

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة حسيبة بن بوعلي - الشلف

Université Hassiba Benbouali – Chlef

كلية الهندسة المدنية و المعمارية

Faculté de Génie Civil et d'Architecture

قسم الهندسة المدنية

Département de Génie-civil



Mémoire de Master

Filière : Travaux Publics

Spécialité : Voies et Ouvrages d'Art

Thème

Effet du pavé d'asphalte recyclé (RAP) sur les propriétés géotechniques d'un tuf naturel utilisé en travaux routiers

Présenté par :

- SYADI M. M. Mhady
- KHELIFI Abdelmalek

Dirigé par :

Dr. AZAIEZ Hamou

Promotion : 2023/2024

Dédicaces

Nous dédions cet humble travail à nos Chers parents.

Aucune dédicace ne peut exprimer notre respect, notre amour éternel et notre reconnaissance pour les sacrifices que vous avez faits pour notre éducation.

Nous vous remercions pour tout le soutien et l'amour que vous nous avez donnés depuis l'enfance et j'espère que vos bénédictions seront toujours avec nous. Nous espérons également que cet humble travail sera l'accomplissement de vos désirs bien formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, même si nous ne vous paierons jamais assez. Que Dieu Tout-Puissant vous accorde santé, bonheur et longue vie.

À toutes chères sœurs et à tous les frères, nous vous remercions pour votre compréhension et vos encouragements, qui ont été pour nous le principal soutien, et nous vous souhaitons beaucoup de bonheur et de réussite dans votre vie. Aux amis, merci pour les bons conseils et le soutien moral qui nous ont beaucoup aidés pendant cette période.

Pour toutes nos familles, petites et grandes, J'espère que vous trouverez dans cet acte humble une expression de notre amour.

À tous les professeurs qui ont contribué à notre formation.

Nous voudrions enfin remercier toutes les personnes qui ont cru en nous et qui nous ont donné envie de partir en avant.

SYADI M.M. MHADY

Dédicaces

C'est avec un immense plaisir, une joie incommensurable, que je dédie mon modeste travail à mes très chers parents qui m'ont soutenu tout au long de ma vie et de mon parcours universitaire, celui qui m'a fait de moi un homme, qu'Allah leur procure bonne santé et longue vie, à mes frères et sœurs, ainsi qu'à toute ma famille.

Je profite de dédier une dédicace particulière à mes professeurs qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

*À tous mes chers amis et mes collègues de la promotion 2023/2024
Option : Voies et ouvrages d'art de la filière de travaux publics et à toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont apporté le soutien et prodigué leurs encouragements. Qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance et mes remerciements.*

Khelifi Abdelmalek

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Allah Tout-Puissant pour Ses bénédictions tout au long de ces années d'études, et pour nous avoir donné la volonté, la patience et le courage d'achever ce travail.

Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude et notre profonde appréciation à notre encadreur, Monsieur **Dr. AZAIEZ Hamou**, Maître-assistant au département de Génie Civil, pour sa supervision de ce travail et ses précieux conseils.

Nous souhaitons également exprimer nos sincères remerciements à l'Ingénieur Herihli el Eid, ainsi qu'à tous les techniciens de la DTP Chlef, pour leur suivi constant, leurs orientations, leurs conseils et leurs encouragements tout au long du processus.

Nous remercions également les membres du jury qui ont accepté de juger ce travail.

Enfin, nous remercions tous nos amis et toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Table des matières

Liste des figures	I
Liste des tableaux	IV
Résumé	V
الملخص.....	VI
Abstract	VII
Notations	VIII
Introduction générale.....	1
1 Chapitre 1 : Structures des chaussées et applications du tuf.....	4
1.1 Introduction	4
1.2 Structure de corps de chaussée	4
1.2.1 Sol support.....	5
1.2.2 Couche de forme	5
1.2.3 Couches d'assise	5
1.2.3.1 Couche de fondation	5
1.2.3.2 Couche de base	5
1.2.4 Couche de surface	5
1.2.4.1 Couche de roulement	6
1.2.4.2 Couche de liaison.....	6
1.3 Types de chaussée	6
1.3.1 Chaussée souple	7
1.3.2 Chaussée semi-rigide.....	7
1.3.3 Chaussée rigide	8
1.3.4 Chaussée mixte.....	9

1.3.5	Chaussée à structure inverse (sandwich).....	9
1.3.6	Chaussée à structure bitumineuse	9
1.4	Matériaux de chaussée.....	10
1.4.1	Fines	10
1.4.2	Granulat	10
1.4.2.1	Sable.....	10
1.4.2.2	Grave.....	11
1.4.2.3	Gravier	11
1.5	Généralités sur les tufs.....	11
1.5.1	Définitions des tufs.....	11
1.5.2	Types des tufs d'encroûtements.....	12
1.5.2.1	Les encroûtements calcaires	12
1.5.2.2	Les encroûtements gypseux	13
1.5.2.3	Les encroûtements mixtes.....	13
1.5.3	Utilisation des tufs calcaires en constructions routières.....	13
1.5.4	Stabilisation de tuf par des liants hydrauliques	14
1.5.5	Mélanges de tuf avec d'autres matériaux	15
1.5.5.1	Mélange Tuf – Sable de dune	16
1.5.5.2	Mélange Tuf - Sable concassé	17
1.5.5.3	Mélange Tuf - Émulsion bitume	17
1.5.5.4	Mélange Tuf - chaux	18
1.5.5.5	Mélange Tuf - ciment.....	19
1.5.5.6	Mélange Tuf – Cendres.....	20
1.5.5.7	Mélange Tuf - Laitier	21

1.6	Tufs avec bétons	23
1.7	Conclusion	24
2	Chapitre 2 : Recyclage et matériaux recyclés.....	26
2.1	Introduction	26
2.2	Définition de Recyclage	26
2.3	Principes de recyclage	27
2.4	Techniques de recyclage.....	27
2.5	Étapes de recyclage	28
2.5.1	Collecte de déchets.....	28
2.5.2	Transformation	28
2.5.3	Commercialisation et consommation	28
2.6	Avantages du recyclage	28
2.7	Principaux recyclât utilisés dans le domaine de génie civil	29
2.7.1	Le béton.....	29
2.7.2	La brique	30
2.7.3	La céramique	31
2.7.4	L'acier	32
2.7.5	Le plastique	34
2.8	Pavé d'Asphalte Recyclé (RAP).....	35
2.8.1	Méthodes de recyclage d'asphalte.....	36
2.8.1.1	Recyclage de l'asphalte à froid ou à chaud.....	37
2.8.1.2	Recyclage d'asphalte à chaud.....	37
2.8.1.3	Recyclage d'asphalte à froid en place	37
2.9	Utilisation du RAP dans le domaine des travaux publics.....	38

2.9.1	Mélange Ciment-RAP	40
2.9.2	Mélange Agrégats-RAP	40
2.10	Conclusion	41
3	Chapitre 3 : Matériaux et méthodes.....	43
3.1	Introduction	43
3.2	Programme expérimental.....	44
3.3	Préparation des matériaux	44
3.4	Essais d'identification.....	45
3.4.1	Teneur en eau à l'état naturel	45
3.4.2	Analyse granulométrique	45
3.4.3	Equivalent de sable (NF EN 933-8)	48
3.4.4	Valeur au bleu de méthylène (NF P 94-068).....	49
3.4.5	Los Angeles (LA) et Micro-deval	50
3.4.5.1	Essai Los Angeles (NF P18-573).....	50
3.4.5.2	Essai Micro Deval (NF P18-572)	50
3.4.6	Masse volumique des particules solides (NF P 94-054)	51
3.4.7	Indices des vides extrêmes	52
3.4.7.1	Indice des vides maximal $e_{\max}$	52
3.4.7.2	Indice des vides minimal $e_{\min}$	53
3.4.8	Teneur en eau optimale (w_{OPN}) et densité sèche maximale (γ_{dOPN}) (NF P 94-093) .	54
3.5	Essais mécaniques	56
3.5.1	Essai Proctor modifié (NF P 94-093)	56
3.5.2	Essai CBR (NF P 94-078)	58
3.5.3	Essai de cisaillement direct (NF P94-071-1).....	60

3.6	Conclusion	62
4	Chapitre 4 : Résultats et discussions	65
4.1	Introduction	65
4.2	Résultats de compactage.....	66
4.2.1	Courbes Proctor modifié	66
4.2.2	Variation des paramètres de compactage en fonction du RAP	69
4.2.3	Indice des vides	70
4.2.4	Degré de saturation.....	71
4.2.5	Porosité.....	72
4.3	Résultats des essais de CBR imbibé.....	73
4.3.1	Courbes force-pénétration	73
4.3.2	Variation de la densité sèche en fonction de l'indice CBR imbibé.....	76
4.3.3	Indice CBR à l'optimum Proctor modifié	77
4.4	Résultats des essais de cisaillement.....	78
4.4.1	Contrainte normale $\sigma_n = 100$ kPa	79
4.4.2	Contrainte normale $\sigma_n = 200$ kPa	79
4.4.3	Contrainte normale $\sigma_n = 400$ kPa	80
4.4.4	Effet de l'ajout du RAP sur la résistance au cisaillement maximale du Tuf.....	81
4.4.5	Resistance au cisaillement maximale en fonction de contrainte normale	82
4.4.6	Variation de l'angle de frottement et de la cohésion	83
4.4.6.1	Angle de frottement interne	84
4.4.6.2	Cohésion	84
4.5	Conclusion.....	85
	Conclusion générale	88

Références bibliographiques	90
--	-----------

Liste des figures

Figure 1.1 : Différentes couches de la chaussée routière (Léa Ordener, 2023).	4
Figure 1.2 : Différentes catégories de chaussées (El Fahssi, 2018).	6
Figure 1.3 : Structure d'une chaussée souple (Infociments, 2019).	7
Figure 1.4 : Structure d'une chaussée semi-rigide (Infociments, 2019).	8
Figure 1.5 : Structure d'une chaussée rigide (Infociments, 2019).	8
Figure 1.6 : Schéma de circuit de la formation des tufs calcaires (Goual, 2012).	12
Figure 1.7 : Incorporation de la chaux ou du ciment à l'aide d'un épandeur (Tayebi et Triki, 2019).	20
Figure 1.8 : Cendres utilisées en techniques routières (Souchu, 2014).	21
Figure 1.9 : Laitier de haut-fourneau granulé (Belhocine et Sefroune, 2018).	22
Figure 2.1 : Ruban de Möbius - symbole universel des matériaux recyclables.	26
Figure 2.2 : Broyage du béton (Oumeddour, 2020).	30
Figure 2.3 : Déchet de brique (Oumeddour, 2020).	31
Figure 2.4 : Déchet de céramique (Oumeddour, 2020).	32
Figure 2.5 : Recyclage de l'acier (Oumeddour, 2020).	33
Figure 2.6 : Cycle de recyclage de l'acier (Oumeddour, 2020).	33
Figure 2.7 : Phases de la confection des pavés de sol (Gilles et Sorgho, 2009).	35
Figure 2.8 : Matériaux de chaussée en asphalte récupéré (RAP) (D'après : Theconstructor.org). ..	35
Figure 2.9 : Recyclage de l'asphalte à froid (D'après : metongfrench)	38
Figure 3.1 : Localisation du site de prélèvement.	43
Figure 3.2 : Préparation des matériaux.	44
Figure 3.3 : Courbes granulométriques du Tuf et du RAP.	47
Figure 3.4 : Etapes de l'essai au bleu de méthylène.	49

Figure 3.5 : Procédure de la mesure de la masse volumique des grains solides.	51
Figure 3.6 : Etapes de l'essai Proctor normal.	55
Figure 3.7 : Courbe Proctor normale : (a) Tuf ; (b) RAP.	55
Figure 3.8 : Mode du compactage.	57
Figure 3.9 : Reproduction de l'effet du pneu par l'essai CBR.	58
Figure 3.10 : Appareillage de l'essai CBR.	59
Figure 3.11 : Appareil de cisaillement direct à la boîte de Casagrande.	61
Figure 3.12 : Dispositif de la boîte de cisaillement.	61
Figure 3.13 : Exemple d'échantillon préparé par la technique de damage humide	62
Figure 4.1 : Organigramme de recherche d'une formulation optimale.	65
Figure 4.2 : Densité sèche en fonction de teneur en eau pour 100% Tuf et : (a)- 10%RAP ; (b)- 20%RAP ; (c)- 30%RAP.	68
Figure 4.3 : Densité sèche en fonction de teneur en eau des différents mélanges (Tuf/RAP).	69
Figure 4.4 : Variation de teneur en eau optimale et densité sèche optimale des différents mélanges (Tuf/RAP).	70
Figure 4.5 : Variation d'indice des vides en fonction de RAP.	71
Figure 4.6 : Variation du degré de saturation en fonction de RAP.	72
Figure 4.7 : Porosité en fonction de RAP.	72
Figure 4.8 : Courbes d'essai CBR imbibé pour les mélanges Tuf/RAP à différentes énergies : (a) RAP = 0% ; (b) RAP = 10% ; (c) RAP = 20% ; (d) RAP = 30%.	75
Figure 4.9 : Densité sèche maximale en fonction de l'indice CBR : (a) RAP = 0% ; (b) RAP = 10% ; (c) RAP = 20% ; (d) RAP = 30%.	77
Figure 4.10 : Evolution de l'indice CBR (à 95% et 98% de l'OPM) en fonction de RAP.	78
Figure 4.11 : Comportement mécanique des mélanges Tuf /RAP, $\sigma_n = 100$ kPa.	79
Figure 4.12 : Comportement mécanique des mélanges Tuf /RAP, $\sigma_n = 200$ kPa.	80

Figure 4.13 : Comportement mécanique des mélanges Tuf /RAP, $\sigma_n = 400$ kPa.	81
Figure 4.14 : Résistance au cisaillement maximale en fonction de RAP et la contrainte normale initiale $\sigma_n = 100, 200$ et 400 kPa.	82
Figure 4.15 : Résistance au cisaillement maximale en fonction de contrainte normale.	83
Figure 4.16 : Angle de frottement en fonction de RAP des mélanges Tuf/RAP.	84
Figure 4.17 : Cohésion en fonction de RAP des mélanges Tuf/RAP.	85

Liste des tableaux

Tableau 3.1 - Résultats de teneur en eau naturel du tuf	45
Tableau 3.2 - Résultats d'analyse granulométrique du tuf	46
Tableau 3.3 - Résultats d'analyse granulométrique du RAP	46
Tableau 3.4 - Paramètres granulométriques du tuf et du RAP	47
Tableau 3.5 - Résultats d'équivalent de sable pour le tuf et le RAP	48
Tableau 3.6 - Résultats de l'essai au bleu de méthylène.....	49
Tableau 3.7 - Résultats de la masse volumique des grains solide pour le tuf et RAP	52
Tableau 3.8 - Indice des vides maximal	53
Tableau 3.9 - Indice des vides minimal	54
Tableau 3.10 - Exemple du calcul de la densité sèche	55
Tableau 4.1 - Valeurs de l'angle de frottement et de la cohésion des mélanges Tuf/RAP.....	83

Résumé

Cette étude en laboratoire vise à évaluer la faisabilité potentielle d'un mélange de tuf et de pavé d'asphalte recyclé (RAP) dans la construction de routes. L'étude a impliqué une analyse complète des propriétés géotechniques du mélange tuf-RAP, telles que la distribution granulométrique, la densité, le comportement de compactage, la résistance au cisaillement et la perméabilité du matériau. L'objectif est de déterminer l'aptitude de ce mélange à des applications de construction routière, y compris les couches de fondation ou de base. L'un des objectifs clés de cette recherche était d'explorer les avantages potentiels du recyclage du matériau RAP et de son incorporation dans la construction routière. La réutilisation du RAP permet non seulement de réduire les déchets, mais aussi de minimiser la demande de nouveaux matériaux vierges, rendant ainsi le processus de construction plus durable et rentable. Cette approche contribue à économiser des ressources et à réduire les coûts de construction.

Mots-clés : Tuf, pavé d'asphalte recyclé (RAP), compactage, portance, travaux routiers.

الملخص

تهدف هذه الدراسة المخبرية إلى تقييم إمكانية استخدام مزيج من التوف والرصف الأسفلتي المعاد تدويره (RAP) في بناء الطرق. تضمنت الدراسة تحليلاً شاملاً للخصائص الجيوتقنية لمزيج التوف والرصف الأسفلتي المعاد تدويره، مثل توزيع حجم الحبيبات، والكثافة، وسلوك الضغط، وقوة القص، ونفاذية المواد. الهدف هو تحديد مدى ملاءمة هذا المزيج لتطبيقات بناء الطرق، بما في ذلك طبقات الأساس أو القاعدة. كان أحد الأهداف الرئيسية لهذا البحث هو استكشاف الفوائد المحتملة لإعادة تدوير هذه المادة ودمجها في بناء الطرق. إعادة استخدام الرصف الاسفلتي لا يقلل فقط من النفايات بل يقلل أيضاً من الطلب على المواد الخام الجديدة، مما يجعل عملية البناء أكثر استدامة وفعالية من حيث التكلفة. هذه المقاربة تساعد على توفير الموارد وتقليل تكاليف البناء.

الكلمات المفتاحية: التوف، الرصف الأسفلتي المعاد تدويره، الضغط، القدرة على التحمل، أعمال الطرق.

Abstract

This laboratory study aims to evaluate the potential feasibility of a mixture of tuff and recycled asphalt pavement (RAP) in road construction. The study involved a comprehensive analysis of the geotechnical properties of the tuff-RAP mixture, such as grain size distribution, density, compaction behavior, shear strength, and material permeability. The objective is to determine the suitability of this mixture for road construction applications, including foundation or base layers. One of the key goals of this research is to explore the potential benefits of recycling RAP material and incorporating it into road construction. Reusing RAP not only reduces waste but also minimizes the demand for new raw materials, thus making the construction process more sustainable and cost-effective. This approach helps save resources and reduce construction costs.

Keywords: Tuff, recycled asphalt pavement (RAP), compaction, bearing capacity, roadworks.

Notations

SETRA	: Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements
LCTP	: Laboratoire Central Des Travaux Publics
IPI	: Indice portant immédiat
OPM	: Optimum Proctor Modifié
CBR	: Indice portant californien (California Bearing Ratio)
W_n	: Teneur en eau naturelle du sol
VBS	: Valeur au bleu de méthylène
ES	: Equivalent de sable
LA	: Coefficient de Los Angeles
MDE	: Coefficient micro Deval en présence d'eau
ϕ	: Angle de frottement du sol
C	: Cohésion
γ_d	: Densité sèche
W_{opm}	: Teneur en eau à l'optimum Proctor modifié
W_{opn}	: Teneur en eau à l'optimum Proctor normal
w	: Teneur en eau
σ	: Contrainte normale
τ_{max}	: Résistance au cisaillement maximale

Introduction générale

Introduction générale

L'importance des infrastructures routières dans le développement économique et social d'un pays est primordiale. Les réseaux routiers facilitent le transport des biens et des personnes, connectant les communautés et soutenant la croissance économique. Pour assurer la durabilité et la performance de ces infrastructures, le choix des matériaux routiers et la compréhension de leur comportement sont essentiels. Dans ce contexte, les travaux publics doivent constamment innover pour répondre aux besoins croissants tout en minimisant les impacts environnementaux.

Les matériaux routiers traditionnels, bien que performants, soulèvent des préoccupations environnementales dues à leur extraction intensive et à l'épuisement des ressources naturelles. C'est pourquoi l'amélioration des sols et l'intégration de matériaux recyclés dans les projets de génie civil gagnent en importance. Le recyclage des matériaux de construction, comme les granulats recyclés et les enrobés bitumineux recyclés (RAP), représente une solution durable qui permet de réduire l'empreinte écologique des travaux publics.

L'utilisation de matériaux recyclés dans la construction routière vise à améliorer la durabilité, la performance et la longévité des routes, tout en réduisant les coûts et les impacts environnementaux. Cette innovation est cruciale pour garantir des infrastructures plus écologiques et économiquement viables.

Ce mémoire se concentre sur l'amélioration des paramètres géotechniques du tuf de carrière de Ouad Sly par l'utilisation du RAP recyclé. Le tuf, un matériau de construction couramment utilisé, présente des propriétés géotechniques qui peuvent être optimisées par l'incorporation de RAP.

Le présent mémoire est structuré comme suit :

Chapitre 1 : Ce chapitre présente une recherche bibliographique approfondie sur la structure du corps de chaussée et les différents types de chaussées. Il aborde également la définition du tuf, ses types d'encroutements, et son utilisation dans les constructions routières.

Chapitre 2 : Ce chapitre examine le recyclage des matériaux, en mettant en lumière les principaux matériaux recyclés utilisés dans le génie civil, notamment le RAP, ses méthodes de recyclage, et son application dans les travaux publics.

Chapitre 3 : Ce chapitre détaille le matériel et les méthodes des essais de laboratoire réalisés sur le tuf et le RAP, ainsi que les essais mécaniques (Proctor modifié, CBR, cisaillement) effectués sur des mélanges de tuf avec différents pourcentages de RAP (0%, 10%, 20%, 30%).

Chapitre 4 : Les résultats des essais Proctor modifié, CBR et cisaillement sont interprétés et analysés dans ce chapitre, fournissant des insights sur les performances des mélanges étudiés.

De plus, ce mémoire met en évidence l'importance du recyclage dans les travaux publics, en particulier par l'amélioration des caractéristiques géotechniques des matériaux de construction grâce à l'incorporation de RAP recyclé. Cette approche contribue à des pratiques de construction plus durables et respectueuses de l'environnement, tout en répondant aux exigences techniques des infrastructures routières modernes.

Chapitre 1

Structures des chaussées et applications du tuf

Chapitre 1 : Structures des chaussées et applications du tuf

1.1 Introduction

Les matériaux de corps de chaussée routiers jouent un rôle essentiel dans la stabilité et la durabilité des routes. Ils se composent principalement des couches de fondation, de base et de surface, chacune ayant une fonction spécifique. La couche de fondation, souvent faite de matériaux granulaires comme le sable, le gravier ou les pierres concassées, assure une répartition uniforme des charges sur le sol sous-jacent. La couche de base, également composée de granulats mais parfois stabilisée avec des liants, offre une résistance supplémentaire et améliore le drainage. Enfin, la couche de surface, constituée d'asphalte ou de béton, fournit une surface de roulement lisse et résistante aux intempéries (Boulahlib, 2012).

1.2 Structure de corps de chaussée

Il s'agit du sol du terrain naturel terrassé (sol support), qui est ensuite recouvert au besoin d'une couche de forme. C'est une série de couches de matériaux dont la résistance géotechnique diminue habituellement de la surface vers la profondeur (Léa Ordener, 2023). De bas en haut, le corps de chaussée comporte généralement les éléments suivants :

- Couche de surface ;
- Couche de fondation ;
- Couche de base ;
- Couche de forme (éventuellement).

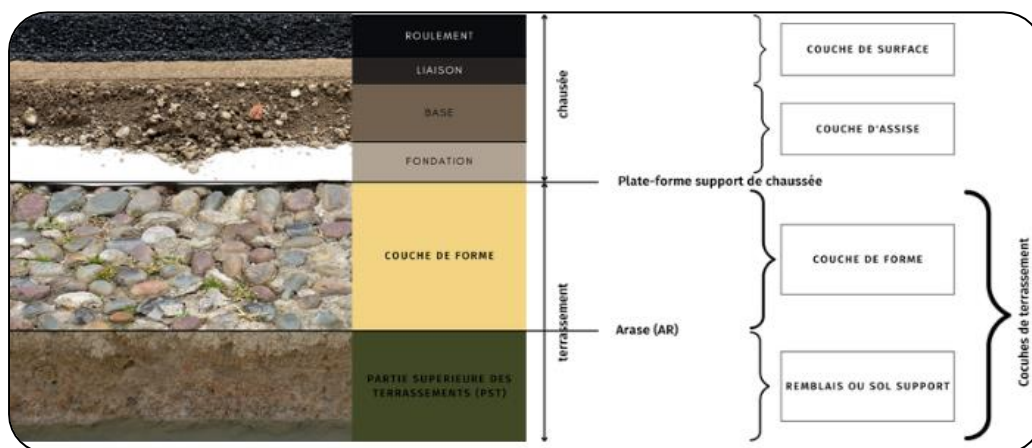


Figure 1.1 : Différentes couches de la chaussée routière (Léa Ordener, 2023).

1.2.1 Sol support

Dans la conception des structures de chaussée, le sol support est souvent considéré comme couche à part entière d'une structure. Il constitue la plate- forme sur laquelle repose la chaussée. Pour bien remplir son rôle, il est souhaitable que cette plate-forme possède un certain nombre de qualités. Elle doit offrir une assise convenable pour le compactage des structures de chaussée et doit donc être suffisamment rigide. Cette rigidité ne doit pas se détériorer pendant la période qui sépare l'exécution des terrassements et la réalisation de la chaussée. Elle doit donc être peu sensible aux intempéries (Oukaci, 2023).

1.2.2 Couche de forme

La couche de forme est le support de la couche de fondation. C'est une couche réalisée en des matériaux de bonnes qualités, elle contribue au nivellement et permet la circulation des engins de chantier, elle permet en outre de rendre plus homogènes les caractéristiques du sol support. (Oukaci, 2023).

1.2.3 Couches d'assise

L'assise de chaussée est généralement constituée de deux couches, la couche de fondation, surmontée de la couche de base.

1.2.3.1 Couche de fondation

La couche de fondation est mise en œuvre sur la couche de forme. Réaliser le plus souvent en matériaux élaborés (bitume, liants hydrauliques), elle permet de réduire les contraintes transmises au sol support ou la couche de forme. Elle présente des caractéristiques lui permettant de résister aux contraintes engendrées par le trafic (Oukaci, 2023).

1.2.3.2 Couche de base

La couche de base est une couche destinée à réduire les contraintes transmises au support. Elle est mise en œuvre sur la couche de fondation à partir des matériaux traités ou non. Ses performances lui permettent de résister aux contraintes engendrées par le trafic (Oukaci, 2023).

1.2.4 Couche de surface

Est constituée de la couche de roulement et le cas échéant d'une couche de liaison :

1.2.4.1 Couche de roulement

La couche de roulement est la couche supérieure de la chaussée, elle est directement soumise aux agressions conjuguées du trafic et du climat. C'est une couche constituée de matériaux ou béton de ciment et qui assure une fonction d'étanchéité et de protection des assises.

1.2.4.2 Couche de liaison

La couche de liaison se trouve entre la couche d'assise et de roulement, elle vise à ralentir la remontée des fissures des couches d'assise traitées aux liants hydrauliques (Oukaci, 2023).

1.3 Types de chaussée

Une chaussée est une surface spécialement aménagée, sur le sol ou sur un ouvrage, pour le stationnement ou la circulation des personnes ou des véhicules. Cependant on dénombre six types de structure de chaussée traditionnelle : souple, semi-rigide, rigide, mixte et inverse auxquelles il faut ajouter la structure bitumineuse (El Fahssi, 2018).

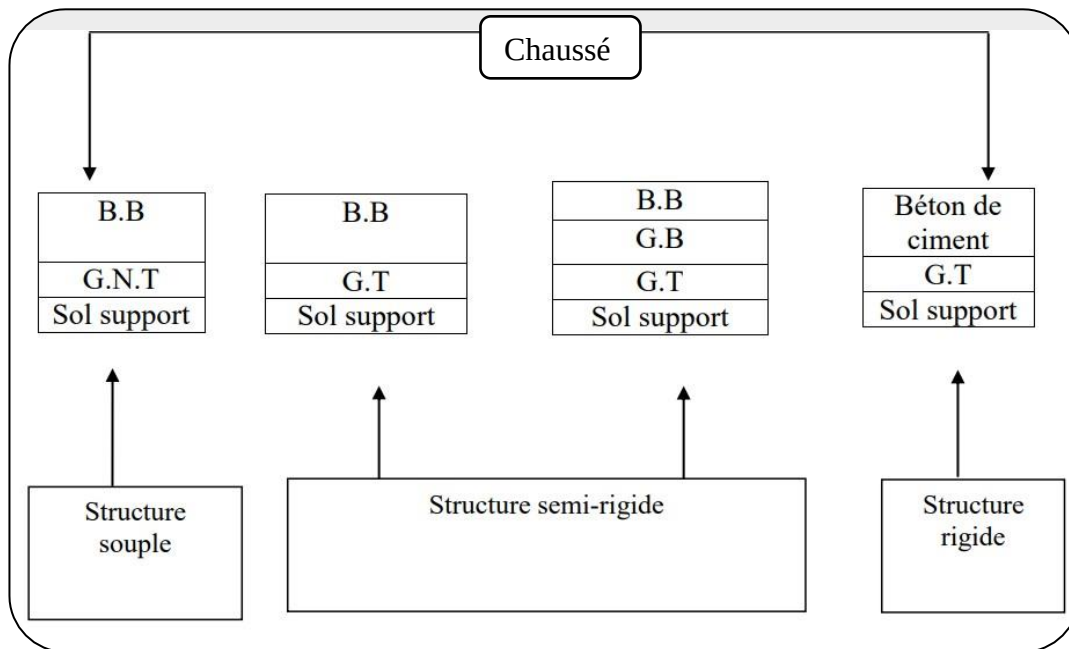


Figure 1.2 : Différentes catégories de chaussées (El Fahssi, 2018).

- **B.B** : Béton bitumineux ;
- **G.B** : Grave bitume ;
- **G.T** : Grave traité ;
- **G.N.T** : Grave non trait.

1.3.1 Chaussée souple

Une structure souple est composée d'une couverture bitumineuse relativement mince (inférieure à 15 cm) reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traitées d'épaisseurs comprise entre 30 et 50 cm. L'épaisseur globale de la chaussée est généralement comprise entre 30 à 60cm. L'étalement des efforts verticaux sur le sol support est modéré. Le critère principal de dimensionnement d'une chaussée souple réside donc dans la limitation de la sollicitation du sol support de manière à éviter sa plastification qui se traduirait en surface par d'importantes déformations de la chaussée (Infociments, 2019).

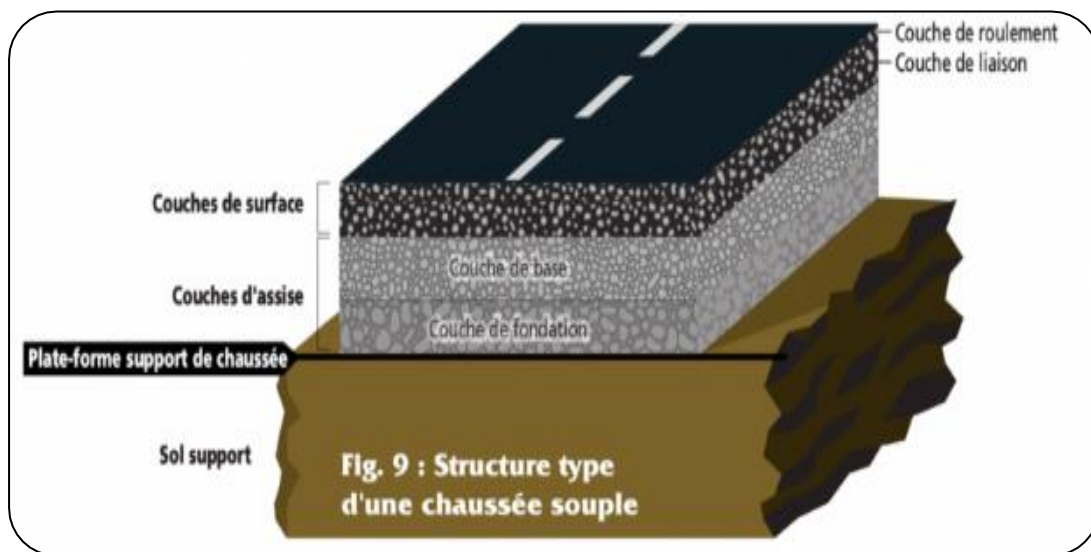


Figure 1.3 : Structure d'une chaussée souple (Infociments, 2019).

1.3.2 Chaussée semi-rigide

Les structures semi-rigides sont constituées d'une assise en grave traitée aux liants hydrauliques et/ou hydrocarbonés de 20 à 50 cm d'épaisseur et revêtue d'un enduit superficiel ou d'un enrobé bitumineux d'épaisseur inférieur à 14 cm. Le rôle structurel d'une couche de fondation en matériaux non traités est faible sous une assise traitée au ciment, ainsi, il est d'usage de supprimer cette couche de fondation non traitée dans le cas où une couche de forme est prévue au niveau des terrassements (Ilboudo W. Ineïssa Cerina 2016).

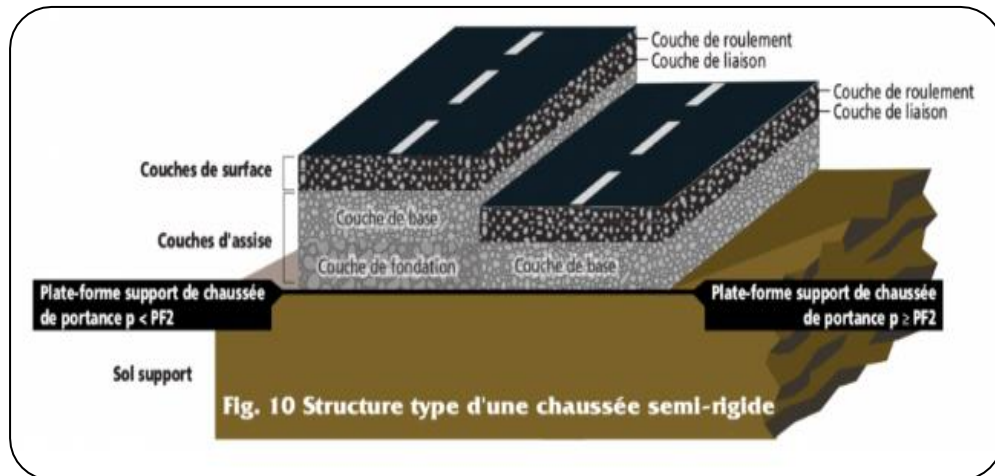


Figure 1.4 : Structure d'une chaussée semi-rigide (Infociments, 2019).

1.3.3 Chaussée rigide

Une chaussée est dite rigide lorsqu'elle est composée de couche de béton de ciment de 15 cm à 40 cm d'épaisseur éventuellement recouverte par une couche de roulement mince en matériaux bitumineux. La couche de béton repose, soit sur une couche de fondation, soit directement sur le sol support avec interposition d'une couche de liaison. Les matériaux constituant ce type de chaussée présentent une forte rigidité (par conséquent pouvant mobiliser des efforts notables de traction par flexion). On observe un important étalement des efforts au niveau du sol support qui est peu sollicité. Le principal critère de dimensionnement d'une chaussée rigidifiée réside dans la limitation des efforts de traction par flexion des matériaux sous l'effet de la répétition des charges. (Ilboudo, 2016).

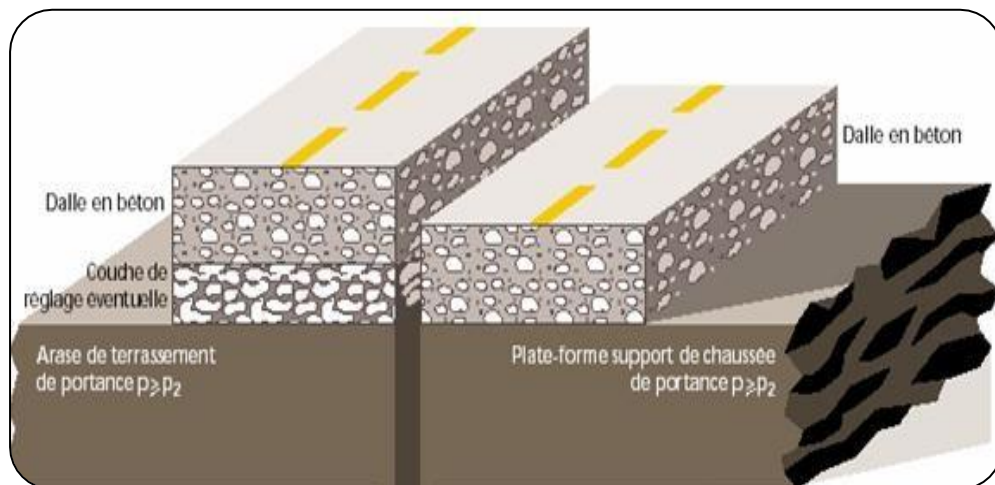


Figure 1.5 : Structure d'une chaussée rigide (Infociments, 2019).

1.3.4 Chaussée mixte

Les structures mixtes sont constituées d'une couche de base traitée au liant hydrocarboné et une couche de fondation traitée au liant hydraulique. Ces structures sont très coûteuses.

1.3.5 Chaussée à structure inverse (sandwich)

Si la couche de base est non traitée et la couche de fondation est traitée au liant hydraulique, alors la chaussée est dite à structure inverse. Ce type de chaussée est surtout employé pour ralentir la progression des fissures de retrait qui apparaissent dans la couche de grave traitée aux liants hydrauliques. Ces chaussées comportent quelques fois deux couches de revêtement. Un premier revêtement constitué de grave bitume et un second revêtement en béton bitumineux.

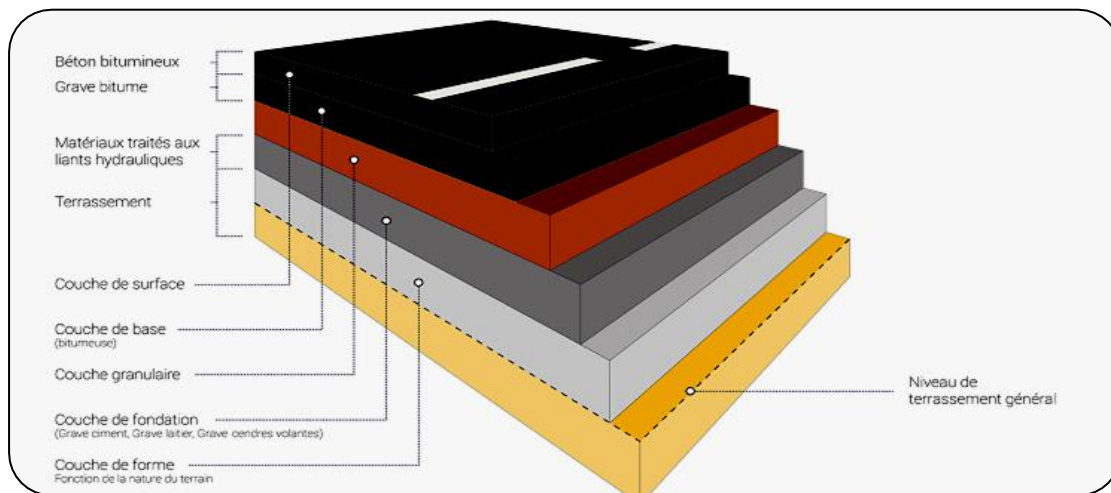


Figure 1. 1. Structure d'une chaussée inverse (Tpdemain, 2020).

1.3.6 Chaussée à structure bitumineuse

Composées de revêtements bitumineux, les chaussées bitumineuses épaisses disposent d'une assise en matériaux traités aux liants hydrocarbonés, d'une épaisseur de 15 à 40 cm. Les matériaux qui les composent étant d'une relative rigidité, cela permet de répartir les contraintes verticales et de réduire les efforts au niveau du sol support. Elle comporte des couches traitées aux liants hydrocarbonés, généralement du grave bitume. Les matériaux traités aux liants hydrocarbonés formant l'assise de la chaussée ont une rigidité permettant une transmission avec atténuation des efforts verticaux dus aux charges roulantes vers la plate-forme support. Cette atténuation est d'autant plus grande que l'épaisseur de l'assise bitumineuse est forte. En revanche, on assiste à de fortes contraintes de traction par flexion au sein de l'assise (Groupe-Pigeon).

1.4 Matériaux de chaussée

1.4.1 Fines

Granulat composé d'éléments de très petites dimensions utilisées soit comme charge de remplissage pour augmenter la compacité notamment d'un béton ou d'un sol, soit comme constituant de liants hydrauliques. Dans ce second cas, le terme fillers est également utilisé

Nota :

- Dans le domaine des chaussées, on utilise le terme « fines » pour la portion des granulats regroupant les éléments de dimensions $D < 80$ microns.
- Dans le domaine des chaussées, on utilise le terme « fillers » pour un granulat composé uniquement de fines.

1.4.2 Granulat

Ensemble de grains de dimensions comprises entre 0 et 80 mm. il est dit naturel quand il est issu de gisements alluvionnaires ou de roches massives, et qu'il ne subit aucun traitement autre que mécanique ; il est dit artificiel lorsqu'il provient, soit de la transformation thermique de roches, minerais et déchets, soit de la démolition d'ouvrages divers. Les granulats sont classés en fonction de la grosseur de leurs grains, mesurée au moyen d'un tamis à mailles carrées. Les granulats sont désignés par d et D , qui représentent respectivement la plus petite et la plus grande des dimensions demandées.

1.4.2.1 Sable

Granulat d/D dont le d est compris entre 0 et 1 mm et le D est inférieur ou égal à 6.3 mm. Les sables ont en outre 65 % des éléments supérieurs à 80 microns. Ce sont des sables qui n'ont pas été spécialement élaborés dans le but d'un usage routier. Ils peuvent être naturels ou issus d'une chaîne d'élaboration (sables roulés résultant du criblage primaire d'un tout-venant, ou sables de concassage). Les sables se différencient par un grand nombre de paramètres : Granularité, Composition minéralogique et pétrographique, Forme des grains et leur aspect de surface, Caractéristique des fines.

1.4.2.2 Grave

C'est un matériau granulaire utilisé dans la construction de routes, souvent constitué de pierres concassées, de gravier ou de sable. Classe granulaire normalisée de type d/D où $d = 6.3 \text{ mm}$ et $D = 80 \text{ mm}$.

1.4.2.3 Gravier

Le gravier est un matériau de construction composé de fragments de roche de taille variable, généralement plus gros que le sable mais plus petit que les pierres concassées. Gravillon produit par les ballastières, de type d/D où $d = 2 \text{ mm}$ et $D = 20 \text{ mm}$.

1.5 Généralités sur les tufs

1.5.1 Définitions des tufs

Les tufs et sont définis dans la bibliographie comme des formations superficielles, tendres, friables, poreuses, légères et de couleur claire. Elles remontent au Quaternaire et sont le résultat de plusieurs échanges par dissolution et pluie (Goual, 2012).

Les tufs calcaires sont des roches formées par l'accumulation d'algues microscopiques, les algues bleues. Elles vivent en colonie et se fabriquent une protection en cristaux calcaires. Pour se développer, elles ont besoin d'eau et d'un climat tempéré. Elles se développent donc souvent à l'émergence des sources et dans les cours d'eau peu profonds au cours des périodes interglaciaires, selon le type d'algues et les conditions du milieu, les tufs peuvent être friables ou durs et épais ; ils peuvent alors servir pour la construction, la lente formation des tufs fossilise par encroûtements successifs et saisonniers des débris de végétaux (feuilles, brindilles, graines...) et d'animaux (coquilles, ossements) (Goual, 2012).

La formation des encroûtements calcaires correspond à certaines conditions climatiques critiques. Pour que les sols s'encroûtent de manière appréciable, les précipitations doivent être capables de solubiliser des quantités importantes de carbonates, sans toutefois excéder un certain seuil au-delà duquel elles pourraient emporter la totalité ou la majeure partie de ces carbonates vers les bassins marins ou lacustres (Figure 1.6). Ces conditions climatiques peuvent être illustrées par le climat qui règne dans les zones méditerranéennes subhumides et semi arides (Goual, 2012).

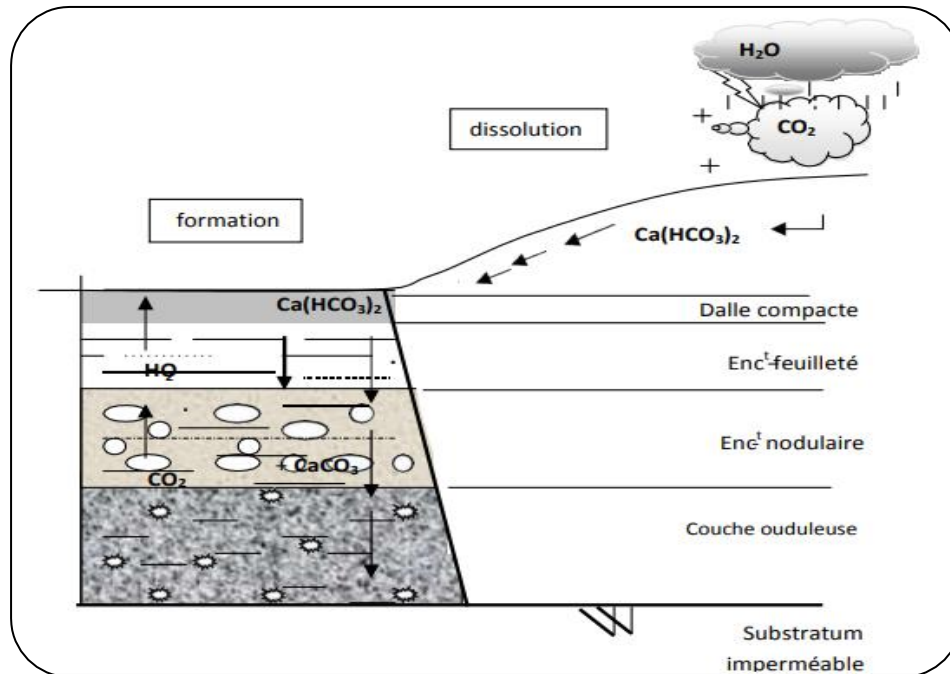


Figure 1.6 : Schéma de circuit de la formation des tufs calcaires (Goual, 2012).

1.5.2 Types des tufs d'encroûtements

Les tufs des encroûtements sont divisés en trois catégories en fonction de leur composition chimique : les tufs calcaires, les tufs gypseux et les tufs mixtes.

1.5.2.1 Les encroûtements calcaires

La plupart des pays du bassin méditerranéen possèdent des tufs calcaires qui se trouvent dans les régions à climat sec. L'utilisation de cette ressource naturelle comme matériau routier est devenue de plus en plus courante en raison de leur abondance. On peut citer parmi toutes les définitions proposées celle suivante : « Les tufs calcaires sont des roches calcaires avec un Los Angeles supérieur à 60, une masse volumique inférieure à 20 KN/m^3 , une résistance à la compression simple comprise entre 5 et 10MPa, et dont la teneur en éléments fins passant au tamis de 80 microns, obtenus sur la fraction 0/20 du matériau après extraction, est d'environ 10 à 40 % ». De plus, la croûte calcaire est un matériau terrestre principalement constitué de carbonates de calcium, mais pas uniquement. Les croûtes peuvent être présentes sous forme de poudre, de nodules ou très indurées ; elles sont causées par la cimentation, l'accumulation ou le remplacement de quantités inférieures (Touati et Barbouchi, 2018).

1.5.2.2 Les encroûtements gypseux

Les compositions des encroûtements gypseux sont similaires à celles des encroûtements calcaires. Ils sont très répandus dans les régions à climat arides où les précipitations sont trop faibles pour filtrer le gypse (c'est-à-dire faire passer lentement un liquide à travers une poudre pour en extraire les produits solubles), qui se trouve déjà dans les compositions géologiques anciennes. Ce minéral, qui renferme le composé actif qui renforce ces formations, présente une faible dureté. On peut l'enlever sur l'ongle. Cette caractéristique peut sembler appropriée. L'utilisation du gypse en tant que matériau de pavage est interdite dans les climats semi-humides et semi-arides. (Touati et Barbouchi, 2018).

1.5.2.3 Les encroûtements mixtes

Les formations de tufs calcaires gypsifères à dominante carbonatée ou de tufs gypseux calcifiés à dominante sulfatée sont appelées encroûtements mixtes. Le développement des encroûtements calcaires est interrompu à la source lorsque les précipitations sont insuffisantes pour dissoudre et drainer le calcaire vers les nappes phréatiques. De plus, lorsque l'on passe du climat désertique au climat semi-aride, le gypse devient instable dans les sols en raison de sa solubilité importante. Les encroûtements gypseux sont alors remplacés par les encroûtements calcaires.

Guetouche et al. (2006), ont observé la présence de formations calcaires dans le Nord du Sahara, tandis que les formations gypseuses se trouvent plus au sud. Ces formations sont caractérisées par l'évaporation d'une eau, qui est chargée de divers minéraux. Le carbonate de calcium se forme d'abord sous forme d'aragonite (CaCO_3), puis de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), puis d'halite (NaCl), et enfin de sels de potassium et de magnésium.

Il est déconseillé d'utiliser les tufs gypso-calcaires et calcaire-gypseux dans les zones subhumides et semi-arides en raison de la solubilisation du gypse. Cependant, ils sont recommandés dans les régions arides.

1.5.3 Utilisation des tufs calcaires en constructions routières

Depuis environ cinquante ans, en Algérie, des milliers de kilomètres de routes économiques et de désenclavement ont été construits avec succès en utilisant des tufs d'encroûtement (par exemple, pour le corps de chaussée de la RN 1 entre Laghouat et Ghardaïa ont été utilisées depuis

1956. La totalité du réseau routier algérien en zone aride et semi-aride est couverte par ces matériaux.

Le tuf joue un rôle essentiel et rentable en tant que matériau de construction routière dans de nombreux pays à climat aride ou semi-aride. Depuis longtemps, le tuf est employé dans le secteur de la construction routière sous différentes formes. Ils sont utilisés le plus souvent sous forme de granulats non liés pour la construction des chaussées de moyen à faible trafic. L'utilisation la plus courante est en assises de chaussée (couche de base et couche de fondation) (Fenzy, 1966), d'autres usages sont fréquents : accotements, couche de forme, pistes agricoles, etc.

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

1.5.4 Stabilisation de tuf par des liants hydrauliques

Un liant hydraulique routier se présente sous forme d'une poudre obtenue en mélangeant différents constituants et dont la composition est statistiquement homogène. Pour produire les liants hydrauliques routiers traités, il est essentiel de disposer des installations nécessaires, pour contrôler et évaluer la qualité des produits, et procéder aux ajustements nécessaires (Babilotte, 1996).

L'utilisation des LHR présente de multiples avantages :

- ✓ La réutilisation des sols en place ;
- ✓ La possible valorisation des matériaux de déconstruction ;
- ✓ La réutilisation des matériaux de la chaussée à rénover ;
- ✓ Une reprise rapide du chantier ;
- ✓ L'allongement de la durée de vie de l'ouvrage : gain de résistance faces aux contraintes– mécaniques et climatiques (Babilotte,1996).

On a déjà envisagé d'utiliser le traitement des tufs d'encroûtements. Il peut viser à améliorer la cohésion et/ou l'angle de frottement interne, à améliorer les caractéristiques de mise en œuvre ou à rendre l'eau plus insensible. En cas d'emploi des tufs en corps de chaussée, en situation de trafic intense, la stabilisation à l'aide de liants hydrauliques est souvent utilisée (Colombier, 1988 ; Cherrak, 2003).

Les problèmes rencontrés par ces sols peuvent être résolus par le traitement aux liants hydrauliques, qui peut modifier leur nature et améliorer leur état. Il autorise l'utilisation de sols non réutilisables ou de mauvaise qualité dans leur état naturel, et permet de réaliser les terrassements dans des conditions de travail normales tout en réduisant la sensibilité du chantier aux intempéries. Selon Serikma (2013), l'action des liants hydrauliques est principalement causée par la prise hydraulique, ce qui entraîne la cimentation des éléments granulaires présents dans le sol.

D'un autre côté, la nature calcaire des tufs convient parfaitement à l'utilisation de liants hydrauliques. En revanche, il est important de prendre en considération la porosité des tufs et leur capacité à absorber de l'eau, et de rendre le mélange plus humide en conséquence (Ben Dhia, 1998 ; Cherrak, 2003).

Les performances du sable laitier sont considérablement améliorées par l'ajout de tuf, car dans le cas de la GP1, la résistance après 28 jours de prise était multipliée par 3 et la densité augmentée de 6 % (Colombier, 1988). Ainsi, cette solution semble intéressante à chaque fois qu'on envisage de traiter un sable avec un liant hydraulique et que l'on se trouve à proximité de gisements de tuf calcaire. Dans cette méthode, le tuf ne joue qu'un rôle secondaire, mais il joue un rôle crucial.

1.5.5 Mélanges de tuf avec d'autres matériaux

De plus, étant donné la teneur élevée en fines des tufs d'encroûtement, une autre méthode a été développée et mise au point depuis plus de 30 ans. Dans cette approche, le tuf est associé à d'autres matériaux, qu'ils soient traités ou non, qui sont riches en gros éléments, mais qui ne contiennent pas de fines (graves ou sables) (Hamrouni, 1975 ; Colombier, 1988). Cette méthode de fusion de matériaux semble ouvrir une nouvelle perspective. Son objectif peut être soit de corriger les dimensions des granules, soit d'améliorer les caractéristiques géotechniques et mécaniques d'un matériau spécifique.

La courbe granulométrique des tufs, en particulier les plus tendres, est naturellement discontinue. Ils sont riches en fines et ils ont peu ou pas de squelette. Au contraire, certaines graves naturelles sont très riches en gros éléments, mais très peu fines.

D'autre part, certains sables naturels éoliens ou alluvionnaires, voire dunaires, présentent des structures granulométriques très homogènes et ne présentent pas de fines. Il semble donc

intéressant de combiner le tuf avec ces graves ou sables (Cherrak et al., 2008 ; Morsli et al., 2013) afin d'obtenir une courbe granulométrique continue et suffisamment riche en fines pour obtenir un matériau avec un faible pourcentage de vides après compactage. Cette méthode a été développée et mise au point depuis plus de trente ans.

On peut la comparer à la litho-stabilisation qui est couramment employée pour traiter les latérites.

1.5.5.1 Mélange Tuf – Sable de dune

De nombreuses recherches et accomplissements ont été réalisés et un guide pratique d'utilisation des sables sur les routes a été publié (Chauvin, 1987). Toutefois, le cas des sables de dunes est spécifique et les directives et recommandations ne peuvent pas être mises en œuvre sans études particulières. Selon Ben-Dhia (1998), dans une tentative de mettre en valeur le sable de dune, il a été mélangé à différents taux avec différents matériaux tels que le grave naturel, le tuf calcaire, le tuf gypseux et le sol argileux. Il a été constaté que l'ajout du sable de dune améliore la portance des matériaux jusqu'à 30% et réduit la plasticité, ce qui améliore la propreté.

En Algérie, étant donné l'abondance du sable de dune, il semble très intéressant de combiner le tuf avec le sable de dune en laboratoire (Cherrak, 2003 ; Morsli, 2007). L'objectif de cette étude était d'analyser l'impact de l'ajout d'un sable de dune sur les caractéristiques géotechniques et mécaniques d'un tuf calcaire de la région de Bechar. Il s'agissait de mettre à l'épreuve les moyens d'améliorer les caractéristiques de ce tuf par une méthode de stabilisation économique en valorisant à la fois le sable de dune et le tuf calcaire pulvérulent. Selon les résultats, l'ajout de 25% de sable de dune a entraîné une augmentation d'environ 25 % de l'eau de compactage, de 17 % de la densité sèche et de 30 % de la portance. En ce qui concerne la résistance à la compression, elle reste équivalente à celle du matériau non enrichi.

Daheur et al. (2019) ont réalisés une étude géotechnique préliminaire sur divers mélanges de tuf-sable dune pour améliorer les propriétés du tuf destinés dans construction de routes locales. Les auteurs ont montré que le mélange optimal, composé de 65% de tuf et de 35% de sable de dune (nommé : 65T35SD), présentait les meilleures caractéristiques géotechniques et performances mécaniques. Selon les spécifications proposées en Algérie par Struillou et Alloul (1984), l'utilisation de ce mélange compacté dans les structures de chaussées est restreinte à la zone

climatique IV, caractérisée par un faible trafic. Une attention particulière doit être accordée à la protection contre les eaux pluviales et capillaires.

1.5.5.2 Mélange Tuf - Sable concassé

Goual (2012) a mené des études visant à démontrer la possibilité d'améliorer les caractéristiques mécaniques d'un tuf en utilisant une technique de stabilisation économique à l'aide d'un déchet de carrière (sable de calcaire). La formulation optimale tuf-sable calcaire a été révélée par les indices de portance, avec un ajout de 30% et 40% de sable calcaire respectivement pour les indices immédiats et après 4 jours d'imbibition. Les indices de portance diminuent au-delà de ces pourcentages tout en maintenant des valeurs supérieures ou égales à celles du tuf seul. De plus, l'analyse de la résistance à la compression simple a révélé que la résistance optimale est obtenue en ajoutant 20% de sable calcaire. L'évaluation de la cohésion a été basée sur cette résistance, un critère essentiel dans le choix des matériaux utilisés dans la technique routière saharienne. La cohésion s'estompe presque complètement après la saturation du matériau. On a choisi cette formulation qui contient 80% de tuf et 20% de sable calcaire comme mélange idéal. Le défaut de cette formulation est que sa résistance s'effondre après l'immersion. Afin de pallier ce défaut, il a été indispensable de procéder à un traitement avec un faible pourcentage de liant hydraulique. Les performances mécaniques du mélange optimisé ont été considérablement améliorées grâce à ce traitement au ciment. En somme, les résultats obtenus soulignent l'opportunité de mettre en valeur les matériaux locaux tels que le tuf et les déchets de carrière (sable calcaire) pour la construction de chaussées dans les zones arides sahariennes (Goual, 2012 ; Goual et al., 2012).

1.5.5.3 Mélange Tuf - Émulsion bitume

Les assises de chaussée constituent un élément important dans les structures routières elles contribuent à l'absorption et à la répartition des contraintes créées par le trafic. Les assises en Tuf, qui ne conviennent qu'aux trafics faibles et moyennes, constituent un pourcentage très important des routes existantes en Algérie. Les études ont montré que les caractéristiques géotechniques souvent faibles des tufs, notamment leur faible résistance aux chocs et à l'abrasion ainsi que leur sensibilité à l'eau, ne permettent pas d'envisager leur emploi en assises de chaussées à moyenne trafic. L'idée de les associer de tuf par différents pourcentages d'émulsion bitume en vue d'améliorer leurs caractéristiques géotechniques et mécaniques peut s'avérer intéressante. Les différents mélanges étudiés représentent les résultats suivants : - Le mélange de 85% de tuf + 15%

émulsion bitume présente une densité sèche importante après compactage et une résistance à la traction simple élevée. - Le mélange de 95% tuf + 5% d'émulsion bitume présente une valeur de portance de l'essai CBR importante. En dernier, nous espérons avoir laissé une base de travail positive qui sera utile dans la poursuite des travaux de recherche. (Touati et Barbouchi, 2018).

1.5.5.4 Mélange Tuf - chaux

Tayebi et Triki, (2019) ont étudié l'application de la chaux pour stabiliser le tuf dans la construction. Leur étude en laboratoire a démontré que l'ajout de chaux améliore notablement la résistance à la compression du tuf tout en réduisant sa sensibilité aux variations dimensionnelles causées par l'eau. Les résultats ont mis en évidence que la chaux réagit avec les composants du tuf pour former des composés chimiques renforçant la structure du matériau, ce qui le rend plus adapté à des applications nécessitant une robustesse et une durabilité accrues, comme les routes et les fondations de bâtiments. En résumé, l'étude souligne l'efficacité de la chaux comme stabilisant pour le tuf, ouvrant ainsi la voie à des utilisations plus larges dans l'industrie de la construction.

Daheur et al. (2022) ont exploré l'utilisation du tuf traité à la chaux dans les applications de construction. Les recherches mettent en lumière les effets bénéfiques de l'ajout de chaux sur les propriétés du tuf, notamment l'amélioration de la résistance à la compression. Les résultats montrent que l'augmentation de la teneur en chaux entraîne une augmentation de la limite de retrait et de la teneur en eau de désaturation, tandis que la succion diminue. Ce phénomène est expliqué par la formation de silico-aluminates de calcium insolubles, qui renforcent le matériau grâce à une réaction pouzzolanique progressive. Cependant, bien que le traitement à la chaux augmente la résistance mécanique du tuf, il ne le rend pas imperméable à l'eau, nécessitant ainsi des précautions lors de son utilisation dans la construction de chaussées

L'étude de Serikma (2009) sur l'auto-stabilité et le comportement des tufs, non traités et traités, vise à évaluer leur potentiel d'utilisation dans les couches de base et de fondation des chaussées. L'application de ciment, notamment de chaux, a été examinée pour améliorer les performances mécaniques des tufs, bien que celles-ci demeurent inférieures à celles des graves traitées au ciment et à d'autres matériaux comme le sable calcaire. Une corrélation a été observée entre la résistance à la compression et la teneur en gypse des échantillons. L'effet du traitement des tufs par la chaux a été évalué à travers des tests de CBR immédiat, de résistance à la compression et de traction à différents intervalles de cure. Bien que les propriétés obtenues après traitement ne

soient pas comparables à celles des graves traitées, elles restent prometteuses et influencées par des facteurs tels que la nature et la quantité de liant utilisé ainsi que les caractéristiques intrinsèques du matériau. Malgré des améliorations nécessaires encore insuffisantes, les tufs traités demeurent une option viable pour les chaussées à fort trafic.

1.5.5.5 Mélange Tuf - ciment

Le tuf-ciment est un mélange à consistance plus au moins plastique qui se transforme en pierre artificielle cohérente grâce à la réaction entre le ciment et l'eau (l'hydratation). Au cours de l'hydratation d'un ciment (CRS), il apparaît les constituants suivants :

- Le silicate de calcium hydraté CSH provenant des silicates bi calciques et tricalcique ;
- Le portlandite Ca(OH)_2 ;
- L'aluminate de calcium C_4AH_{13} , provenant d'aluminate tricalcique (C_3A) ;
- Le sulfo-aluminate de chaux (par réaction du gypse avec le C_3A) ;
- D'abord sous forme d'étringite : $\text{C}_3\text{A SO}_4 \text{ Ca } 31\text{H}_2\text{O}$;
- Puis sous forme de mono-sulfo-aluminate : $\text{C}_3\text{A SO}_4 \text{ Ca } 12\text{H}_2\text{O}$.

Le mélange de tuf et de ciment confère une cohésion et une résistance qui augmentent avec le temps, grâce à la croissance, à l'entrelacement et au feutrage progressif des microcristaux. La vitesse et le taux d'hydratation sont influencés par les composants du ciment, leur finesse, la teneur en eau et la température. Pendant l'hydratation, l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2) formé par le ciment se lie aux éléments argileux présents dans le tuf (Tayebi et Triki T, 2019).

En Algérie, les essais de traitement du tuf au ciment sont anciens. Par exemple, la RN 8 a été traitée en 1958 entre Sidi Aissa et Ain El Hdjel avec 2 à 3 % de ciment. Plus récemment, la piste d'aérodrome d'Es Senia à Oran a été construite avec du tuf traité à 5 % de ciment.

En Tunisie, la route MC 100 entre Quardenine et Msaken a été réalisée il y a plus de quarante ans par traitement en place d'un tuf au ciment.

Aux États-Unis, plus de 100 millions de m^2 de routes comportent des couches de fondation en sol-ciment. En Russie, l'ajout de ciment permet d'obtenir des routes résistant bien aux cycles de gel-dégel. En Grande-Bretagne, en 20 ans, plus de 1 million de m^2 de sol ont été traités. Parmi les 164 routes dont les couches de fondation et de base étaient en sol-ciment et âgées de 8 à 23 ans, la plupart sont en excellent état.

Au Brésil, plus de 100 millions de m² de routes ont été traitées au ciment (Goual, 2012 ; Tayebi et Triki, 2019).



Figure 1.7 : Incorporation de la chaux ou du ciment à l'aide d'un épandeur (Tayebi et Triki, 2019).

1.5.5.6 Mélange Tuf – Cendres

Les cendres de foyer, cendres volantes sèches ou humides, peuvent toutes être utilisées dans les techniques routières. La valorisation des cendres de charbon en matériaux pour les infrastructures routières est encadrée par le « Guide d'application : Applicabilité de matériaux alternatifs en technique routière » (Souchu, 2014).

Ce guide définit les conditions d'utilisation des cendres volantes selon deux critères principaux :

Usage normalisé : Les cendres doivent être utilisées de manière normalisée pour garantir les performances mécaniques du matériau final.

Acceptabilité environnementale : Les cendres doivent prouver leur acceptabilité environnementale en fonction des sites d'implantation de l'ouvrage final.

Les spécifications de produit et de performances dépendent de l'usage prévu des cendres dans l'ouvrage routier, qu'il s'agisse de remblais, de couche de base, de couche de forme ou de liant routier. Les cendres volantes utilisées seules sont mécaniquement sensibles à l'eau. Leur utilisation en technique routière nécessite donc une maîtrise du contact avec l'eau :

Ajout de chaux ou de ciment : Cela permet la prise hydraulique des cendres, les rendant insensibles à l'eau.

Isolation de l'ouvrage : Les ouvrages constitués de cendres seules doivent être protégés du contact avec l'eau, qu'elle soit souterraine ou météorique.

En ce point, les préoccupations de performances mécaniques servent également celles de l'environnement : limiter le contact avec l'eau (nappes phréatiques ou eaux superficielles) permet d'éviter toute éventuelle dissémination de polluants (Souchu, 2014).



Figure 1.8 : Cendres utilisées en techniques routières (Souchu, 2014).

1.5.5.7 Mélange Tuf - Laitier

Les laitiers de haut fourneau sont des coproduits formés au cours de l'élaboration de la fonte à partir de minerai de fer. Ce laitier présente une granulométrie grossière. Le laitier est un sous-produit de l'élaboration de la fonte. Il est formé des constituants non ferreux, des fondants et des cendres de coke, et donc composé essentiellement de chaux (CaO), magnésie (MgO), silice (SiO_2)

et alumine (Al_2O_3). L'élaboration du laitier peut conduire, selon le traitement de refroidissement adopté, à deux formes minéralogiques (Belhocine et Sefroune, 2018).



Figure 1.9 : Laitier de haut-fourneau granulé (Belhocine et Sefroune, 2018).

A l'instar des pays industrialisés, l'utilisation du laitier de hauts fourneaux d'El-Hadjar dans la construction des routes, est un enjeu économique pour l'Algérie et une solution de débarrasser de l'image négative de ce sous-produit (pollution, stockage,...) (Rouabah et Guetteche, 2008).

D'après l'étude et l'expérimentaux obtenus de Rouabah et Guetteche (2008), on peut dire que les couches de formes des infrastructures routières, constituent une des utilisations qui peut valoriser les laitiers produits ou stockés avec des quantités importantes.

Les laitiers sont les mieux placés pour un tel usage, car ce sont des matériaux insensibles à l'eau, qualité indispensable pour un emploi en couche de forme. d'améliorer les caractéristiques mécaniques du laitier, on a formulé des mélanges laitier – tuf calcaire avec des pourcentages différents, pour cela on a élaboré les mélanges (Rouabah et Guetteche . 2008).

Cette insensibilité est due essentiellement à sa propreté et à son faible pourcentage de tamisat inférieure à $80\ \mu\text{m}$. Le laitier granulé a une composition granulométrique très serrée, ceci diminue son aptitude au compactage, il sera donc nécessaire d'effectuer une correction avec d'autre matériau (le tuf dans notre cas). Dans notre étude on a abouti à un pourcentage optimum (30 % pour le tuf). Les résultats des analyses chimiques, mécaniques et physiques du laitier d'el-Hadjar, comparés à ceux des granulats naturels, permettent de l'utiliser comme granulat dans la construction des routes (Rouabah et Guetteche, 2008).

1.6 Tufs avec bétons

L'utilisation de tuf calcaire dans le domaine de génie civil est très rare mais on peut considérer comme une perspective de recherche dans le développement de ce domaine. A titre d'exemple, nous citons les travaux Zaidi Feriel et Souiah Siham (2015) et de (Cherrak et al. 2013 cité par Remma M et Aroussi A (2017)). Ces recherches, ont examinés les effets de tufs calcaires sur les propriétés physicomécaniques du béton adjuvanté et non adjuvanté. Cherrak et al. (2013), ont réalisé une substitution partielle du sable alluvionnaire par de tuf calcaire, avec des pourcentages variables de [5 à 35%], de deux gisements du nord Algérien (le tuf de Htattba et le tuf de Boughezoul) pour la formulation d'un béton ordinaire sans et avec ajout de superplastifiant pour un rapport E/C constant.

L'abondance des tufs calcaires en Algérie et leur utilisation avec succès dans la réalisation des chaussées ont permis d'envisager de les incorporer dans le béton en tant que granulat en substitution partielle au sable. Selon Boulkhiout (2015). L'ajout de tuf dans les bétons ordinaires conduit à une perte de maniabilité considérable à cause de son caractère absorbant et son taux de fines élevé. Grâce à l'usage de superplastifiant, ce problème a été contourné. L'ouvrabilité se trouve améliorée avec même une augmentation des résistances des bétons. A signalé, que l'introduction du tuf calcaire dans les bétons ordinaires présente un optimum à 25 % d'ajout pour lequel les performances mécaniques sont maximales. Par ailleurs, la perméabilité et les absorptions d'eau des bétons à base de tufs sont plus élevées que celles du béton de référence. Cette faiblesse conduit à une limitation dans leur utilisation qui devrait se faire avec des mesures d'imperméabilisation contre les agents extérieurs, notamment l'eau, ou être réservée pour les parties de structure non exposées Boulkhiout (2015).

Concernant, la valorisation des tufs dans les BAP, les résultats obtenus sont très prometteurs avec une possibilité de substitution allant jusqu'à 55 %. Il est tout à fait possible d'utiliser L'utilisation du tuf calcaire dans le béton serait tout à fait envisageable à condition de lui assurer une bonne protection contre les agressions extérieures. Le tuf calcaire dans l'industrie des BAP. (Boulkhiout, 2015).

1.7 Conclusion

Les matériaux d'encroutements calcaires sont largement utilisés dans les techniques routières dans de nombreux pays tels que l'Algérie, la Tunisie, l'Afrique du Sud et l'Argentine. Lorsqu'ils sont employés dans les assises de chaussées, ils présentent un comportement bien meilleur que ce que leurs caractéristiques géotechniques laisseraient supposer, surtout en comparaison avec les spécifications des pays tempérés.

Les techniques d'amélioration des sols consistent à modifier les caractéristiques d'un sol par une action physique (comme les vibrations) ou par l'inclusion ou le mélange d'un matériau plus résistant, dans le but de :

- Augmenter la capacité portante et/ou la résistance au cisaillement,
- Diminuer les tassements, tant absolus que différentiels, et éventuellement les accélérer,
- Réduire ou éliminer le risque de liquéfaction en cas de tremblement de terre ou de vibrations importantes.

L'association de tuf avec d'autres granulats est une technique prometteuse pour obtenir un matériau à faible pourcentage de vides après compactage.

Le comportement de ces structures est généralement jugé bon, tant sur chantier qu'en laboratoire, bien que cette technique présente, comme toute autre, des avantages et des inconvénients. Elle pourrait également être étendue à d'autres types de granulats naturels ou artificiels, tels que les matériaux recyclés.

Chapitre 2

Recyclage et matériaux recyclés

Chapitre 2 : Recyclage et matériaux recyclés

2.1 Introduction

Dans le cadre de la garantie de la sécurité environnementale à long terme, la caractérisation des déchets constitue une étape préalable importante au choix du stockage ou du recyclage : elle permet de décrire le déchet, de le comprendre et de prédire son comportement à venir.

L'épuisement des sources naturelles existantes de granulats, les lois plus strictes en matière de protection de l'environnement et les problèmes posés par la destruction des déchets sont autant de facteurs favorisant le recyclage des déchets de construction.

Les matériaux recyclables sont repérables grâce au célèbre ruban de Möbius, logo universel de ces matériaux depuis 1970 (Figure 2.1). Les matériaux recyclables comprennent certains métaux, plastiques et cartons, le verre, les gravats...

Les granulats recyclés issus des produits de démolition font partie d'un matériau alternatif local actuellement utilisé dans le secteur routier dans la plupart des pays européens.



Figure 2.1 : Ruban de Möbius - symbole universel des matériaux recyclables.

2.2 Définition de Recyclage

Le recyclage est le processus de réutilisation partielle ou totale de matériaux pour fabriquer de nouveaux produits en fin de vie, « du vieux pour du neuf ». Les déchets deviennent donc matière première (Taleb Karina, 2016). Ce qui permet d'économiser des matières premières et de l'énergie (Molleta R, 2009).

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures :

La réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. C'est une des activités économiques de la société de consommation. Certains procédés sont simples et bon marché mais, à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables. Dans ce domaine, les objectifs de l'écologie et ceux des consommateurs se rejoignent mais parfois divergent ; c'est alors le législateur qui intervient. Ainsi, en particulier depuis les années 70, le recyclage est une activité importante de l'économie et des conditions de vie des pays développés (Balet, 2014). Ce mode de traitement concerne surtout le verre, le papier-carton, les emballages et les métaux : ces déchets font l'objet d'une collecte séparée déjà bien établie depuis longtemps et suivie d'un traitement spécifique de valorisation sous forme de recyclage, il s'agit d'une récupération de matière première, sans véritable transformation (Balet, 2014).

2.3 Principes de recyclage

Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois principes :

- **Réduire**, qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets,
- **Réutiliser**, qui regroupe les procédés permettant de donner à un produit usagé un nouvel usage.
- **Recycler**, qui désigne le procédé de traitement des déchets par recyclage.

Le recyclage apporte une contribution importante à la baisse des quantités de déchets à éliminer par enfouissement et par incinération, mais il n'est pas suffisant pour contrer l'augmentation de la production des déchets ou y suffit à peine. (Layada et Khelaifia, 2020).

2.4 Techniques de recyclage

Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage : chimique, mécanique et organique.

Le recyclage dit 'chimique' utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants. Le recyclage dit 'mécanique' est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer. Le recyclage dit 'organique' consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz (Saadani, 2006).

2.5 Étapes de recyclage

Les étapes de recyclage des déchets sont :

2.5.1 Collecte de déchets

Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets. Les déchets non recyclables sont incinérés ou enfouis en centres d'enfouissement techniques. Les déchets collectés pour le recyclage ne sont pas destinés ni à l'enfouissement ni à l'incinération mais à la transformation. La collecte s'organise en conséquence. La collecte sélective, dite aussi séparative et souvent appelée à tort tri sélectif est la forme la plus répandue pour les déchets à recycler. Le principe de la collecte sélective est le suivant : celui qui crée le déchet le trie lui-même. À la suite de la collecte, les déchets, triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri où différentes opérations permettent de les trier de manière à optimiser les opérations de transformation. Le tri manuel est une de ces opérations (Belbali et Bouchentouf, 2016).

2.5.2 Transformation

Une fois triés, les déchets sont pris en charge par les usines de transformation. Ils sont intégrés dans la chaîne de transformation qui leur est spécifique. Ils entrent dans la chaîne sous forme de déchets et en sortent sous forme de matière prête à l'emploi (Belbali et Bouchentouf, 2016).

2.5.3 Commercialisation et consommation

Une fois transformés, les produits finis issues du recyclage sont utilisés pour la fabrication de produits neufs qui seront à leur tour proposés aux consommateurs et consommés. Pour être en fin de vie, à nouveau jetés, récupérés et recyclés (Belbali et Bouchentouf, 2016).

2.6 Avantages du recyclage

Parmi les biens faits environnementaux et économiques et du recyclage, on trouve :

- Protection de l'environnement, limiter la pollution de l'air et des sols et préservation de ressources naturelles (Layada et Khelaifia, 2020).
- Réduction des volumes des décharges et de l'incinération, procédé qui favorisent la pollution des sols et de l'air,

- Réduction des nuisances liées aux transports des matières premières, limite la consommation du carburant et le dégagement du CO₂, limite la sollicitation du réseau routier et création d'emplois.
- Offre des ressources d'approvisionnement en matières premières alternatives aux autres sources, exemples :
 - L'acier recyclé permet d'économiser du minerai de fer ;
 - Une tonne de plastique recyclé permet d'économiser 700 kg de pétrole brut ;
 - Le recyclage de 1 kg d'aluminium peut économiser environ 8kg de bauxite, 4 kg de produits chimiques et 14 kWh d'électricité ;
 - Chaque tonne de carton recyclé fait économiser 2.5 tonnes de bois ;
 - Chaque feuille de papier recyclé fait économiser 1 litre d'eau et 2.5 W d'électricité en plus de 15 g de bois. (Layada et Khelaifia, 2020).

2.7 Principaux recyclât utilisés dans le domaine de génie civil

2.7.1 Le béton

Le béton est un matériau composite c'est-à-dire qu'il est Multi-matériaux. En effet, il est formé par un mélange d'eau, de granulats (sable et gravier), de ciment et éventuellement complété par des adjuvants et des additions. Il existe plusieurs types de béton utilisé dans le secteur du BTP, le béton armé, le béton fibré, et le béton préfabriqué.

Le béton peut être recyclé ou valorisé en étant transformé en granulat de différentes tailles (gravillons, sable, etc.) (Figure 2.2). Les gravillons peuvent être utilisés comme matériaux de couches et de sous-couches des routes dans les travaux publics.

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

Les sables obtenus, mélangés à de la chaux, peuvent être réutilisés comme mortier. Cependant, l'utilisation de sables de bétons recyclés peut directement affecter le contenu du mortier

et donc sa maniabilité, et peut provoquer un rétrécissement dû à l'absorption d'eau élevée. (Oumeddour, 2020).



Figure 2.2 : Broyage du béton (Oumeddour, 2020).

2.7.2 La brique

La brique est un matériau fait d'argile ou d'autres matière argileuse, avec ajout ou non de sable, combustible ou autre adjuvant, porté à une température suffisamment élevée pour former une liaison céramique. La brique est à la fois un isolant, un régulateur thermique et un matériau résistant (Figure 2.3).

Le recyclage de briques provenant de chantiers de démolition est une réalité depuis plus de dix ans. Aujourd'hui, plus de 95% des déchets de démolition sont recyclés. Les briques sont transformées en granulats dans des installations de concassage ; ces granulats sont alors mis en œuvre dans des travaux de fondations. Une autre application originale du recyclage de briques est la terre battue utilisée pour le revêtement des terrains de tennis. A petite échelle, certaines entreprises de démolition récupèrent les briques en les nettoyant du mortier. Elles peuvent alors être réutilisées pour des travaux de restauration ou pour des nouvelles constructions auxquelles elles donnent un certain cachet (Oumeddour, 2020).



Figure 2.3 : Déchet de brique (Oumeddour, 2020).

2.7.3 La céramique

Les plus grands volumes de déchets de céramique proviennent des chantiers de démolition ou des travaux publics (Figure 2.4). Les céramiques présentes dans le BTP sont les terres cuites utilisées afin d'obtenir des briques, des tuiles de toiture, des conduits de fumée, des tuyaux de drainage, des revêtements de sol et mur.

Considérées comme inertes, les céramiques ne se décomposent pas, ne polluent pas les eaux de ruissellement et ne posent pas de problème pour la santé. Cependant, elles représentent des quantités importantes et nécessitent d'être traitées. Le recyclage de la céramique commence une fois triée et isolée des autres déchets.

Les céramiques sont d'abord concassées par des engins adaptés, le plus souvent installés directement sur les chantiers. Ensuite, on les passe au crible pour améliorer la pureté du produit fini. Un contrôle final permet de valider sa qualité et exclure tout risque de pollution.

On peut distinguer trois grandes manières de recycler les déchets de céramique :

- Les routes : les granulats obtenus après broyage servent généralement au secteur du BTP pour le terrassement ou comme sous-couche pour la création de nouvelles routes.
- Le remblai : il représente la principale façon de réutiliser les céramiques. Il peut être réemployé directement in situ selon le type de chantier ou alors être vendu à des particuliers ou des professionnels pour renforcer et terrasser certains sols. Les granulats peuvent se révéler comme substitut pour le remplissage des tranchées de tuyau. (Oumeddour, 2020).



Figure 2.4 : Déchet de céramique (Oumeddour, 2020).

Les déchets usuels sont produits par les ménages et les industries. Ils forment la part la plus large des déchets recyclables. Ils sont souvent simples à collecter et à transformer. Ils sont peu dangereux. En revanche, ils représentent des volumes importants à transporter et à stocker.

2.7.4 L'acier

Le secteur de la construction au sens large, emploie un acier standardisé et normalisé pour la réalisation d'ouvrages architecturaux et d'ouvrages d'art. Il est un élément essentiel qui sert pour former le squelette des bâtiments, armer le béton, renforcer les fondations. Il est utilisé pour la tuyauterie, il habille les façades et les toitures. La popularité de l'acier dans la construction résulte de sa polyvalence, sa résistance, sa durabilité, son potentiel esthétique, sa capacité à bien se travailler avec d'autres matériaux et l'application de techniques industrielles dans la construction.

Aucune des propriétés d'origine de l'acier ne disparaît au cours des opérations de recyclage, en particulier ses qualités mécaniques (Figure 2.5). N'importe quel type d'ouvrage peut indifféremment être fabriqué à partir d'acier recyclé ou d'acier provenant de minerai de fer, quelles qu'en soient les caractéristiques.

L'acier est le matériau le plus recyclé au monde. Lorsque l'acier a rempli son rôle après quelques décennies, il devient un déchet et donc une matière première de haute qualité qui peut être recyclée complètement et indéfiniment sans aucune perte de qualité et peut être complètement réinjecté dans le cycle économique. Ses vertus magnétiques permettent sa séparation et sa récupération parmi les déchets (Oumeddour, 2020).



Figure 2.5 : Recyclage de l'acier (Oumeddour, 2020).

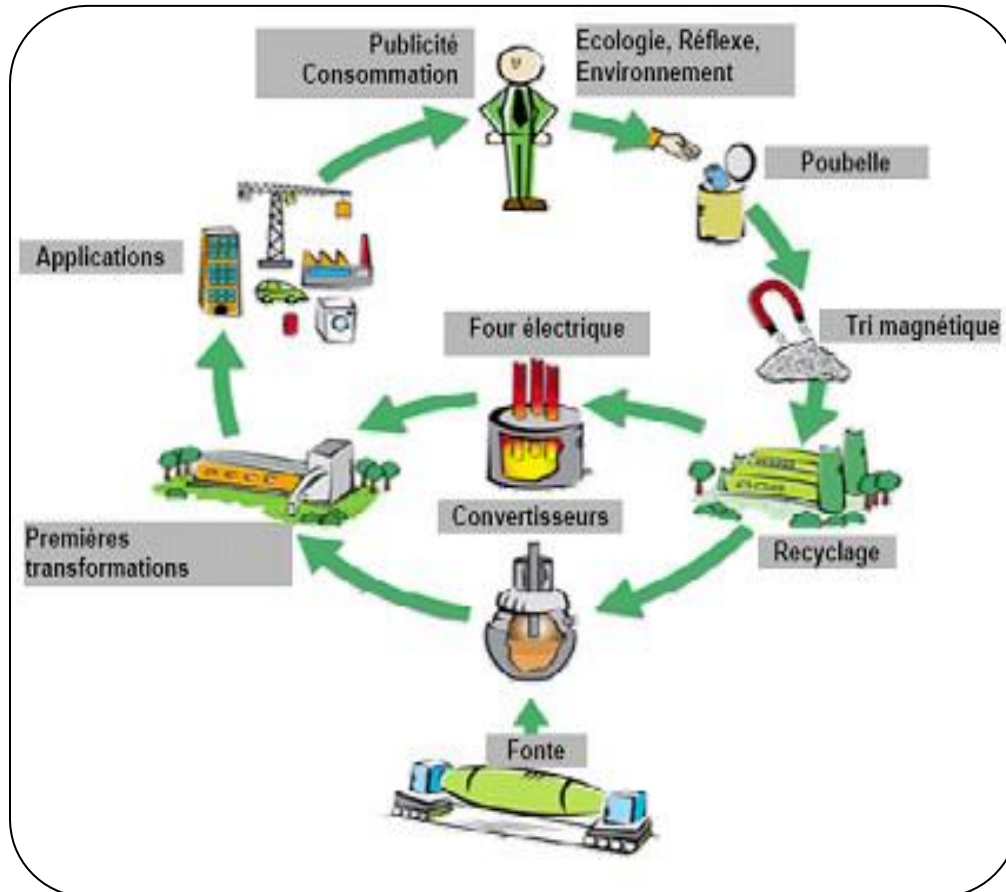


Figure 2.6 : Cycle de recyclage de l'acier (Oumeddour, 2020).

2.7.5 Le plastique

Les plastiques ou polymères forment une famille de matières provenant du raffinage du pétrole. On distingue trois grandes familles de produits : les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères.

Les thermoplastiques sont des plastiques malléables qui peuvent être chauffés et refroidis pour leur donner une forme, puis chauffés à nouveau pour obtenir une autre forme. Cette caractéristique les rend aptes à être recyclés.

Les thermodurcissables caractérisent les plastiques qui se rigidifient dès la première transformation ; ils ne supportent pas d'autres transformations et sont très difficiles à recycler (ex. polyuréthanes, silicones).

Les élastomères caractérisent les plastiques qui se déforment et sont recyclables (caoutchouc).

Compte tenu de la variabilité de type de plastique existant, on se contentera d'utiliser ce produit sous forme de grains de dimension assez proche à celle des grains de sable et graviers.

- **Béton et mortier** : L'utilisation des matériaux plastiques dans le mortier et le béton a fait l'objet de nombreuses recherches. Dans le passé, les plastiques étaient principalement utilisés dans le béton sous deux formes : (1) les granulats plastiques, qui remplaçaient les granulats naturels et (2) les fibres plastiques, utilisés dans le béton fibré.
- **Confection de pavé à base de sachet de plastique** : Un autre procédé de valorisation du plastique nommé **CERVALD** est la confection de pavé de sol ou de voiries. Le principe de fabrication est simple. Il s'apparente à celui d'un béton de sable (mélange de sable et de ciment). Du plastique en fusion sert de liant à la place du ciment. Il est mélangé avec du sable de granulométrie choisie, dans des proportions précises, selon l'utilisation recherchée pour le produit fini (pavé piétonnier ou pavé de voirie) (Gilles et Sorgho, 2009) (Figure 2.7).



Figure 2.7 : Phases de la confection des pavés de sol (Gilles et Sorgho, 2009).

2.8 Pavé d'Asphalte Recyclé (RAP)

Le Pavé d'Asphalte Récupéré est défini comme un matériau de chaussée retiré et/ou retraité composé de bitume et de granulats (Prosperi et Bocci, 2021). Le revêtement d'asphalte récupéré est utilisé comme substitut de granulat et comme complément de ciment d'asphalte dans les revêtements d'asphalte recyclés, sous forme de base ou de sous-fondation granulaire, de granulat de base stabilisé, de remblai ou de remblayage (Figure 2.8) (D'après Theconstructor.org).

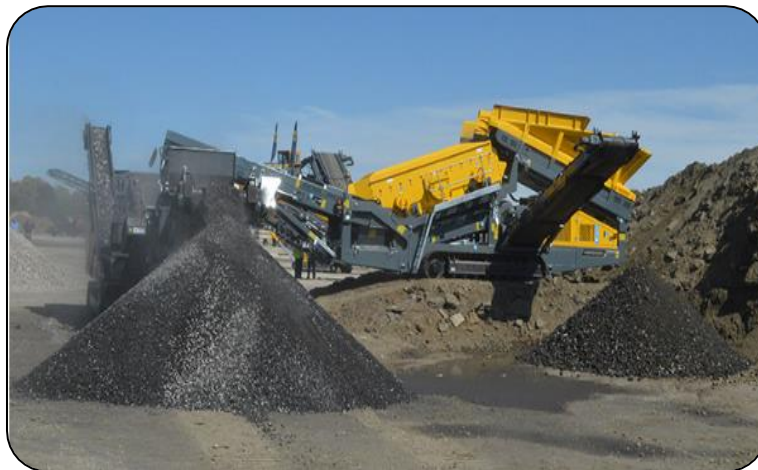


Figure 2.8 : Matériaux de chaussée en asphalte récupéré (RAP) (D'après : Theconstructor.org).

2.8.1 Méthodes de recyclage d'asphalte

Préparer correctement l'asphalte en vue de sa réutilisation dans le recyclage de l'asphalte, la demande de granulats plus fins augmente, car les petits morceaux sont chauffés plus rapidement et nécessitent moins d'énergie. Dans le passé, on utilisait des fractions de 0-20 mm ou 0-25 mm, alors qu'aujourd'hui, des granulométries finales de 0-6 mm, 0-8 mm ou 0-11 mm sont demandées. Lors du traitement du matériau, les mottes brisées sont broyées dans un broyeur à percussion et réduites à la granulométrie finale souhaitée.

Il en résulte une meilleure qualité finale que si l'on utilise une fraiseuse à asphalte, qui mélange les gros grains de la couche de base avec les grains fins de la couche de surface, ce qui diminue la qualité du matériau. L'utilisation de la fraiseuse détruit également les agrégats et produit plus de matériaux fins, ce qui entraîne la perte de grosses pierres pour la base de la route (Prosperi et Bocci, 2021).

Principales techniques de valorisation de ce matériau sont :

- Recyclage en usine à chaud ;
- Recyclage en place à chaud ;
- Recyclage en usine à froid ;
- Recyclage en place à froid.

Permettent le recyclage des RAP dans de nouveaux mélanges bitumineux, déterminant l'économie de ressources vierges et la réutilisation cyclique progressive de ces déchets matériau, de manière durable et économiquement circulaire.

La méthode de recyclage du PAR la plus répandue est la technique à chaud en usine, qui permet de valoriser à la fois les granulats et le liant contenus dans le PAR. Malheureusement, le liant vieilli, rigide et cassant du RAP augmente la rigidité du mélange et peut donc provoquer de la fatigue et des dommages à basse température. Pour cette raison, les agences routières limitent généralement la quantité maximale d'enrobés pouvant être recyclés dans de nouveaux enrobés à chaud. Dans le but de résoudre ce problème, de nombreux produits dans le monde ont été utilisés avec la fonction d'agents rajeunissants, qui permettent de restaurer (totalement ou partiellement) les propriétés mécaniques que le liant RAP perd avec le vieillissement (Prosperi et Bocci, 2021).

2.8.1.1 Recyclage de l'asphalte à froid ou à chaud

Dans le recyclage à froid de l'asphalte, on n'utilise qu'environ 15-20% de matériaux recyclés, alors que dans le recyclage à chaud de l'asphalte, on utilise jusqu'à 90 % d'asphalte réutilisable. L'avantage du recyclage à chaud est qu'il nécessite moins de bitume frais et de matériaux de base minéraux. En outre, il n'est pas nécessaire de stocker les déchets de démolition d'asphalte dans des sites d'enfouissement, ce qui protège l'environnement et réduit les coûts

Le recyclage des agrégats à chaud sépare l'asphalte et les agrégats anciens dans le RAP de manière physique de manière efficace pour réaliser la gestion de classement du RAP avec précision, réduire considérablement la taille des fausses particules et la variabilité du RAP, résoudre et améliorer les problèmes clés limitant la quantité et le rendement de mélange du RAP efficacement et améliorer l'efficacité du recyclage de l'asphalte de 40%.

2.8.1.2 Recyclage d'asphalte à chaud

1. Le ramollissement du revêtement d'asphalte en place en utilisant de la chaleur.
2. L'enlèvement mécanique du matériau de surface.
3. Le malaxage du matériau avec les produits pour l'appliquer de nouveau, créant ainsi un mélange recyclé.
4. L'application du mélange recyclé sur la surface de la chaussée. Le processus vise à remettre les matériaux d'asphalte en état initial et à respecter les besoins liés à l'asphalte nouvellement appliqué.

2.8.1.3 Recyclage d'asphalte à froid en place

Recyclage à froid en place Le recyclage à froid en place (RFP) est un procédé de réhabilitation en place de surfaces en asphalte (aussi bien de chaussée souple que de chaussée composite) sur une épaisseur pouvant atteindre 150 mm. Le vieil asphalte est fraisé jusqu'à une profondeur déterminée, mélangé à une émulsion de bitume, puis remis en place au niveau et au profil requis. On applique un traitement de surface ou une couche d'usure faite d'un enrobé préparé à chaud après que le mélange obtenu par RFP ait bien durci. Le mûrissage d'un mélange recyclé à froid en place dépend énormément des types d'émulsion utilisés et des conditions météorologiques. En général, le mûrissage peut prendre de deux à six semaines mais les températures froides peuvent l'affecter considérablement (Infraguide, 2005.).



Figure 2.9 : Recyclage de l'asphalte à froid (D'après : metongfrench)

2.9 Utilisation du RAP dans le domaine des travaux publics

Le RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) broyé ou concassé peut être utilisé pour diverses applications routières, notamment sur les autoroutes. Les applications du RAP et leurs exigences de traitement sont les suivantes :

Le RAP est utilisé comme substitut aux granulats dans la fabrication de nouveaux enrobés ou d'enrobés recyclés.

Le RAP sert à produire une base granulaire ou un agrégat de sous-base. Pour ce faire, il est concassé, criblé, et mélangé à des granulats conventionnels ou à d'autres matériaux de béton récupéré (Theconstructor.org).

Le RAP est utilisé pour les revêtements d'asphalte à chaud et à froid. Lorsqu'il est produit dans une installation centrale de traitement du RAP, le matériau RAP fini qui est traité selon la granulométrie souhaitée est incorporé comme substitut d'agrégat au mélange de pavage d'asphalte à chaud. De même, l'asphalte mélangé à froid est produit en combinant un matériau RAP fini comme substitut d'agrégat au mélange de pavage d'asphalte mélangé à froid (Lakhdari et Khedaiache, 2021).

Le processus de recyclage sur place peut également produire des enrobés à froid et des enrobés à chaud. Ici, le RAP est préparé et traité, mélangé à une émulsion d'asphalte, puis placé et compacté en une seule ou plusieurs passes.

Le matériau RAP stocké est utilisé comme remblai granulaire ou base pour la construction de remblais (Source : Theconstructor.org).

Aux États-Unis, le béton récupéré des revêtements en béton peut être recyclé pour la fabrication d'asphalte en y ajoutant des agrégats naturels (RECYC-QUÉBEC, 2010).

Le réemploi de l'asphalte comme matériau pour le pavage est une pratique identifiée au Royaume-Uni par AggRegain, illustrant une approche créative et rigoureuse avec environ 125 applications recensées (Recyc-Québec, 2010).

Les agrégats recyclés sont principalement utilisés comme sous-couches lors de la construction de routes et de stationnements. Cette pratique a connu une importante croissance au cours des 15 dernières années, tant par les quantités d'agrégats que de celles des entreprises concernées. Des compagnies de pavage, entrepreneurs en construction de routes, carrières, entrepreneurs en démolition et entreprises spécialisées dont le broyage d'agrégats recyclés est l'activité principale, (Remblais routiers et de tranchées ; Fondations de voies asphaltées ; Couches de forme ; Matériaux drainants) y sont impliqués. Notons qu'en Allemagne, près de 70 % de la matière recyclée provenant des débris de construction est utilisée pour la construction de routes en 2002 (RECYC-QUÉBEC, 2010).

L'utilisation du RAP pour la préparation des mélanges de béton diminue le pourcentage de demande de granulats naturels, le RAP peut être utilisé pour remplacer à la fois les fractions des agrégats conventionnels, c'est-à-dire les agrégats grossiers et fins. Des études montrent que 50 % des granulats conventionnels pourraient être remplacés par du RAP sans trop affecter les propriétés du béton (Lakhdari et Khedaiache, 2021).

Il a été rapporté que l'inclusion de RAP pour les chaussées en béton améliore certaines des propriétés telles qu'une maniabilité améliorée, une ténacité accrue et l'amélioration de la résistance au gel et au dégel etc. De même, l'utilisation de PA en stock améliorerait l'esthétique des autoroutes du fait de la réduction des tas de RAP conservés en bordure de route (Lakhdari et Khedaiache, 2021).

Et leur limitation de l'utilisation du RAP pour les mélanges de béton :

- Absence de dispositions et de directives codales ;

- Manque de sensibilization ;
- Hésitation des entrepreneurs sur la qualité finale et la durabilité des mélanges de béton ;
- Hésitation des clients par manque d'études et de recommandations ;

Manque d'études de recherche, bien qu'au cours des 2 à 3 dernières années, il y ait eu une énorme augmentation du nombre d'études sur les mélanges de béton inclus dans le RAP, etc.

Les dégradations de la chaussée, telles que l'orniérage, l'effilochage, la fissuration thermique, la fissuration longitudinale et la rugosité, sont généralement associées aux chaussées souples. Ces dégradations empêchent souvent les sections de chaussée d'atteindre leur durée de vie nominale, rendant ainsi nécessaire leur remise en état.

Les granulats récupérés, même après l'achèvement de la durée de vie de la chaussée, peuvent conserver une valeur élevée. Ces granulats récupérés sont généralement connus sous le nom d'agrégats de (RAP). La réutilisation du RAP dans les mélanges bitumineux permet de réduire les besoins en gravier et en liant bitumineux. Des économies de 50 à 70 % sur les coûts ont été signalées pour les mélanges RAP par rapport aux mélanges conventionnels (Lakhdari et Khedaiache, 2021).

2.9.1 Mélange Ciment-RAP

Al-Fatlawy et ses collègues (2023) ont étudié l'efficacité de l'ajout de RAP et de ciment pour renforcer les matériaux de sous-base routière, en se basant sur l'indice CBR (California Bearing Ratio) comme principal critère d'évaluation. Les tests en laboratoire ont montré que les valeurs de CBR augmentent avec une plus grande teneur en ciment et jusqu'à 12 % de RAP. Notamment, un mélange contenant 12 % de RAP et 1 % de ciment a montré un CBR de 138.6, comparable à celui obtenu avec 6 % de ciment (133.5), mais à moindre coût grâce à la disponibilité économique du RAP, permettant ainsi d'économiser l'équivalent de 5 % de ciment.

2.9.2 Mélange Agrégats-RAP

Mousa et al., (2017) ont mené des essais sur l'intégration de l'asphalte recyclé (RAP) dans les matériaux de construction routière. L'étude a révélé que l'augmentation du pourcentage de RAP entraînait une diminution à la fois de l'indice CBR et de la conductivité hydraulique. En revanche, une augmentation significative des valeurs du module de résilience a été observée pour les échantillons compactés à la teneur en eau optimale et à la densité sèche maximale. Sur la base des

résultats du CBR, il a été conclu que jusqu'à 60 % de RAP pouvait être utilisé efficacement dans la construction de fondation de routes en Égypte, tandis que seulement jusqu'à 20 % de RAP était adapté à la construction de couches de base de routes.

2.10 Conclusion

Le recyclage présente de nombreux avantages environnementaux et économiques. Il permet de réduire l'extraction de matières premières, de diminuer la pollution et de créer des emplois dans l'industrie du recyclage. Cependant, il fait face à des défis, tels que la contamination des matériaux, les coûts de collecte et de tri, et les fluctuations des marchés des matières recyclées. Pour surmonter ces obstacles, des innovations technologiques et des politiques de gestion des déchets plus efficaces sont nécessaires.

Le recyclage est une solution indispensable pour un développement durable. Il contribue à préserver les ressources naturelles, à réduire les déchets et à atténuer le changement climatique. Promouvoir et améliorer les pratiques de recyclage est essentiel pour construire un avenir plus respectueux de l'environnement et plus durable pour les générations futures.

Chapitre 3

Matériaux et méthodes

3.2 Programme expérimental

Ce chapitre est dédié à l'identification des matériaux sélectionnés pour cette étude, ainsi qu'aux essais mécaniques associés. À savoir le tuf et le RAP, Ces matériaux forment la base des principaux essais. Les matériaux utilisés et leurs propriétés physiques (essais d'indentification) :

- Teneur en eau à l'état naturel (w_n) ;
- Analyse granulométrique (A_g) ;
- Equivalent de sable (ES) ;
- Valeur au bleu de méthylène (VBS) ;
- Los Angeles (LA) et Micro-deval (MDE) ;
- Masse volumique des particules solides (γ_s) ;
- Indices des vides extrêmes (e_{min} & e_{max}) ;
- Teneur en eau optimale (w_{OPN}) et densité sèche maximale (γ_{dOPN}).

Des essais mécaniques tels que :

- Essai Proctor modifié ;
- Essai CBR ;
- Essai de cisaillement direct.

3.3 Préparation des matériaux

Les matériaux ont été préparés de manière à conserver leurs propriétés. Une fois le tuf et le RAP prélevés, les échantillons ont été séchés dans une étuve à des températures de 105°C pour le tuf et 50°C pour le RAP (Figure 3.2). Ensuite, ils ont été concassés et tamisés pour obtenir la granulométrie souhaitée.



Figure 3.2 : Préparation des matériaux.

3.4 Essais d'identification

3.4.1 Teneur en eau à l'état naturel

La connaissance de la teneur en eau d'un sol est très importante car elle permet, avec d'autres caractéristiques, d'apprécier l'état dans lequel se trouve ce sol. Pour mesurer cette teneur en eau, commencer par prélever un peu de tuf dans son état naturel. Placer l'ensemble du prélèvement sur une tare de poids (P_t) et peser immédiatement l'ensemble pour obtenir le poids humide (P_h). Ensuite, mettre l'échantillon dans une étuve à 105°C jusqu'à dessiccation complète et poids stable, ce qui prend environ 24 heures. Peser l'échantillon sec immédiatement à la sortie de l'étuve ou après refroidissement dans un dessiccateur, ce qui vous donnera le poids sec (P_s). La teneur en eau (w%) de l'échantillon est déterminé par la formule suivante :

$$w(\%) = \frac{P_h - P_s}{P_s - P_t} \times 100 \quad (3.1)$$

Tableau 3.1 - Résultats de teneur en eau naturel du tuf

Échantillons	A	B	C
Masse de tare (g)	18.08	18.6	17.96
Masse humide + tare (g)	79.11	82.35	75.67
Masse sèche + tare (g)	73.3	76.2	69.9
Teneur en eau w (%)	10.54	10.68	11.11
Teneur en en eau w_{moy} (%)	10.77		

3.4.2 Analyse granulométrique

L'essai granulométrique par tamisage, couramment utilisé pour déterminer la répartition des grains d'un échantillon en fonction de leurs dimensions, consiste à séparer les grains du matériau à l'aide d'une série de tamis emboîtés aux ouvertures de mailles décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon, placé dans la partie supérieure de la colonne de tamis, est séparé par vibration et tamisage manuel, puis les refus sur chaque tamis sont enregistrés. Le matériel nécessaire comprend une série de tamis, une balance, un échantillon de 2000g, un couvercle pour fermer les tamis, un fond de tamis et une tamiseuse mécanique. L'essai granulométrique du tuf et du RAP a été réalisé au laboratoire de génie civil de l'université Hassiba Ben Bouali de Chlef, selon la norme NF P 94-056.

Les tableaux suivants résument l'analyse granulométrique du tuf et du RAP. De plus, les courbes granulométriques correspondantes sont présentées dans la Figure 3.3.

Tableau 3.2 - Résultats d'analyse granulométrique du tuf

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus (%)	Refus cumulés (%)	Tamisât %
20	0	0	0	100.00
16	383.5	19.17883577	19.17883577	80.82
10	315.3	15.76815363	34.9469894	65.05
8	221.3	11.06721344	46.01420284	53.99
6.3	110.1	5.50610122	51.52030406	48.48
5	164.2	8.211642328	59.73194639	40.27
1	522.2	26.11522304	85.84716943	14.15
0.08	132	6.601320264	92.4484897	7.55
fond	151	7.551510302	100	
Σ	1999.6	100		

Tableau 3.3 - Résultats d'analyse granulométrique du RAP

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus (%)	Refus cumulés (%)	Tamisât (%)
10	0	0.00	0	100.00
8	581.3	29.08	29.07954	70.92
6.3	432.9	21.66	50.73537	49.26
5	168.9	8.45	59.18459	40.82
2.5	548.9	27.46	86.64332	13.36
1.6	150.1	7.51	94.15208	5.85
1.25	30.3	1.52	95.66783	4.33
1	17.4	0.87	96.53827	3.46
0.08	16.9	0.85	97.38369	2.62
fond	52.3	2.62	100	
Σ	1999	100		

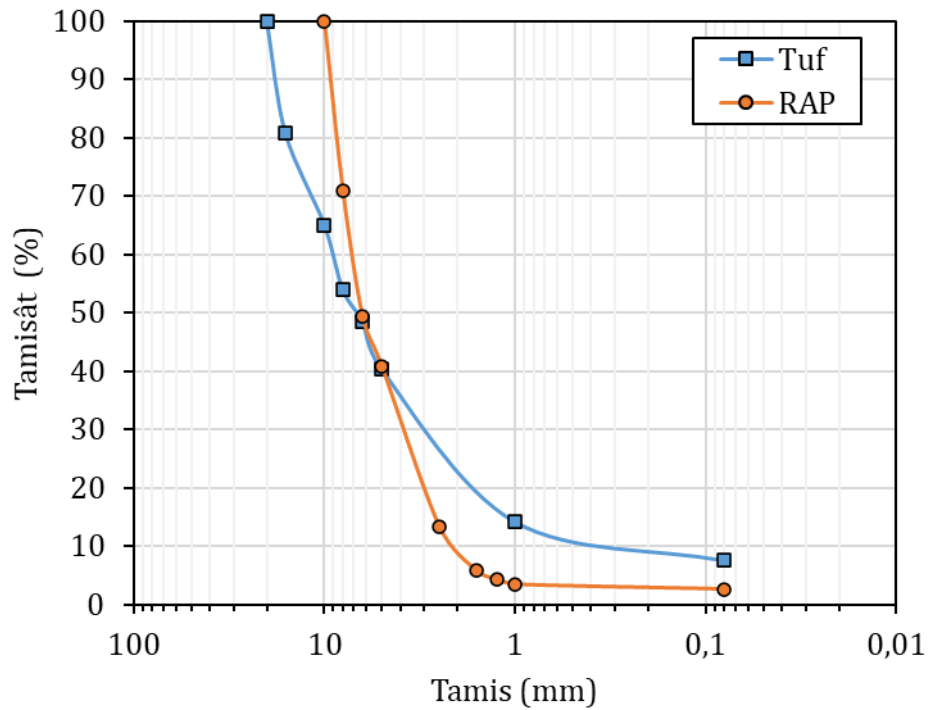


Figure 3.3 : Courbes granulométriques du Tuf et du RAP.

Les coefficients d'uniformité C_u et de courbure C_c sont déterminés par les formules suivantes :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3.2)$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (3.3)$$

Le tableau suivant résume les valeurs des paramètres de gradation pour le tuf et le RAP :

Tableau 3.4 - Paramètres granulométriques du tuf et du RAP

	$D_{\max}$	D_{10}	D_{30}	D_{60}	C_u	C_c
Tuf	20	0.4	03	09	22.50	2.50
Rap	10	02	04	07	3.50	1.14

3.4.3 Equivalent de sable (NF EN 933-8)

L'équivalent de sable est un essai empirique simple et rapide utilisé en géotechnique pour évaluer la proportion relative d'éléments fins dans un sol. Il consiste à séparer les matières fines d'un échantillon de sol par un lavage énergétique, en utilisant des cylindres gradués, un piston d'essai, un chronomètre et un réglet. Le sol est humidifié, agité pendant 30 secondes pour séparer les éléments fins, puis laissé au repos pour mesurer le niveau du floculat et la hauteur du sédiment. Le mode opératoire inclut le remplissage des cylindres avec une solution lavante et l'échantillon de sol, une agitation de 90 cycles, et la mesure des hauteurs après un temps de repos. Ces résultats permettent d'évaluer la propreté du sable et de déterminer sa qualité. La formule suivante a été utilisée pour le calcul d'équivalent de sable pour le Tuf et le RAP :

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad (3.4)$$

Les résultats d'équivalent de sable pour le Tuf et le RAP sont présentés dans le tableau 3.5 :

Tableau 3.5 - Résultats d'équivalent de sable pour le tuf et le RAP

		h_2 (cm)	h_1 (cm)	h_2/h_1 (%)	ES_{moy} (%)
Tuf	Première éprouvette	7.6	27.5	27.64	27.72
	Deuxième éprouvette	7.7	27.7	27.8	
Rap	Première éprouvette	11.0	12.5	88	85.98
	Deuxième éprouvette	11.0	13.1	83.96	

En utilisant les valeurs d'ES pour classer les matériaux, le tuf, avec un ES de 27 (ES entre 20 et 40), est classé comme un sol non plastique. Le RAP, avec un ES de 85 (ES entre 40 et 100), est classé comme un sol proche d'un sol pur et propre, étant plus propre qu'un sol non plastique mais moins pur qu'un sol totalement propre.

3.4.4 Valeur au bleu de méthylène (NF P 94-068)

L'essai au bleu de méthylène permet d'apprécier globalement l'activité de la fraction argileuse d'un sol en mesurant la surface interne et externe des grains argileux. L'essai est effectué sur la fraction granulométrique 0/5 mm du matériau. En effet, ce sont principalement les éléments les plus fins (inférieurs à 2 μm) qui contiennent la fraction argileuse. Celle-ci donne l'essentiel de la réaction au bleu de méthylène et exprime donc de manière quantifiée la sensibilité du sol à l'eau. Le dosage consiste à injecter successivement des doses bien déterminées de bleu de méthylène dans la suspension de sol, jusqu'à atteindre la saturation des particules d'argile. Le test de la tache permet de repérer l'instant de cette saturation. On prélève une goutte de liquide dans le bécher contenant le sol imbibé de bleu, et on dépose celle-ci sur le papier filtre maintenu horizontalement en l'air (diamètre du dépôt compris entre 8 et 12 mm).



Figure 3.4 : Etapes de l'essai au bleu de méthylène.

La valeur au bleu de méthylène est calculée par la formule suivante :

$$VBS = \frac{0.01 \times V}{m_0} \times 100 \quad (3.5)$$

Avec : $V = 40 \text{ cm}^3$, $m_0 = 30\text{g}$ pour le Tuf et $V = 65 \text{ cm}^3$, $m_0 = 30\text{g}$ pour le RAP

Les valeurs au bleu de méthylène pour le Tuf et le RAP sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 3.6 - Résultats de l'essai au bleu de méthylène

Matériau	m_0 (g)	V (cm^3)	VBS (%)
Tuf	30	40	1.33
RAP	30	65	2.16

3.4.5 Los Angeles (LA) et Micro-deval

3.4.5.1 Essai Los Angeles (NF P18-573)

L'essai Los Angeles est un test fiable et rapide pour évaluer la qualité des matériaux en mesurant la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produits par des chocs de boulets normalisés dans une machine dédiée. Ce test détermine la résistance des granulats à la fragmentation par choc et au frottement, essentielle pour les travaux publics, notamment pour les assises de chaussées et les couches de roulement. Le mode opératoire implique de tamiser, laver, et sécher l'échantillon avant de le soumettre aux chocs ; ensuite, le refus est recueilli et pesé pour calculer le coefficient Los Angeles.

La masse du refus, c'est-à-dire les particules restant sur le tamis 1.6 mm, est ensuite mesurée. Le coefficient Los Angeles (LA) est calculé à l'aide de la formule :

$$LA = \left(\frac{\text{Masse initiale} - \text{Masse du refus}}{\text{Masse initiale}} \right) \times 100 \quad (3.6)$$

Nous avons : la masse initiale 5000 g , la masse du refus 3903.2 g

Le coefficient Los Angeles pour le RAP est $LA = 21.94\%$

3.4.5.2 Essai Micro Deval (NF P18-572)

L'essai Micro-Deval mesure la résistance à l'usure des roches, qui peut varier en fonction de leur état sec ou humide, et est appliqué aux granulats utilisés dans les travaux publics. Le matériel requis comprend un ensemble de tamis, des outils d'échantillonnage, un appareil Micro-Deval, des billes sphériques en acier, et des bacs. La procédure commence par le tamisage de l'échantillon pour obtenir une granulométrie appropriée, suivi d'un lavage et d'un séchage. Ensuite, l'échantillon est placé dans l'appareil Micro-Deval avec une charge de billes sphériques en acier et une quantité d'eau définie. L'appareil est mis en rotation pour un nombre spécifié de tours, ce qui provoque des impacts et des frottements entre les granulats et les billes. Après le cycle de rotation, le matériau est retiré, tamisé à nouveau pour séparer les éléments usés inférieurs à taille 1.6 mm, et le refus est recueilli et pesé.

Le coefficient Micro-Deval (MD) est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$MDE = \left(\frac{\text{Masse initiale} - \text{Masse du refus}}{\text{Masse initiale}} \right) \times 100 \quad (3.7)$$

Nous avons : la masse initiale 500 g , la masse du refus 379.2 g

Le coefficient Micro-Deval en présence d'eau pour le RAP est MDE = 24.2%

3.4.6 Masse volumique des particules solides (NF P 94-054)

L'essai de masse volumique des particules solides d'un sol détermine l'indice de vides, le degré de saturation et la porosité du sol. La masse volumique des particules solides (γ_s) est calculée en divisant la masse des particules solides (m_s) par leur volume (V_s) :

$$\gamma_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (3.8)$$

Pour cet essai, on utilise un pycnomètre à eau, une balance, un tamis de 2 mm, des éprouvettes de 250 cm³ avec bouchons, de l'eau distillée et un échantillon de sol. L'échantillon, après prélèvement, est placé dans une coupelle de masse connue et mis à sécher dans une étuve. La procédure commence par la pesée du pycnomètre vide et sec (Q₁), puis l'ajout de 25 grammes de sol et une nouvelle pesée (Q₂). De l'eau est ensuite ajoutée jusqu'au repère (après l'agitation approprié) et le pycnomètre est pesé de nouveau (Q₃). Le pycnomètre est vidé, rempli d'eau distillée jusqu'au repère, et pesé encore une fois (Q₄). Les résultats obtenus permettent de calculer la masse volumique des particules solides du sol.

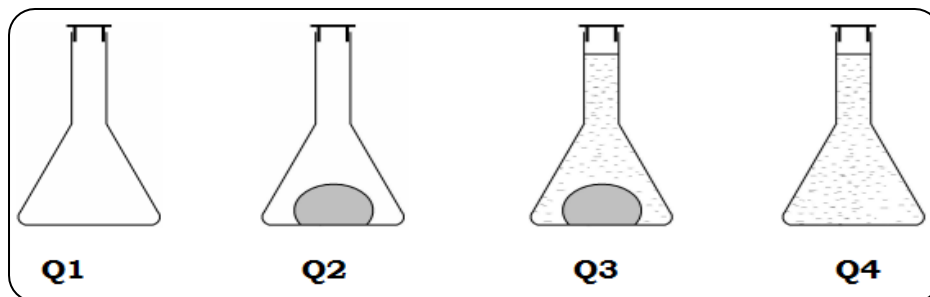


Figure 3.5 : Procédure de la mesure de la masse volumique des grains solides.

La masse volumique des particules solides est calculée en utilisant la formule suivante :

$$\gamma_s = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_4 + (Q_2 - Q_1) - Q_3} \quad (3.9)$$

Tableau 3.7 - Résultats de la masse volumique des grains solide pour le tuf et RAP

Matériau	Test	Q ₁ (g)	Q ₂ (g)	Q ₃ (g)	Q ₄ (g)	γ_s (g/cm ³)
Tuf	test 1	161.56	186.6	674.38	659.56	2.49
	test 2	161.56	186.78	674.5	659.61	
	test 3	161.56	186.53	674.7	659.46	
RAP	test 1	161.66	186.55	666.68	659.56	1.47
	test 2	161.66	187.3	667.1	659.68	
	test 3	161.66	186.77	668.99	659.55	

3.4.7 Indices des vides extrêmes

3.4.7.1 Indice des vides maximal $e_{\max}$

L'indice des vides maximal, correspondant à la compacité naturelle minimale, est déterminé en versant simplement l'échantillon de sol dans un moule à faible hauteur. Pour ce faire, l'échantillon est placé dans le moule à l'aide d'un entonnoir, avec une vitesse de versement très lente et une chute presque nulle. Ensuite, le poids total du moule avec l'échantillon est mesuré, noté comme M_L . La masse volumique sèche à l'état lâche est calculé comme suite :

$$\gamma_{d \min} = \frac{M_L - m_{\text{moule}}}{V_{\text{moule}}} \quad (3.10)$$

L'indice des vides maximal est calculé par :

$$e_{\max} = \frac{\gamma_s}{\gamma_{d \min}} - 1 \quad (3.11)$$

Le tableau ci-dessous résume les valeurs d'indice des vides maximal des matériaux de la présente étude :

Tableau 3.8 - Indice des vides maximal

	M_L	m_{moule}	V_{moule}	γ_{dmin}	γ_s	e_{max}	$e_{max}(moy)$
Tuf	1152.04	720.4	360.2	1.198	2.49	1.078	1.08
	1149.48	720.4	360.2	1.191	2.49	1.090	
	1152.99	720.4	360.2	1.201	2.49	1.073	
RAP	1111.7	720.4	360.2	1.086	1.47	0.353	0.35
	1114.8	720.4	360.2	1.095	1.47	0.343	
	1114.82	720.4	360.2	1.095	1.47	0.342	

3.4.7.2 Indice des vides minimal e_{min}

L'indice des vides minimal, correspondant au compactage maximum, est déterminé en remplissant méthodiquement le moule en cinq couches avec une hauteur de chute aussi élevée que possible. Chaque couche est compactée avec une petite dame effectuant 25 coups réguliers pour assurer un serrage uniforme. Cette méthode permet de réduire au maximum les vides entre les particules du sol, assurant ainsi une compacité optimale. Après avoir complété le compactage, le poids total du moule avec l'échantillon est mesuré et enregistré comme M_d , fournissant une mesure précise de la masse totale après compactage maximal. La masse volumique sèche à l'état dense est calculé comme suite :

$$\gamma_{dmax} = \frac{M_d - m_{moule}}{V_{moule}} \quad (3.12)$$

L'indice des vides maximal est calculé par :

$$e_{min} = \frac{\gamma_s}{\gamma_{dmax}} - 1 \quad (3.13)$$

Le tableau suivant résume les valeurs d'indice des vides minimal des matériaux examinés :

Tableau 3.9 - Indice des vides minimal

	M_d	m_{moule}	V_{moule}	γ_{dmax}	γ_s	e_{min}	$e_{min}(moy)$
Tuf	1265.5	720.2	360.2	1.514	2.49	0.645	0.62
	1268.08	720.2	360.2	1.521	2.49	0.637	
	1288.6	720.2	360.2	1.578	2.49	0.578	
RAP	1229.6	720.2	360.2	1.414	1.47	0.039	0.039
	1230.1	720.2	360.2	1.416	1.47	0.038	
	1228.9	720.2	360.2	1.412	1.47	0.041	

3.4.8 Teneur en eau optimale (w_{OPN}) et densité sèche maximale (γ_{dOPN}) (NF P 94-093)

L'essai Proctor est une méthode standardisée de compactage réalisée en laboratoire pour évaluer l'effet de la teneur en eau sur la capacité d'un matériau à être compacté, mesurée par sa masse volumique sèche (γ_d , en g/cm³ ou kg/m³). Ce processus fournit des données essentielles pour déterminer les propriétés de compactage optimales du matériau en vue de son utilisation dans diverses applications de construction et de génie civil et travaux publics. Dans l'essai Proctor normal, comme avec le tuf ou le RAP, le matériau est versé en trois couches distinctes dans un moule métallique spécifique. Avant le compactage, la quantité exacte d'eau nécessaire pour atteindre une teneur en eau spécifique, par exemple 6%, est calculée avec précision, ce qui influence directement la compacité finale du matériau. Un brassage minutieux est essentiel pendant le mélange pour assurer une répartition uniforme de l'eau. Chaque couche est ensuite compactée avec une dame normalisée, effectuant 25 coups réguliers pour garantir un compactage uniforme et efficace. Une fois les trois couches remplies et compactées, l'excès de matériau est soigneusement arasé des bords du moule à l'aide d'une règle pour obtenir une surface plane. Ensuite, le moule est pesé et des échantillons de sol sont prélevés pour mesurer la teneur en eau après séchage en étuve pendant 24 heures (Figure 3.7). Enfin, la densité sèche est déterminée en utilisant une formule spécifique :

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{(1 + w(\%))} \quad (3.14)$$



Figure 3.6 : Etapes de l'essai Proctor normal.

Tableau 3.10 - Exemple du calcul de la densité sèche

Désignation	Symbol et relation	Tuf	RAP
Volume de moule (cm ³)	V	955.55 cm ³	955.55 cm ³
Poids de moule vide (g)	P1	3960.1 g	3960.1 g
Poids de moule + sol compacte (g)	P2	5946.3 g	5665.6 g
Poids de sol compacté (g)	P = P2 – P1	1986.2 g	1705.5 g
Masse volumique humide (g/cm ³)	$\gamma_h = P/V$	2.08 g/cm ³	1.79 g/cm ³
Teneur en eau après compactage (%)	w	10.21 %	8.94 %
Densité sèche (g/cm ³)	γ_d	1.89 g/cm ³	1.64 g/cm ³

On répète cette procédure pour différentes teneurs en eau (8%, 10% et 12%) et l'on trace une courbe, connue sous le nom de "courbe Proctor". Cette courbe en forme de cloche illustre qu'il existe une teneur en eau optimale pour une énergie de compactage donnée, permettant d'atteindre une densité sèche maximale. La teneur en eau optimale et la densité sèche maximale représentent les caractéristiques Proctor essentielles du sol étudié (figure 3.8).

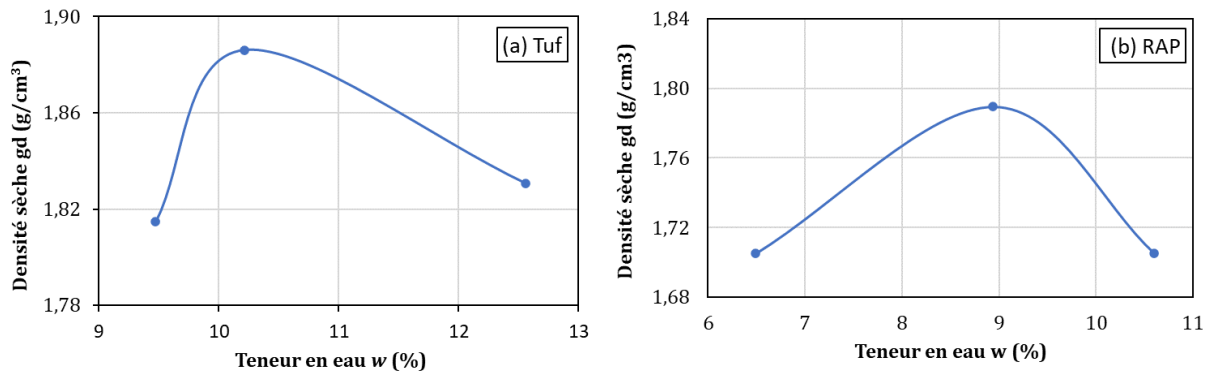


Figure 3.7 : Courbe Proctor normale : (a) Tuf ; (b) RAP.

3.5 Essais mécaniques

3.5.1 Essai Proctor modifié (NF P 94-093)

L'essai Proctor modifié vise à déterminer la teneur en eau optimale d'un sol destiné à la construction des routes, pour des conditions de compactage spécifiques, afin d'obtenir le meilleur compactage possible ou la capacité portante maximale. Suivant le même principe que l'essai Proctor normal mais avec une énergie de compactage plus élevée, le processus consiste à humidifier le matériau à diverses teneurs en eau, le compacter selon une énergie standardisée, puis mesurer la masse volumique sèche pour chaque teneur en eau. La courbe Proctor, qui représente la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau, atteint un maximum à une teneur en eau particulière, définissant les caractéristiques optimales de compactage. L'essai Proctor modifié permet de s'assurer que les assises de chaussée atteignent une densité et une stabilité suffisantes pour supporter les charges prévues, optimisant ainsi la durabilité et la performance des infrastructures.

a) Appareillage

L'appareillage pour l'essai Proctor modifié comprend un socle de compactage en béton d'au moins 30 cm d'épaisseur, un moule Proctor ou CBR avec un corps de moule, une embase et une rehausse, ainsi qu'une dame de compactage spécifique, appelée "dame Proctor modifié". Cette dame a un mouton cylindrique de 51 mm de diamètre, une hauteur de chute de 457 mm $\pm$ 2 mm et une masse de 4 535 g $\pm$ 5 g. L'appareillage courant inclut des tamis, des balances, une enceinte thermique ou un appareil de séchage, des récipients hermétiques, un pulvérisateur à eau, éventuellement un malaxeur-désagréateur, un dispositif pour extraire l'éprouvette du moule, et divers autres outils. Les machines de compactage mécanisées doivent répondre à des spécifications strictes pour garantir des résultats comparables à ceux obtenus manuellement.

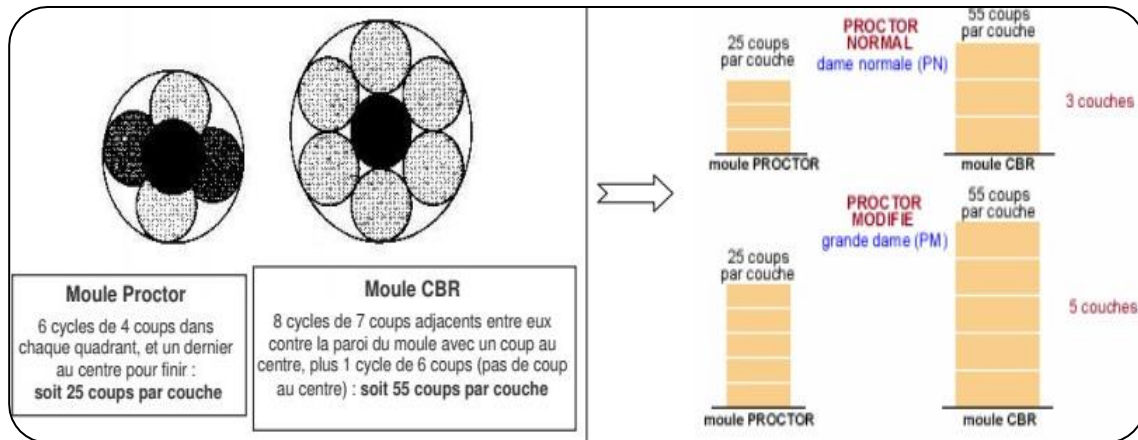


Figure 3.8 : Mode du compactage.

b) Préparation des échantillons et mode opératoire

Pour réaliser l'essai Proctor modifié sur un mélange de 90% tuf calcaire et 10% RAP, commencer par prélever les matériaux et les peser selon les proportions souhaitées, puis mélanger-les soigneusement. Humidifier le mélange à différentes teneurs en eau pour préparer une gamme d'échantillons.

Placer chaque échantillon dans un moule Proctor et compacter-le en cinq couches avec une dame Proctor modifiée, ayant une hauteur de chute de 457 mm et une masse de 4 535 g, en donnant 56 coups de dame par couche.

Démouler et peser immédiatement chaque échantillon humide, puis sécher-le à 110°C pendant 24 heures pour obtenir la masse sèche.

Calculer la densité sèche de chaque échantillon en fonction de sa teneur en eau, en utilisant les masses humide et sèche et le volume du moule (comme l'essai Proctor normale).

Tracer la courbe Proctor en représentant la densité sèche en fonction de la teneur en eau, et identifier le point culminant de la courbe pour déterminer la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale.

Utiliser ces résultats pour évaluer la qualité et la performance du mélange pour les conditions de trafic prévues, en assurant une durabilité et une capacité portante adéquates pour les chaussées.

3.5.2 Essai CBR (NF P 94-078)

L'essai CBR (Indice Portant Californien) est une méthode de test essentielle utilisée dans l'ingénierie routière pour évaluer la résistance à la compression des matériaux de chaussée dans des conditions spécifiques de gonflement et d'humidité. Il se définit comme le rapport en pourcentage entre la charge requise pour enfoncer un piston dans un matériau de chaussée donné et celle nécessaire pour le même enfoncement dans un matériau de référence standard. Cette évaluation permet de mesurer la capacité du matériau à supporter des charges sans subir de déformations excessives. L'essai CBR revêt une importance capitale pour la conception et la construction de chaussées, car il permet de classer les matériaux selon leur résistance et de déterminer leur aptitude à supporter le trafic prévu. Ces données sont fondamentales pour garantir la durabilité et la sécurité des infrastructures routières, en assurant que les matériaux utilisés répondent aux normes et aux exigences spécifiques du projet.

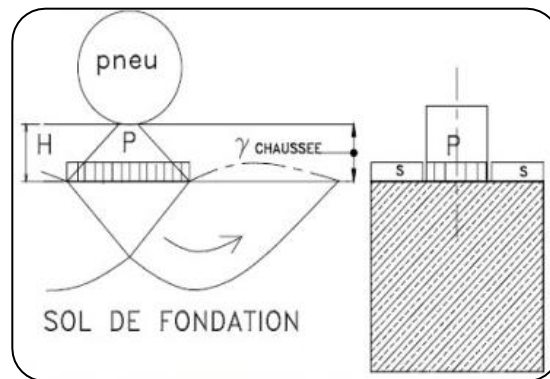


Figure 3.9 : Reproduction de l'effet du pneu par l'essai CBR.

a) Appareillage

L'appareillage nécessaire pour réaliser l'essai CBR comprend :

- Un moule CBR avec une base perforée et un piston de chargement ;
- Un dispositif de compactage pour préparer les échantillons ;
- Un dispositif de mesure de la déformation du piston ;
- Un appareil de mesure de la charge appliquée ;
- Une balance précise pour peser les échantillons ;

- Une étuve pour sécher les échantillons si nécessaire ;
- Un dispositif de contrôle de l'humidité des échantillons.



Figure 3.10 : Appareillage de l'essai CBR.

b) Préparation des échantillons et mode opératoire

L'indice CBR imbibé est déterminé en immergeant le moule CBR dans l'eau et en positionnant un comparateur pour mesurer le gonflement après quatre jours, suivi du poinçonnement. Cette méthode vise à évaluer le comportement du sol dans des conditions critiques telles que les fluctuations de la nappe phréatique, les inondations et l'accumulation des eaux pluviales.

Le mode opératoire implique la prise de trois échantillons d'environ 6 kg chacun, compactés jusqu'à atteindre une densité généralement comprise entre 95% et 100% avec 10, 25 et 56 coups respectivement. Après avoir pesé le moule vide, de l'eau est ajoutée au premier échantillon avant compactage en cinq couches de 10 coups chacune. Une fois compacté, le collier est retiré, la surface est nivelée et un échantillon est prélevé pour déterminer la teneur en humidité.

Après quatre jours d'immersion, le moule est retiré, la lecture du gonflement est mesurée et convertie en pourcentage. Enfin, l'échantillon est soumis au poinçonnement sous un piston de pénétration pour mesurer les valeurs de charge correspondantes, permettant ainsi de calculer l'indice CBR et de tracer les graphiques de pénétration par rapport à la charge pour l'analyse des résultats.

Pendant l'essai du poinçonnement, on mesure les forces nécessaires pour enfoncer un

poinçon cylindrique dans une éprouvette de matériau à une vitesse constante de 1.27 mm/min. La courbe force-pénétration est tracée pour les enfoncements de 0 mm, 0.625 mm, 1.25 mm, 2 mm, 2.5 mm, 5 mm, 7.5 mm et 10 mm. À partir de cette courbe, les valeurs caractéristiques suivantes sont définies :

$$I_1 = \frac{\text{Force de pénétration à 2.5 mm (kN)}}{13.35} \times 100 \quad (3.15)$$

$$I_2 = \frac{\text{Force de pénétration à 5 mm (kN)}}{19.35} \times 100 \quad (3.16)$$

L'indice CBR recherché est conventionnellement défini comme étant la valeur maximale entre I_1 et I_2 .

3.5.3 Essai de cisaillement direct (NF P94-071-1)

L'essai de cisaillement direct est une méthode de test utilisée pour mesurer les caractéristiques de rupture d'un échantillon de sol sous conditions de cisaillement direct. Son objectif principal est de déterminer les propriétés de résistance du sol, telles que l'angle de frottement interne et la cohésion, dans des conditions où le sol est humide ou sec. Cela permet d'évaluer la capacité du sol à résister aux efforts de cisaillement qui pourraient survenir dans des conditions réelles, notamment dans le dimensionnement des fondations, la conception des ouvrages de soutènement, et la stabilité des talus.

a) Principe de l'essai

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans un bâti de cisaillement constitué de deux demi-boîtes indépendantes. Le plan de séparation des deux demi-boîtes correspond au plan de glissement préférentiel, qui est le plan de cisaillement de l'éprouvette.

L'essai de cisaillement consiste initialement à consolider l'éprouvette de sol de section s en appliquant une contrainte verticale constante, représentée par $\sigma_n = N/s$, maintenue tout au long de l'essai. Cette phase de consolidation permet de déterminer la vitesse à laquelle l'échantillon sera soumis au cisaillement.

Ensuite, le sol est cisailé le long du plan de séparation des deux demi-boîtes avec un déplacement relatif imposé à vitesse constante. Ce processus permet d'évaluer les caractéristiques

de résistance du sol sous contrainte de cisaillement, essentielles pour diverses applications en ingénierie géotechnique et civile.



Figure 3.11 : Appareil de cisaillement direct à la boîte de Casagrande.

b) Appareillage

Le dispositif de "boîte de cisaillement" est constitué des éléments de base suivants :

- a. **Pierres poreuses** : utilisées pour le drainage des échantillons et assurant une bonne adhérence entre l'échantillon et les demi-boîtes ;
- b. **Demi-boîte supérieure** : formée d'un cadre et d'un piston permettant d'appliquer la charge verticale N uniquement sur l'échantillon ;
- c. **Demi-boîte inférieure** : fixée lors de l'essai de cisaillement direct ;
- d. **Dispositif à contrainte contrôlée** : entraînant la demi-boîte inférieure à une vitesse constante pour mesurer la contrainte de cisaillement τ , réalisé par un dynamomètre (Figure 3.13).

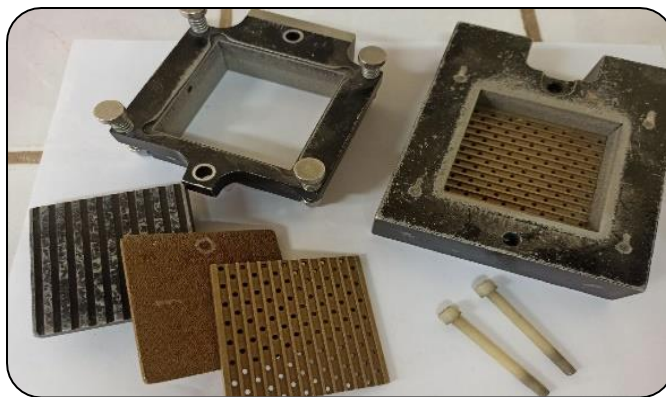


Figure 3.12 : Dispositif de la boîte de cisaillement.

b) Préparation des échantillons et mode opératoire

Pour mesurer la résistance au cisaillement des échantillons de sol et de RAP, une boîte de cisaillement direct de dimensions 6×6×2.5 cm a été utilisée dans cette étude. Les échantillons pour cet essai ont été compactés à 95 % de la γ_{dOPM} (densité sèche à l'OPM) pondéral à w_{OPM} (teneur en eau à l'OPM) pour les mélanges de 0%, 10%, 20% et 30% de RAP. Les contraintes normales initiales appliquées au cours des essais sont respectivement $\sigma_n = 100, 200$ et 400 kPa, représentant différentes conditions de charge pour l'étude de la résistance au cisaillement.

Les échantillons, qu'ils soient traités ou non, ont été préparés selon les conditions optimales de Proctor (teneur en eau optimale et densité sèche maximale) déterminées lors des essais de compactage. Cette méthode (damage humide) implique l'humidification des mélanges, puis la division de l'échantillon en trois parties égales. Chaque partie est déposée délicatement couche par couche successive avec l'application d'une énergie standardisée de 25 coups par couche. Les mélanges ont été soumis à trois de contraintes normales ($\sigma_n = 100$ kPa, 200 kPa, 400 kPa). Une fois le mélange en place et la contrainte normale appliquée (σ_n), l'échantillon a été soumis à un cisaillement à une vitesse constante de 1 mm par minute jusqu'à ce qu'un déplacement horizontal de 6 à 7 mm soit atteint. Les résultats de cette série d'essais seront présentés dans le chapitre 4.



Figure 3.13 : Exemple d'échantillon préparé par la technique de damage humide

3.6 Conclusion

Les caractéristiques géotechniques du tuf calcaire, notamment sa faible résistance aux chocs et à l'abrasion, ainsi que sa forte teneur en fines et en argiles, le rendent particulièrement sensible à l'eau. Cette sensibilité se traduit par une réduction significative de ses performances mécaniques en présence d'humidité. En raison de ces limitations, le tuf calcaire n'est pas adapté pour une utilisation dans les assises de chaussées à fort trafic, car il ne peut pas supporter les charges élevées

sans subir une détérioration rapide. Par conséquent, l'emploi du tuf calcaire est limité aux chaussées à faible ou moyen trafic, où les contraintes mécaniques sont moins sévères et les risques de détérioration prématurée sont réduits.

Pour surmonter ces limitations et améliorer ses propriétés, une solution envisageable est l'ajout de matériaux plus résistants, comme le RAP (Reclaimed Asphalt Pavement). Le RAP, en tant que matériau recyclé, offre une résistance supérieure aux chocs et à l'abrasion, et est moins sensible à l'humidité. L'intégration du RAP dans les mélanges à base de tuf calcaire pourrait ainsi renforcer la durabilité et la capacité portante des chaussées, tout en étant une solution économique et écologique.

Cette approche permettrait de recycler les matériaux existants, réduisant les coûts et l'impact environnemental, tout en améliorant la performance des infrastructures routières.

Chapitre 4

Résultats et discussions

Chapitre 4 : Résultats et discussions

4.1 Introduction

Après avoir caractérisé les matériaux utilisés, nous allons maintenant examiner en détail les propriétés mécaniques du mélange Tuf/RAP, appelé T/R, dans des proportions variées de 0%, 10%, 20%, et 30%. Les propriétés mécaniques à étudier incluent les caractéristiques optimales de compactage (essais Proctor), l'indice CBR imbibé, ainsi que les résultats de cisaillement.

Pour ce faire, une série d'essais mécaniques a été réalisée sur le Tuf avec différents pourcentages de RAP (0%, 10%, 20%, et 30%). Ces essais visent à évaluer de manière exhaustive l'influence de l'ajout de RAP sur le comportement mécanique du Tuf. Les essais de compactage déterminent la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale, tandis que les essais CBR (California Bearing Ratio) imbibés évaluent la capacité de portance du matériau sous des conditions saturées. Les essais Proctor permettent de déterminer la relation entre la teneur en eau et la densité sèche du mélange, et les essais de cisaillement fournissent des informations sur la résistance au cisaillement du matériau.

Ces analyses approfondies permettront de comprendre comment le RAP affecte les propriétés du Tuf, et d'identifier les proportions optimales pour une utilisation efficace dans des applications spécifiques.

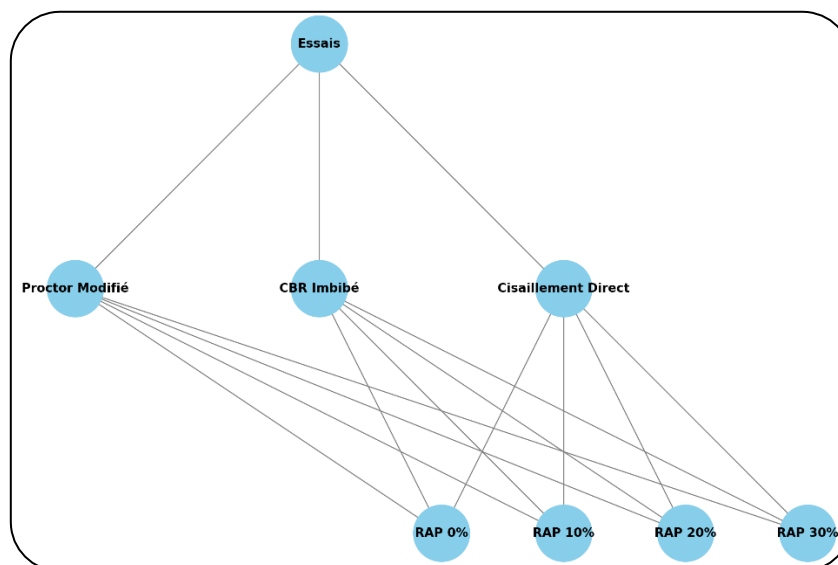


Figure 4.1 : Organigramme de recherche d'une formulation optimale.

4.2 Résultats de compactage

L'essai de compactage "Proctor Modifié" est réalisé conformément à la norme NF P 94-093. Plusieurs échantillons du mélange (100-x%) Tuf/RAP sont préparés avec différentes teneurs en eau. Pour chaque teneur en eau w , on détermine la valeur de la densité sèche γ_d . ces valeurs sont ensuite reportées sur un graphique en fonction des teneurs en eau obtenues pendant l'essai. Cette relation permet de déterminer la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale de chaque mélange. Les Figures suivantes 4.2(a, b, c) montrent les valeurs des densités sèches en fonction de la teneur en eau pour les différents mélanges tuf + RAP :

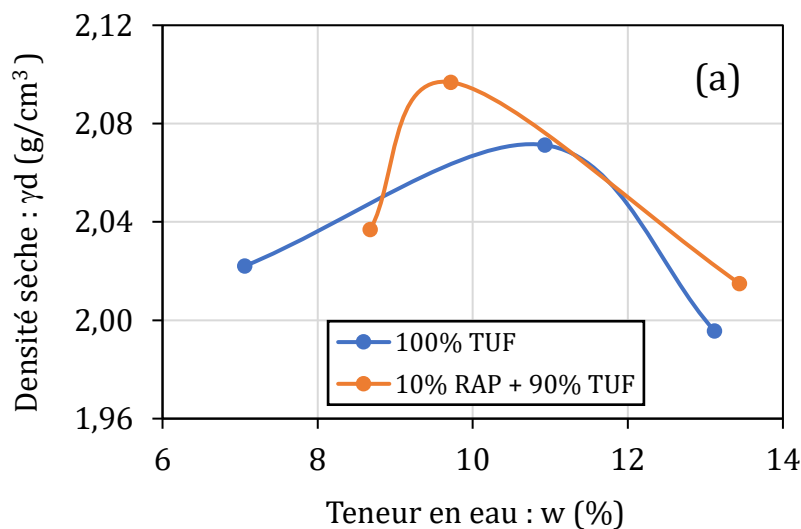
4.2.1 Courbes Proctor modifié

La Figure 4.2a illustre les résultats de l'essai de compactage "Proctor Modifié" pour deux mélanges : 100% Tuf et un mélange composé de 10% RAP et 90% Tuf. La courbe bleue montre que la densité sèche du Tuf pur augmente avec la teneur en eau, atteignant un maximum d'environ 2,07 g/cm³ à une teneur en eau de 10,93%, puis diminue. La courbe orange, représentant le mélange avec 10% de RAP, atteint une densité sèche maximale légèrement supérieure, environ 2,10 g/cm³, à une teneur en eau de 9,72%. Cette comparaison indique que le mélange avec 10% de RAP a une meilleure compactabilité et nécessite une teneur en eau optimale légèrement inférieure pour atteindre la densité maximale. Après ces points optimaux, les densités sèches des deux mélanges diminuent avec l'augmentation continue de la teneur en eau, la diminution étant plus prononcée pour le Tuf pur. Ces résultats suggèrent que l'ajout de RAP améliore les propriétés de compactage du Tuf.

La Figure 4.2b présente les résultats de l'essai de compactage "Proctor Modifié" pour deux mélanges : 100% Tuf et un mélange de 20% RAP et 80% Tuf. La première courbe, représentant le Tuf pur, montre que la densité sèche augmente avec la teneur en eau, atteignant un maximum d'environ 2,07 g/cm³ à une teneur en eau de 10,93%, puis diminue rapidement après ce point optimal. En comparaison, la deuxième courbe, représentant le mélange avec 20% de RAP, atteint une densité sèche maximale plus élevée d'environ 2,15 g/cm³ à une teneur en eau de 10,7% (augmentation de 3,86% pour la densité, et diminution de 2,1% pour la teneur en eau). Cette différence indique que l'ajout de RAP améliore significativement la compactabilité du mélange, nécessitant moins d'eau pour atteindre une densité maximale plus élevée. Cette performance peut

être attribuée aux propriétés granulaires du RAP, qui améliorent l'interaction entre les particules et augmentent la densité lorsqu'elles sont compactées.

Les résultats de l'essai de compactage "Proctor Modifié" pour deux mélanges : 100% Tuf et un mélange de 30% RAP et 70% Tuf sont présentés dans la Figure 4.2c. La courbe représentant le Tuf pur, montre que la densité sèche augmente légèrement avec la teneur en eau, atteignant un maximum d'environ 2,07 g/cm³ autour de 10,93% de teneur en eau, puis diminue légèrement. En revanche, la courbe représentant le mélange avec 30% de RAP, démarre à une densité sèche beaucoup plus faible d'environ 1,70 g/cm³ à une teneur en eau de 8%, mais augmente rapidement pour atteindre un maximum d'environ 2,10 g/cm³ à une teneur en eau de 10,05%, avant de diminuer légèrement. Cette comparaison indique que bien que le mélange avec 30% de RAP atteigne une densité sèche maximale similaire à celle du Tuf pur, il part d'une densité initiale beaucoup plus faible, suggérant une nécessité de compactage plus rigoureux pour atteindre des résultats optimaux. De plus, la teneur en eau optimale pour le mélange avec RAP est légèrement plus basse, autour de 10%, ce qui peut être avantageux dans certaines conditions de chantier où une teneur en eau réduite est souhaitable. Ces résultats suggèrent que l'ajout de 30% de RAP au Tuf peut être bénéfique pour atteindre une densité sèche élevée, à condition que le processus de compactage soit bien contrôlé pour compenser la densité initialement plus faible du mélange.



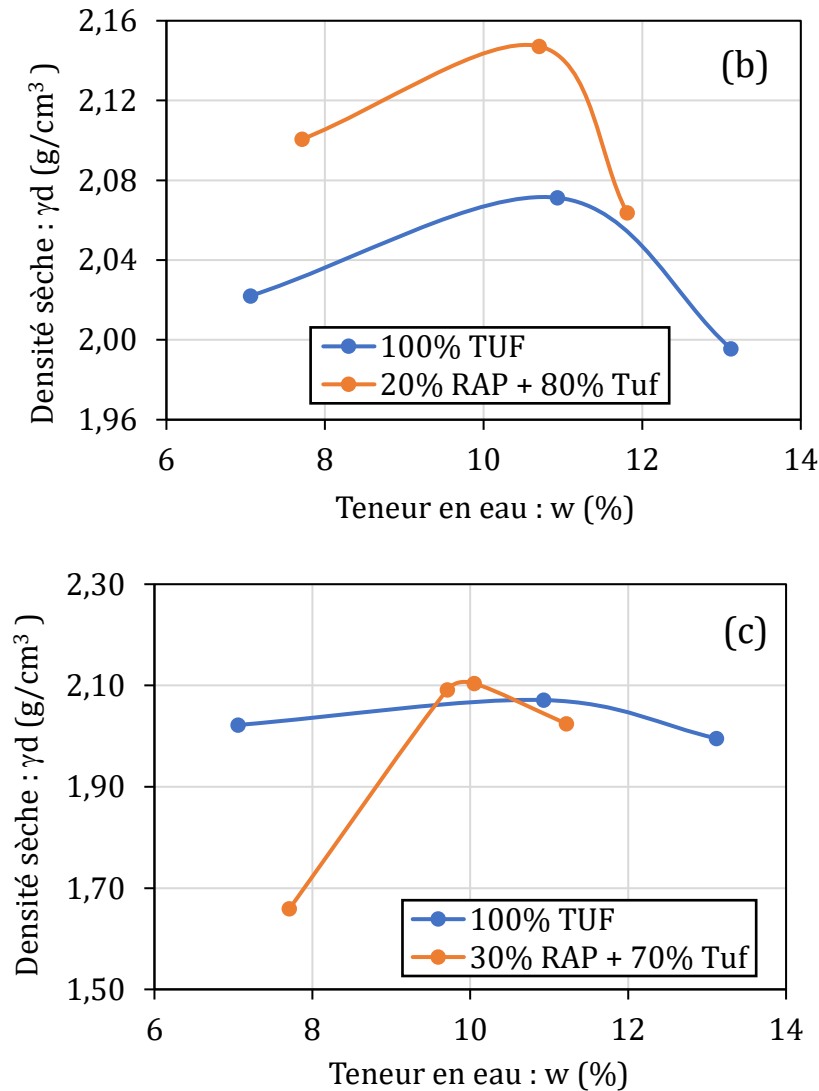


Figure 4.2 : Densité sèche en fonction de teneur en eau pour 100% Tuf et : (a)- 10%RAP ; (b)- 20%RAP ; (c)- 30%RAP.

La Figure 4.3 montre les résultats de compactage des mélanges Tuf/RAP pour cette étude. On remarque que l'ajout de 10% de RAP augmente la densité sèche de 2.07 à 2.10 g/cm³ (augmentation de 1.014 fois). Pour le mélange avec 20% de RAP, la densité sèche atteint 2.15 g/cm³, ce qui représente une augmentation de 1.039 fois par rapport au tuf pur. Le mélange testé avec 30% de RAP présente une densité sèche de 2.10 g/cm³, c'est-à-dire une augmentation de 1.014 fois par rapport au mélange avec 0% de RAP. De plus, les résultats montrent que l'ajout de RAP aux mélanges Tuf/RAP influence positivement la densité sèche des matériaux compactés.

En pratique, ces résultats suggèrent que le mélange avec 20% de RAP est plus performant pour des applications telles que la construction de routes, offrant une meilleure densité et une compacité optimale avec moins d'eau. Cela contribue non seulement à une meilleure performance mécanique de la couche de base de la route, augmentant sa durabilité et sa résistance aux charges de trafic, mais aussi à une construction plus durable et écologique grâce à l'utilisation de matériaux recyclés.

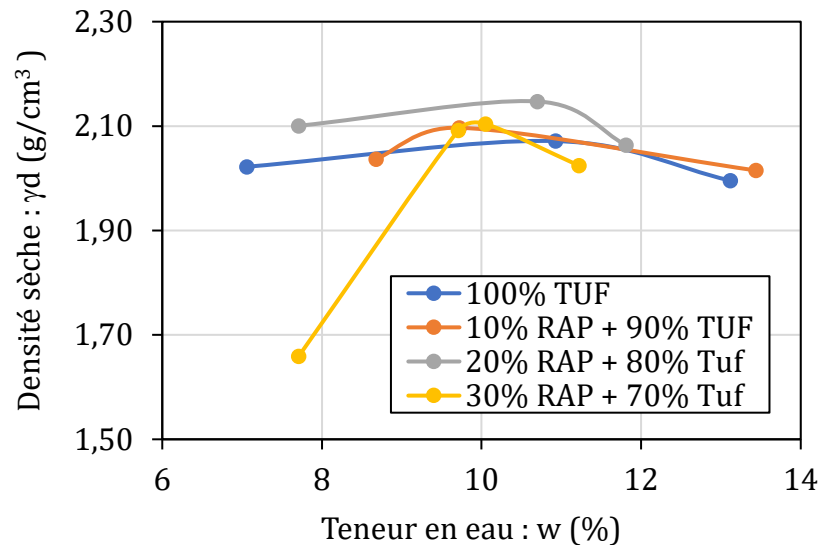


Figure 4.3 : Densité sèche en fonction de teneur en eau des différents mélanges (Tuf/RAP).

4.2.2 Variation des paramètres de compactage en fonction du RAP

La figure 4.4 présente les variations de la teneur en eau optimale et de la densité sèche maximale en fonction du pourcentage de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) dans les mélanges Tuf/RAP. On remarque que la teneur en eau optimale diminue initialement avec l'ajout de 10% de RAP, passe de 10,93% à 9,72% (diminution de 11,07%), puis augmente pour atteindre un maximum de 10,07% avec 20% de RAP (augmentation de 10,08% par rapport au 10% RAP), avant de redescendre à environ 10,05% avec 30% de RAP (diminution de 6,69% par rapport au 20% RAP). Simultanément, la densité sèche maximale augmente avec l'ajout de RAP, atteignant un pic à 20% de RAP avec une valeur de 2,15 g/cm³, puis diminue à environ 2,10 g/cm³ pour 30% de RAP. Ces résultats montrent que l'ajout de RAP influence de manière significative la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale, avec un pourcentage optimal de 20% de RAP pour maximiser la densité sèche, indiquant l'importance de déterminer les proportions optimales de RAP pour améliorer les propriétés des mélanges de construction.

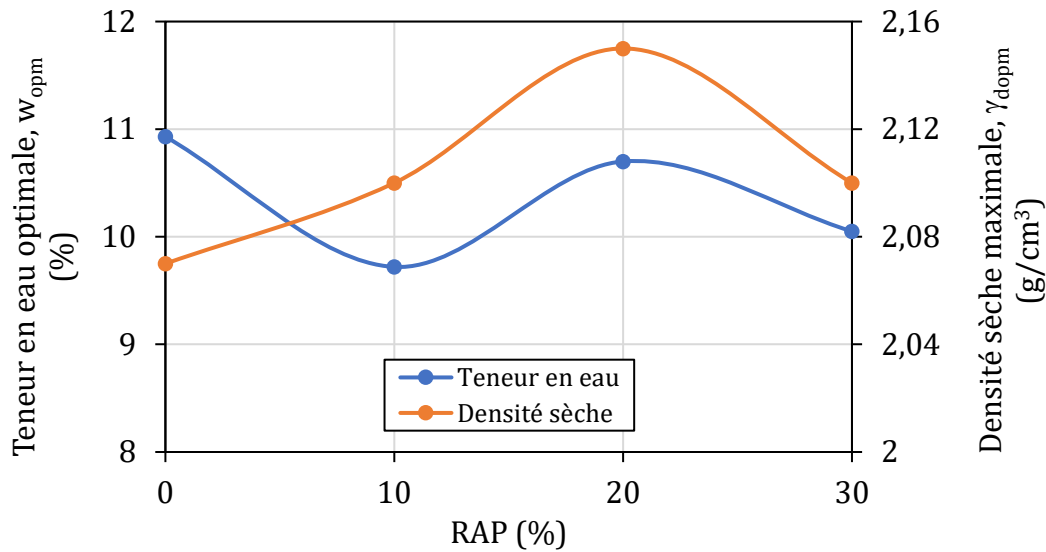


Figure 4.4 : Variation de teneur en eau optimale et densité sèche optimale des différents mélanges (Tuf/RAP).

4.2.3 Indice des vides

La Figure 4.5 montre la relation entre le pourcentage de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) et l'indice des vides ($e = \gamma_s/\gamma_d - 1$) dans les mélanges Tuf/RAP. Il est évident que l'indice des vides diminue de manière linéaire avec l'augmentation du pourcentage de RAP, comme indiqué par la ligne de tendance avec l'équation ($e = -0.0056 \times (RAP) + 0.1952$) et un coefficient de détermination ($R^2 = 0.96$), indiquant une forte corrélation. À 0% de RAP, l'indice des vides est d'environ 0.2, mais il diminue progressivement pour atteindre environ 0.04 à 30% de RAP. Cette tendance montre que l'ajout de RAP réduit significativement l'indice des vides dans le mélange, ce qui suggère une meilleure compaction et une réduction de la porosité avec l'augmentation du RAP, améliorant potentiellement la densité et la stabilité du matériau compacté.

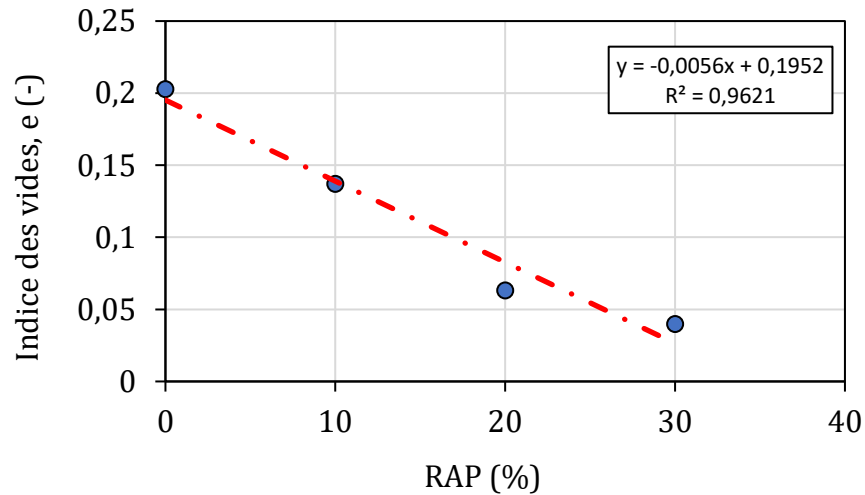


Figure 4.5 : Variation d'indice des vides en fonction de RAP.

4.2.4 Degré de saturation

La figure 4.6 illustre la relation entre le pourcentage de RAP et le degré de saturation ($S_r = \gamma_s \times w / \gamma_w \times e$) des mélanges Tuf/RAP. On observe une augmentation linéaire du degré de saturation avec l'augmentation du pourcentage de RAP, comme indiqué par l'équation de la ligne de tendance ($S_r = 0.1461 \times (\text{RAP}) + 0.9052$) et un coefficient de détermination ($R^2 = 0.94$), montrant une forte corrélation. À 0% de RAP, le degré de saturation est d'environ 1.3%, mais il augmente progressivement pour atteindre environ 5.5% à 30% de RAP. Cette tendance indique que l'ajout de RAP augmente le degré de saturation des mélanges, ce qui peut être lié à une meilleure rétention d'eau et une plus grande stabilité des mélanges avec des pourcentages croissants de RAP.

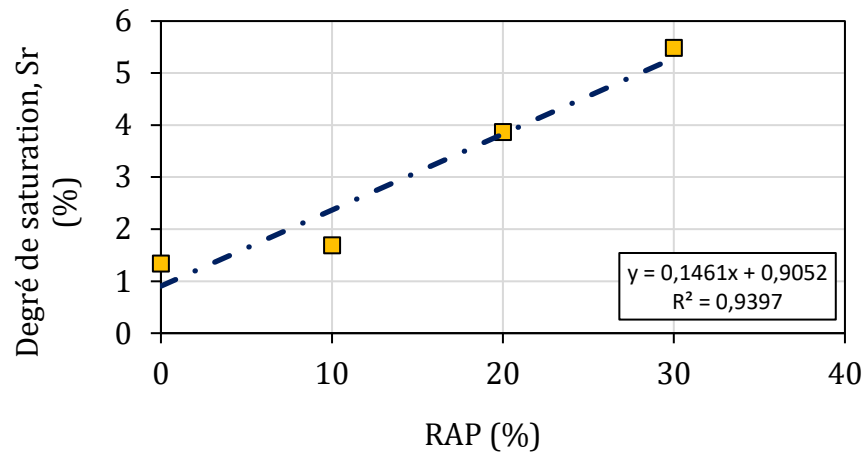


Figure 4.6 : Variation du degré de saturation en fonction de RAP.

4.2.5 Porosité

La figure 4.7 illustre la relation entre le pourcentage de RAP et la porosité ($n = 1 - \gamma_d/\gamma_s$) des mélanges Tuf/RAP. On observe qu'avec l'augmentation du pourcentage de RAP, il y a une diminution linéaire de la porosité, comme indiqué par l'équation linéaire ($n = -0,00045 \times (\text{RAP}) + 0,1646$) et un coefficient de détermination ($R^2 = 0,97$), montrant une forte corrélation. À 0 % de RAP, la porosité est d'environ 0,17, mais elle diminue progressivement pour atteindre environ 0,04 à 30 % de RAP. Cette tendance indique que l'ajout de RAP diminue la porosité des mélanges, ce qui peut être lié à une meilleure rétention d'eau et une plus grande stabilité des mélanges avec des pourcentages croissants de RAP.

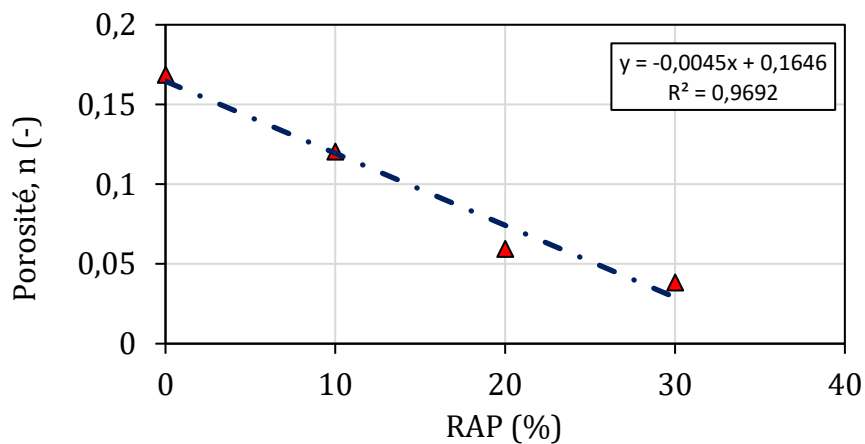


Figure 4.7 : Porosité en fonction de RAP.

4.3 Résultats des essais de CBR imbibé

L'essai CBR est essentiel pour évaluer la résistance d'un sol à la déformation sous une charge appliquée. Ce test est souvent réalisé sur des échantillons de sol saturés d'eau afin de simuler les conditions réelles sur le terrain, où le sol peut être imbibé.

L'essai CBR sur des échantillons saturés est crucial pour obtenir des données précises sur la capacité portante du sol dans des conditions similaires à celles rencontrées en pratique, garantissant ainsi une conception adéquate des fondations et des infrastructures.

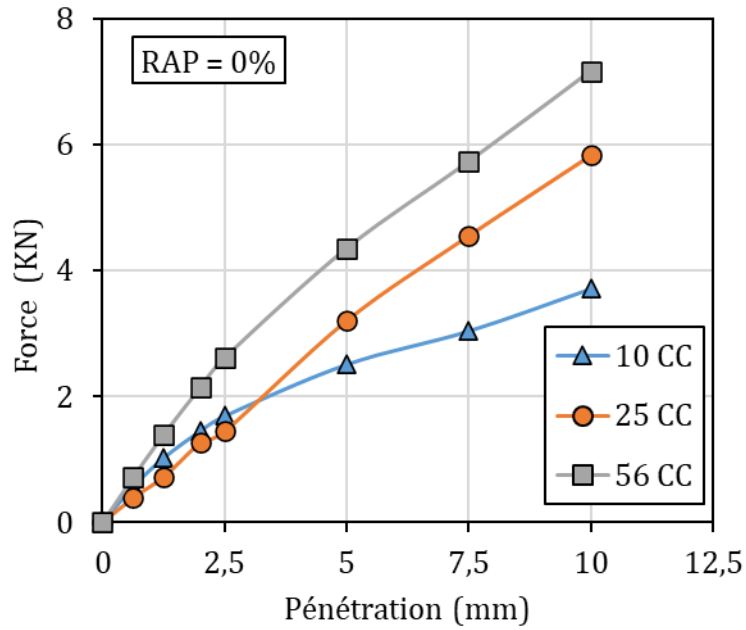
Des essais de CBR imbibés ont été réalisés sur des mélanges composés de Tuf et de RAP avec des pourcentages de 0, 10, 20 et 30 % de RAP. Les échantillons ont été compactés en utilisant les teneurs en eau optimales, à différentes énergies de compactage (10, 25 et 56 coups par couche). Les moules ainsi préparés ont été placés dans un bassin d'eau pendant 4 jours. Ensuite, les échantillons ont été soumis à la presse CBR.

4.3.1 Courbes force-pénétration

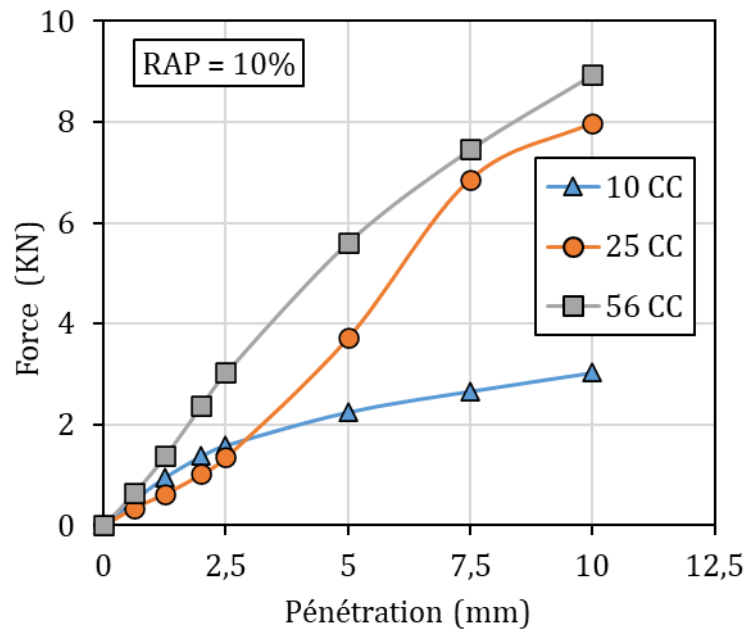
La Figure 4.8 présente la relation entre la force appliquée (en KN) et la pénétration (en mm) de différents mélanges de Tuf contenant 0%, 10%, 20% et 30% de RAP, soumis à trois niveaux d'énergie distincts (10, 25 et 56 coups par couche).

Le graphique illustre une corrélation positive où l'augmentation du pourcentage de pénétration entraîne une augmentation proportionnelle de la force requise. Initialement à 0 KN pour 0 mm de pénétration, la force augmente progressivement jusqu'à un maximum atteint à 10 mm de pénétration.

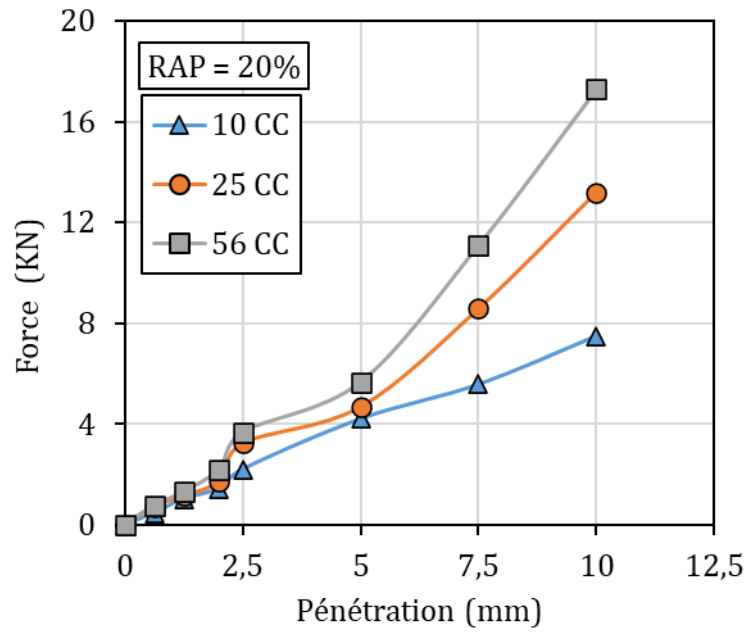
La constance de la progression linéaire des courbes suggère une résistance uniforme du matériau à la pénétration à travers tous les échantillons testés.



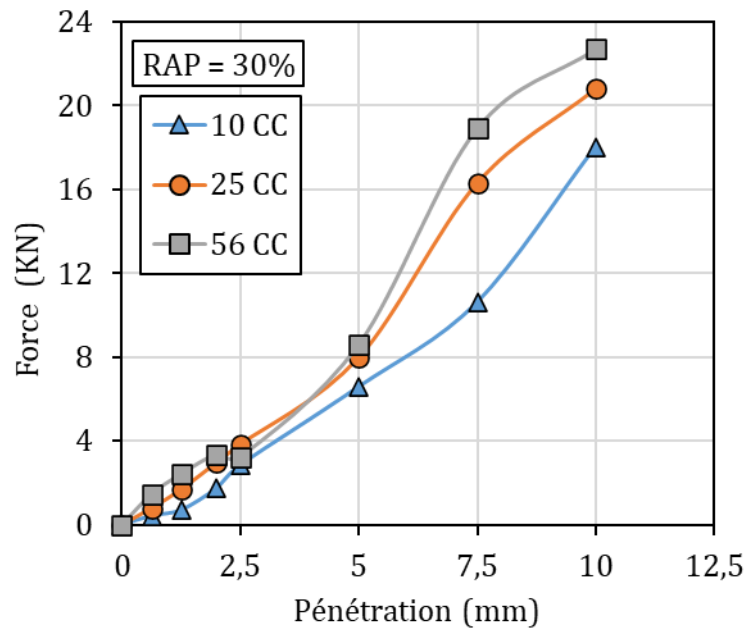
(a)



(b)



(c)

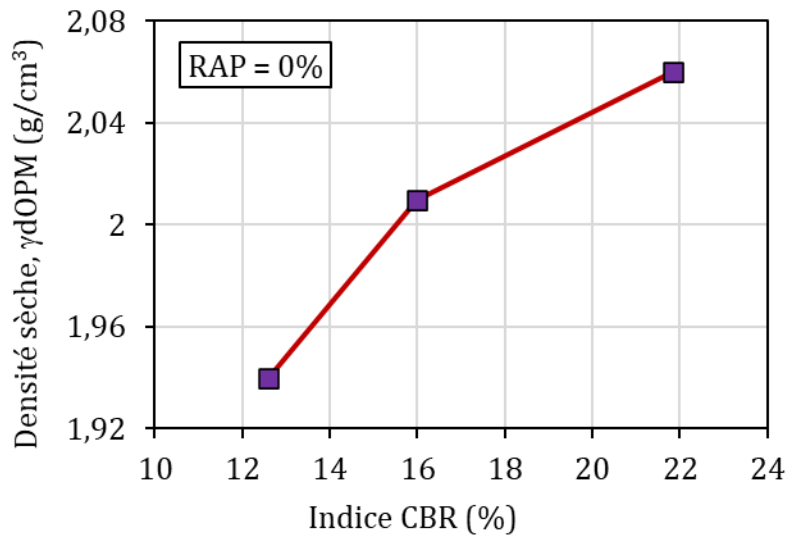


(d)

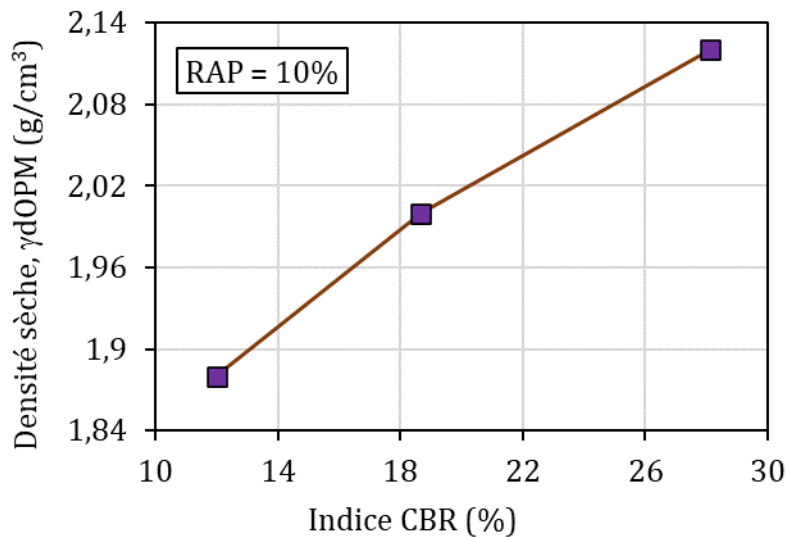
Figure 4.8 : Courbes d'essai CBR imbibé pour les mélanges Tuf/RAP à différentes énergies : (a) RAP = 0% ; (b) RAP = 10% ; (c) RAP = 20% ; (d) RAP = 30%.

4.3.2 Variation de la densité sèche en fonction de l'indice CBR imbibé

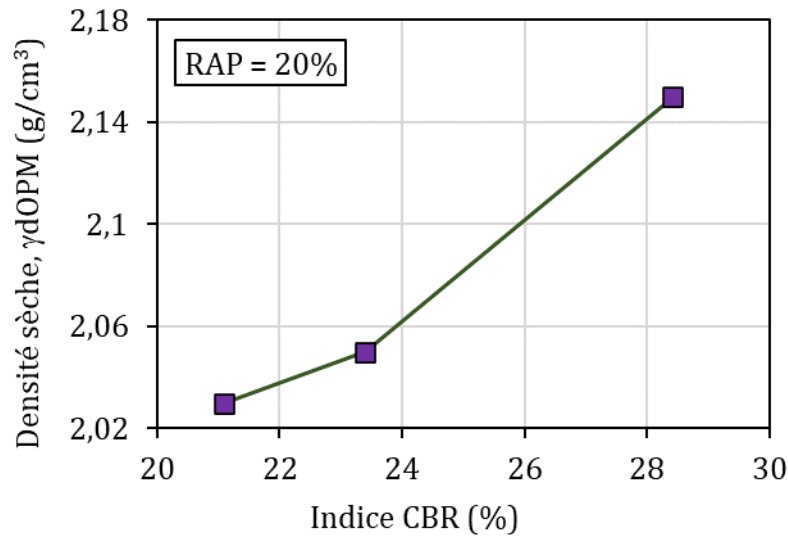
La figure 4.9 présente la densité sèche en fonction de l'indice CBR imbibé des échantillons préparés sous différentes énergies de compactage (10, 25 et 56 coups par couche) pour chaque mélange étudié (RAP = 0%, 10%, 20% et 30%). Il est clair, à partir de tous les graphiques obtenus, que l'indice CBR augmente avec l'augmentation de l'énergie de compactage. Ces courbes sont utilisées pour déterminer l'indice CBR à certains pourcentages de la densité de l'optimum Proctor modifié (généralement 95% pour les couches de fondation et 98% pour les couches de base).



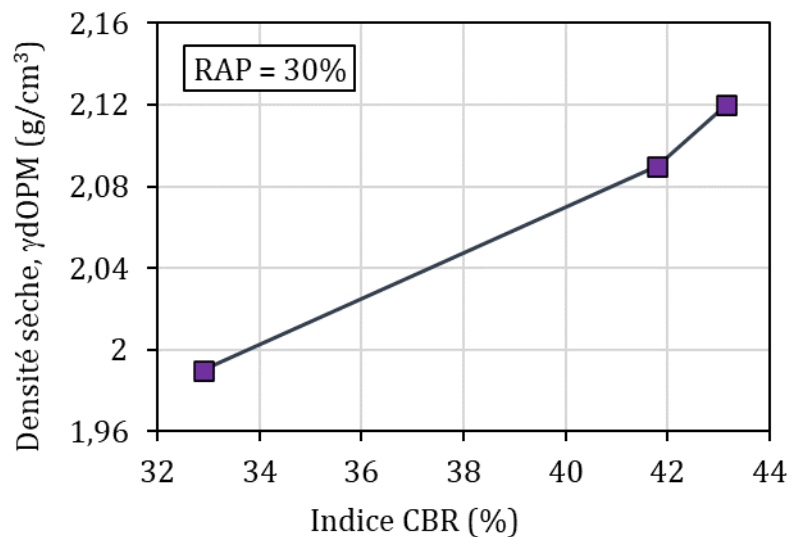
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 4.9 : Densité sèche maximale en fonction de l'indice CBR : (a) RAP = 0% ; (b) RAP = 10% ; (c) RAP = 20% ; (d) RAP = 30%.

4.3.3 Indice CBR à l'optimum Proctor modifié

La figure suivante présente la variation de la densité sèche maximale en fonction de l'indice CBR imbibé. Selon cette figure, l'indice CBR (à 95% de l'OPM) augmente progressivement avec l'augmentation du pourcentage de RAP, atteignant des valeurs supérieures à 20% pour les mélanges

contenant 20% et 30% de RAP. Cependant, pour les applications dans les couches de chaussées, il est essentiel de considérer que ces mélanges ne répondent pas aux exigences minimales pour les couches de base, où un indice CBR (à 98% de l'OPM) de 60% ou plus est souvent requis pour assurer la résistance adéquate à long terme et la capacité de support de la charge.

Par contre, les mélanges avec 20% et 30% de RAP sont considérés acceptables pour les couches de fondation des chaussées souples, où les exigences de résistance sont moins contraignantes. Cela est principalement dû à leur capacité à offrir une résistance suffisante tout en permettant une utilisation efficace des matériaux recyclés, contribuant ainsi à des pratiques de construction plus durables et économiques.

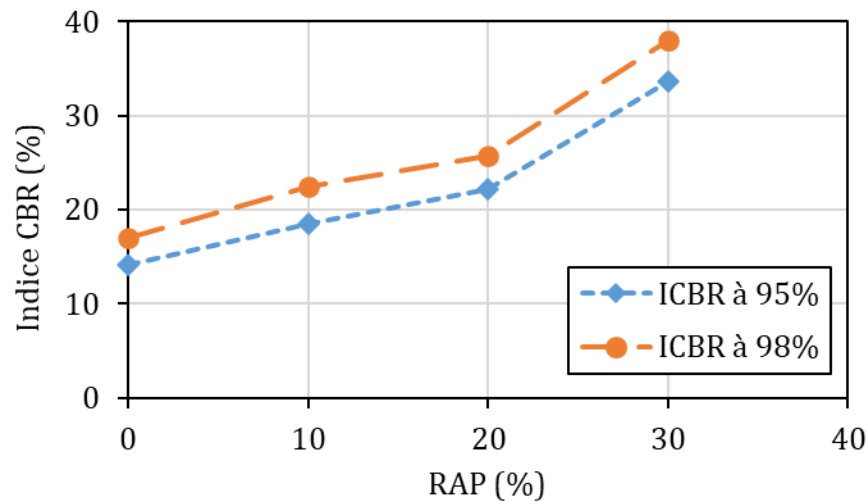


Figure 4.10 : Evolution de l'indice CBR (à 95% et 98% de l'OPM) en fonction de RAP.

4.4 Résultats des essais de cisaillement

Une série d'essais de cisaillement à la boîte de Casagrande a été réalisée sur différents échantillons de mélanges Tuf/RAP avec les coordonnées à l'optimum Proctor obtenues (γ_d et w à l'OPM) comme suit : $w = 10.93\%$ pour le Tuf pur (RAP = 0%), $w = 9.72\%$ pour les mélanges avec RAP = 10%, $w = 10.7\%$ pour le mélange avec RAP = 20%, et $w = 10.05\%$ pour le mélange avec RAP = 30%. De plus, les échantillons ont été placés dans une boîte de cisaillement direct de 60 mm $\times$ 60 mm $\times$ 25 mm, reconstitués avec les caractéristiques de l'optimum Proctor, et soumis à trois contraintes normales : $\sigma_n = 100$ kPa, 200 kPa et 400 kPa.

4.4.1 Contrainte normale $\sigma_n = 100$ kPa

La figure 4.11a illustre le comportement mécanique du Tuf mélangé avec différentes fractions de RAP, variant de 0 % à 30 %, soumis à une contrainte normale de 100 kPa. Il ressort clairement que l'ajout de RAP a un effet considérable sur la résistance au cisaillement des matériaux testés. Le mélange Tuf + 0 % RAP présente une résistance au cisaillement maximale ($\tau_{\max}$) de 122 kPa. Cette résistance augmente avec l'ajout de RAP, atteignant 124 kPa pour 10 % de RAP et 126 kPa pour 20 % de RAP. Cependant, elle diminue légèrement avec 30 % de RAP, avec une $\tau_{\max}$ de 124 kPa. Cette tendance s'explique probablement par le fait qu'une quantité modérée de RAP améliore la cohésion et l'angle de friction du mélange, tandis qu'un excès de RAP pourrait perturber la matrice du Tuf, réduisant ainsi son efficacité à des pourcentages plus élevés.

La figure 4.11b démontre l'influence significative de l'ajout de RAP sur le comportement mécanique du Tuf. En effet, on observe une augmentation progressive de la phase de dilatance à mesure que la fraction de RAP atteint 30%.

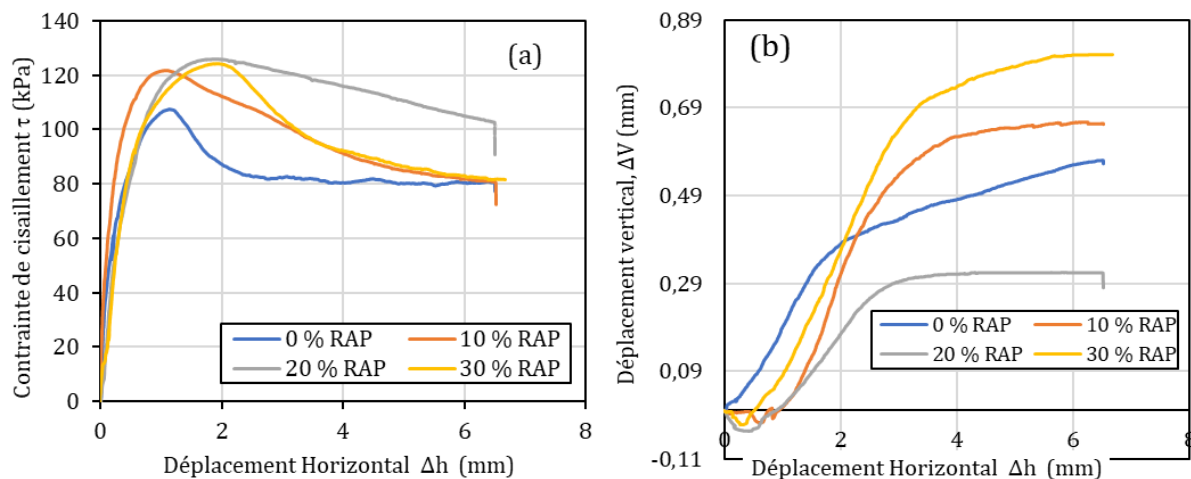


Figure 4.11 : Comportement mécanique des mélanges Tuf /RAP, $\sigma_n = 100$ kPa.

4.4.2 Contrainte normale $\sigma_n = 200$ kPa

La figure 4.12 présente la résistance au cisaillement direct du Tuf mélangé avec différentes fractions de RAP, allant de 0 % à 30 %, sous une contrainte normale de 200 kPa. Il est évident que l'ajout de RAP influence considérablement la résistance au cisaillement des mélanges testés. Le

mélange Tuf sans RAP (0 %) montre une résistance au cisaillement maximale ($\tau_{\max}$) de 171 kPa. Avec l'ajout de RAP, cette résistance diminue d'abord à 157 kPa pour 10 % de RAP, puis augmente à 195 kPa pour 20 % de RAP. Toutefois, avec 30 % de RAP, la résistance diminue légèrement à 189 kPa. Cette variation peut s'expliquer par le fait qu'une quantité modérée de RAP améliore la cohésion et l'angle de friction du mélange, tandis qu'une quantité excessive de RAP pourrait perturber la matrice du Tuf, réduisant ainsi son efficacité.

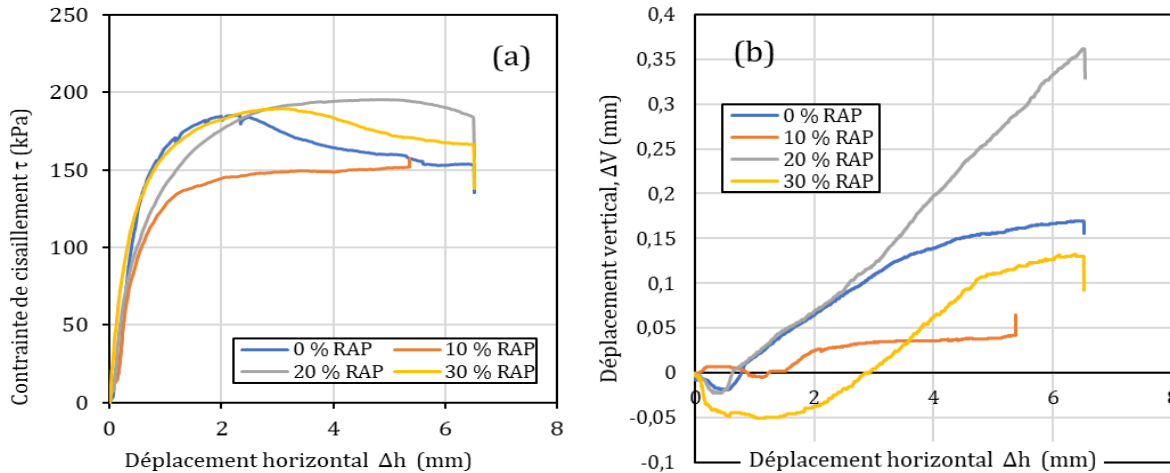


Figure 4.12 : Comportement mécanique des mélanges Tuf /RAP, $\sigma_n = 200$ kPa.

4.4.3 Contrainte normale $\sigma_n = 400$ kPa

La figure 4.13 illustre la résistance au cisaillement direct du Tuf mélangé avec diverses proportions de RAP, allant de 0 % à 30 %, sous une contrainte normale de 400 kPa. Il est clair que l'ajout de RAP a un impact significatif sur la résistance au cisaillement des mélanges testés. Le mélange de Tuf sans RAP (0 %) présente une résistance au cisaillement maximale ($\tau_{\max}$) de 313 kPa. Lorsque 10 % de RAP est ajouté, cette résistance augmente de 4,2 % pour atteindre 326 kPa. Avec 20 % de RAP, elle augmente légèrement de 0,6 % supplémentaires pour atteindre 328 kPa. Toutefois, avec 30 % de RAP, la résistance diminue de 4,9 %, atteignant ainsi 312 kPa.

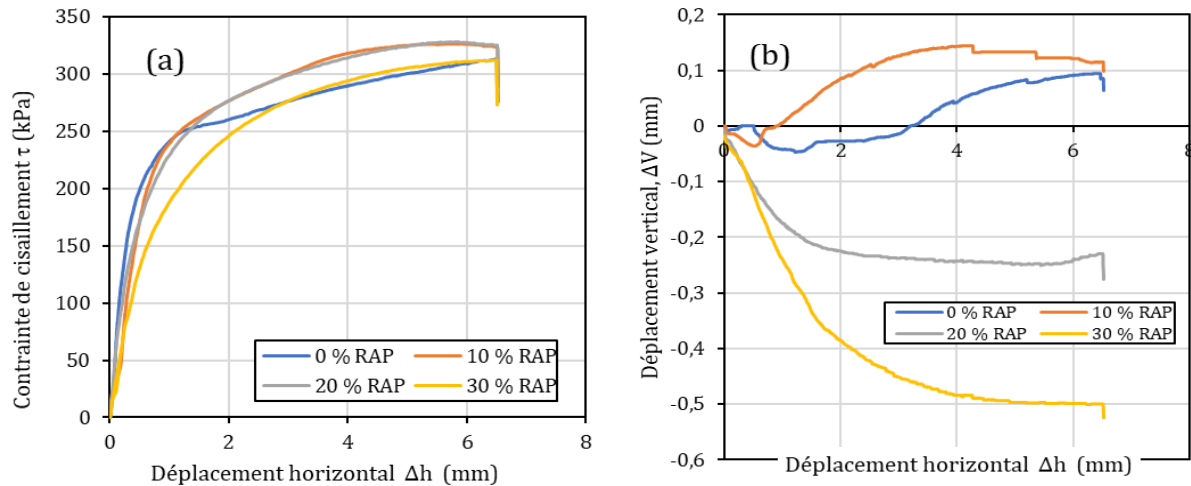


Figure 4.13 : Comportement mécanique des mélanges Tuf /RAP, $\sigma_n = 400$ kPa.

4.4.4 Effet de l'ajout du RAP sur la résistance au cisaillement maximale du Tuf

La Figure 4.14 illustre l'évolution de la résistance au cisaillement en fonction de la teneur en RAP (0%, 10%, 20%, et 30%). On peut observer à partir de ces graphiques qu'une augmentation de la contrainte normale initiale (100, 200, et 400 kPa) améliore significativement le comportement du tuf, quelle que soit la teneur en RAP.

Par exemple, pour une teneur en RAP de 0%, la résistance au cisaillement maximale est de 108 kPa sous une contrainte normale de 100 kPa. Cette résistance augmente de 58,3% pour atteindre 171 kPa sous une contrainte normale de 200 kPa, et de 83% pour atteindre 313 kPa sous une contrainte normale de 400 kPa. Cette phase d'augmentation de la résistance est particulièrement marquée pour les contraintes normales initiales élevées, notamment de 200 et 400 kPa.

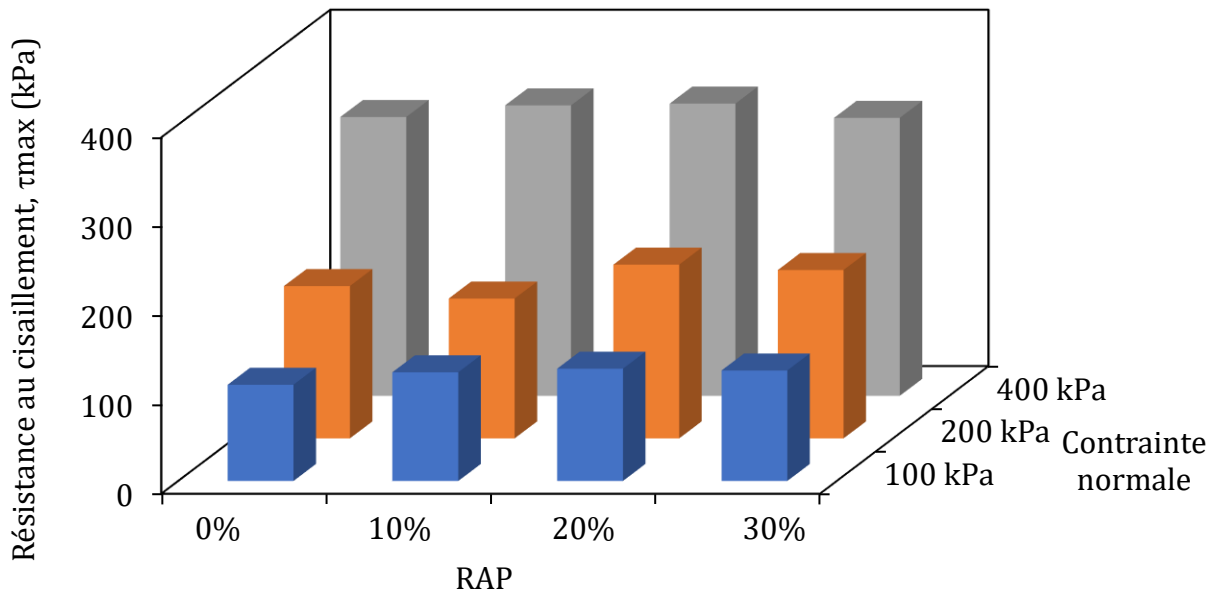


Figure 4.14 : Résistance au cisaillement maximale en fonction de RAP et la contrainte normale initiale $\sigma_n = 100, 200$ et 400 kPa.

4.4.5 Résistance au cisaillement maximale en fonction de contrainte normale

La variation de la contrainte de cisaillement maximale des mélanges Tuf/RAP en fonction de trois contraintes normales ($\sigma_n = 100$ kPa, $\sigma_n = 200$ kPa et $\sigma_n = 400$ kPa) est présentée dans la figure 4.15. Comme illustré dans ce graphique, la teneur en eau et la teneur en RAP ont un effet notable sur l'angle de frottement interne et la cohésion des mélanges binaires étudiés. L'augmentation de la teneur en RAP de 0% à 10% entraîne d'abord une légère augmentation de l'angle de frottement interne, suivie d'une diminution lorsque la teneur en RAP passe de 10% à 30%. Ce comportement pourrait s'expliquer par le rôle des particules de RAP présentes entre les grains de tuf, qui augmentent initialement les forces intergranulaires et l'enchevêtrement des grains, mais qui, à des teneurs plus élevées, peuvent perturber la structure du mélange. Parallèlement, la cohésion augmente de manière constante avec l'augmentation de la teneur en RAP. Ces résultats démontrent que l'incorporation de RAP peut améliorer les caractéristiques de cisaillement des sols, ce qui est avantageux pour les applications de génie civil.

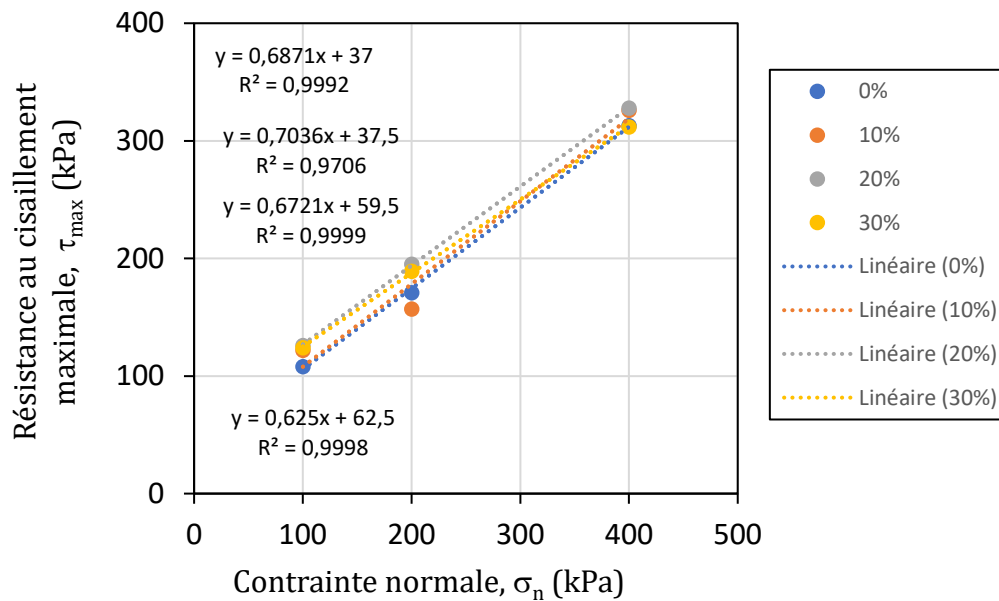


Figure 4.15 : Résistance au cisaillement maximale en fonction de contrainte normale.

4.4.6 Variation de l'angle de frottement et de la cohésion

En utilisant les équations linéaires du graphique 4.15, nous avons déterminé les valeurs de l'angle de frottement et de la cohésion par la relation (critère de rupture de Mohr-Coulomb) :

$$\tau = \sigma \tan \phi + c \quad (4.1)$$

Où : τ est la contrainte de cisaillement, σ est la contrainte normale, et c est la cohésion.

Puis nous avons tracé les courbes paramétriques de cisaillement (ϕ et c).

Les valeurs de l'angle de frottement et de la cohésion sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 4.1 - Valeurs de l'angle de frottement et de la cohésion des mélanges Tuf/RAP.

RAP (%)	0%	10%	20%	30%
Angle de frottement interne ϕ (°)	34.493	35.1302	33.905	32.0054
Cohésion C (kPa)	37	37.5	59.5	62.5

4.4.6.1 Angle de frottement interne

La Figure 1.16 présente la variation de l'angle de frottement interne en fonction du pourcentage de RAP pour des mélanges avec 0%, 10%, 20%, et 30% de RAP. Comme mentionné précédemment, l'ajout de RAP a un effet significatif sur l'angle de frottement des mélanges étudiés. Lorsque la teneur en RAP augmente de 0% à 10%, l'angle de frottement augmente par 1.84%, puis diminue par 8.89%. Cette tendance est bien représentée par l'équation polynomiale ($\phi = -0.0063 \times (\text{RAP})^2 + 0.1034 \times (\text{RAP}) + 34.552$) avec un coefficient de détermination élevé ($R^2 = 0.99$), indiquant une forte corrélation entre la teneur en RAP et l'angle de frottement. Cette analyse suggère que l'optimisation de la teneur en RAP peut influencer de manière significative les propriétés mécaniques des mélanges, ce qui est crucial pour leur utilisation dans diverses applications en génie civil.

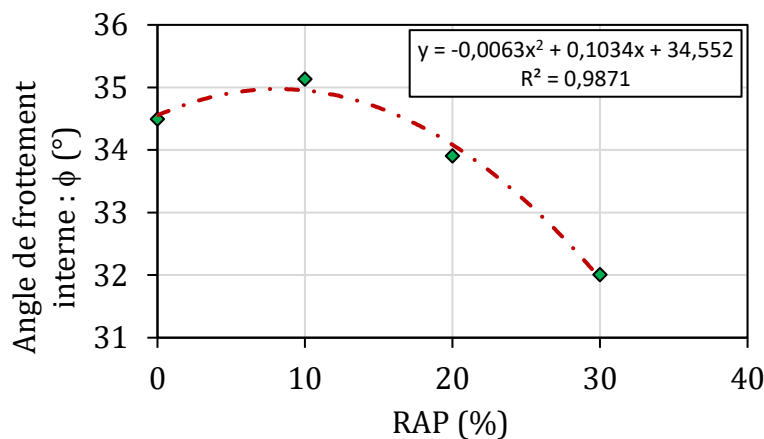


Figure 4.16 : Angle de frottement en fonction de RAP des mélanges Tuf/RAP.

4.4.6.2 Cohésion

La figure suivante illustre la variation de la cohésion en fonction des pourcentages de RAP pour les mélanges Tuf/RAP. Il est clair que l'ajout de RAP combiné à la teneur en eau entraîne une augmentation significative de la cohésion des mélanges testés. La cohésion augmente de 37 à 62.5 kPa lorsque le pourcentage de RAP passe de 0 à 30%. Une équation exponentielle a été développée pour modéliser la relation entre la cohésion et le RAP : $c = 35.126 \times \text{Exp}(0.0203 \times \text{RAP})$, avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.85$, démontrant une relation robuste entre ces deux paramètres. Cette analyse met en évidence l'impact bénéfique de l'incorporation de RAP sur les propriétés mécaniques des mélanges, ce qui est vital pour leur application dans divers projets de construction.

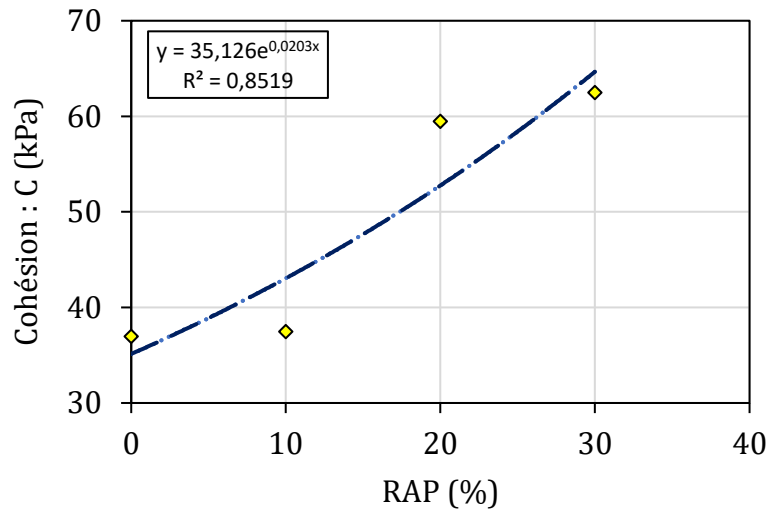


Figure 4.17 : Cohésion en fonction de RAP des mélanges Tuf/RAP.

4.5 Conclusion

L'incorporation progressive de 0%, 10%, 20% et 30% de RAP dans le tuf a été évaluée à travers des essais de Proctor modifié, de CBR imbibé et de cisaillement direct, révélant des impacts significatifs sur les propriétés mécaniques des mélanges étudiés.

Les résultats montrent une augmentation générale de la résistance et de la cohésion des mélanges à mesure que la teneur en RAP augmente. L'angle de frottement interne a montré une légère augmentation initiale suivie d'une diminution avec l'augmentation du RAP, illustrant la complexité de son optimisation. Parallèlement, la cohésion a considérablement augmenté, passant de 37 kPa à 62.5 kPa avec l'accroissement du pourcentage de RAP, soutenue par une relation exponentielle ajustée ($c = 35.126 \times \text{Exp}(0.0203 \times \text{RAP})$, $R^2 = 0.85$).

Les essais de Proctor modifié ont révélé un pic de densité à 20% de RAP, indiquant une optimisation de la compaction à cette concentration particulière. De plus, les essais de CBR imbibé ont montré une augmentation significative du CBR, passant de 14.1% à 33.6% à 95% de l'OPM (Optimum Proctor Modifié), avec l'intégration de RAP, soulignant ainsi une amélioration substantielle de la portance et de la stabilité des mélanges.

Une teneur en RAP de 20 % semble offrir le meilleur équilibre entre la réutilisation des matériaux recyclés et les propriétés mécaniques requises. À cette concentration, les tests montrent

généralement une augmentation significative de la résistance et de la stabilité du mélange, avec des valeurs CBR augmentant jusqu'à 33.6 % à OPM 95 %. Ce rapport permet également un bon compactage et une liaison efficace entre les granulats tout en minimisant les effets négatifs potentiels sur la durabilité et la résistance dus à une teneur excessive en RAP. Cependant, la sélection finale du pourcentage de RAP doit être adaptée aux conditions spécifiques du projet, en tenant compte des exigences locales et des résultats des tests en laboratoire pour garantir des performances optimales du mélange dans les conditions de charge et d'utilisation prévues.

Ces observations soulignent les avantages potentiels de l'utilisation de RAP dans les mélanges de tuf pour les applications routières, tout en mettant en évidence l'importance critique d'une analyse approfondie pour optimiser la teneur en RAP en fonction des exigences spécifiques de performance, de durabilité et de coût des projets de travaux publics.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'amélioration des infrastructures routières est cruciale pour le développement économique et social d'un pays. La performance des routes dépend en grande partie des matériaux utilisés et de leur comportement géotechnique. Ce mémoire s'est concentré sur l'amélioration des paramètres géotechniques du tuf de carrière de Ouad Sly par l'incorporation de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) recyclé. Les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

Essais Proctor Modifié

- **Densité Sèche Maximale (γ_d max) :** L'ajout de RAP aux mélanges de tuf a permis d'atteindre des densités sèches maximales plus élevées par rapport au tuf seul. Le mélange optimal, avec 20% de RAP, a montré une densité sèche maximale de 2.15 g/cm^3 à une teneur en eau optimale de 10%. De plus, nous observons que pour des pourcentages de RAP de 0%, 10%, 20% et 30%, les densités sèches maximales étaient respectivement de 2.070 g/cm^3 , 2.100 g/cm^3 , 2.150 g/cm^3 et 2.100 g/cm^3 .
- **Teneur en Eau Optimale (w_{opt}) :** La quantité d'eau idéale fluctue légèrement avec l'incorporation de RAP. Puisque le pourcentage de RAP augmente, il tend à diminuer globalement, passant de 11 % pour 0 % RAP à environ 10 % pour 30 % RAP. Cela suggère que le mélange utilise moins d'eau pour atteindre la densité maximale en ajoutant du RAP.

Essais CBR (California Bearing Ratio)

- **Indice CBR :** L'incorporation de RAP a significativement amélioré les valeurs de l'ICBR. Le mélange avec 30% de RAP a atteint une valeur de 43.14, presque deux fois supérieure à celle du tuf seul (21.83).

Essais de Cisaillement

- **Résistance au Cisaillement :** Les résultats des essais de cisaillement ont montré que l'ajout de RAP améliore la résistance au cisaillement des mélanges de tuf. Le mélange avec 20% de RAP a présenté la meilleure performance globale, avec une résistance maximale sous contraintes normales de 100 kPa, 200 kPa, et 400 kPa.

- **Angle de Frottement Interne et Cohésion :** Les résultats des essais de cisaillement montrent une augmentation de la cohésion avec l'ajout de RAP, tandis que l'angle de frottement interne présente une légère diminution.

Ces résultats indiquent clairement que l'incorporation de RAP dans le tuf de carrière améliore significativement les propriétés géotechniques du matériau. Le RAP permet d'obtenir des mélanges plus denses, avec une meilleure portance et une résistance accrue au cisaillement. Ces améliorations sont essentielles pour la durabilité et la performance des infrastructures routières.

20 % du RAP offre un équilibre optimal entre la réutilisation des matériaux recyclés et les propriétés mécaniques souhaitées. À ce niveau, les essais indiquent une augmentation significative de la résistance et de la stabilité du mélange, avec des valeurs CBR atteignant jusqu'à 33,6 % à un OPM de 95 %. Ce rapport favorise également un compactage efficace et une bonne liaison entre les granulats, tout en minimisant les effets négatifs potentiels sur la durabilité et la résistance dus à une quantité excessive de RAP.

Perspectives et Recommandations : À la fin de cette étude, nous recommandons ce qui suit :

- **Continuer les Recherches :** Poursuivre les recherches sur l'utilisation de RAP et d'autres matériaux recyclés dans les mélanges de construction routière, afin de maximiser les bénéfices environnementaux et économiques.
- **Évaluation à Long Terme :** Évaluer l'impact à long terme de l'utilisation de RAP sur les performances des infrastructures routières, notamment en termes de durabilité et de maintenance.
- **Étude des Interactions :** Étudier les interactions entre différents types de RAP et d'autres matériaux géotechniques pour identifier les combinaisons les plus efficaces.

L'intégration de RAP dans les projets de construction routière représente une approche prometteuse pour améliorer les propriétés des matériaux géotechniques tout en contribuant à la réduction de l'empreinte écologique des travaux publics. Les résultats de cette étude fournissent une base solide pour des recherches futures et des applications pratiques visant à promouvoir des infrastructures plus durables et performantes.

Références bibliographiques

- Al-Fatlawy, R., Ali, T., Fakhraldin, M., Hussain, N. & Abd, I. (2023). Improvement in the California bearing ratio of subbase soil by recycled asphalt pavement and cement. *Open Engineering*, 13(1), 20220449. <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0449>
- Apequa.org. (2024) Notions d'enrobé et de bitume. Disponible sur le site :<https://wordpress.apequa.org/notions/> Consulté le 11/06/2024.
- Babilotte C.,(1996). COURS DE ROUTES 1ère Année, France,.
- Balet J.-M. (2014). Gestion des déchets ; Aide-mémoire ; 4ème. Ed. DUNOD, France. 63,71p.
- Belbali A, Bouchentouf F. (2016) .Valorisation énergétique de déchet de déjection par méthanisation (mouton); Master Académique ; Université d'Adrar
- Belhocine S et Sefroune H (2018). Valorisation du laitier dans le béton ordinaire destine pour la précontrainte ; Mémoire de master UNIVERSITE DE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES.
- Belkbir.H . (2011). Elaboration d'un béton autoplaçant léger à base des déchets de plastique ; mémoire de DEUA ; Université de Boumerdes ; Algérie
- Ben Dhia M. H., (1998). Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière en milieu saharien. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, N° 213 - janvier-février - réf. 4159 – pages 33-42.
- Boulahlib (2012). Géométrie des tracés, conception et entretien des chaussées, université de Constantine.
- Boulkhiout M. (2015). Valorisation des tufs dans le béton. Thèse de Doctorat en Sciences. Ecole Nationale Polytechnique Département de Génie Civil Laboratoire Construction et Environnement.
- Bouziane M. (2017). Etude d'expertise des dégradations de chaussée : Essais Expérimentaux. Mémoire de master. Université Ibn Khaldoun De Tiaret.
- Breslin, V. T., Senturk, U., Berndt, C.(1998). Long-term engineering properties of recycled plastic lumber in pier construction. *Resources, Conservation and Recycling* 23, 243-258
- Chauvin J.J., (1987). Les sables – guide pratique d'utilisation routière – Synthèse, ISTED.
- Cheref.L, et Rezki R, (2016) , Recyclage et valorisation des déchets inertes de la briqueterie SARL-DBK-MAT dans la fabrication de dallage de sol, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou 01.
- Cherrak M., (2003). Utilisation des tufs calcaires et sable de dune en technique routière. Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.

- Cherrak M., Morsli M., Bali A., Silhadi K., (2008). Valorisation de l'utilisation des tufs calcaires en techniques routière. Colloque International «Caractérisation et Modélisation des Matériaux et Structures – CMMS08 », Tizi Ouzou, Algérie.
- Cherrak M., Morsli M., Bali A., Silhadi K., (2008). Valorisation de l'utilisation des tufs calcaires en techniques routière. Colloque International «Caractérisation et Modélisation des Matériaux et Structures – CMMS08 », Tizi Ouzou, Algérie.
- Colombier G., (1988). Tufs et encroûtements calcaires, utilisation routière. Synthèses. ISTED.
- CSTC (2005). Les Dossiers du CSTC– Cahier n° 3 – 3e trimestre 2005. Quelles solutions pour le recyclage des déchets du bâtiment ? Des questions et des réponses. Projets – études.
- Daheur E.G., Taibi S., Goual I. Demdoun A. et Demdoun A.(2022). Effet du traitement a la chaux sur le comportement hydromécanique d'un mélange tuf-sable de dune de la région d'Ouargla ; Conference: 5ème Colloque International sur les sols non saturés - UNSATOuargla, 15 et 16 Mars 2022 At: Ouargla, Algeria.
- Daheur E. G. , Goual I. , Taibi S. ,Mitiche-Kettab R.,(2019). Effect of dune sand incorporation on the physical and mechanical behaviour of tuff:(experimental investigation),Geotechnical and Geological Engineering,37(3) 1687-1701.
- Debieb, F., Courard, L., Kenai, S., Degeimbre, R. (2010). Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. Cem Con Comp 32 (8):421-426 .
- Debieb, F., Kenai, S. (2008). The use of fine and coarse crushed bricks as aggregates in concrete.Constr Build Mater 22(5):886–93 .
- El Fahssi Ch. (2018). Etude géotechnique des désordres au niveau de la route nationale RN4 entre les villes de Fès et Meknès (cas des tronçons PK. 146-153 et PK. 108.5-112) ; Mémoire de master ; Université Sidi Mohamed Ben Abdellah - Fès False - Faculté des Sciences et Techniques - Fès ; Route d'Immouzer, B.P. 2202 Fès-, Maroc ;
- Fenzy, e., (1966). « Particularité de la technique routière au Sahara. Revue générale des routes et aéroports, N° 411 », p. 57-71.
- Gilles D et Sorgho O (2009)., valorisation des déchets de sachets plastiques utilisation comme liant dans la fabrication de matériaux composites : application dans les villes subsahariennes, conférence internationale sur la valorisation des déchets et de la biomasse résiduelle dans les pays en développement, Burkina Fasso.
- Goual I., Goual, M.S., Taibi S., Abou-Bekr N. (2012). Amélioration des propriétés d'un tuf naturel utilisé en technique routière saharienne par ajout d'un sable calcaire. European Journal of Environmental and Civil Engineering, volume 16, N° 6, pages 744–763.
- Goual I., (2012). Comportement mécanique et hydrique d'un mélange de tuf et de sable calcaire de la région de Laghouat: Application et technique routière. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, Algérie.

- Groupe-Pigeon. Les différents types de chaussées ; disponible sur le site : <https://www.groupe-pigeon.com/fr/notre-groupe/notre-actualite/les-differents-types-de-chaussees>. Consulté le 08/06/2024.
- Guettouche M.S., Guendouz M., Boutiba M., (2006). Sur l'existence d'un modèle- type d'encroûtements des sols arides et semi-arides d'Algérie – Journal des sciences pour l'ingénieur. N°6, p. 65-80.
- Hamrouni A., (1975). Routes économiques et routes à faible circulation. XVème Congrès mondial de la route, Mexico.
- Hounnou Ch. .Généralités Sur Les Chaussées Les différents types de chaussée et leurs rôles. Disponible sur le site : <https://fr.scribd.com/document/657517355/Generalites-sur-les-chaussees> Consulté le 11/06/2024.
- ici.radio-canada. (.2023) Asphalte recyclé à Sudbury : un rapport décrit de nombreuses lacunes. Disponible sur le site : <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/2007485/refection-route-degradation-cout-entretien>. Consulté le 20/05/2024 .
- Ilboudo W.Ineïssa Cerina (2016). 2IE Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement : Etude comparative des différentes techniques de stabilisation en Géotechnique Routière.
- Infociments. (2019). Caractéristiques générales des chaussées. Publier Mai 2019 ; disponible sur le site : <https://www.infociments.fr/route/caracteristiques-generales-des-chaussees> . Consulté le 08/06/2024.
- Infraguide. (.2005). Réutilisation ou recyclage des matériaux de construction ou d'entretien de routes. ISBN 1–897094–90–6. <www.infraguide.ca.
- Julien. B. (2011).De l'incinération des ordures ménagères, maîtrise sciences de l'environnement, milieux urbains et industriels ; Université de Cergy-Pontoise.
- Khalfalla M. (2018). La prise en compte de l'aspect sécurité routière dans la conception et l'amélioration de l'infrastructure routier, cas du réseau routier de la wilaya de Biskra. Mémoire de master. Université Mohamed khider 3 Biskra Faculté des Sciences et de la Technologie.
- Lakhdari Z et Khedaiache S.(2021). Influence du remplacement partiel des granulats recyclés sur les propriétés du béton. Mémoire de master. Université de Ghardaïa faculté des sciences et technologies département d'hydraulique et de génie civil.
- Layada S et Khelaifia Kh. (2020). Etude et caractérisation d'un béton à base de recyclât '' Etat de l'Art '' Mémoire de master. L'Université 08 mai 1945 de Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie.

- Layada S et Khelaifia Kh. (2020). Etude et caractérisation d'un béton à base de recyclât '' Etat de l'Art '' Mémoire de master. L'Université 08 mai 1945 de Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie.
- Léa Ordener. (2023). La structure de la chaussée routière. suitedispatch Publier Le 18 avril 2023 ; disponible sur le site : <https://www.concretedispatch.eu/blog/structure-chaussee-routiere/> consulté le 08/06/2024 ;
- Metongfrench.<http://metongfrench.com/>.metongfrench.com<http://metongfrench.com/3d-cold-recyclingequipment.html#:~:text=Dans%20le%20recyclage%20%C3%A0%20froid,une%20couche%20de%20base%20pour> Consulté le 20/05/2024.
- Molleta R, (2009). Le traitement des déchets ; 18-20,105p.
- Morsli M., (2007). Contribution à la valorisation des tufs d'encroûtement en technique routière saharien. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Polytechnique, Alger.
- Morsli M., (2007). Contribution à la valorisation des tufs d'encroûtement en technique routière saharien. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Polytechnique, Alger.
- Morsli M., Boutemour R., Cherrak M., Bali A., (2013). Co-valorisation par mélange d'un tuf calcaire et d'un sable de dune de la région d'Ouargla : Utilisation en Technique Routière Saharienne. Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, N° 6.
- Mousa, Eman; Azam, Abdelhalim; El-Shabrawy, Mohamed; El-Badawy, Sherif . (2017). Laboratory Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement for Road Construction in Egypt. Canadian Journal of Civil Engineering, (), cjce-2016-0435-. doi:10.1139/cjce-2016-0435
- Oukaci A. (2023). Etude du comportement mécanique d'un mélange de marne et des débris de béton pour une valorisation en construction routière ; Mémoire de master. Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou (Ummto).
- Oumeddour N. (2020). Stabilisation des terrains par des matériaux recyclés ; Mémoire de master. L'Université 8 Mai 1945 Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie
- Prosperi E et Bocci E. (2021) Review on Bitumen Aging and Rejuvenation Chemistry: Processes, Materials and Analyses. Sustainability,13, 6523. <https://doi.org/10.3390/su13126523>
- Recyc-Québec. (2010). Recyclage des débris de construction et de démolition (béton, brique et asphalte) – façons de faire à l'extérieur du Québec dossier client no 40916 rapport technique no rt-40916 mai 2010
- Remma M et Aroussi A(2017). Comportement physico-mécanique d'un béton autoplaçant élaboré à base de mélange de sable et de tuf calcaire. Mémoire de master. UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT.

- Rouabah K. et Guetteche M.N.(2008). Utilisation des laitiers de hauts fourneaux dans la construction des routes. Département de Génie Civil Faculté des Sciences de l'Ingénieur - Université Mentouri Constantine – Algérie . *revenu Sciences & Technologie B – N°27*, Juin (2008), 17-24.
- Saadani Sabrina (2006); Comportement des bétons à base de granulats recyclent ; Master Académique ; Université Mentouri Constantine.
- Serikma M , Mitiche-Kettab R , Bali A , (2013). Stabilisation par la chaux des tufs gypseux et gypso-calcaire. Séminaire National sur «les matériaux locaux dans la construction». Ouargla 20 et 21 février .
- Serikma M . (2009) ; contribution a l'étude de la stabilisation par la chaux des tufs gypseux et gypso-calcaires. Mémoire de Magister. Ecole Nationale Polytechnique Laboratoire Construction Et Environnement L'école Doctorale Ingénierie Et Environnement.
- Sétra. (1998). Aménagements des routes principales (ARP) 3 Recommandations techniques pour la conception générale et la géométrie de la route. Guide technique Aout 1998.
- Souchu Ph. (2014). Valorisation des cendres en technique routière Disponible sur le site :<https://doc.lerm.fr/emploi-cendres-volantes-en-technique-routiere/> Consulté le 12/06/2024.
- Struillou L, Alloul B., (1984). Valorisation routière des tufs d'encroûtements en Algérie – Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Symposium International sur les Granulats.
- Taleb Karina. (2016). Etude à l'état frais et à l'état durci de l'influence des fines de mortiers de Démolition sur les propriétés des mortiers ; Master Académique ; Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou ;
- Tayebi A Triki T. (2019). Etude géotechnique d'une structure routière à base des matériaux locaux entre TSABIT et BOUDA. Mémoire de master ; Université Ahmed DRAIA Adrar Faculté Des Sciences et de Technologies.
- The constructor. What are Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Materials? Disponible sur le site : <https://theconstructor.org/transportation/reclaimed-asphalt-pavement-rap-materials/561516/> Consulté le 20/05/2024.
- Touati S et Barbouchi A. (2018). Etude d'un mélange Tuf-Sable concassée, pour assise de chaussée. - Application à la région d'Adrar -. Mémoire de master. Université Ahmed Draia Adrar Faculté Des Sciences et de Technologies.
- Tpdomain. (2020). Différents types de chaussées ; disponible sur le site : <https://tpdomain.com/module/les-differents-types-de-chaussees/>. Consulté le 08/06/2024.
- Tran Ngoc T.,(2009).Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière thèse. Université d'Artois

Zaidi.F , Souiah.S (2015).Etude de comportement mécanique d'un béton ordinaire élaboré par substitution partielle du sable alluvionnaire par du tuf calcaire.

Normes :

Norme française NF P94 – 056 : Essai analyse granulométrique méthode par tamisage à sec.

Norme française NF P94 – 054 : Poids volumique des grains solides.

Norme française NF P94 – 068 : Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux.

Norme française NF EN 933 – 8 : Equivalent de sable.

Norme française NF P 94– 059 : Détermination de l'indices des vides extrêmes.

Norme française NF P18– 573 : Détermination de coefficient de Los Angeles.

Norme française NF P18– 572 : Détermination de coefficient du Micro Deval.

Norme française NF P94 – 093 : Détermination des références de compactage d'un matériau.

Norme française NF P 94– -078 : Détermination de l'indice CBR.

Norme française NF P94– 071-1 : Essai de cisaillement direct.

Sites web :

(<http://essai-laboratoire.blogspot.com>) (20/03/2024).