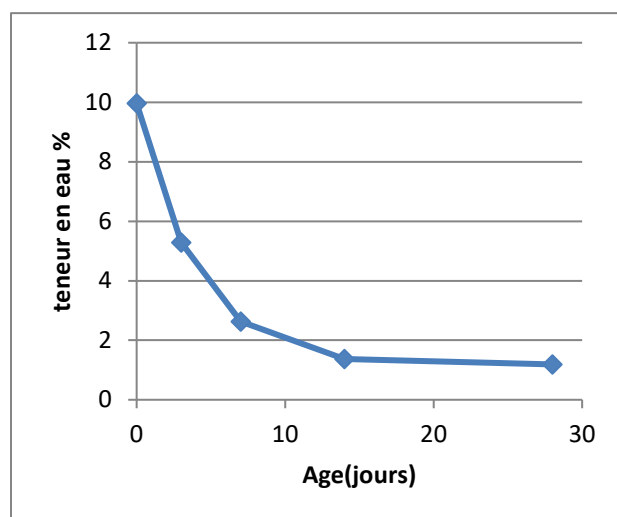


Figure 3.11 La teneur en eau des éprouvettes en fonction du temps

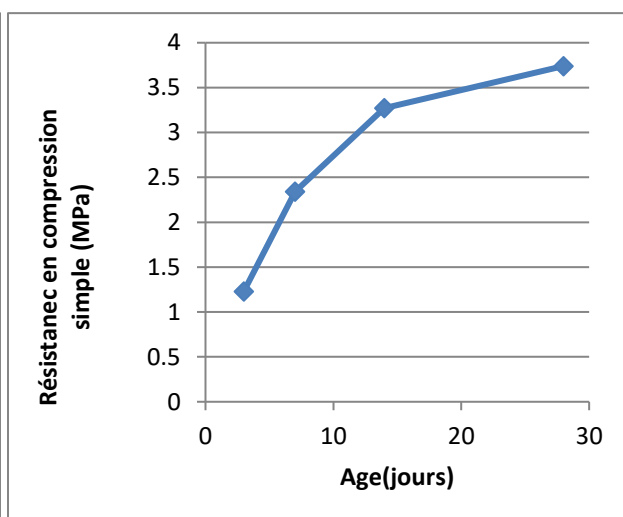


Figure 3.12 Résistance à la compression simple en fonction du temps.

3.3.6 CLASSIFICATION DU MATERIAU

Pour aborder les obstacles de la mécanique des sols, il est essentiel non seulement de caractériser un sol, mais également de le classer, c'est-à-dire, de l'organiser au sein d'un groupe présentant des comportements semblables. On compte plusieurs classifications à l'échelle mondiale. Habituellement, nous opterons pour l'une de ces options :

- Classification G.T.R (Guide des terrassements routiers) ;
- Système de classification des sols U.S.C.S (Unified Soil Classification System) développé par Casagrande.

Conformément aux données des tests indiqués dans le tableau 4.2, le tuf est catégorisé par le guide GTR comme un sol contenant à la fois des composants fins et grossiers (C1A2ts). Dans le contexte de l'USCS, il est classé comme grave limoneux (GL).

3.4 LES DECHETS

Dans la wilaya d'Adrar, l'augmentation des activités urbaines entraîne une accumulation notable des déchets, notamment ceux issus des chantiers de construction. Les déchets de briques rouges représentent une part importante de ces résidus, provenant des opérations de découpe, de casse et de démolition, et s'accumulent souvent de manière désordonnée autour des sites. Les déchets de briques en adobe constituent également un problème, car ils forment des amas terreux irréguliers pouvant altérer le paysage urbain et occuper des espaces abandonnés. Cette situation contribue à la pression croissante des déchets de construction et complique la gestion de l'environnement bâti dans la région.

3.4.1 DECHETS DE BRIQUES ROUGE

3.4.1.1 Matériaux locaux

Les déchets de briques rouges (figure 3.13) ont été obtenus à environ 3,1 km de l'Université Ahmed Draia à Adrar, près d'une usine de fabrication de briques rouges connue sous le nom de Sarl Timadnine Briquertrie, comme le montre la figure 3.14.



Figure 3.13 Déchets de brique



Figure 3.14 Localisation de Sarl Timadnine Briquertrie

Chaque année, des milliers de tonnes de déchets de briques (bricklayon) sont éliminés, résultant de défauts, d'une mauvaise cuisson ou de briques cassées lors de divers processus de cuisson. Cela occupe de vastes zones sans tenir compte de leur réutilisation.

Dans cette étude, ces déchets ont été exploités en les broyant et en les passant à travers un tamis de 0/2 mm comme le montre la figure 3.15.



Figure 3.15 Déchets de briques rouges broyés

3.4.1.2 Analyse chimique :

Selon le tableau 4.5 l'essai chimique des déchets de briques rouges a montré qu'ils avaient une très faible teneur en carbonate de calcium (CaCO_3), avec une prédominance de matières insolubles.

Tableau 3.5 Résumé des résultats d'analyse chimique

Echantillons	Carbonate de Calcium % (CaCO_3)	Sulfate (mg/kg)	Chlure (%)	L'insolubles (%)
Déchets de Briques rouge	5,6	4018	0,21	93,79

Grâce aux résultats de l'analyse DRX (Figure 3.16), il est confirmé que les déchets de briques rouges contiennent un pourcentage important de biotite et un peu de quartz.

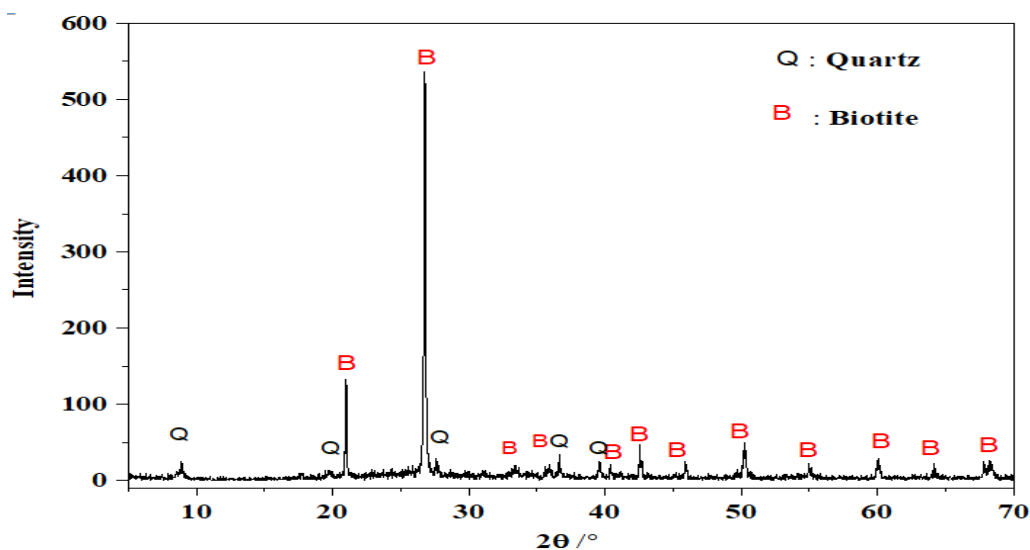


Figure 3.16 Diffraction des rayons X de déchets de briques rouge

3.4.2 DECHETS DE BRIQUES D'ADOBE

3.4.2.1 Matériaux locaux

Nous avons prélevé un échantillon de déchets de briques d'adobe (Figure 3.17) dans une maison détruite du village de Tilouline, situé à 100 km du siège de la wilaya d'Adrar, comme le montre la Figure 3.18.



Figure 3.17 Échantillon de briques d'adobe



Figure 3.18 lieux de prélever l'échantillon de brique d'adobe

4.4.2.2 Analyse chimique :

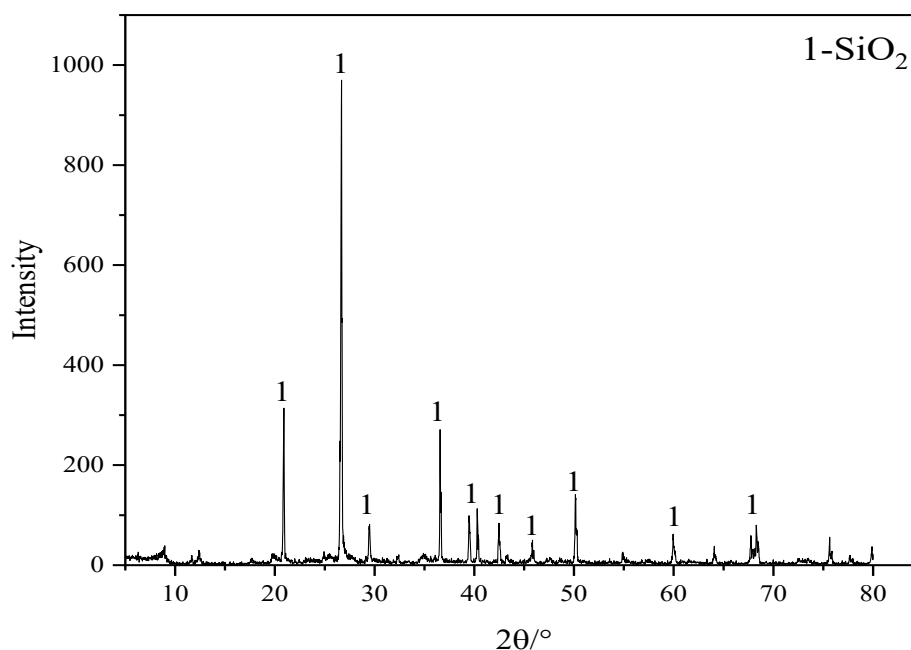
Selon le tableau 3.6, l'examen chimique des déchets de briques rouges a montré qu'ils avaient une très faible teneur en carbonate de calcium (CaCO_3), avec une prédominance de matières insolubles.

Table 3.6. Résumé des résultats d'analyse chimique

Echantillons	Carbonate de Calcium % (CaCO_3)	Sulfate (%)	Chlure (%)	L'insolubles (%)
Adobe brick waste	04	0,79	0,272	87,2

3.4.2.3 Diffraction des rayons X

D'après les résultats de l'analyse par diffraction des rayons X (Figure. 3.19), il apparaît clairement que les déchets de briques d'adobe contiennent une grande proportion de dioxyde de silicium.

**Figure 3.19** Diffraction des rayons X de déchets de briques d'adobe

3.4.2.4 ANALYSE GRANULOMETRIQUE

D'après la courbe granulométrique de la brique d'adobe, nous obtenons $D_{60} = 0,22$, $D_{30} = 0,14$ et $D_{10} = 0,085$.

$C_u = 0,22 / 0,085 = 2,64$; $C_c = (0,14 \times 0,14) / (0,22 \times 0,085) = 1,05$. Nous concluons donc que la granulométrie est très serrée et qu'il s'agit d'un matériau bien gradué. D'après les résultats des tests du tableau 4.2 et les classifications du GTR, de la norme NF P 94 11-300 et du Système unifié de

classification des sols (USCS), les déchets de briques d'adobe sont classés par le GTR comme des sables argileux (B21h). Selon l'USCS, ils sont classés comme sable propre de mauvaise qualité (sable limoneux) (SmL).

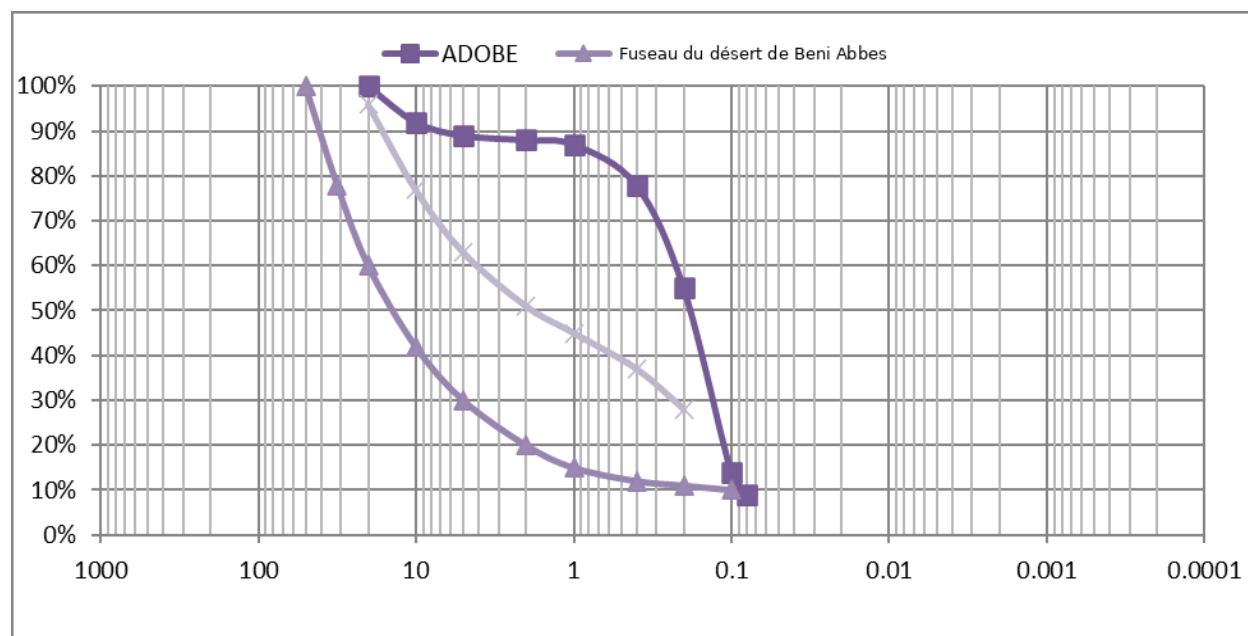


Figure. 3.20. Courbes de distribution granulométrique du l'Adobe

- Qualité des fines

La brique d'adobe est classée comme sol Faiblement argileux d'après les résultats du test limite d'Atterberg (tableau 3.2) et le tableau de classification (tableau 3.3).

D'après les résultats du test au bleu de méthylène et la classification présentée dans la figure 3.5, nous concluons que la brique d'adobe est un sol limoneux.

3.4.2.5 ESSAIS PROCTOR MODIFIÉ

Le graphique (Figure 3.21) présente l'évolution de la densité sèche du matériau *Adobe* en fonction de sa teneur en eau sous l'effet du compactage. À faible teneur en eau, la densité obtenue reste réduite car l'humidité n'est pas suffisante pour assurer la lubrification des particules du mélange d'Adobe, ce qui limite leur mobilité et empêche un agencement optimal pendant le compactage. Lorsque la teneur en eau augmente, l'eau facilite le glissement et la réorganisation des grains, ce qui permet d'atteindre progressivement une densité sèche plus élevée jusqu'à une valeur maximale correspondant à l'humidité optimale. Au-delà de cet optimum, l'excès d'eau remplit les vides,

augmente la porosité apparente et gêne le rapprochement des particules, entraînant une diminution de la densité sèche. La droite *Zero Air Void Line* représente la densité sèche théorique maximale pour un Adobe entièrement saturé sans air, et sert uniquement de référence puisque la densité mesurée reste systématiquement inférieure en raison de la présence inévitable d'air résiduel dans la structure.

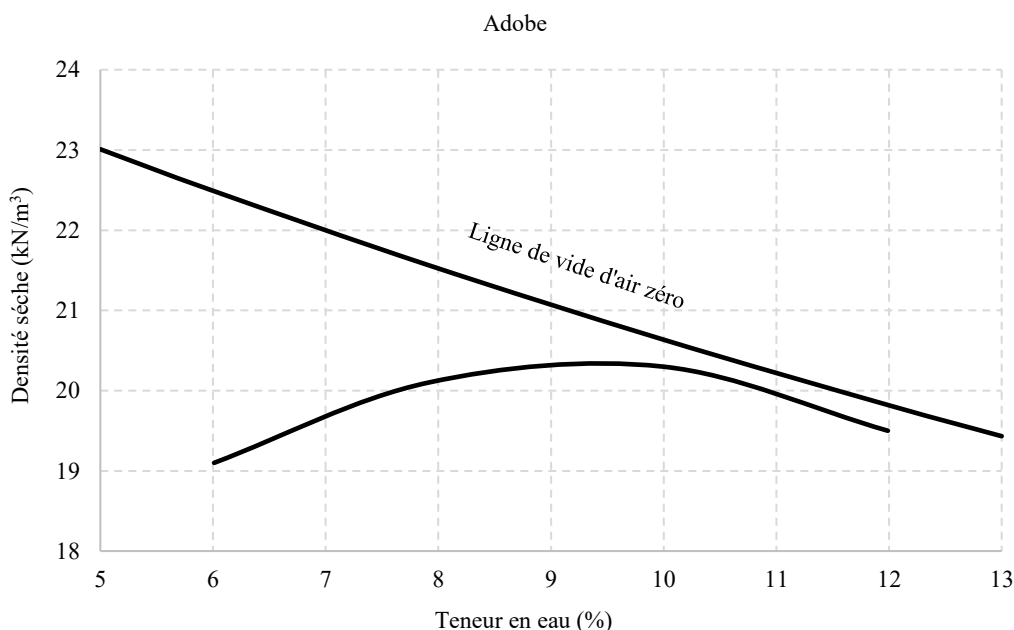


Figure 3.21: Courbe Proctor de l'adobe

3.5 Conclusion :

L'ensemble des analyses menées dans ce chapitre a permis d'établir une identification précise et complète des matériaux étudiés. Les résultats montrent que le tuf calcaire étudié est un matériau riche en carbonate de calcium, bien gradué, présentant de bonnes capacités de compactage et une portance élevée, ce qui confirme son aptitude à être utilisé dans les structures routières. Les déchets de briques rouges et les briques d'adobe se distinguent par une forte proportion de matières insolubles et des caractéristiques granulaires plus fines, accompagnées d'une plasticité faible à modérée selon les classifications géotechniques. Les essais de compactage, de portance et de résistance mécanique ont mis en évidence des comportements cohérents avec la nature

minéralogique de chaque matériau. Cette caractérisation détaillée constitue un fondement indispensable pour la suite de l'étude, notamment pour analyser l'effet du mélange de ces matériaux et évaluer leur potentiel de valorisation dans les applications géotechniques et routières.

Chapitre 4

RESULTATS ET DISCUSSION

Chapitre 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Introduction

L'utilisation de matériaux locaux et alternatifs dans la construction routière représente aujourd'hui une orientation stratégique majeure, soutenue par les principes du développement durable et la nécessité de réduire l'exploitation excessive des ressources naturelles. Dans de nombreuses régions, en particulier les zones arides et semi-arides, les matériaux granulaires conventionnels deviennent rares ou leur extraction engendre des coûts économiques et environnementaux considérables. Face à cette problématique, le recours à des matériaux disponibles localement, tels que le tuf calcaire, apparaît comme une solution prometteuse permettant de concilier performance technique, économie de ressources et réduction des impacts écologiques.

Parallèlement, la gestion et la valorisation des déchets issus de la construction et de la démolition constituent un enjeu environnemental majeur. Les quantités importantes de déchets de briques rouges (DBR) et de briques d'adobe (DBA) générées dans de nombreuses régions posent des défis de stockage et de recyclage. Leur réutilisation dans le domaine routier offre une double opportunité : réduire la pression sur les ressources naturelles et limiter les impacts liés à l'accumulation de déchets, tout en améliorant potentiellement les caractéristiques mécaniques des sols locaux. Les briques rouges, du fait de leur nature cuite et de leur granulométrie fine issue du broyage, ainsi que les briques d'adobe, riches en particules terreuses non cuites, présentent des propriétés physiques susceptibles de modifier de manière favorable la structure granulaire et la compacité du tuf.

Dans ce contexte, ce chapitre s'intéresse à la valorisation du tuf calcaire par l'incorporation de deux types de déchets de briques, DBR et DBA, afin de développer un matériau stabilisé pouvant être utilisé efficacement dans les couches de fondation routière. L'étude vise à analyser l'effet de différents taux d'incorporation de ces déchets sur les performances géotechniques essentielles du tuf, notamment son comportement au compactage, sa portance et sa résistance mécanique. Cette démarche s'inscrit dans une vision globale visant à promouvoir l'économie circulaire, optimiser la gestion des déchets de construction, et encourager l'utilisation de matériaux locaux disponibles à faible coût.

Ainsi, le chapitre présente d'abord le déroulement expérimental adopté pour l'élaboration et la préparation des mélanges, avant d'examiner en détail l'évolution des propriétés du tuf modifié par les DBR et les DBA. L'analyse de ces comportements permettra d'identifier les formulations les plus performantes, de comprendre les mécanismes d'amélioration induits par les matériaux recyclés, et d'évaluer leur potentiel réel dans les applications routières, en particulier dans les environnements où les contraintes techniques et économiques exigent des solutions innovantes, durables et accessibles.

4.2 Déroulement de l'étude expérimentale

Le déroulement de cette étude expérimentale consiste à utiliser le tuf calcaire (T) comme matériau de base, en y incorporant deux types de déchets, à savoir les déchets de briques rouges (DBR) et les déchets de briques d'adobe (DBA), où les DBR sont préparés par broyage suivi d'un tamisage à 0,2 mm, tandis que les DBA sont préparés par concassage, puis des mélanges de tuf avec ces

deux types de déchets sont élaborés selon différents pourcentages, soit 0 %, 10 %, 20 % et 30 % de DBR, et 0 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 % et 50 % de DBA, avant de soumettre l'ensemble des mélanges à des essais en compression simple pour évaluer la résistance mécanique, à l'essai CBR pour l'étude de la portance, ainsi qu'à l'essai Proctor modifié pour analyser le comportement au compactage.

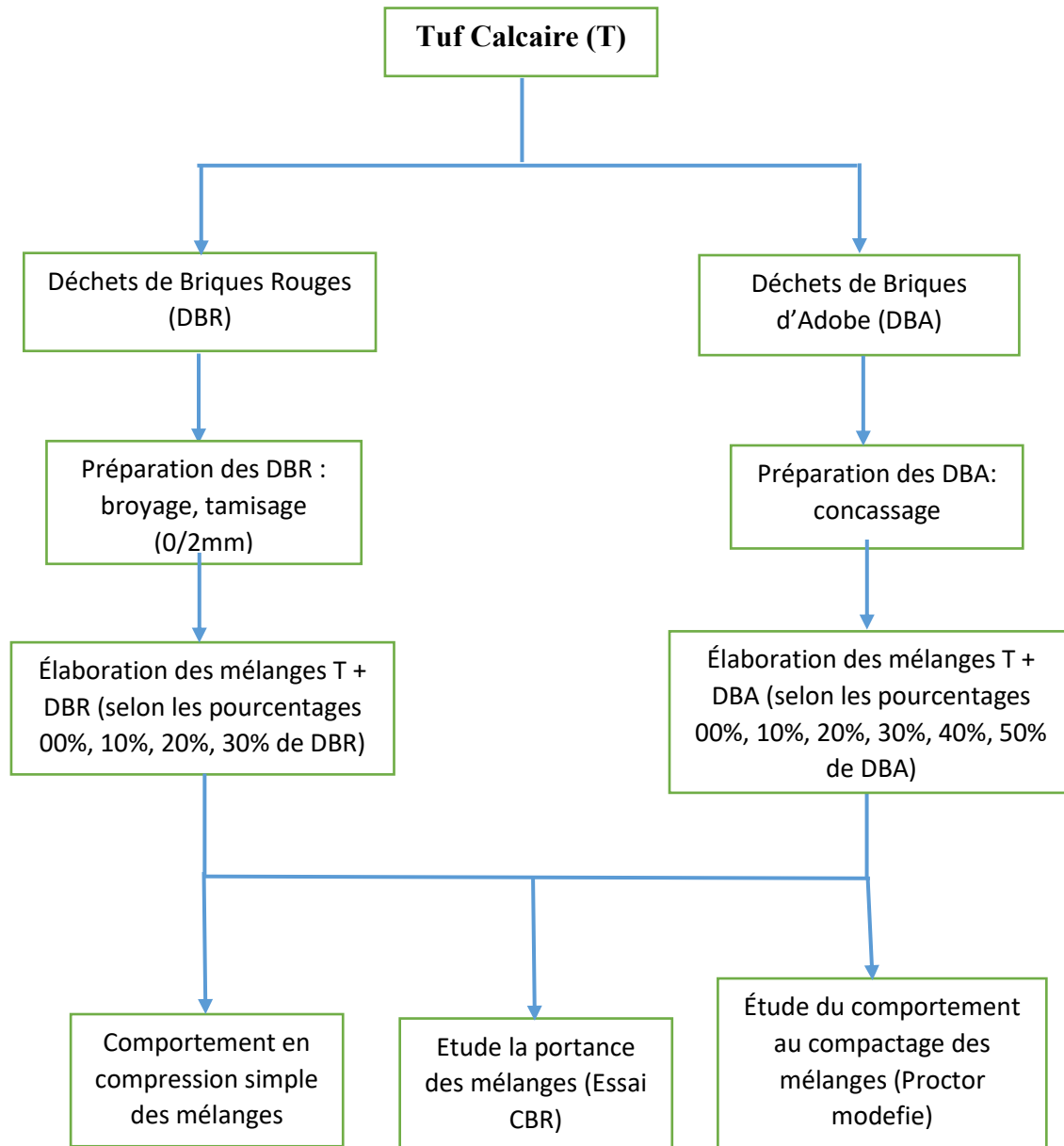


Figure 4.1 Déroulement de l'étude expérimentale.

4.3 Mélange de tuf avec des déchets de briques rouges

Le recours aux déchets de briques rouges comme matériau d'amélioration des sols représente une solution écologique et techniquement intéressante pour le secteur routier. Leur structure poreuse, leur granulométrie fine et leur bonne capacité d'adhérence en font un élément favorable à l'amélioration du compactage et de la cohésion de matériaux locaux tels que le tuf calcaire. Dans le cadre de cette étude, l'incorporation progressive de différents pourcentages de DBR (tableau 4.1) dans le tuf vise à évaluer leur influence sur les propriétés géotechniques essentielles du matériau, notamment la densité sèche, l'optimum de teneur en eau, la portance (CBR) et la résistance à la compression simple. Cette analyse permettra de déterminer le taux d'ajout optimal des DBR pour l'obtention d'un matériau stabilisé performant et susceptible d'être employé dans les couches de base des chaussées.

Tableau 4.1. Différents mélanges préparés T-DBR

Mélange	Tuf (T)	Déchets de briques rouges (DBR)
T-00 DBR	100%	0%
T-10 DBR	90%	10%
T-20 DBR	80%	20%
T-30 DBR	70%	30%

4.3.1 Comportement au compactage

L'analyse du comportement des matériaux de route lors du compactage est effectuée grâce à l'essai Proctor modifié, ce qui permet d'établir les paramètres essentiels de compactage, tels que le taux d'humidité idéal et la densité sèche maximale. La figure appropriée présente les diverses courbes de Proctor pour les mélanges de tuf calcaire, résultant de l'ajout de débris de briques rouges (T + DBR) en différents pourcentages (figure 4.2).

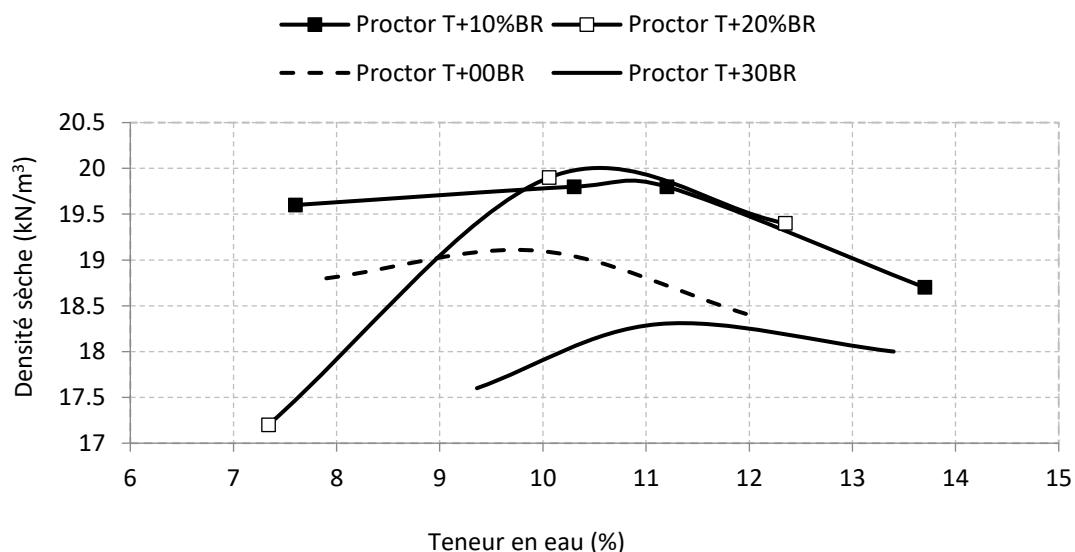


Figure 4.2 Courbes Proctor des différents mélanges (T-BRW)

L'analyse du comportement des mélanges tuf-déchets de briques rouges (T-DBR) lors du compactage a été effectuée à l'aide de l'essai Proctor modifié. Cela a permis de définir, pour chaque formulation, le taux d'humidité optimal (OMC) et la densité sèche maximale (MDD). Les graphiques de compactage (Figure 4.2) illustrent une élévation graduelle de la densité sèche avec l'incorporation des résidus de briques jusqu'à un taux de 20 %, qui est ensuite suivi d'une baisse marquée à 30 %. La densité sèche maximale augmente alors, passant de 19,1 kN/m³ pour le tuf pur à 20,0 kN/m³ pour le mélange contenant 20% de DBR, ce qui représente une amélioration d'environ 4,7%, avant de redescendre à 18,3 kN/m³ pour un dosage de 30%. En parallèle, le taux d'humidité idéal augmente légèrement, passant de 10 % pour le tuf pur à 10,6 % à 20 % de DBR (figure 4.3). Cela témoigne d'une amélioration de la capacité au compactage due à l'ajout de fines provenant du concassage des briques. Cette progression est due à une disposition plus efficace des grains et à une distribution granulométrique plus homogène, les particules fines de briques ayant contribué à combler le manque de fractions intermédiaires du tuf naturel. Cependant, si le DBR dépasse 20%, l'accumulation de fines provoque une réduction de la perméabilité et une plus grande rétention d'eau, ce qui conduit à une diminution de la densité maximale sèche.

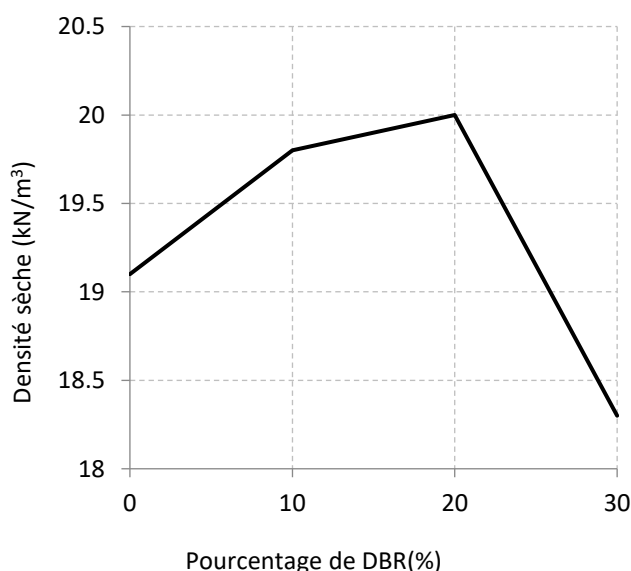


Figure. 4.3. Variation de la Densité sèche en fonction du pourcentage de DBR

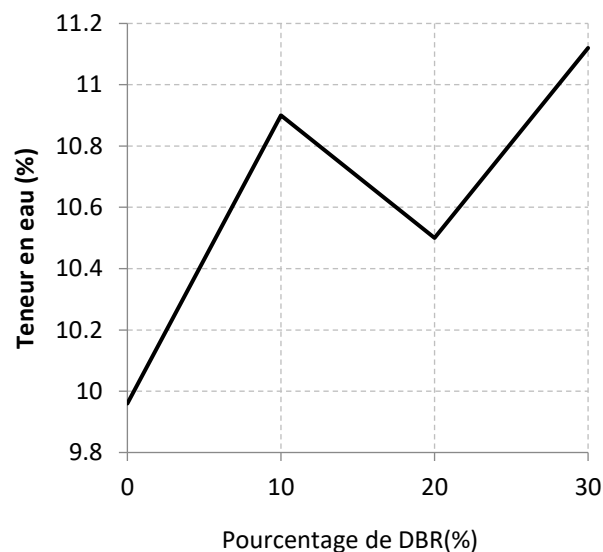


Figure. 4.4. Variation de la teneur en eau optimale en fonction du pourcentage de DBR

La figure 4.4 montre que la teneur en eau optimale augmente d'environ 10 % pour le tuf pur (0 % de DBR) à près de 10,9 % pour un taux de 10 % de DBR, puis diminue légèrement à 20 %, avant de croître de nouveau pour atteindre sa valeur maximale à 30 %.

Ce comportement s'explique principalement par l'augmentation de la demande en eau due à la présence accrue de fines issues du broyage des briques, lesquelles se caractérisent par une forte capacité d'absorption. Par ailleurs, la modification de la structure granulaire du mélange influence directement le processus de compactage et la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une compacité optimale.

4.3.2 La Portance

La portance des mélanges de tuf et de déchets de briques rouges (T-RBW) a été évaluée à l'aide de l'essai CBR (California Bearing Ratio) (figure 4.5), conformément à la norme française NF P 94-078. L'indice CBR reflète la capacité portante des sols compactés et est directement lié à leur densité et à leur teneur en eau.



Figure 4.5 Illustration de certaines phases de l'essai CBR

La figure 4.6 représente l'évolution de la charge en fonction de la pénétration pour le tuf naturel (T+0% DBR) et les mélanges contenant 10 %, 20 % et 30 % de déchets de briques rouges. On observe que, pour une même pénétration, la charge supportée augmente avec l'ajout de DBR jusqu'au taux de 20 %, ce qui traduit une amélioration progressive de la portance du matériau.

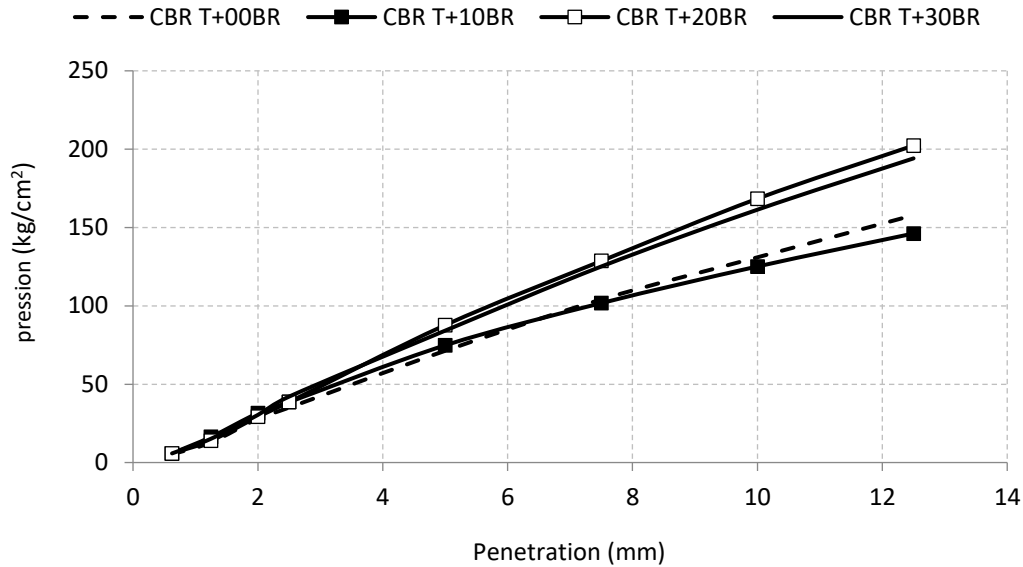


Figure 4.6 Évolution de la charge en fonction de la pénétration

Le mélange T+20 % DBR présente les charges les plus élevées, confirmant qu'il offre la meilleure capacité portante. En revanche, pour le mélange T+30 % DBR, bien que les performances restent supérieures à celles du tuf naturel, une légère baisse est observée par rapport au taux optimal de 20 %. Cette évolution s'explique par l'amélioration de l'emboîtement et de la compacité du matériau grâce aux fines de briques, tandis que l'excès de fines au-delà de 20 % réduit l'efficacité du transfert des charges.

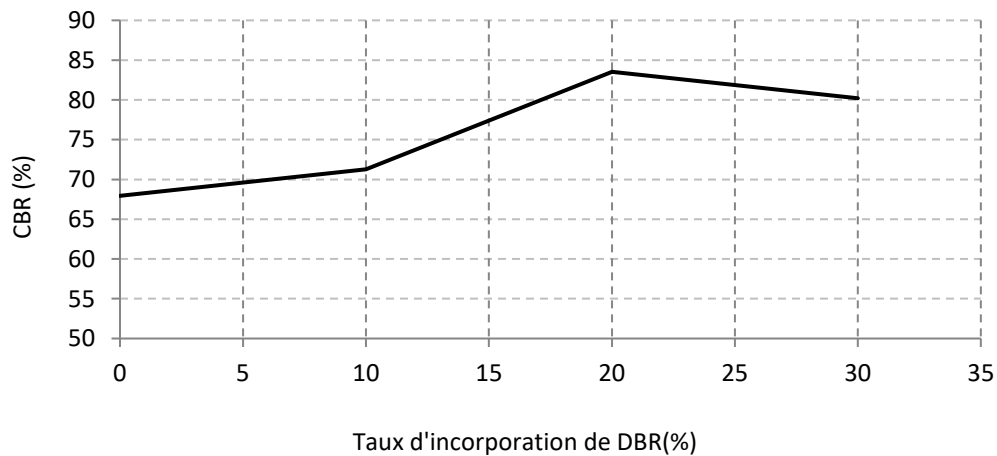


Figure 4.7 Influence du taux d'incorporation des déchets de briques rouges sur l'indice CBR du tuf

La figure 4.7 illustre l'évolution de l'indice CBR en fonction de la teneur en déchets de briques rouges. L'indice CBR du tuf naturel est de 67,94 %, puis il augmente à 71,21 % avec l'ajout de 10 % de DBR. La valeur maximale est atteinte pour un taux de 20 % de DBR avec un CBR de 83,53

%, soit une amélioration globale d'environ 22,9 % par rapport au matériau non traité. Lorsque le taux de DBR atteint 30 %, le CBR diminue légèrement à 80,19 %, tout en restant dans une plage élevée et conforme aux exigences des matériaux de couche de fondation routière. Cette évolution s'explique par l'effet bénéfique de la densification et du meilleur arrangement granulaire jusqu'à 20 %, tandis qu'au-delà, l'excès de fines perturbe le drainage, augmente la compressibilité et réduit la résistance à la charge.

4.3.3 Essai de compression simple

La capacité à résister à la compression est un facteur crucial lors de la sélection des matériaux pour la construction des chaussées dans les zones désertiques. Elle a été jugée selon la technique de résistance à la compression non confinée (RCNC) modifiée de Fenzy. La figure 4.8 illustre le dispositif RCNC employé dans cette recherche, ainsi que les moules cylindriques séparés utilisés pour la fabrication des échantillons.

Les échantillons cylindriques ont été élaborés en respectant le taux d'humidité idéal défini par le test Proctor, en combinant du tuf avec des résidus de briques rouges (DBR) à 0 %, 10 %, 20 % et 30 %. Afin de garantir la reproductibilité, trois échantillons pour chaque composition ont été comprimés dans des moules mesurant 50 mm × 100 mm. Après le processus de moulage, les échantillons ont été gardés pendant des périodes de 3, 7, 14 et 28 jours avant d'être soumis aux tests. La compression a par la suite été effectuée à un rythme constant de 1,04 mm/min sur le cadre RCNC illustré à la figure 4.9, ce qui a permis de recueillir simultanément les données de charge axiale et de déformation afin de déterminer précisément la RCNC et les coefficients de rigidité.



Figure. 4.8 Appareil d'essai de résistance à la compression non confinée (UCS) : cadre de charge et moules fendus



Figure 4.9 Étapes d'essai de résistance à la compression non confinée (UCS)

Les données (figures 4.10 et 4.11) indiquent une hausse progressive de la résistance à la compression en intégrant le RBW jusqu'à un seuil de 20 %, après quoi la résistance commence à baisser. En termes quantitatifs, la résistance à la compression uniaxiale (UCS) est passée de 3,74 MPa pour le tuf pur à 4,74 MPa avec 10 % de RBW et a culminé à 5,05 MPa avec 20 % de RBW, représentant une augmentation de 35 % par rapport au tuf non traité. Toutefois, l'incorporation supplémentaire de 30 % de RBW a provoqué une diminution de l'UCS à 2,80 MPa, vraisemblablement en raison d'une surabondance de particules fines altérant la cohésion et la densité.

L'augmentation notée de la résistance à la compression jusqu'à 20 % de RBW peut être due à une meilleure interconnexion des particules, un calibre plus uniforme et une efficacité de compactage amplifiée grâce à l'ajout de granulats de briques fins. Une diminution au-delà de ce pourcentage est liée à une croissance du taux de fines, qui perturbe la structure interne et diminue le transfert effectif des contraintes. Dans l'ensemble, les observations corroborent que l'intégration de 20 %

de débris de briques rouges dans le tuf procure des performances mécaniques idéales et pourrait être envisagée comme un pourcentage de stabilisation efficace pour une application dans les couches de base des routes désertiques.

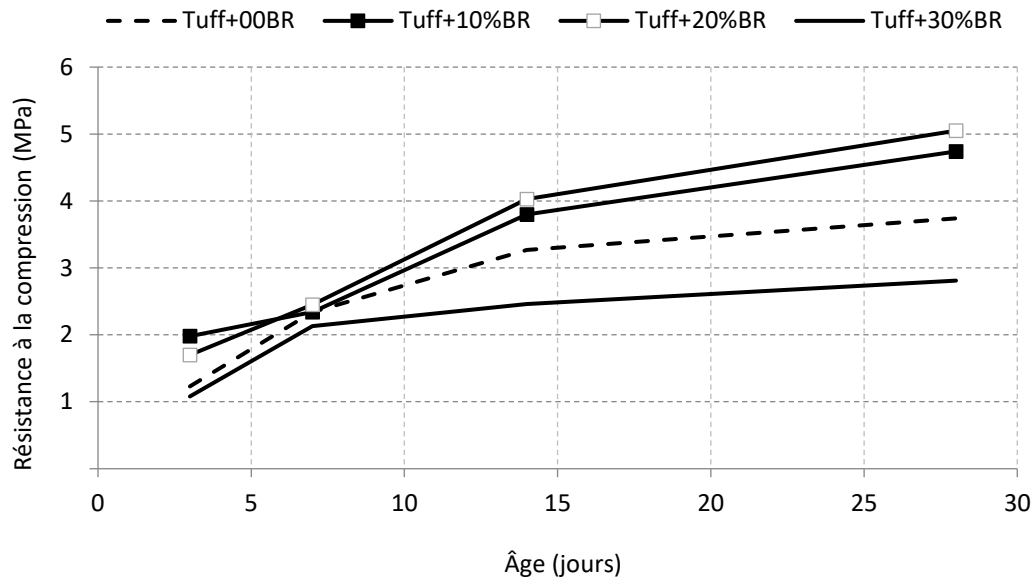


Figure 4.10. Effet de l'âge sur la résistance à la compression des mélanges

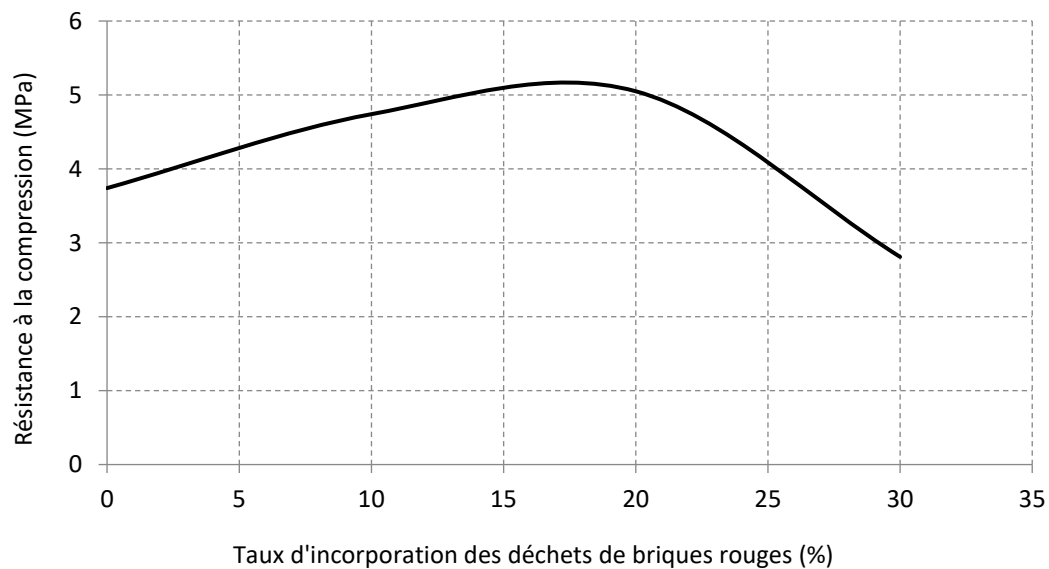


Figure 4.11. Effet des déchets de briques rouges sur la résistance à la compression simple des mélanges

4.3.4 Conclusion Concernant Les Mélanges De Tuf Et DBR

Les résultats expérimentaux ont montré que l'incorporation de déchets de briques rouges (DBR) dans le tuf améliore de manière significative les performances mécaniques du matériau jusqu'à un taux optimal d'environ 20 %. À cette proportion, le mélange a atteint une portance élevée, avec une augmentation du CBR de 67,94 % pour le tuf pur à 83,53 %, indiquant une meilleure capacité portante adaptée aux couches de fondation routière. La résistance à la compression simple (UCS) a également enregistré une progression notable, passant de 3,74 MPa pour le tuf seul à 5,05 MPa après 28 jours de cure, traduisant une amélioration de la cohésion et de la rigidité du matériau. Même avec une teneur de 30 % en RBW, les performances demeurent acceptables : le CBR reste élevé à 80,19 %, bien que l'UCS diminue à 2,8 MPa. Ces résultats confirment que les mélanges contenant entre 20 % et 30 % de RBW offrent un compromis satisfaisant entre résistance mécanique et utilisation de déchets, tout en maintenant des valeurs compatibles avec les exigences techniques des chaussées en milieu désertique.

4.4 La Mélange De Tuf Avec Déchet De Brique D'adobe

Les résidus de briques d'adobe, des matières non cuites et largement répandues en milieu rural, présentent un potentiel significatif de réutilisation dans la construction de routes. L'intégration de différentes proportions de tufs calcaires, avec une teneur élevée en fines, une capacité d'absorption notable et une granulométrie spécifique, peut influencer considérablement le comportement du tuf calcaire. L'analyse du mélange tuf-DBA est donc orientée vers l'examen de l'impact de ces particules naturelles sur les propriétés de compactage, de portance et de solidité mécanique, dans le but de déterminer les compositions les plus appropriées pour une application routière. L'inclusion des DBA s'aligne avec une approche d'économie circulaire, contribuant à minimiser les déchets tout en optimisant les performances des matériaux locaux.

Pour établir les proportions idéales de combinaison de tuf et de résidus de briques d'adobe (T-ABW), nous avons préalablement réduit ces derniers en poudre grâce à une machine d'abrasion du type Los Angeles. Par la suite, nous avons procédé à la combinaison manuelle d'échantillons avec divers pourcentages de tuf et de résidus de briques d'adobe (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%). Chaque préparation a été pétrie pendant 4 à 5 minutes pour garantir sa consistance uniforme. Par la suite, des essais Proctor modifiés ont été effectués afin d'établir la densité sèche maximale et le taux d'humidité idéal, en accord avec la norme NF P 94-093. Le rapport de portance de Californie (CBR) a été établi en conformité avec la norme NF P 94-078. Des tests de compression uniaxiale (UCS) ont aussi été réalisés conformément à la norme NF P 94-074 pour analyser le comportement physique et mécanique des mélanges (voir le Tableau 4.2).

Les valeurs d'UCS et de CBR présentées correspondent aux moyennes de trois essais. Les résultats étaient globalement les mêmes lorsque les conditions de test étaient identiques, avec des valeurs d'écart type moyen (SD) inférieures à 10 % de la valeur moyenne (m) UCS ou CBR.

Tableau 4.2. Différents mélanges préparés T-DBA

Mélange	Tuf (T)	Déchets de briques d'adobe (DBR)
T-0ABW	100%	0%
T-10ABW	90%	10%
T-20ABW	80%	20%
T-30ABW	70%	30%
T-40ABW	60%	40%
T-50ABW	50%	50%

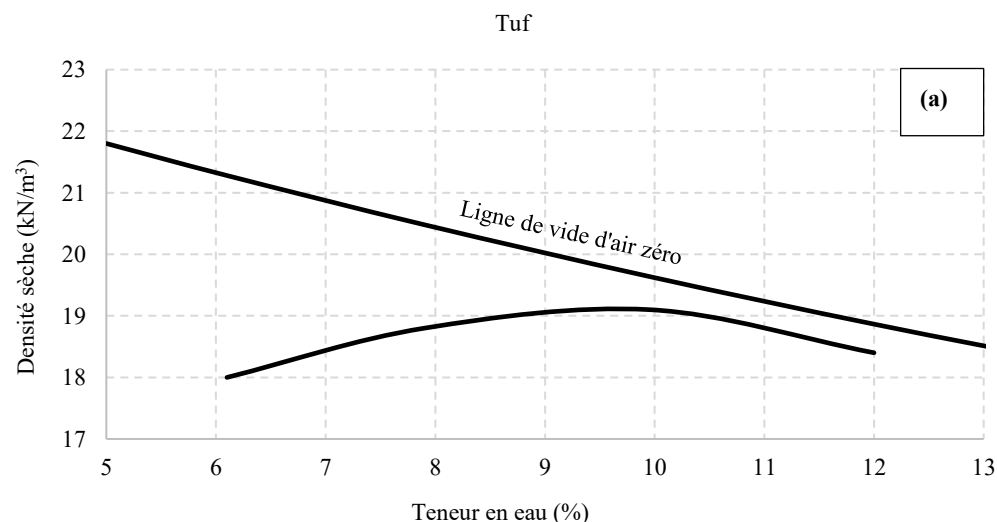
4.4.1 Comportement au compactage

4.4.1.1 Caractéristiques de compactage du tuf et de l'adobe

La figure 4.12 compare les courbes de compactage du tuf et de l'adobe à la ligne de saturation en air. À une teneur en eau optimale (OMC) de 10 %, la densité sèche maximale (MDD) du tuf était d'environ 19,1 kN/m³. La densité a ensuite diminué en raison d'une trop grande quantité d'eau interstitielle. La figure 4.12a montre que la courbe est éloignée de la ligne de saturation en air. Cela signifie que le tuf est poreux et ne peut retenir qu'une faible quantité d'eau.

L'adobe, quant à lui, présentait une MDD plus élevée, d'environ 20,3 kN/m³, et une OMC de 9 à 10 %. Il possède moins de vides d'air et une meilleure réorganisation des particules, comme l'explique sa courbe plus proche de la ligne de saturation en air. Ceci est principalement dû à la présence de petites particules d'argile et de limon (figure 4.12b).

De manière générale, l'adobe se densifie mieux que le tuf, mais leurs valeurs d'OMC sont sensiblement identiques. Leur comportement complémentaire démontre que l'amalgame de la structure grossière du tuf avec les particules d'adobe peut améliorer les performances de compactage et faciliter le développement de matériaux de construction routière durables.



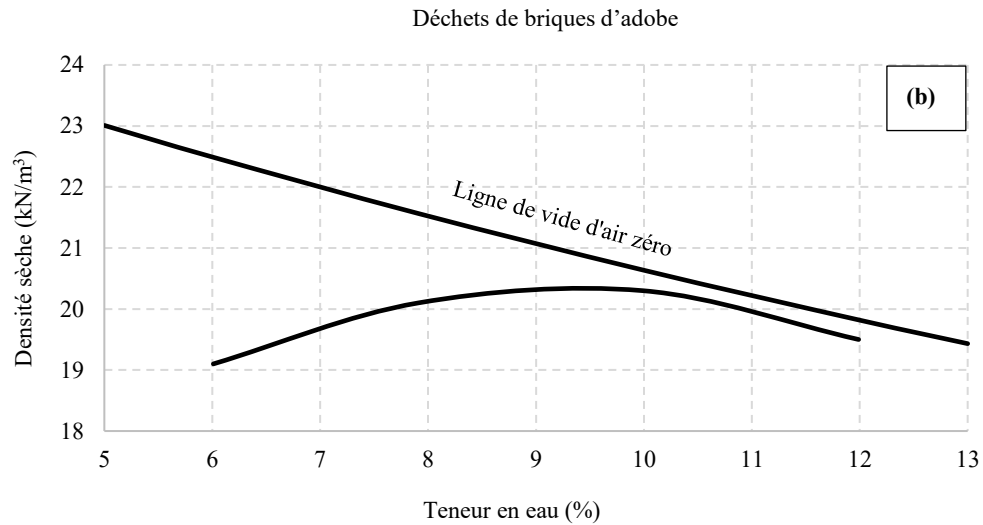


Figure 4.12 : Courbes de compactage du tuf (a) et des déchets de briques d'adobe (b)

4.4.1.2 Comportement au compactage du mélange T-DBA

La courbe de compaction du tuf mélangé à différentes proportions de déchet d'adobe, allant de 0% à 50%, est illustrée dans la Figure 4.13. Les résultats indiquent que la quantité d'adobe dans le mélange influence clairement la densité sèche maximale (MDD) et le meilleur taux d'humidité (OMC).

Tuf sans adobe (0%) : La densité maximale sèche est d'environ 19,1 kN/m³ à l'humidité optimale, soit environ 10 %.

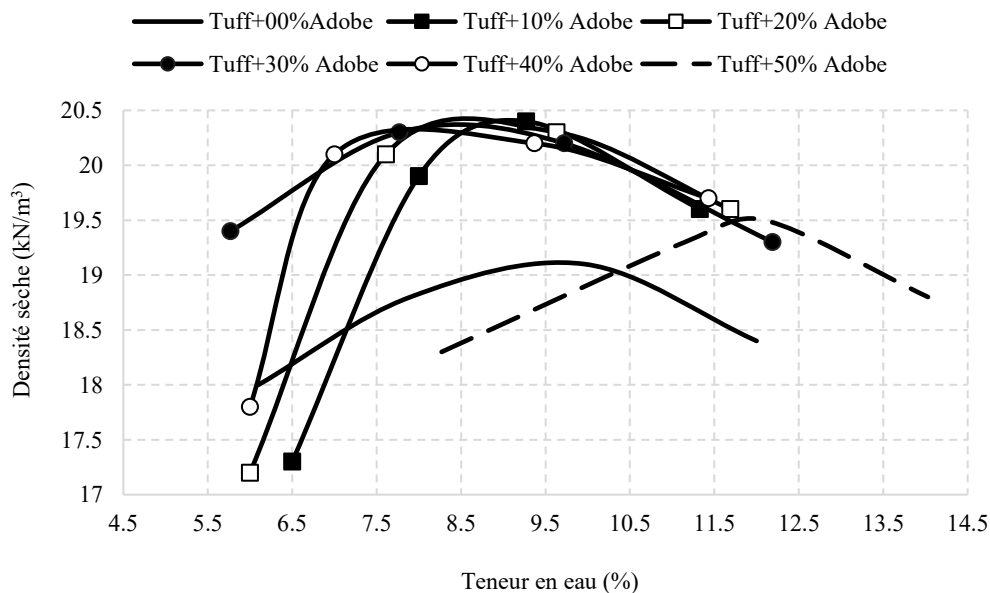


Figure 4.13 : Comportement au compactage de divers mélanges de tuf et d'adobe

10 à 20% d'adobe : On observe une amélioration notable, avec des valeurs de DMD atteignant 20 kN/m³ et OMC réduite à environ 8-9%. Cela souligne l'effet bénéfique des particules d'adobe fines qui combler les cavités dans la matrice du tuf, augmentant ainsi l'efficacité de l'emballage.

30 à 40% adobe : La densité sèche maximale demeure élevée (~20-20,3 kN/m³), mais la courbe de compactage s'aplanit quelque peu, signalant une moindre sensibilité aux variations d'humidité. Cela indique une combinaison stable avec une densification appropriée.

50% adobe : La densité sèche maximale diminue à moins de 19.5 kN/m³, alors que la teneur en humidité optimale augmente (plus de 11%). Cela signifie que des amendes d'adobe excessives entraînent une consommation d'eau accrue et une efficacité de conditionnement réduite, ce qui conduit à une performance de compactage inférieure.

Les résultats confirment (Figure 4.14) que des apports modérés de déchets d'adobe (~20-30%) assurent un équilibre optimal entre la densité et le besoin en humidité. Au-delà de cette plage, les bénéfices diminuent en raison d'un excès de particules, augmentant la sensibilité à l'eau et limitant la densité atteignable. Par conséquent, il semble que remplacer 20% de l'adobe soit la proportion idéale pour améliorer le comportement de compactage dans les matériaux de construction routière à base de tuf.

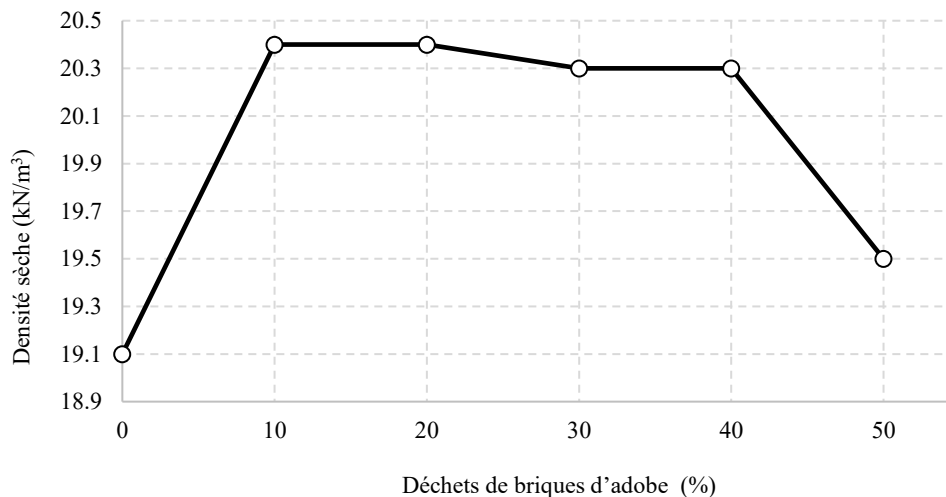


Figure 4.14 Variation de la Densité sèche maximale des mélanges (T-ABW) en fonction de la teneur en déchets de briques d'adobe

4.4.2 La Portance

Dans le cadre de cette expérimentation, les mélanges de tuf et de déchets d'adobe ont été préparés selon des proportions soigneusement définies, puis homogénéisés avant leur mise en essai. Chaque échantillon a été pesé, séché et conditionné conformément aux exigences du Proctor modifié afin de garantir la précision des mesures de masse humide et sèche. Les matériaux ont ensuite été compactés en couches successives dans des moules normalisés, suivis d'une pesée rigoureuse pour déterminer la densité sèche correspondante (figure 4.15). L'ensemble de ces opérations

méthodiques a permis d'établir les courbes de compactage et d'analyser l'influence des différents taux d'adobe sur le comportement du tuf.



Figure 4.15 Illustration de certaines phases de l'essai CBR

Les mesures de l'Indice Portant Californien (CBR) montrent des différences importantes selon les propriétés des combinaisons tuf-adobe. L'indice CBR est plus élevé lorsque la combinaison conserve un squelette granulaire solide et une granulométrie bien étalée, ce qui favorise l'emboîtement des grains et la compaction. Les valeurs maximales sont souvent atteintes pour des teneurs en eau légèrement inférieures à l'optimum (W_{opt}). Selon la littérature publiée, les valeurs de CBR pour les tufs à croûte calcaire utilisés dans les systèmes de chaussées varient généralement entre 50 % et 150 % (Goual, 2012; Morsli, 2007).

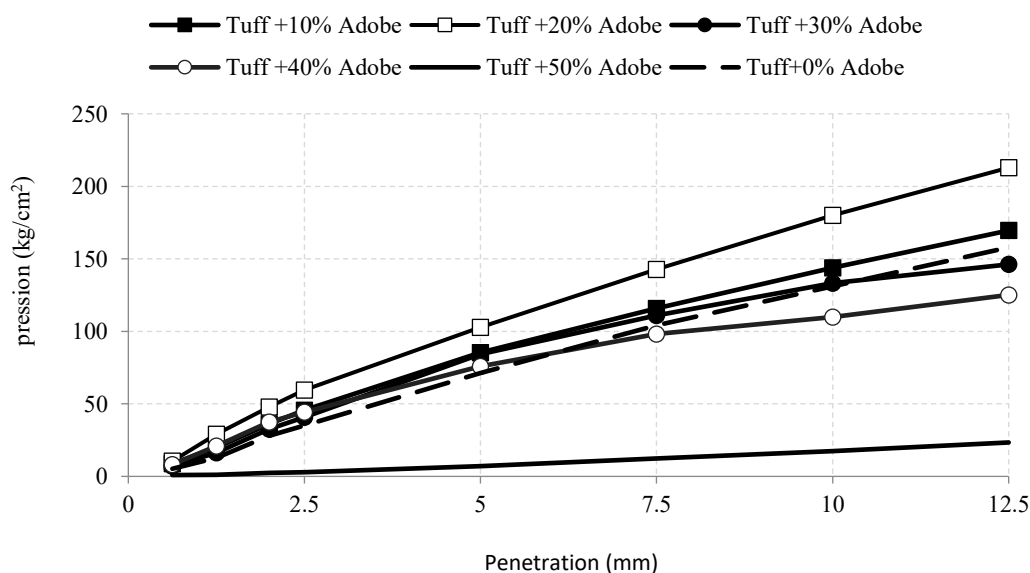


Figure 4.16 Évolution de la charge en fonction de la pénétration

Dans cette étude, l'indice CBR a été obtenu conformément à la norme NF P 94-078, à partir des courbes pression du piston – enfoncement (Figure 4.16). Les résultats indiquent que l'ajout de déchets de briques en adobe (ABW) augmente la capacité portante jusqu'à un maximum (Figure 4.17).

La meilleure performance a été obtenue avec 20 % d'ABW, lorsque le CBR a atteint 98 %, grâce à l'amélioration de la densité de compactage et au remplissage des vides par les particules fines issues de l'adobe. Les valeurs de CBR pour 30–40 % d'ABW demeurent acceptables (72–80 %), ce qui reste supérieur au minimum requis pour les matériaux de couche de fondation routière (CBR > 60 % selon NF P 94-078 et GTR92, matériau de fondation satisfaisant).

Au-delà de 50 % d'ABW, le CBR chute fortement (<20 %), indiquant qu'un excès de fines perturbe le squelette granulaire et réduit la résistance au cisaillement.

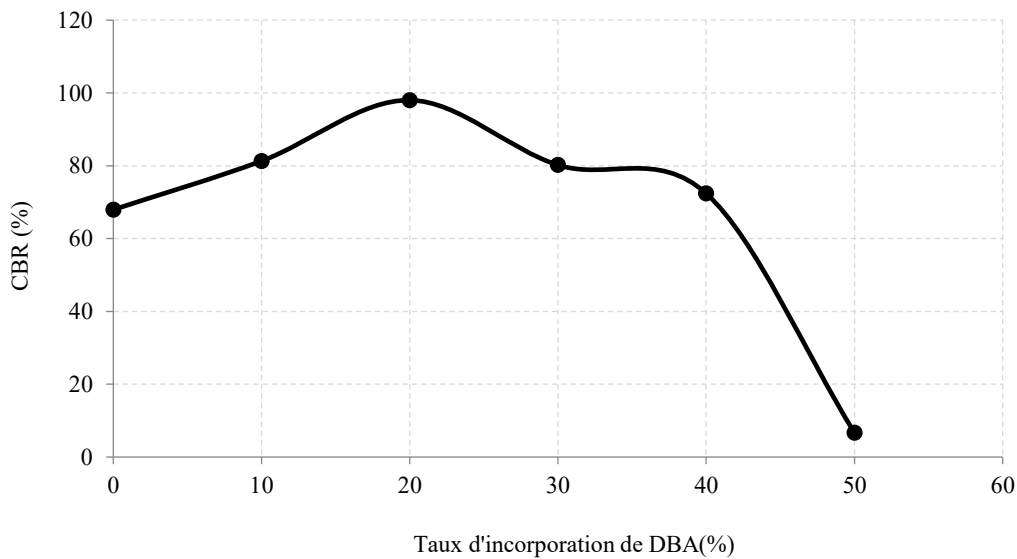


Figure 4.17 Influence du taux d'incorporation des déchets de briques d'adobe sur l'indice CBR du tuf

Ces résultats concordent avec des recherches antérieures sur la stabilisation des sols utilisant des déchets de construction et de démolition, où des apports modérés en fines augmentent la résistance et la rigidité, tandis que des teneurs excessives entraînent une diminution des performances. Les résultats suggèrent également qu'une teneur en adobe de 20–30 % constitue la plage idéale pour équilibrer performance et durabilité, tout en garantissant une capacité portante acceptable pour des applications de couche de fondation dans les climats arides.

4.4.3 Essai de compression simple

L'essai de résistance à la compression simple (UCS), réalisé conformément à la norme NF P 94-077, a été utilisé pour évaluer la résistance mécanique des mélanges tuf–adobe. Avant la réalisation de l'essai, les éprouvettes ont été préparées selon un protocole strict comprenant le malaxage des

mélanges, leur mise en moule et leur compactage à la teneur en eau optimale. Après démoulage, les échantillons ont été conservés pendant différentes durées de cure afin de permettre le développement progressif de la cohésion interne. Chaque éprouvette a ensuite été positionnée dans la presse de compression, où une charge axiale croissante a été appliquée jusqu'à la rupture, permettant d'obtenir les valeurs maximales de résistance (Figure 4.18). Les valeurs d'UCS présentées correspondent à la moyenne de trois essais répétés, et la reproductibilité a été vérifiée pour l'ensemble des résultats avec des écarts-types inférieurs à 10 % de la valeur moyenne, garantissant ainsi la fiabilité statistique des données.



Figure 4.18 La mise en charge et rupture des cylindres UCS

Les résultats obtenus montrent clairement que l'ajout de déchets de briques d'adobe (DBA) influence l'UCS de manière non linéaire. Pour des teneurs en DBA inférieures ou égales à 20 %, une augmentation de l'UCS est observée par rapport au tuf pur (figure 4.19). Cette amélioration est attribuée à une meilleure répartition granulométrique et à une densification accrue du squelette granulaire, les fines d'adobe venant combler les vides entre les grains plus grossiers du tuf (El Fehem et al., 2024; A. C. da Silva et al., 2019). De plus, les minéraux argileux présents dans l'adobe renforcent les liaisons interparticulaires et favorisent la cohésion naturelle qui se développe dans le tuf lors du séchage (phénomène de « self-stabilisation ») (Morsli, 2007).

En revanche, une diminution de l'UCS est constatée pour des teneurs élevées en adobe, supérieures à 30–40 %. Dans ces proportions, l'excès de fines perturbe le squelette granulaire du tuf, entraînant une réduction de la résistance au cisaillement et, par conséquent, de la résistance en compression. À 50 % de DBA, les valeurs d'UCS chutent en dessous du seuil généralement considéré comme acceptable pour les couches de fondation des chaussées (figure 4.20) (Illampas et al., 2013; Kheillou et al., 2021).

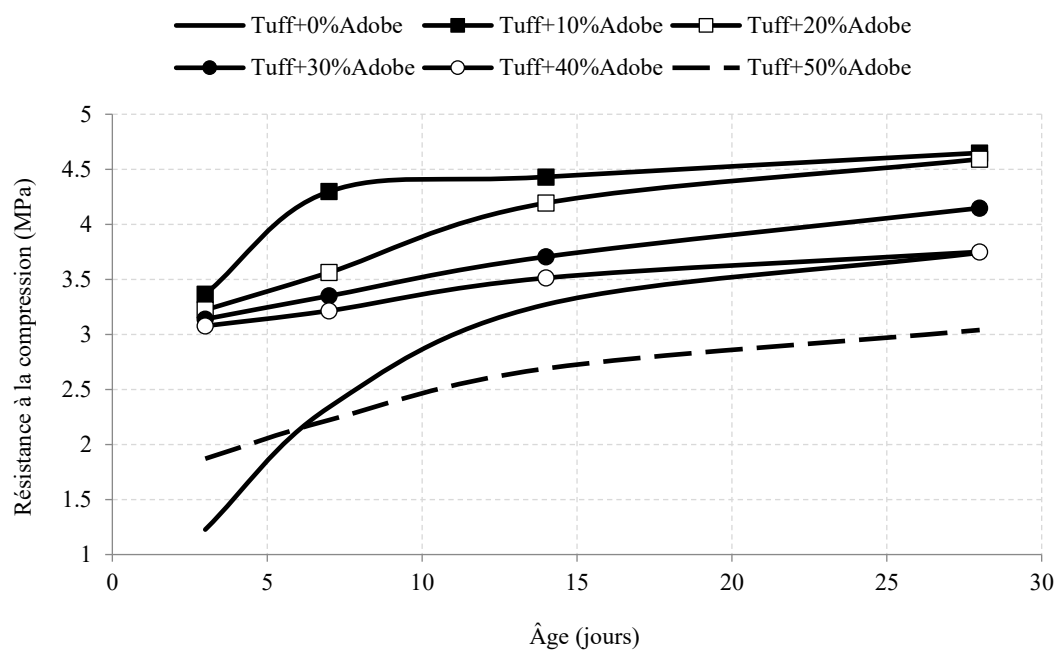


Figure 4.19. Effet de l'âge sur la résistance à la compression des mélanges

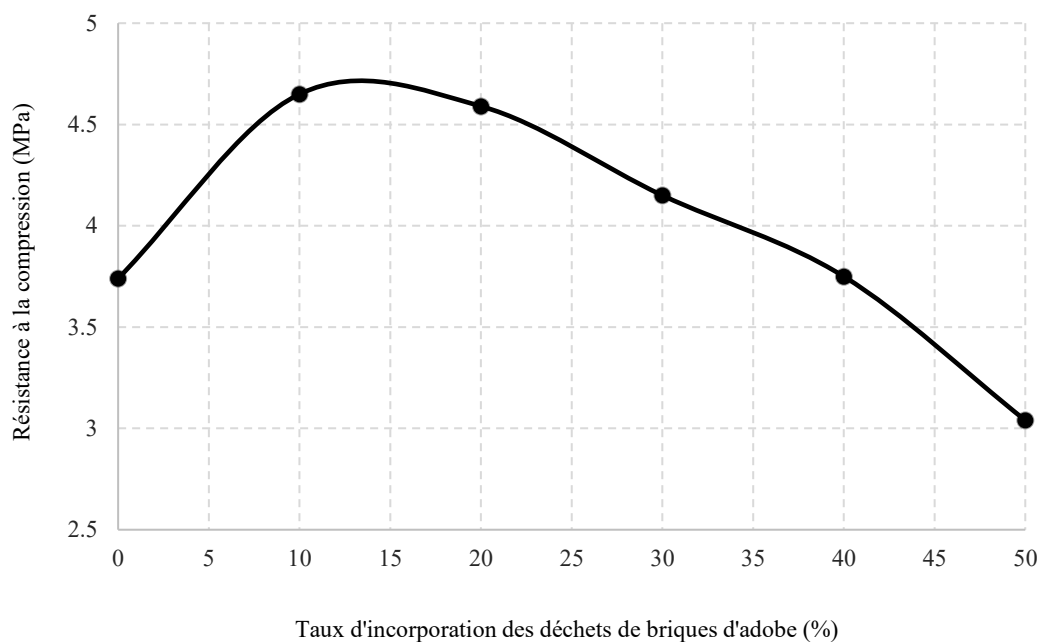


Figure 4.20. Effet des déchets de briques d'adobe sur la résistance à la compression simple des mélanges

Ces observations concordent avec plusieurs travaux antérieurs portant sur la valorisation des déchets de construction, de démolition ou d'autres sous-produits fins dans la stabilisation des sols. Il a été démontré qu'une faible proportion de fines améliore la compacité et la résistance, tandis

que des substitutions excessives tendent à réduire les performances mécaniques (Derabla & Bourema, 2016; Mansoor et al., 2024). Les résultats obtenus dans cette étude confirment ainsi que la teneur optimale en adobe se situe entre 20 % et 30 %, permettant de maximiser la résistance en compression, la performance au compactage et la durabilité globale du matériau.

L'analyse combinée des résultats CBR et UCS montre que l'incorporation de déchets de briques d'adobe dans le tuf améliore sensiblement les performances géotechniques jusqu'à une teneur optimale comprise entre 20 % et 30 %. Dans ce domaine optimal, le mélange présente une capacité portante élevée (CBR = 98 %) et une résistance en compression suffisante pour une utilisation en couche de fondation. Au-delà de cette plage, l'excès de fines perturbe le squelette granulaire, entraînant une diminution progressive du CBR et de l'UCS. Cette étude met ainsi en évidence le potentiel de co-valorisation du tuf et de l'adobe, permettant de produire un matériau durable répondant aux exigences des couches de base routières en zones arides.

4.4.4 Conclusion Concernant Les Mélanges De Tuf Et DBA

Les résultats obtenus montrent que l'ajout de déchets de briques d'adobe (DBA) améliore significativement les performances mécaniques du tuf jusqu'à un certain seuil. Sur le plan du compactage, une teneur de 10 à 20 % d'ABW a permis d'augmenter la densité sèche maximale de 19,1 à environ 20,0–20,3 kN/m³ tout en réduisant la teneur en eau optimale, alors que des proportions supérieures à 40 % ont entraîné une baisse de la compacité. Les essais CBR ont révélé une nette amélioration à 20 % d'ABW, avec une valeur atteignant 98 %, contre 67,94 % pour le tuf pur, tandis que les mélanges contenant 30–40 % sont restés au-dessus des exigences minimales. En termes de résistance à la compression (UCS), l'ajout de 20 % d'ABW a augmenté la résistance de 3,74 à 4,592 MPa, et les mélanges à 30–40 % ont présenté des valeurs encore acceptables pour les couches de fondation. Toutefois, les proportions de 50 % ont provoqué une chute marquée du CBR et de l'UCS. Globalement, les performances optimales ont été obtenues pour une substitution comprise entre 20 % et 30 %, où les mélanges affichent une bonne densité, une capacité portante élevée et une résistance mécanique satisfaisante pour les applications routières.

4.5 Conclusion

Ce chapitre a permis d'évaluer de manière approfondie l'effet de l'incorporation des déchets de briques rouges (DBR) et des déchets de briques d'adobe (DBA) sur les performances géotechniques du tuf, matériau largement utilisé dans les infrastructures routières des régions arides. Les analyses menées sur les mélanges—incluant les essais Proctor modifié, CBR et résistance à la compression simple (UCS)—ont montré que l'ajout contrôlé de fines issues de ces déchets améliore sensiblement les caractéristiques mécaniques du tuf jusqu'à un seuil optimal.

Pour les mélanges **tuf–DBR**, l'étude a démontré que des teneurs modérées, en particulier autour de **20 %**, permettent d'atteindre les meilleures performances : densité sèche maximale plus élevée, compacité améliorée, capacité portante renforcée et résistance à la compression accrue. Au-delà de 30 %, l'excès de fines de briques rouges réduit la perméabilité et perturbe le squelette granulaire, entraînant une diminution progressive des performances.

De manière similaire, les mélanges **tuf-DBA** ont montré un comportement optimal pour des taux compris entre **20 % et 30 %**. Les particules fines d'adobe contribuent au remplissage des vides, améliorant la densification et la cohésion des grains. Cependant, des proportions élevées, notamment à partir de 40–50 %, engendrent une surcharge en fines, augmentent la demande en eau et réduisent à la fois la densité sèche et la résistance mécanique.

Dans l'ensemble, les résultats confirment que la valorisation conjointe du tuf avec des déchets de briques rouges ou d'adobe représente une stratégie efficace pour obtenir des matériaux présentant un bon compromis entre compacité, portance et résistance mécanique. Les deux types de déchets offrent un potentiel d'amélioration notable lorsqu'ils sont utilisés dans une plage optimale de substitution de **20 à 30 %**, répondant ainsi aux exigences techniques des couches de fondation routières en milieu désertique.

Cette étude met en évidence l'intérêt pratique et technique d'intégrer ces matériaux recyclés dans les mélanges de tuf, tout en ouvrant la voie à des solutions constructives plus durables, économiquement viables et adaptées aux contextes géotechniques locaux.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

La problématique de la gestion durable des ressources naturelles et de la réduction de l'impact environnemental des activités de construction constitue aujourd'hui un axe majeur de recherche en ingénierie routière, en particulier dans les régions sahariennes caractérisées par des conditions climatiques sévères et une disponibilité limitée des matériaux conventionnels. Dans ce contexte, la valorisation des matériaux locaux et des déchets de construction apparaît comme une alternative stratégique permettant à la fois de préserver les ressources naturelles, de réduire les coûts de réalisation des infrastructures et de s'inscrire dans une démarche de développement durable.

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse s'inscrivent dans cette logique, en s'intéressant à la caractérisation et à la valorisation du tuf local par son association avec deux types de déchets de construction largement disponibles dans les régions sahariennes, à savoir les déchets de briques rouges et les déchets de briques en adobe. L'objectif principal était d'analyser l'influence de ces déchets sur le comportement physique et mécanique du tuf, en vue de son utilisation dans les couches d'assise et de sous-assise des chaussées, tout en tenant compte des exigences techniques, économiques et environnementales propres aux infrastructures routières en milieu aride.

L'étude expérimentale menée a permis de mettre en évidence que, bien que le tuf présente une aptitude intéressante à la compacité, ses performances mécaniques à l'état naturel restent insuffisantes pour certaines applications routières, notamment en raison de sa sensibilité à l'eau. La caractérisation physico-mécanique et chimique des matériaux étudiés a montré que les déchets de briques rouges et en adobe se distinguent par une granulométrie fine, une faible plasticité et des propriétés minéralogiques complémentaires à celles du tuf. Leur incorporation progressive au tuf a conduit à une amélioration significative de la structure granulaire des mélanges, favorisant une meilleure répartition des grains, une réduction des vides intergranulaires et, par conséquent, une augmentation de la densité sèche maximale.

Les résultats des essais mécaniques, notamment l'indice de portance CBR et la résistance à la compression simple, ont confirmé l'apport bénéfique de ces déchets dans l'amélioration du comportement mécanique du tuf. Sur le plan du compactage (essai Proctor modifié), la densité sèche maximale du tuf est passée d'environ 19,1 kN/m³ à l'état pur à 20,0 kN/m³ avec 20 % de déchets de briques rouges et à 20,0–20,3 kN/m³ avec 20 % de déchets d'adobe, tandis que la teneur en eau optimale a légèrement diminué dans les deux cas. L'indice CBR est passé de 67,94 % pour le tuf naturel à 83,53 % avec 20 % de briques rouges et jusqu'à 98 % avec 20 % de déchets d'adobe, soit la meilleure performance enregistrée. De même, la résistance à la compression simple (USC) a augmenté de 3,74 MPa pour le tuf seul à 5,05 MPa avec 20 % de briques rouges et à 4,59 MPa avec 20 % de déchets d'adobe. Les performances optimales ont été observées pour des taux d'incorporation compris entre 20 % et 30 % de déchets de briques, aussi bien pour les briques rouges que pour les briques en adobe, au-delà desquels une baisse progressive du CBR et de l'USC a été constatée (par exemple 80,19 % de CBR et 2,80 MPa d'USC à 30 % de briques rouges). Ces proportions permettent d'atteindre un équilibre satisfaisant entre performance mécanique, stabilité hydrique et limitation de la consommation de tuf vierge. Les résultats obtenus mettent ainsi en

Conclusion Générale Et Perspectives

évidence la pertinence de la co-valorisation du tuf avec des déchets de briques comme solution alternative crédible aux matériaux routiers conventionnels dans les régions sahariennes.

Sur le plan scientifique, cette thèse apporte une contribution originale à la compréhension du rôle des déchets de briques dans l'amélioration du comportement des matériaux tufacés, en établissant des relations claires entre la composition des mélanges, leurs caractéristiques granulométriques et leurs performances mécaniques. Elle fournit également des références expérimentales utiles pour l'élaboration de matériaux routiers durables adaptés aux contraintes spécifiques des zones arides.

Les résultats obtenus ouvrent plusieurs perspectives de recherche. Il serait pertinent d'approfondir l'étude du comportement à long terme des mélanges développés, notamment à travers des essais de fatigue, de durabilité et de résistance aux cycles hydriques répétés. Par ailleurs, l'évaluation des performances de ces matériaux à l'échelle réelle, par la réalisation de sections expérimentales en conditions de chantier, permettrait de valider les résultats de laboratoire et d'identifier les contraintes liées à la mise en œuvre. Enfin, l'exploration de l'association du tuf avec d'autres sous-produits industriels ou locaux, ainsi que l'intégration de ces matériaux dans des méthodes de dimensionnement mécanistes, constitue une voie prometteuse pour le développement de solutions routières encore plus performantes et durables.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Aiban, S. A. (1994). A study of sand stabilization in eastern Saudi Arabia. *Engineering Geology*, 38(1-2), 65-79.
- Akacem, M. (2017). Valorisation des matériaux locaux : Tuf et sable de dunes dans la construction routière Saharienne. (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie-Mohamed Boudiaf d'Oran).
- Akacem, M., Moulay Omar, H., Abbou, M., & Djafari, D. (2022). Study of the Effect of Adding Dune Sand to Tuff in Saharan Road Construction. *Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development*, 4(1), 46-58.
- Akacem, M., Zentar, R., Mekerta, B., Abdelfeteh, S., & Moulay Omar, H. (2020). Co-valorization of local materials tuff and dune sands in construction of roads. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(8), 435–447. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-01035-4>
- Akhtar, A., & Sarmah, A. K. (2018). Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete : A global perspective. *Journal of Cleaner Production*, 186, 262-281.
- Al-Obaydi, M. A., Abdulnafaa, M. D., Atasoy, O. A., & Cabalar, A. F. (2022). Improvement in field CBR values of subgrade soil using construction–demolition materials. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 9, 185–205. <https://doi.org/10.1007/s40515-021-00170-x>
- AlKarni, A., & ElKholy, S. M. (2012). Improving geotechnical properties of dune sands through cement stabilization. *Journal of Engineering and Computer Sciences*, 5(1), 1-19.
- Allal, M. A., & Sayagh, C. (2001). Recyclage des Déchets de Construction en Voiries. IIIème Congrès Algérien de la Route. Recueil des communications, Tome I, ARAL, Alger, p. 102.
- 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]. Université de Paris VI.
- AMEL, E. (2003). Les dunes du Tafilalet (Maroc) : Dynamique éolienne et ensablement des palmeraies. *Sécheresse*, n° 2, vol. 14, pp. 73-84.
- Améraoui, Z. (2002). Les tufs d'encroûtements, utilisation dans la géotechnique routière. Magister Thesis, National Polytechnic School, Algeria.
- Arulrajah, A., Disfani, M. M., Horpibulsuk, S., Suksiripattanapong, C., & Prongmanee, N. (2014). Physical properties and shear strength responses of recycled construction and demolition materials in unbound pavement base/subbase applications. *Construction and Building Materials*, 58, 245–257. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.025>

Références bibliographiques

- Arulrajah, A., Piratheepan, J., Disfani, M. M., & Bo, M. W. (2013). Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(8), 1077–1088. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000652](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000652)
- Balhachemi, S., & Berrafa, F. (2017). La valorisation de sable de dune (sable de Naama) Durabilité et comportement mécanique. Mémoire de magister en génie civil, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain Témouchent.
- Banna, Y., & Bedjou, A. (2004). Valorisation des sables de dunes, Rapport de phase de projet, CNERIB.
- Belhaj, N., & Khatteli, H. (1994). La dynamique des dunes dans le Sud-Ouest tunisien. *Sécheresse*, n° 4, vol. 5, pp. 245-249.
- Ben Dhia, M. (1983). Les tufs et encroûtements calcaires en Tunisie et dans le monde. *BULL LIAISON LAB PONTS CHAUSS*, 126.
- BENYOUB, A. (2011). Le sable siliceux en Algérie. Extrait du Portail Algérien des ENERGIES RENOUVELABLES.
- BOUDAD, L. (2003). Etude préliminaire de la dynamique des dunes continentales dans les Sud-Est marocain (Tafilalt, Maroc). *Sécheresse*, n° 3, vol. 14, pp. 149-156.
- Boukezzi, L. (1997). Etude des tufs calcaires : Utilisation en construction routière.
- Boutouba, K., Benessalah, I., Arab, A., & Henni, A. D. (2019). Shear strength enhancement of cemented reinforced sand: Role of cement content on the macro-mechanical behavior. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 41(4), 200–211. <https://doi.org/10.2478/sgem-2019-0020>
- Cabalar, A. F., Abdulnafaa, M. D., & Isik, H. (2019). The role of construction and demolition materials in swelling of a clay. *Arabian Journal of Geosciences*, 12, Article 361. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4552-4>
- Cabalar, A. F., & Alosman, S. O. (2021). Influence of rock powder on the behaviour of an organic soil. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80, 8665–8676. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02457-2>
- Cabalar, A. F., & Omar, R. A. (2023). Stabilizing a silt using waste limestone powder. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82, Article 300. <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03302-4>
- CHAUVIN, J. J. (1987). Les sables, guide technique d'utilisation routière. ISTeD Paris.
- Cherrak, M., Morsli, M., Boutemour, R., & Bali, A. (2015). Valorization of the use of calcareous tuff and dune sand in Saharan road design. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 9(6), 665-676.

Références bibliographiques

- Cissé, P., Zorom, M., Barbier, B., & Maiga, A. Y. (2010). Les migrations, une stratégie d'adaptation à la variabilité climatique en zones sahéliennes.
- Colombier, G. (1988). « Tufs » et encroûtements calcaires : Utilisations routières. ISTE D Paris.
- CTTP des Travaux Publics. (2001). Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves — Fascicule 2 : Hypothèses et données de dimensionnement. Alger.
- Daheur, E. G., Taibi, S., Goual, I., & Li, Z.-S. (2021). Hydro-mechanical behavior from small strain to failure of tuffs amended with dune sand—Application to pavements design in Saharan areas. *Construction and Building Materials*, 272, 121948.
- Derabla, R., & Bourema, M. (2016). Valorisation des déchets de brique rouge dans le béton à haute performance. *Academic Journal of Civil Engineering*, 34(1), 915-921. <https://doi.org/10.26168/ajce.34.1.111>
- DERRUAU, M. (1987). Précis de géomorphologie. Edition. Masson, Paris. 415 p.
- Duan, Z. H., & Poon, C. S. (2014). Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. *Materials & Design*, 58, 19-29.
- DUBIEF, J. (1953). Les vents de sable au Sahara. Proceeding colloques internationaux du centre national de la recherche scientifique. « Actions éoliennes—Phénomènes d'évaporation et d'hydrologie superficielle dans les régions arides », Alger.
- Elias, C., Paris, A. K., Paris, F., & Ioannou, I. (2016). Cradle to site life cycle assessment (LCA) of adobe bricks. *Journal of Cleaner Production*, 112, 443–452. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.016>
- El Fehem, O. K., Bella, N., & Boudia, A. (2024). Mechanical behavior of calcareous tuff and coal mine tailings mixture as an embankment material for road construction. *Studies in Engineering and Exact Sciences*, 5(2), e5759-e5759.
- Fenzy, E. (1966). Particularités de la technologie routière au Sahara. *Revue Générale des Routes et des Aérodromes*, 411, 57–71.
- FOOKE, S. P. G., & HIGGINBOTHAM, M. I. E. (1968). Some problems of construction aggregates in desert areas with particular référence to the Arabian peninsula. *Proc. Inst. Civil Engs*, vol. 68, 1, pp. 39-67 et 69-90.
- France. (1992). Loi n°92-646 du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets ainsi qu'aux installations classées pour la protection de l'environnement. Journal officiel de la République française.
- Gandia, R. M., Gomes, F. C., Corrêa, A. A. R., Rodrigues, M. C., & Mendes, R. F. (2019). Physical, mechanical and thermal behavior of adobe stabilized with glass fiber reinforced polymer waste. *Construction and Building Materials*, 222, 168–182. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.107>

Références bibliographiques

- Goual, I. (2012). Comportement mécanique et hydrique d'un mélange de tuf et de sable calcaire de la région de Laghouat : Application en construction routière.
- Goual, I., Goual, M. S., Taibi, S., & Abou-Bekr, N. (2012). Improvement of the properties of a natural tuff used in the Saharan road technique by adding limestone sand. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(6), 744–763. <https://doi.org/10.1080/19648189.2012.667653>
- Goudie, A. S. (2013). Arid and semi-arid geomorphology. Cambridge university press.
- Guettouche, M., Guendouz, M., & Boutiba, M. (2006). Sur l'existence d'un modèle-type d'encroûtement des sols arides et semi-arides en Algérie : Etude comparative entre la Tafna (Algérie nord-occidentale), les Hauts Plateaux sétifiens et le bassin hodéen (Algérie nord-orientale). *Journal des Sciences Pour l'Ingénieur*, 6, 65-80.
- GUERMITI, L. (2013). Contribution a l'amélioration de certaines caractéristiques du béton de structure à base de Sable de dune corrigé et renforcé par des fibres Métalliques, Mémoire de MAGISTER, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- Gul, N., & Mir, B. A. (2022). Influence of glass fiber and cement kiln dust on physicochemical and geomechanical properties of fine-grained soil. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7, Article 344. <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00943-4>
- Hamrouni, A. (1975). Routes économiques et routes à faible circulation. XVeme Congres mondial de la route.
- Hamzaoui, R., Bouchenafa, O., Idir, R., Djerbi, A., Fen-Chong, T., Florence, C., & Boutin, F. (2024). Development of Sustainable Construction Materials from Inert Waste Mixtures Using the Mechanosynthesis Process. *Materials*, 17(17), 4301.
- Horta, O. (1979). LES ENCROUTEMENT CALCAIRES ET LES ENCROUTEMENTS GYPSEUX EN GEOTECHNIQUE ROUTIERE.
- Hueber, D. (2001). Manuel d'information sur la gestion des déchets solides urbains. Algiers, Algeria: Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement.
- Illampas, R., Ioannou, I., & Charmpis, D. C. (2013). Overview of the pathology, repair and strengthening of adobe structures. *International Journal of Architectural Heritage*, 7(2), 165-188.
- Khellou, A., Abdelouahed, K., Abdelatif, H., Khadija, M., & Hind, S. (2021). Study of the mechanical properties of gypsum tuff–dune sand mixture for use in Saharan road construction. *International Journal of Integrated Engineering*, 13(4), 254–262. <https://doi.org/10.30880/ijie.2021.13.04.024>
- KHangaoui, S. (2013). Valorisation du sable de dunes en couche de roulement sable—Bitume, thèse de Magister en génie civil, Géo—Matériaux.
- Kou, S., & Poon, C. S. (2012). Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Construction and building materials*, 35, 69-76.
- Lafayette, K. P. V., Paz, D. H. F., Holanda, M. J. D. O., & Costa, L. A. R. D. C. (2018). Analysis of generation and characterization of construction and demolition waste on construction sites in Recife, Brazil. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 23(3). <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0503>
- Laquerre, M., & Pilon, I. (1999). Guide d'information sur le recyclage des matériaux secs.

Références bibliographiques

- Leghrieb, Y. (2012). Etude Et Valorisation Des Sables Des Dunes Dans La Confection Des Briques, Thèse De Doctorat.
- Lukiantchuki, J., Oliveira, J., Almeida, M., Silva, T., & Guideli, L. (2019). Construction and demolition waste (CDW) used in reinforced soil mixtures for pavement applications. *17*.
- Mainguet, M., & Jacqueminet, C. (1984). Le grand Erg Occidental et le grand Erg Oriental. Travaux de l'Institut de Géographie de Reims, n° 59-60, pp. 29-48.
- Malladi, R. C., Chandran, G., & Selvaraj, T. (2024). Upcycling of construction and demolition waste : Recovery and reuse of binder and fine aggregate in cement applications to achieve circular economy. *Cleaner Engineering and Technology*, 100864.
- Mansoor, S. S., Hama, S. M., & Hamdullah, D. N. (2024). Effectiveness of replacing cement partially with waste brick powder in mortar. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 36(7), 524-532.
- Martina, N., Bakti, R. N., Hasan, M. F. R., Agung, P. A. M., & Setiawan, Y. (2022). Compressive strength of concrete using lightweight brick waste as the substitute for fine aggregate. *GEOMATE Journal*, 23(98), 189-196.
- Mei, Z., Huanan, H., & Xianggang, Z. (2023). Experiment on the performance of recycled powder of construction waste on adobe materials. *Buildings*, 13(5), 1358. <https://doi.org/10.3390/buildings13051358>
- MESLI, H. (2017). Construire une architecture bioclimatique par le retour aux origines traditionnelles (cas du Taghit).
- Mohammadinia, A., Arulrajah, A., Sanjayan, J., Disfani, M. M., Bo, M. W., & Darmawan, S. (2015). Laboratory evaluation of the use of cement-treated construction and demolition materials in pavement base and subbase applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(6), 04014186. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001131](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001131)
- Moret, L. (1962). L'histoire géologique des Alpes françaises. *Le Globe. Revue genevoise de géographie*, 102(1), 17-18.
- Morsli, M. (2007). Contribution à la valorisation des tufs encroûtés dans la technologie routière saharienne. Thèse de doctorat, École Nationale Polytechnique, Algérie.
- Morsli, M., Bali, A., Bensaïbi, M., & Gambin, M. (2007). Study of the hardening of a crust tuff from Hassi-Messaoud (Algeria). *European Journal of Civil Engineering*, 11(9–10), 1219–1240. <https://doi.org/10.1080/17747120.2007.9692985>
- Moulay Omar, H., Mekerta, B., Jarno, A., Imanzadeh, S., Alem, A., & Taïbi, S. (2022). Optimization of dune sand-based mixture material for pavement design. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(11), 4952-4972.
- Moulay Omar, H., Zentar, R., Akacem, M., Mekerta, B., & Mouli, M. (2022). Co-valorization of tuff and sandy residues in roads construction. *Civil Engineering Journal*, 8(5), 1029–1045. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-05-013>
- Netterberg, F. (1978). Prospecting for calcrete road materials in South and South West Africa. *Civil Engineering= Siviele Ingenieurswese*, 1978(1), 3-10.
- Office National de la Météorologie (ONM). (2021). *Bilan climatique 2020*
- Paute, J.-L., Hornych, P., & Benaben, J.-P. (1994). Comportement mécanique des graves non traitées. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 190, 27-38.
- Pereira, P. M., & Vieira, C. S. (2022). A literature review on the use of recycled construction and demolition (C&D) materials in unbound pavement applications. *Sustainability*, 14(21), 13918. <https://doi.org/10.3390/su142113918>

Références bibliographiques

- Ramachandran, V. (1981). Utilisation des déchets et sous-produits comme granulats du béton. Division des recherches en construction, CBD-215-F, conseil national de recherches Canada juin.
- Renou, E. (1848). Géologie de l'Algérie. L'exploration scientifique de l'Algérie pendant les années 1840, 1841, 1842, publiée par ordre du Gouvernement, 1-164.
- Ruellan, A. (1970). Quelques réflexions sur la paléopédologie. *Bzill. Ass. FU. Et. Quat*, 23(24), 179-180.
- Silva, A. C. D., Fucale, S., & Ferreira, S. R. D. M. (2019). Effect of construction and demolition waste addition on the hydromechanical properties of a sandy-clayey soil. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 24(3). <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190003.0731>
- Silva, R., De Brito, J., & Dhir, R. K. (2017). Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain : A review. *Journal of Cleaner Production*, 143, 598-614.
- SPERANDIO, K. (2001). Identification des facteurs mobilisateurs des stratégies de gestion des déchets ménagers mises en oeuvre par les collectivités locales, thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon.
- Subramanian, R., Vijayaprakash, S., Subramaniam, Y., & Venkatraman, Y. (2025). A study on the strength and durability of cement mortar featuring partial brick powder replacement. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 30, e20240792. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0792>
- Travers, C. (1997). Dictionnaire Hachette encyclopédique illustré. Paris : Hachette.
- Vegas, I., Ibañez, J. A., Lisbona, A., De Cortazar, A. S., & Frías, M. (2011). Pre-normative research on the use of mixed recycled aggregates in unbound road sections. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2674-2682.
- Zoght, M. F. (1979). Sand dunes fixation, afforestation and exploitation. Damas ACSAD.
- Zaidi, A., Izzemmouren, O., Taallah, B., & Guettala, A. (2022). Mechanical and durability properties of adobe blocks filled with date palm wastes. *World Journal of Engineering*, 19(4), 532–545. <https://doi.org/10.1108/WJE-02-2021-0094>
- Zeybek, A., Tanyildizi, M., Tosun, I., & Cabalar, A. F. (2025). Geotechnical characteristics of clayey soil stabilized with fly ash and marble dust. *Transportation Geotechnics*, 52, 101558.

Annexes

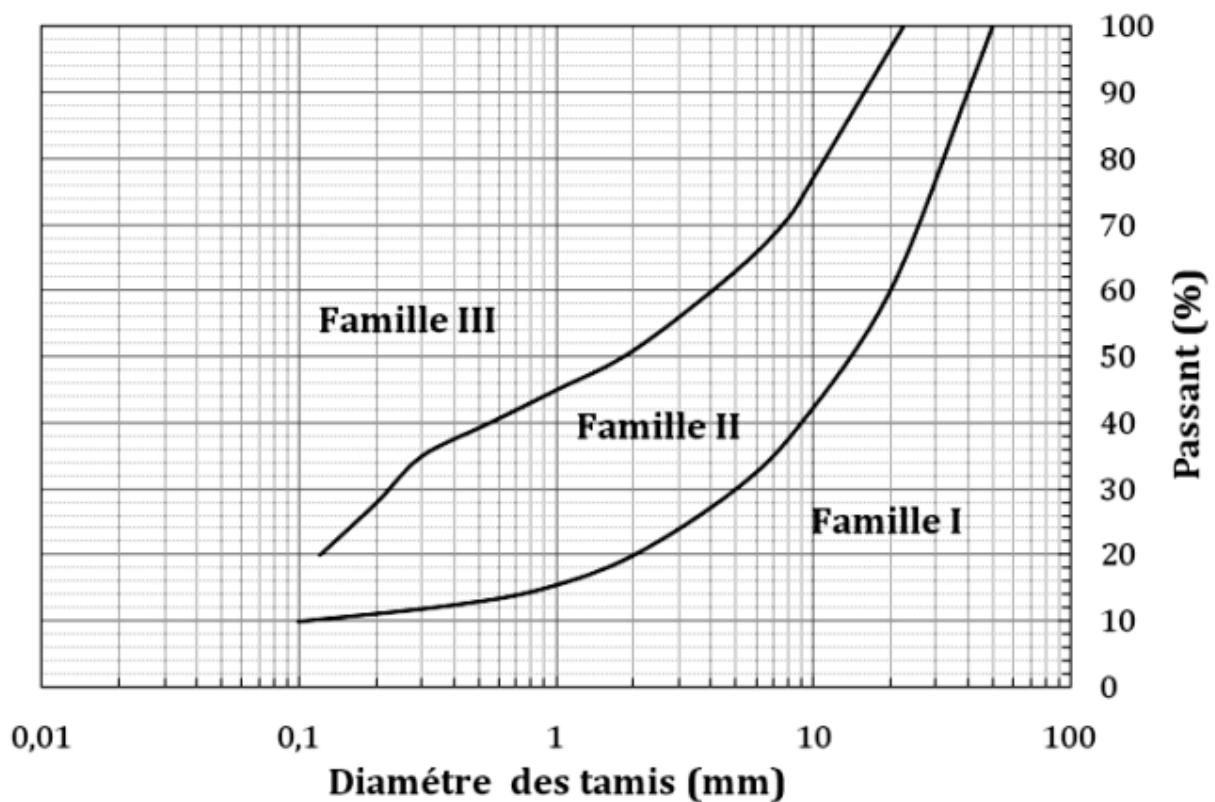
Annexe I

- Définition de la technique routière saharienne

Suite à l'édification de plusieurs milliers de kilomètres de routes dans le Sahara, dont plus de 2500 km entre 1956 (année de détection des premiers gisements de pétrole) et 1963 (moment de la première conférence sur les méthodes de construction de routes sahariennes), une approche routière spécifique au Sahara a vu le jour et a depuis établi ses propres standards et caractéristiques. C'est en 1965, durant le premier congrès de la route qui s'est tenu à Beni-Abbès, que les principes de la technique routière saharienne ont été défendus et établis (Fenzy, 1966 et 1970).

Entre-temps, plusieurs articles de synthèse ont été publiés sur cette méthode, et des recherches spécifiques ont aussi concerné certains matériaux particuliers.

- Domaine d'application



Fuseau de spécification de la technique routière saharienne (Fenzy, 1966)

Famille I : des éléments dont la courbe de granulométrie est totalement ou partiellement située sous le fuseau (zone I du graphique). Ce sont des matériaux à structure avec une forte proportion de vide (ballast). L'utilisation de ces matériaux dans la base de chaussée est envisageable ;

Annexes

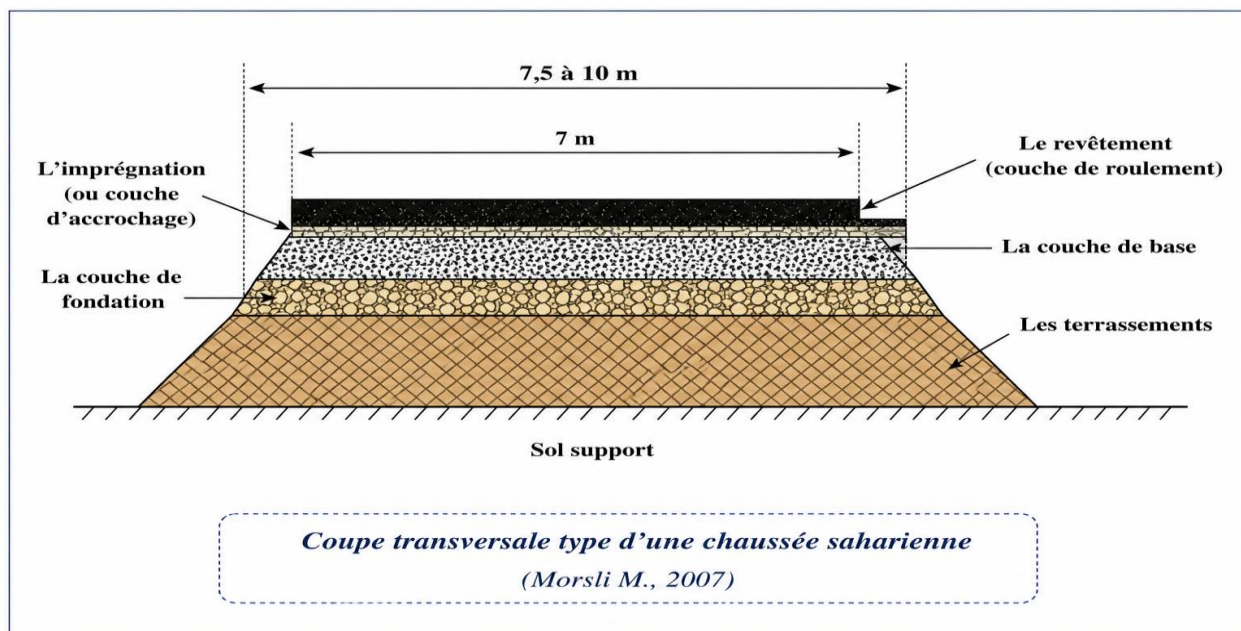
cependant, chaque cas doit être examiné en tenant compte des risques de ségrégation et de compactage ; l'établissement de planches d'essai est parfois indispensable avant de prendre une décision.

Famille II : matériaux dont la courbe de granulométrie se situe entièrement à l'intérieur du fuseau (zone II du graphique) ; ces matériaux sont dits à ossature. Nous appliquerons à eux les critères concernant les matériaux à un angle de friction élevé.

Famille III : des matériaux dont la courbe des granulométries se situe au-dessus du fuseau, totalement ou partiellement (zone III du graphique). Des éléments fins, le squelette est soit absent, soit englouti parmi ceux-ci. Les critères concernant les « matériaux à cohésion élevée » seront appliqués.

- Structure de la chaussée saharienne

D'après les sources citées (Fenzy, 1970 ; Inal, 1980 ; Boularek, 1989 ; Baslimane, 1994), les routes sont construites avec un remblai de faible hauteur, cette configuration facilitant le drainage et modifiant positivement le contenu d'eau d'équilibre sous-couche, et les matériaux d'excavation sont évités puisqu'ils favorisent le sarclage des chaussées. On privilégie fréquemment le concept d'une assise uniforme ; son épaisseur peut aller de 15 cm à 30 cm. Elle est effectuée chaque fois que c'est faisable avec un matériau identique conforme à des normes sévères dérivant de la TRS. Quand il n'y a pas suffisamment de matériaux de haute performance, la couche de fondation, qui représente les 10 premiers centimètres inférieurs, est constituée d'un matériau de qualité inférieure. La structure de la chaussée se dessine alors selon le modèle figuré ci-dessous.



Annexes

- 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 ; (yd = 0,95. yd 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.

■ Tufs 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.

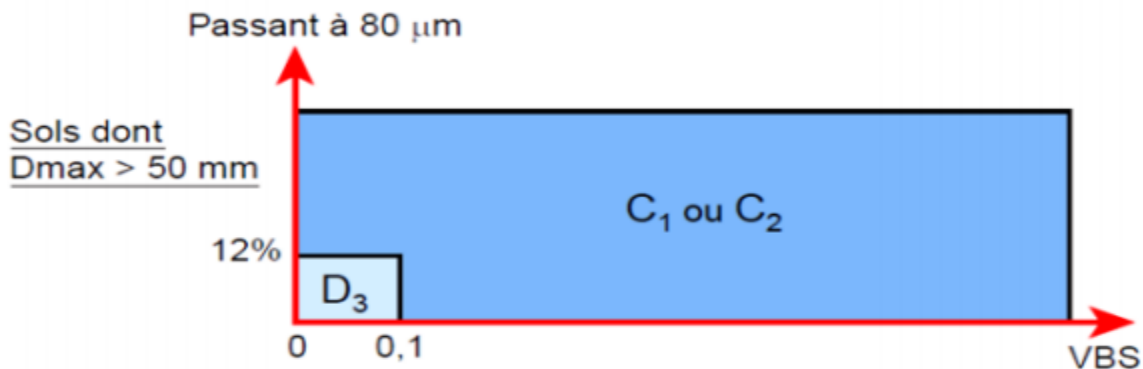
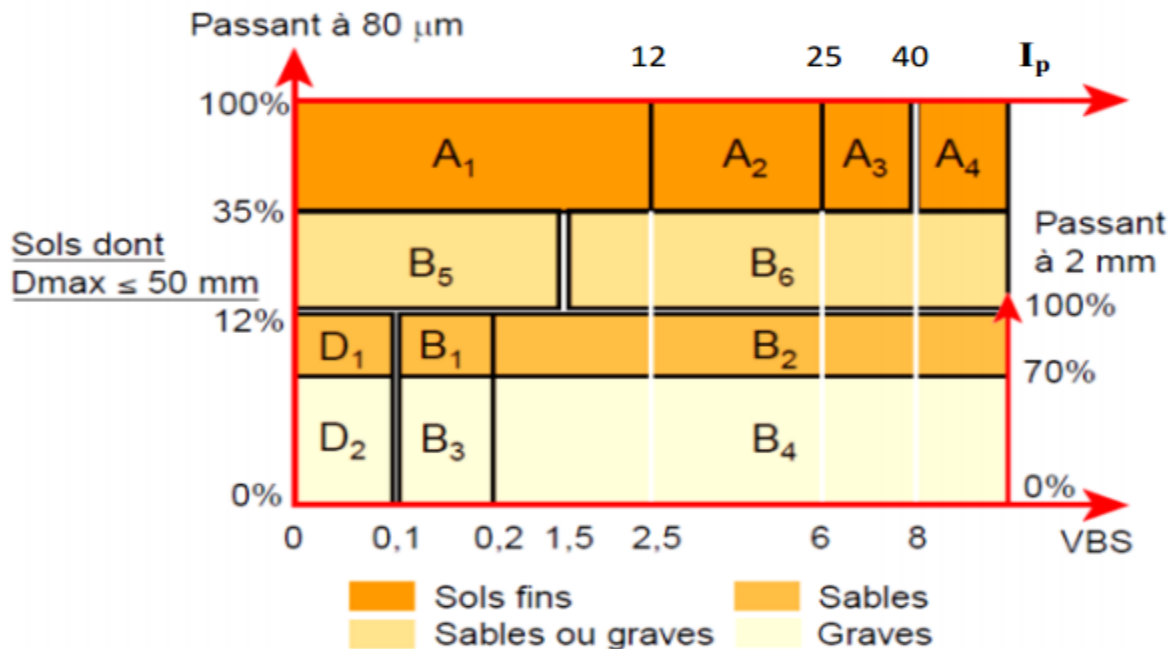
Annexes

- Classification des matériaux

1. 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 (Setra LCPC ; 1992), permet de classer les sols, en fonction d'un certain nombre de paramètres (Passant à 80 μm , passant à 2 mm, l'indice de plasticité I_p et la valeur au bleu V_{bs}), en :

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



Annexes

2. Classification des sols grenus – LPC/USCS

plus de 50 % des éléments > 0,08 mm					
Définitions			Symboles	Conditions	Appellations
GRAVES	Plus de 50% d'éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm	moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	Gb (GW)	Cu > 4 et Cc compris entre 1 et 3	grave propre bien graduée
			Gm (GP)	Une des conditions de Gb non satisfaite	grave propre mal graduée
		plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	Gm (GP)	Limite d'Atterberg au-dessous de A	grave limoneuse
			GL (GM)	Limite d'Atterberg au-dessus de A	grave argileuse
SABLES	Plus de 50% d'éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	Sb (SW)	Cu > 6 et Cc compris entre 1 et 3	sable propre bien gradué
			Sm (SP)	Une des conditions de Sb non satisfaite	sable propre mal gradué
		plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	SL (SM)	Limite d'Atterberg au-dessous de A	sable limoneux
			SA (SC)	Limite d'Atterberg au-dessus de A	sable argileux
Lorsque 5 % < % inférieur à 0,08 mm < 12 % : on utilise un double symbole.					

Annexes

Annexe II

- Échantillon de maisons abandonnées construites en briques d'adobe.



Annexes

- Éprouvettes de briques rouges et briques d'adobe destinées à l'essai de compression simple.



Annexes

- Exécution de l'essai de compression simple sur les briques rouges



- Exécution de l'essai de compression simple sur les briques d'adobe



Annexes

- Mesure de la charge appliquée lors de l'essai de compression simple

