

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU (UMMTO)
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de master académique

Filière : Génie Civil

Spécialité : Géotechnique

Thème

Valorisation des débris de bétons et de briques en construction routière

Présenté par : M^{elle} SAIB Chanez

Devant le jury composé de :

M^{me} MEZIANI Faroudja : Maitre de conférences classe A à l'UMMTO.....Présidente.

M^{me} MOBAREK Houria : Maitre assistante classe A à l'UMMTO.....Examinatrice.

M^r BOUDLAL Omar : Maitre de conférences classe A à l'UMMTOPromoteur.

Promotion : 2023 / 2024

REMERCIEMENTS

Après tant d'années de sacrifices, de travail acharné, j'ai enfin atteint la fin de mes études. Je tiens à remercier Dieu, qui m'a donné la foi et la force nécessaires pour réussir.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à mon exceptionnel promoteur, Monsieur « BOUDLAL Omar ». Il m'a beaucoup aidé, m'a toujours remonté le moral et a été une source inépuisable de conseils et d'inspiration. Son dévouement et sa bienveillance ont été essentiels à ma réussite. Merci infiniment.

J'exprime ma gratitude infinie à mes parents, qui m'ont soutenu sans relâche et ont fait de leur mieux pour que j'atteigne les sommets du classement. Leur amour et leur encouragement ont été une source constante de motivation.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma gratitude à :

- Mme MEZIANI Ferroudja, Maitre de conférences classe A à l'UMMTO pour avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.
- Mme MOBAREK Houria, Maitre assistante classe A à l'UMMTO pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Les responsables des laboratoires de mécanique des sols et de recherche de l'UMMTO : Mme BOUZZOUNI Fatima, Mr KHELIFA Sid Ali et Mr LACHEBI Kamel pour leurs soutiens, leur disponibilité et surtout leur confiance.

Je tiens également à remercier tous mes amis et toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

DEDICACES

À mes chers parents. Vous êtes mes piliers, les fondations de ma force. Votre soutien indéfectible a été la pierre angulaire de ce projet. Votre amour inconditionnel et vos sacrifices ont éclairé mon chemin tout au long de cette aventure académique. Vous êtes mes héros, sans vos efforts considérables ce projet n'aurait jamais vu le jour, et cette réussite est autant la vôtre que la mienne.

À mes deux chers frères Yanis et Azwaw, Vous m'avez toujours apporté joie, encouragement et réconfort. Votre présence compatissante a facilité les moments les plus difficiles et transformé chaque adversité en une expérience plus douce. Vos sourires, vos paroles rassurantes et votre amour ont été des piliers fondateurs qui m'ont soutenu au quotidien. Je ne peux pas exprimer à quel point votre soutien est important pour moi et à quel point je suis reconnaissante de vous avoir à mes côtés.

À mes meilleures amies. Vous êtes plus que de simples amies ; vous êtes ma famille choisie, mes partenaires de rêve et mes plus grands soutiens à chaque pas que je fais avec votre présence constante, vos encouragements continus et votre grand amour. Ensemble, nous avons ri, séché nos larmes et construit des souvenirs inoubliables. Votre amitié a été une source de réconfort et d'inspiration, m'aidant à surmonter les défis et à célébrer chaque réussite. Grâce à vous, je me sens capable d'affronter le monde.

À la seule personne qui m'apporte la paix au milieu de tout ce bruit, qui apporte du bonheur dans mon cœur rien que par sa présence, vers qui je me tourne quand tout le monde autour de moi me déçoit, qui me trouve et me guide quand je suis perdue, et qui me comprend profondément même sans mots.

À mes camarades, pour leur esprit d'amitié, leur solidarité, leur enthousiasme et pour tous les beaux moments que nous avons partagés. Vous avez enrichi cette expérience de votre présence et de votre énergie positive. Vous avez rendu ce voyage inoubliable.

Chanez.

SOMMAIRE

Remerciements	
Dédicaces	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des principales notations et indices	
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES CHAUSSEES	3
I.1. INTRODUCTION	3
I.2. DEFINITION ET ROLE D'UNE CHAUSSEE	3
I.3. LES PRINCIPALES COUCHES DE CHAUSSEES	3
I.3.1. Couche de surface	4
I.3.1.1. Couche de roulement	4
I.3.1.2. Couche de liaison.....	4
I.3.2. Couche d'assise.....	5
I.3.2.1. Couche de base	5
I.3.2.2. Couche de fondation	5
I.3.3. La plate-forme support de chaussée (PFSC)	5
I.3.4. La couche de forme (CdF)	5
I.3.5. Le sol support	5
I.4. LES DIFFERENTES STRUCTURES DE CHAUSSEES	5
I.4.1. Chaussées souples.....	5
I.4.2. Chaussées bitumineuses épaisses.....	6
I.4.3. Chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques.....	7
I.4.4. Chaussées à structure mixte	8
I.4.5. Chaussées à structure inverse.....	9
I.4.6. Chaussées en béton de ciment (rigides)	10
I.5. DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES	11
I.5.1. Étude de trafic	11

I.5.2. Études environnementales et géotechniques.....	11
I.5.3. Le sol support	11
I.5.4. Les matériaux.....	11
I.6. LES MATERIAUX ROUTIERS	11
I.6.1. Les granulats	11
I.6.2. Les caractéristiques exigées des granulats	12
I.6.3. Choix des catégories de granulats.....	13
I.6.4. Les matériaux pour assises de chaussées	13
I.7. DEGRADATIONS DES CHAUSSEES	14
I.7.1. Causes des dégradations des chaussées	14
I.8. TYPES DE DEGRADATIONS DES CHAUSSEES	15
I.8.1. Les déformations.....	15
I.8.2. Les fissurations	18
I.8.3. Les arrachements et Des enrobages	20
I.8.4. Les remontées	22
I.9. CONCLUSION.....	22
CHAPITRE II : LES MATERIAUX RECYCLES	23
II.1. INTRODUCTION	23
II.2. GENERALITES SUR LES DECHETS	23
II.2.1. Définition des déchets.....	23
II.2.2. Origine de la production des déchets	23
II.2.3. Gestion des Déchets.....	23
II.2.4. Les grandes catégories de déchets de chantier.....	24
II.2.5. Types de matériaux qui peuvent être réutilisés.....	26
II.2.6. Principaux déchets de construction et de démolition.....	27
II.2.7. La valorisation des déchets	27
II.2.8. Objectif de la valorisation.....	28
II.2.9. Utilisation des déchets dans le domaine du génie civil.....	28
II.2.10. Les avantages des matériaux recyclés.....	28
II.2.11. Les inconvénients des matériaux recyclés	29

II.3. GENERALITE SUR LES DEBRIS DE BETON.....	29
II.3.1. Définition	29
II.3.2. Valorisation du béton	30
II.4. GENERALITES SUR LA BRIQUE	31
II.4.1. Définition de la brique	31
II.4.2. Techniques de production de brique	31
II.4.3. Différents types de brique	31
II.4.4. Domaines d'utilisation des briques recyclées	34
II.5. CONCLUSION	34
CHAPITRE III : IDENTIFICATION DES MATERIAUX.....	36
III.1. INTRODUCTION.....	36
III.2. PRESENTATION ET IDENTIFICATION DES MATERIAUX.....	36
III.2.1 Les débris de béton	36
III.2.2. Les débris de brique.....	36
III.3. PREPARATION DES DEBRIS DE BETON	37
III.3.1. Concassage et tamisage	37
III.3.2. Teneur en eau (w) (NF P94-050)	38
III.3.3. Les masses volumiques	39
III.3.4. Indice des vides (e)	41
III.3.5. Degré de saturation (Sr)	42
III.3.6. Porosité	42
III.4. PREPARATION DES DEBRIS DE BRIQUE	43
III.4.1. Concassage et tamisage des débris de brique	43
III.4.2. Caractéristiques physico-chimique des débris de brique.....	43
III.5. PREPARATION DES ECHANTILLONS	44
III.6. CONCLUSION	45
CHAPITRE IV : COMPACTAGE ET PORTANCE DES MATERIAUX ETUDIES	46
IV.1. INTRODUCTION	46
IV.2. ESSAIS DE COMPACTAGE	46
IV. 2.1 Définition du compactage	46

IV. 2.2. Objectif du compactage.....	46
IV.3. LES FACTEURS QUI INFLUENCENT LE COMPACTAGE.....	47
IV.3.1. Energie de compactage.....	47
IV.3.2. Teneur en eau	47
IV.3.3. Nature du sol	48
IV.4. Les essais de compactage au laboratoire.....	48
IV.4.1. Essai Proctor normal (NF P 94-093)	48
IV.4.2. Essai Proctor modifié (NF P 94-093)	48
IV.5. ESSAIS REALISES.....	50
IV.5.1. Expression des résultats.....	51
IV.6. ESSAI DE PORTANCE CBR (California Bearing Ratio) (NF P 94-078)	55
IV.6.1. But de l'essai	56
IV.6.2. Principe de l'essai (NF P 94-078)	56
IV.6.3. Matériels utilisés.....	57
IV.6.4. Mode opératoire (NF P 94-078)	58
IV.6.4.1. Confection des éprouvettes.....	58
IV.6.4.2. Exécution du poinçonnement	59
IV.7. EXPRESSION DES RESULTATS	59
IV.8. CONCLUSION	66
CHAPITRE V : ESSAIS ROUTIERS	67
V.1. INTRODUCTION.....	67
V.2. ESSAI MICRO DEVAL (NF P18-572)	67
V.2.1. Définition et but de l'essai.....	67
V.2.2. Principe de l'essai	68
V.2.3. Mode opératoire.....	68
1. Appareillage	68
2. Préparation du matériau (NF P18-572)	68
V.2.4. Matériaux utilisés.....	70
V.2.5. Résultats de l'essai.....	70
V.3. ESSAI DE LOS ANGELES (NF P 18-573)	71
V.3.1. Définition et but de l'essai.....	71

V.3.2. Principe de l'essai	71
V.3.3. Mode opératoire.....	71
1. Appareillage	71
2. Exécution de l'essai.....	71
V.3.4. Matériaux utilisés.....	72
V.3.5. Résultats de l'essai.....	73
V.4. ESSAI DE DEGRADABILITE DES MATERIAUX ROCHEUX (NF P 94-067)	75
V.4.1. Définition et but de l'essai.....	75
V.4.2. Principe de l'essai	75
V.4.3. Mode opératoire.....	75
1. Appareillage	75
2. Exécution de l'essai.....	75
V.4.4. Matériaux utilisés.....	77
V.4.5. Résultats obtenus	77
1. Débris de béton seuls	77
2. Débris de brique seuls.	78
V.5. ESSAI DE FRAGMENTABILITE DES MATERIAUX ROCHEUX (NF P 94-066) ..	80
V.5.1. Définition et but de l'essai.....	80
V.5.2. Principe de l'essai	80
V.5.3. Mode opératoire.....	80
1. Appareillage	80
2. Exécution de l'essai	80
V.5.4. Matériaux utilisés.....	81
V.5.5. Résultats de l'essai.....	81
1. Débris de béton seuls	81
2. Débris de brique seuls	82
V.6. CONCLUSION	84
CONCLUSION GENERALE	85
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1. Les différentes couches de chaussée	4
Figure I. 2 : Dimensionnement d'une chaussée souple	6
Figure I. 3 : Mode de fonctionnement des chaussées souples.....	6
Figure I. 4 : Mode de fonctionnement des chaussées bitumineuses épaisses)	7
Figure I. 5 : Dimensionnement de la chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques.....	7
Figure I. 6 : Mode de fonctionnement des chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques. .	8
Figure I. 7 : Dimensionnement d'une chaussée mixte.	8
Figure I. 8 : Mode de fonctionnement des chaussées à structure mixte.....	9
Figure I. 9 : Dimensionnement d'une chaussée à structure inverse	9
Figure I. 10 : Mode de fonctionnement des chaussées à structure inverse	10
Figure I. 11 : Dimensionnement d'une chaussée en béton de ciment	10
Figure I. 12 : Mode de fonctionnement des chaussées en béton de ciment	11
Figure I. 13 : Orniérage à grand rayon	15
Figure I. 14 : Orniérage à faible rayon	16
Figure I. 15 : Affaissement de rive.....	17
Figure I. 16 : Affaissement hors rive.....	17
Figure I. 17 : Soulèvement différentiel	18
Figure I. 18 : Fissures longitudinales	18
Figure I. 19 : Fissures transversales	19
Figure I. 20 : Le faïençage	19
Figure I. 21 : Nid de poule	20
Figure I. 22 : Pelade	21
Figure I. 23 : Plumage	21
Figure I. 24 : Le ressuage	22
Figure II. 1 : Les déchets inertes	24
Figure II. 2 : Les déchets non dangereux non inertes.....	25
Figure II. 3 : Les déchets dangereux sur un site de construction, le revêtement bitumineux de démolition.....	26
Figure II. 4 : Eprouvettes de béton.....	30
Figure II. 5 : Brique rouge	32
Figure II. 6 : Brique creuse.....	32
Figure II. 7 : Brique parement.....	33
Figure II. 8 : Brique réfractaire	33
Figure II. 9 : Brique en verre.....	33
Figure II. 10 : Brique monomur	34
Figure III. 1. Le béton brisé manuellement.....	37
Figure III. 2. Concassage du béton.....	37
Figure III. 3. Courbe granulométrique des matériaux et des mélanges étudiés	38
Figure III. 4. Tamisage électrique (Dans le cas des petits grains)	38
Figure III. 5. Tamisage du béton à la main (Dans le cas des petits grains).....	38
Figure III. 6. Mode opératoire de l'essai par pesée hydrostatique	39
Figure III. 7. Exécution de l'essai au pycnomètre.....	41
Figure III. 8. Concassage et tamisage des débris de brique.	43

Figure IV. 1. Différence de porosité entre un sol compacté et un sol non compacté.....	46
Figure IV. 2. Influence de l'énergie de compactage	47
Figure IV. 3. Influence de la teneur en eau sur le compactage.	47
Figure IV. 4. Influence de la nature du sol sur la courbe Proctor.	48
Figure IV. 5. Appareillage de l'essai Proctor modifié	49
Figure IV. 6. Schéma de principe de la répartition des coups de dame sur une couche	50
Figure IV. 7. Préparation du matériau.....	50
Figure IV. 8. Préparation du mélange débris de béton et débris de brique	50
Figure IV. 9. Courbe Proctor pour les débris de béton seuls.	51
Figure IV. 10. Courbe Proctor pour le mélange de débris de béton + 5% de débris de brique	52
Figure IV. 11. Courbe Proctor pour le mélange de débris de béton et 10% de débris de brique	52
Figure IV. 12. Courbe Proctor pour le mélange de débris de béton et 30% de débris de brique	53
Figure IV. 13. Courbe comparative de tous les échantillons.	53
Figure IV. 14. Évolutions des densités sèches maximales en fonction du pourcentage de débris de briques.....	54
Figure IV. 15. Évolutions des teneurs en eau en fonction du pourcentage de débris de briques.	55
Figure IV. 16. Appareillage pour CBR immersion	57
Figure IV. 17. La machine de poinçonnement LoadTrac II (LGEA)	58
Figure IV. 18. Courbe enfoncements-forces des débris de béton seuls	60
Figure IV. 19. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + 5% de débris de brique (CBR immédiat).....	60
Figure IV. 20. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + 10% de débris de brique (CBR immédiat).....	61
Figure IV. 21. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + 30% de débris de brique (CBR immédiat).....	61
Figure IV. 22. Evolution des indices CBR immédiat en fonction de la teneur en débris de brique.....	62
Figure IV. 23. Courbe enfoncements-forces de débris de béton seul (CBR immersion).....	63
Figure IV. 24. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + 5% de débris de brique (CBR immersion)	63
Figure IV. 25. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + 10% de débris de brique (CBR immersion)	64
Figure IV. 26. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + 30% de débris de brique (CBR immersion)	64
Figure IV. 27. Evolution des CBR après immersion en fonction de la teneur en débris de brique.....	65
Figure IV. 28. Comparaison des indices CBR et CBRimm des différents pourcentages de débris de brique	66
Figure V. 1. Machine Micro-Deval.....	67
Figure V. 2. La charge abrasive et le matériau pesé	69
Figure V. 3. Préparation du matériau	69
Figure V. 4. Tamisage du matériau	69
Figure V. 5. Histogramme de comparaison des essais micro Deval.	70

Figure V. 6. La machine Los Angeles.....	71
Figure V. 7. Etapes d'exécution de l'essai.	73
Figure V. 8. Histogramme de comparaison des essais Los Angeles.....	73
Figure V. 9. Pesée et immersion et tamisage du matériau.	76
Figure V. 10. Exécution de l'essai de dégradabilité.....	76
Figure V. 11. Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité.....	78
Figure V. 12. Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité.....	79
Figure V. 13. Exécution de l'essai de fragmentabilité	81
Figure V. 14. Pesée et mise du matériau dans le moule CBR.....	81
Figure V. 15. Courbes granulométriques avant et après essais (débris de béton seuls).....	82
Figure V. 16. Courbes granulométriques avant et après essais (débris de briques seuls).....	83

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III.1. Détermination de la teneur en eau.	39
Tableau III.2. Résultats de la détermination de la masse volumique sèche.	40
Tableau III.3. Classification de la densité en fonction de la masse volumique sèche.	40
Tableau III.4. Résultats de la détermination de la masse volumique des particules solides. ...	41
Tableau III.5. Détermination du degré de saturation..	42
Tableau III.6. Les résultats des essais d'identification.....	43
Tableau III. 7. Composition minéralogique de déchets de briques.....	44
Tableau III. 8. Fiche technique des débris de briques étudiés (brique 12 trous).....	44
Tableau IV. 1. Modalités d'exécution des essais Proctor normal et modifié.....	49
Tableau IV. 2. Résultats de l'essai Proctor modifié pour les débris de béton seuls.	51
Tableau IV. 3. Résultats de l'essai Proctor modifié pour le mélange de débris de béton + 5% de débris de brique.....	51
Tableau IV. 4. Résultats de l'essai Proctor modifié pour le mélange de débris de béton et 10% de débris de brique.....	52
Tableau IV. 5. Résultats de l'essai Proctor modifié pour le mélange de débris de béton et 30% de débris de brique.....	53
Tableau IV. 6. Récapitulatif des teneurs en eau optimales et des densités sèches maximales.	54
Tableau IV. 7. Résultats des essais CBR immédiat (CBR).....	62
Tableau IV. 8. Résultats des essais CBR immersion (CBRimm).....	65
Tableau V. 1. Charge de boulets suivant le type de classe granulaire.....	70
Tableau V. 2. Charge de boulets suivant la classe granulaire.	72
Tableau V. 3. Coefficients LA et MDE pour les différents échantillons.....	74
Tableau V. 4. Catégories des granulats selon la résistance aux chocs et à l'usure.....	74
Tableau V. 5. Récapitulatif des refus avant essai (Dégradabilité débris de béton seuls).....	77
Tableau V. 6. Récapitulatif des refus après essai (Dégradabilité débris de béton seuls).....	77
Tableau V. 7. Classification des matériaux rocheux.....	78
Tableau V. 8. Récapitulatif des refus avant essai (Dégradabilité débris de brique seuls).....	78
Tableau V. 9. Récapitulatif des refus après essai (Dégradabilité débris de brique seuls).....	79
Tableau V. 10. Récapitulatif des refus avant essai (Fragmentabilité débris de béton seuls) ..	81
Tableau V. 11. Récapitulatif des refus après essai (Fragmentabilité débris de béton seuls) ..	82
Tableau V. 12. Classification des matériaux rocheux selon le coefficient FR.....	82
Tableau V. 13. Récapitulatif des refus avant essai (Fragmentabilité débris de brique seuls).	82
Tableau V. 14. Récapitulatif des refus après essai (Fragmentabilité débris de brique seuls) ..	83

LISTE DES PRINCIPALES NOTATIONS ET INDICES

w : Teneur en eau naturelle ;

M_s : Masse des particules solides ;

M_h : Masse de l'échantillon à l'état humide ;

γ : Poids volumique total ;

γ_w : Poids volumique de l'eau ;

γ_s : Poids volumique des grains solides ;

γ_h : Poids volumique humide ;

γ_d : Poids volumique sec ;

e: Indice des vides ;

S_r : Degré saturation ;

n: Porosité ;

ρ : Masse volumique total ;

ρ_w : Masse volumique de l'eau ;

ρ_s : Masse volumique des grains solides ;

ρ_h : Masse volumique humide ;

ρ_d : Masse volumique sèche ;

V_w : Volume de l'eau ;

V_s : Volume des particules solides ;

V_a : Volume de l'air ;

V_v : Volume des vides ;

V_t : Volume total ;

D₁₀ : Diamètre correspondant à 10% des tamis cumulé ;

W_{opt}: Teneur en eau optimale de l'essai Proctor ;

(γ_d/γ_w) max : la densité sèche maximale ;

IPI : L'indice Portant immédiat ;

CBR_{imm} : L'indice CBR après immersion ;

CBR : L'indice CBR immédiat ;

G : Gonflement linéaire relatif ;

MDE : Le coefficient micro Deval ;

LA : Le coefficient Los Angeles ;

DG : Le coefficient de dégradabilité ;

Fr : Le coefficient de fragmentabilité ;

INTRODUCTION GENERALE

La gestion des déchets de construction et de démolition représente un défi majeur pour l'industrie du bâtiment et des travaux publics. Avec l'augmentation continue des projets de construction, la quantité de déchets générés ne cesse de croître, posant des problèmes environnementaux et économiques considérables. Parmi ces déchets, le béton et les briques sont deux des matériaux les plus couramment produits. Traditionnellement, ces matériaux sont simplement envoyés en décharge, une pratique qui non seulement gaspille des ressources précieuses mais contribue également à la dégradation de l'environnement.

Cependant, face aux enjeux écologiques actuels et aux réglementations de plus en plus strictes en matière de gestion des déchets, des solutions innovantes doivent être envisagées pour valoriser ces matériaux. Une des voies prometteuses est leur réutilisation dans les infrastructures routières. Cette approche non seulement permet de réduire la quantité de déchets envoyés en décharge, mais elle offre également des avantages économiques et techniques, en diminuant les coûts de matériaux et en exploitant les propriétés mécaniques intéressantes de ces déchets.

Le travail réalisé et étalé dans ce mémoire s'inscrit dans cette démarche de valorisation des déchets de construction. Il consiste en l'étude du comportement de mélanges de déchets de béton et de briques, en vue de leur utilisation potentielle en construction routière

Après avoir identifié les matériaux sélectionnés, les échantillons reconstitués en mélanges (débris de béton+ brique) sont soumis aux principaux essais mécaniques routiers, à savoir, les essais de compactage au Proctor modifié, les essais de portance avant et après immersion, les différents essais routiers proprement dits (Los Angeles, Micro Deval, fragmentabilité et dégradabilité).

Les résultats obtenus sur les différents échantillons, sont comparés ensuite aux exigences des normes en vigueur pour validation.

Pour présenter le travail réalisé dans ce mémoire, nous l'avons réparti ce dernier en six chapitres synthétisés par des conclusions et quelques perspectives.

Le premier chapitre présente une vue d'ensemble sur les chaussées. Il aborde principalement les définitions des différentes couches qui composent une chaussée, les divers types de chaussées existants, ainsi que le principe de dimensionnement utilisé.

Le deuxième chapitre est dédié aux généralités sur le recyclage et la valorisation des matériaux recyclés, leur importance dans le domaine du génie civil avec un accent particulier sur les débris de bétons et les débris de briques.

Le troisième chapitre introduit la partie expérimentale de cette étude. Il est consacré aux divers essais d'identification des matériaux utilisés, afin de déterminer leurs caractéristiques physiques. Il présente également les différents échantillons préparés pour les différents essais.

Le quatrième chapitre présente la première série d'essais mécaniques réalisée en laboratoire, à savoir, les essais de compactage au Proctor modifié et les essais de portance CBR avant et après

immersion. Ces essais ont pour objectif d'évaluer l'aptitude des mélanges étudiés au compactage ainsi que leur portance dans des conditions normales et sous les plus mauvaises conditions hygrométriques. Ce chapitre présente également, les différents protocoles expérimentaux, les résultats des essais, ainsi que les comparaisons effectuées sous forme de tableaux et de courbes, accompagnées des interprétations correspondantes.

Le cinquième chapitre porte sur les principaux essais routiers essentiels dans toute construction routière. Il inclut les essais Los Angeles, les essais Micro-Deval, les essais de dégradabilité et les essais de fragmentabilité, ainsi que les résultats obtenus et les interprétations correspondantes.

Enfin, nous terminons ce mémoire par des conclusions et des perspectives concernant l'utilisation de ces matériaux dans le domaine de la construction routière.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES CHAUSSEES

I.1. INTRODUCTION

Les infrastructures routières de bonne qualité sont un facteur clé de succès pour le développement économique et social de tout pays. Tout commence par une route. La mobilité est une condition préalable au développement. Les routes ouvrent la voie aux transformations que permet la technologie. Pour qu'une économie se développe, que de la richesse soit créée et que la prospérité soit partagée, il faut que les personnes et les biens puissent circuler. Pour cela, la maîtrise de leur mode d'évolution et de dégradation est un élément incontournable.

Ce chapitre consacré aux généralités sur les chaussées permet de présenter les différentes couches constitutives, les principaux types de chaussées, quelques notions sur leur dimensionnement, les différents matériaux utilisés, ainsi que les dégradations et les désordres que peuvent subir les chaussées sous l'effet des charges et du climat.

I.2. DEFINITION ET ROLE D'UNE CHAUSSEE

La chaussée est une partie de la route présentée comme des structures multicouches destinée à la circulation des véhicules et des piétons. Elle est mise en œuvre sur un ensemble appelé plateforme support de chaussée constituée du sol terrassé (dit sol support) surmonté généralement d'une couche de forme. (Lenoir, 2019)

La chaussée peut être unidirectionnelle ou bidirectionnelle, et peut être équipée de marquages au sol, de panneaux de signalisation et d'autres dispositifs de sécurité pour aider à réguler la circulation et protéger les usagers de la route.

Les chaussées jouent un rôle crucial dans la société moderne, couvrant plusieurs aspects fondamentaux (Kettar, 2011)

- Supporter le trafic en étant capables de supporter les charges des véhicules qui les empruntent.
- Assurer la sécurité en fournissant une surface de roulement sûre et adhérente pour réduire les risques d'accidents et de glissades.
- Transport et mobilité en permettant le déplacement des personnes et des marchandises.
- Efficacité économique en réduisant les coûts de transport et augmentant la productivité économique.
- Durabilité et résistance aux conditions climatiques.

Afin que ces objectifs soient atteints, il est nécessaire que la chaussée ait une épaisseur telle que la pression verticale transmise au sol soit suffisamment faible pour que celui-ci puisse la supporter sans dégradation.

I.3. LES PRINCIPALES COUCHES DE CHAUSSEES

La chaussée routière est une structure composite réalisée par empilements successifs de couches de matériaux granulaires, le tout reposant sur un sol support. Elles sont composées de plusieurs couches distinctes, chacune ayant une fonction spécifique pour assurer la durabilité, la sécurité

et l'efficacité du système routier. Les principales couches d'une chaussée typique sont présentées sur la figure I.1 ci-dessous :

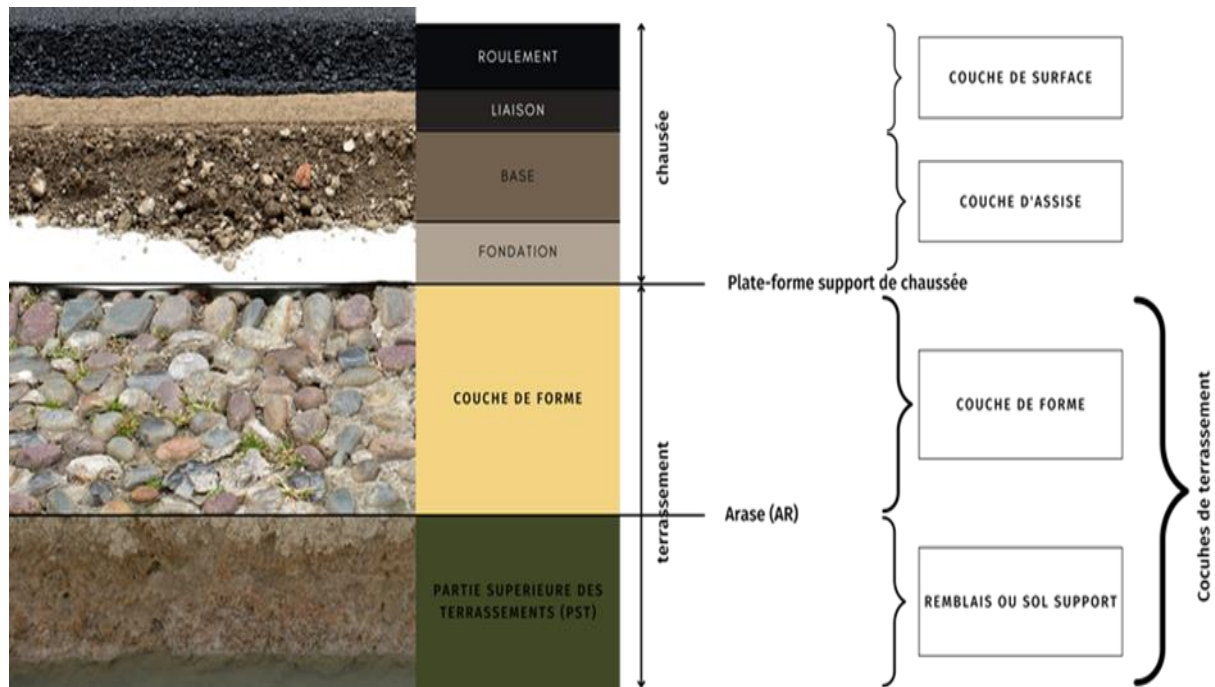


Figure I.1. Les différentes couches de chaussée (Ordener,2023)

I.3.1. Couche de surface

Cette couche est en contact direct avec le trafic. Elle doit offrir une bonne adhérence, être résistante à l'usure, et imperméable pour protéger les couches inférieures. Elle est généralement constituée d'enrobés bitumineux (asphalte) ou de béton de ciment.

I.3.1.1. Couche de roulement

C'est la couche supérieure de la structure de la chaussée sur laquelle s'exercent directement les agressions conjuguées du trafic et du climat. Elle a pour rôle : d'imperméabiliser l'assise et de protéger le sol support, assurer la sécurité et le confort et la participation à la structure. (Oubahdou, 2022)

I.3.1.2. Couche de liaison

Elle est une couche intermédiaire de matériaux qui assure la liaison entre la couche de base et la couche de roulement. Elle a pour rôle de renforcer la cohésion de l'ensemble de la structure de la chaussée. Cette couche peut être composée de différents matériaux tels que l'enrobé, les granulats ou encore les matériaux bitumineux. C'est la couche qui permet de spécialiser la couche de roulement au confort et à la sécurité des usagers.

I.3.2. Couche d'assise :

Cette couche est constituée de :

I.3.2.1. Couche de base

Elle supporte la couche de surface et distribue les charges du trafic vers les couches inférieures. Elle doit être stable et durable. Elle est souvent constituée de granulats concassés, de grave bitume ou de grave-ciment.

I.3.2.2. Couche de fondation

Elle fournit un support structurel supplémentaire et aide à répartir les charges vers la sous-couche. Elle améliore également la résistance à l'eau et la durabilité globale de la chaussée en utilisant des matériaux granulaires stabilisés ou non stabilisés.

I.3.3. La plate-forme support de chaussée (PFSC)

Elle fait le lien entre la partie chaussée et la partie terrassement et elle est la surface supérieure de la couche de forme.

I.3.4. La couche de forme (CdF)

Elle permet d'optimiser la portance du sol support. Elle n'est pas forcément obligatoire si la partie supérieure des terrassements a une portance suffisamment importante (entre 50 MPa et 200 MPa). Une couche de fin de réglage (CfR) vient protéger la couche de forme, formée de gravier clouté ou de bitume liquide. Elle doit présenter des caractéristiques minimales de traficabilité, nivellement, déformabilité et résistance.

I.3.5. Le sol support

Il correspond à la partie supérieure des terrassements (PST), appelé remblai (sol surélevé) ou déblai (sol enfoui). La nature du sol support varie selon la géologie du terrain : sol fin argileux, sol marno-calcaires, sol de types sables et graves, etc. (Ordener,2023)

Dans certaines configurations, des couches supplémentaires comme les géotextiles ou les géogrilles peuvent être utilisées pour renforcer la structure, améliorer la séparation des matériaux, ou favoriser le drainage.

Chaque couche a une importance cruciale dans la performance et la longévité de la chaussée. Une conception et une construction appropriées, ainsi qu'un entretien régulier, sont essentiels pour garantir que la chaussée reste fonctionnelle et sûre pour les usagers.

I.4. LES DIFFERENTES STRUCTURES DE CHAUSSEES

L'une des caractéristiques du réseau routier est l'existence d'une grande diversité de structures de chaussées, que l'on classe dans les familles suivantes :

I.4.1. Chaussées souples

Elles sont composées d'un revêtement bitumineux relativement mince (< à 15 cm) réduit parfois à un enduit dans le cas de chaussée à très faible trafic. L'assise est réalisée d'une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités (GNT). L'épaisseur d'ensemble de la structure est

en générale comprise entre 30 et 60 cm. C'est une structure de chaussée dans laquelle l'ensemble des couches liées qui la constituent sont traitées aux liants hydrocarbonés.

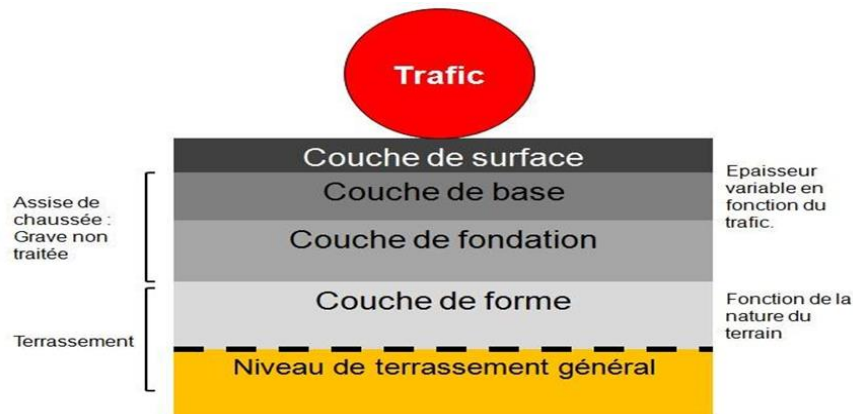


Figure I.2. Dimensionnement d'une chaussée souple (ENSTP, 2015)

Leurs compositions et leurs épaisseurs font que les efforts dus aux trafics, sont directement transmis au sol support avec une faible répartition latérale.

La tenue dans le temps est fortement influencée par la qualité du sol support et notamment son comportement en période hivernale ou humide. La qualité de l'étanchéité de la couche de roulement et du drainage de la partie supérieure des terrassements seront déterminants. Une période de sécheresse prolongée peut aussi entraîner une remontée de fissure. (Enstp, 2015)

Les matériaux utilisés sont

- Couche de fondation : graviers non traités (GNT)
- Couche de base : la grave bitume.

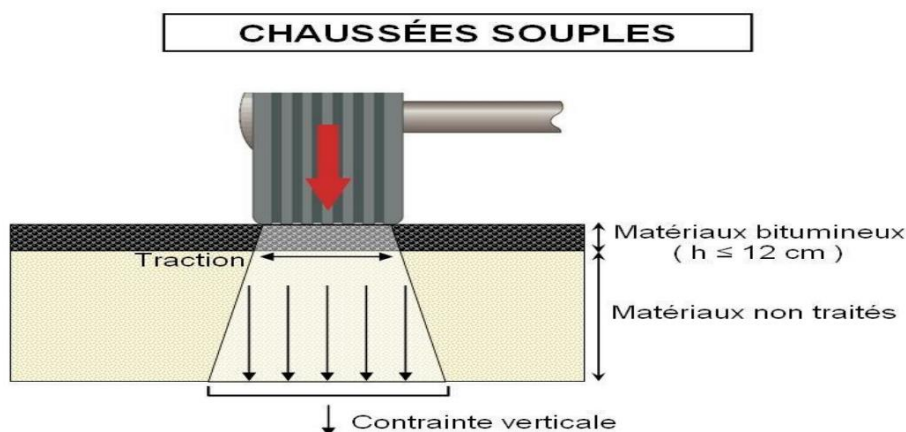


Figure I.3. Mode de fonctionnement des chaussées souples (CFTR, 2009)

I.4.2. Chaussées bitumineuses épaisses

Structures comportant une couche de surface en matériaux bitumineux qui surmontent une couche de base et une couche de fondation en matériaux bitumineux. Le tout est édifié sur une plateforme support. L'épaisseur des couches varient de 30 à 50cm.

Ces chaussées comportent généralement plusieurs couches. Lorsque celles-ci sont liées, les allongements maximaux se produisent à la base de la couche la plus profonde.

Le comité français pour les techniques routières (CFTR) a montré que la rigidité et la résistance en traction de la base en matériaux asphaltiques permettent de diffuser en les atténuant fortement les contraintes verticales transmises au support.

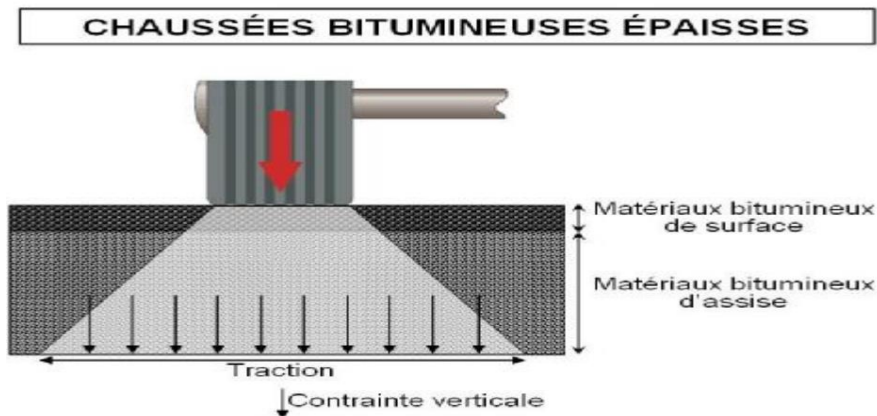


Figure I.4. Mode de fonctionnement des chaussées bitumineuses épaisses (CFTR, 2009)

I.4.3. Chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

Ces structures sont qualifiées couramment de “semi-rigides”. Elles comportent une couche de surface bitumineuse sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposés en une ou deux couches (base et fondation) dont l'épaisseur totale est de l'ordre de 20 à 50 cm.

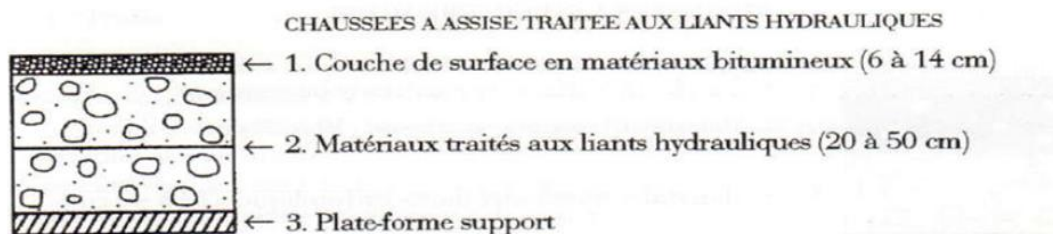


Figure I.5. Dimensionnement de la chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques (Faure, 1997)

Les matériaux traités aux liants hydrauliques formant l'assise de la chaussée ont une forte rigidité ce qui conduit à une transmission d'une faible partie des efforts verticaux dus aux charges roulantes vers la plate - forme support. En revanche, on assiste à de fortes contraintes de traction par flexion au sein de l'assise qui sont déterminantes dans le dimensionnement de ce type de structure. Présentant un fort risque de retraites thermiques, des fissures peuvent apparaître et remonter jusqu'à la couche de surface, entraînant une perte d'étanchéité.

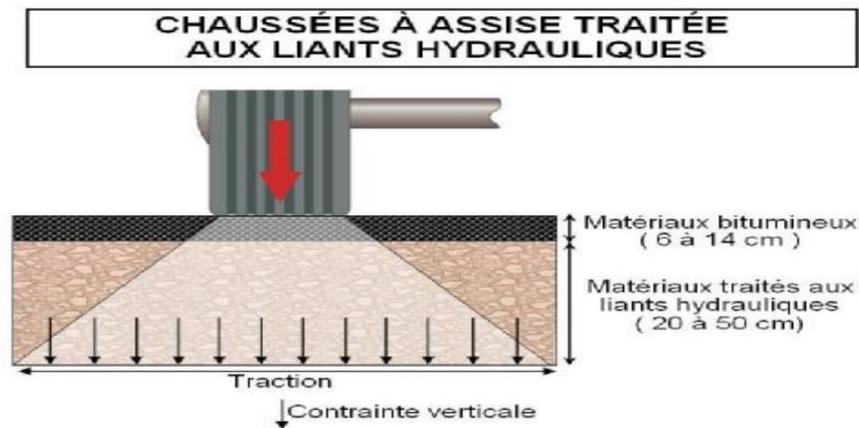
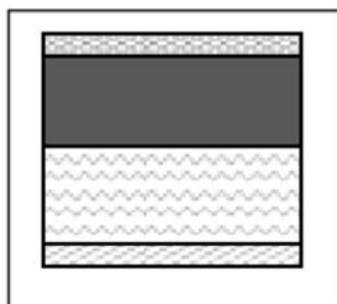


Figure I.6. Mode de fonctionnement des chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques (CFTR, 2009).

1.4.4. Chaussées à structure mixte

Ces structures comportent une couche de roulement et une couche de base (10 à 20 cm) traitée aux liants hydrocarbonés sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm). Les structures qualifiées de mixtes sont telles que le rapport de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale de chaussée soit de l'ordre 1/2.

Les matériaux bitumineux représentent environ la moitié de l'épaisseur totale de la chaussée.



1. Couche de surface de matériaux bitumineux.
2. Matériaux bitumineux d'assise (10 à 20 cm).
3. Matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm).
4. Plate-forme support.

Figure I.7. Dimensionnement d'une chaussée mixte. (Nguyen, 2008).

Les différentes couches ont un rôle fonctionnel distinct ; la couche de fondation traitée aux liants hydrauliques diffuse et atténue les efforts transmis au sol support, les couches bitumineuses servent à ralentir la remontée des fissures transversales de la couche sous-jacente et réduisent les contraintes de flexion à la base de structure, tout en assurant les qualités d'uni et de continuité.

Par suite des mouvements de dilatation différentielle entre le grave bitume et la grave traitée aux liants hydrauliques, l'adhérence de ces deux couches peut finir par se rompre, entraînant alors une forte augmentation des contraintes de traction à la base de la couche bitumineuse qui peut alors, tout comme la grave traitée aux liants hydrauliques, périr par fatigue. (Faure, 2002).

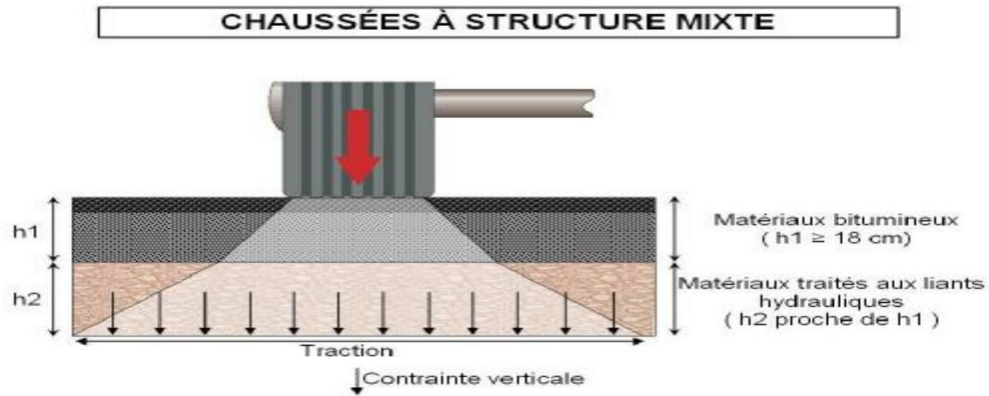
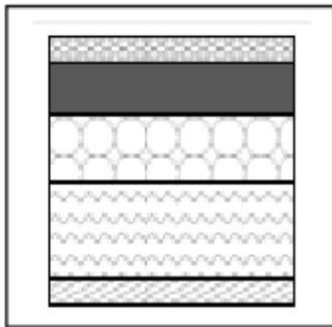


Figure I.8. Mode de fonctionnement des chaussées à structure mixte (CFTR, 2009)

I.4.5. Chaussées à structure inverse

Ces structures composées de couches bitumineuses, sur une couche en grave non traitée, reposant elle-même sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. L'épaisseur totale 60 à 80 cm.



1. Couche de surface de matériaux bitumineux.
2. Matériaux bitumineux d'assise (10 à 20 cm).
3. Matériaux granulaires non traités (12 cm).
4. Matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm).
5. Plate-forme support.

Figure I.9. Dimensionnement d'une chaussée à structure inverse (Nguyen, 2008)

Ce type de structure est surtout employé pour ralentir la propagation des fissures de retrait qui apparaissent dans la couche de grave traitée aux liants hydrauliques.

La structure inverse se distingue de la chaussée mixte, par la présence d'une couche de matériaux granulaires d'environ 12 cm entre la couverture bitumineuse, et la couche de fondation. (Faure, 1998)

La chaussée à structure inverse se compose de trois couches, ayant toutes un rôle spécifique : la couche de surface, assure l'étanchéité et l'uni de l'ensemble ; la couche granulaire absorbe les fissures de la couche de fondation, empêchant ainsi leur remontée ; et enfin, la couche de fondation, permet de répartir les contraintes sur le sol.

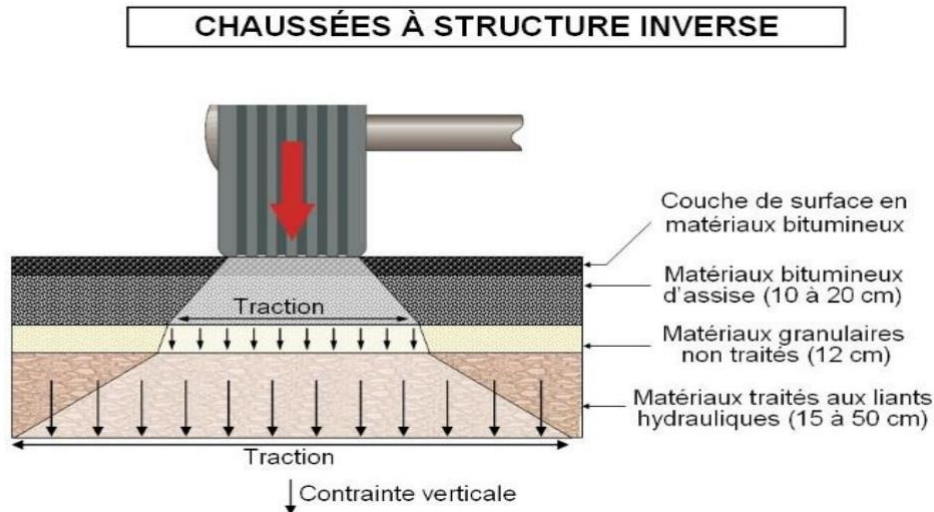


Figure I.10. Mode de fonctionnement des chaussées à structure inverse (CFTR, 2009)

I.4.6. Chaussées en béton de ciment (rigides)

Constituées de dalles de béton d'épaisseur comprise entre 15 et 25 cm coulées en une seule passe, qui jouent le rôle de couche de roulement et de couche de base ; ces dalles reposent sur une fondation en béton maigre ou matériaux traités aux liants hydrauliques. Ce type de chaussée absorbe les efforts et les transmet peu au sol. Elles peuvent être classées en trois catégories : béton de ciment sur matériau bitumineux, béton de ciment sur matériau hydraulique et béton de ciment sur couche de forme ou couche drainante. (Jeuffroy et Sauterey, 1989)

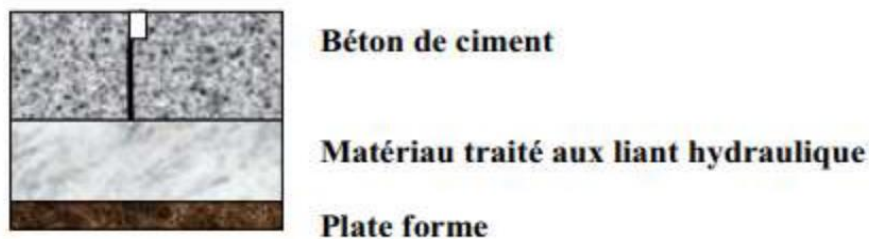


Figure I.11. Dimensionnement d'une chaussée en béton de ciment (Meraga et Meghaouzel, 2020)

Elles résistent particulièrement bien aux efforts de cisaillement et diminuent les efforts de traction, elles présentent aussi une surface unie, très roulante et peu glissante.

SCHÉMA DE FONCTIONNEMENT MÉCANIQUE

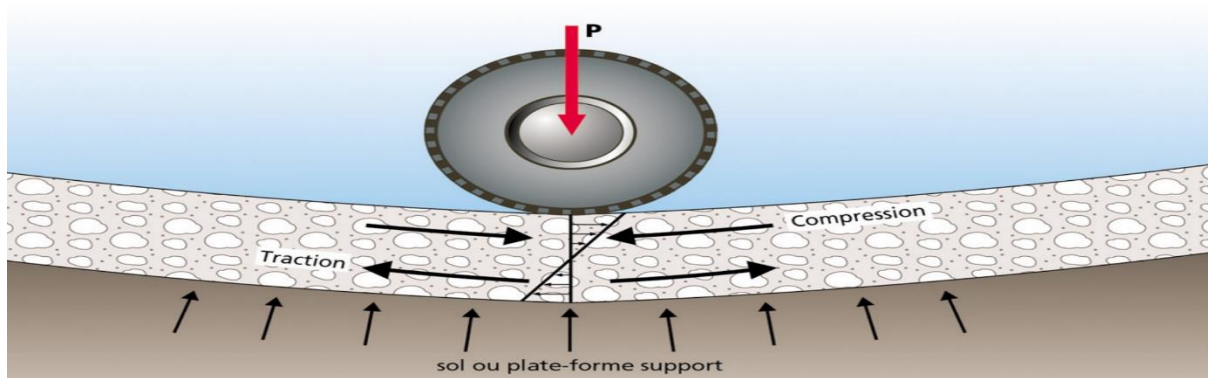


Figure I.12. Mode de fonctionnement des chaussées en béton de ciment (LCPC, 1998)

I.5. DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES

Le dimensionnement des chaussées fait référence à la conception et à la planification de l'épaisseur et de la structure des différentes couches constituant une chaussée afin de garantir sa durabilité et sa capacité à supporter le trafic prévu. Selon (Brunot et Coquand, 1982) et (Faure, 1998), les principaux aspects du dimensionnement des chaussées sont :

I.5.1. Étude de trafic

Analyse du volume et de la composition du trafic prévu sur la route pour déterminer les charges que la chaussée devra supporter.

I.5.2. Études environnementales et géotechniques

Prise en compte des aspects environnementaux et géotechniques lors de la conception des chaussées pour minimiser les impacts sur l'environnement et garantir une construction sûre et durable.

I.5.3. Le sol support

C'est la partie sur laquelle repose la structure de chaussée, elle est généralement constituée du sol naturel terrassé, ou en cas de besoin (mauvaise portance du sol support) surmonté d'une couche de forme.

I.5.4. Les matériaux

Les matériaux peuvent se rompre si on leur applique de façon répétée un grand nombre de sollicitations dont l'amplitude est inférieure à la résistance à la rupture instantanée. C'est le phénomène que l'on désigne par la fatigue.

Pour cela, il est nécessaire d'utiliser les matériaux qui résistent à ce phénomène.

I.6. LES MATERIAUX ROUTIERS

I.6.1. Les granulats

Les granulats sont des fragments de roche, de pierre concassée ou de sable de dimensions généralement comprises entre 0 et 100 mm, qui sont utilisés comme composants dans la construction. Ils sont des matériaux inertes et granulaires qui sont mélangés avec du ciment, du

bitume ou d'autres liants pour former des matériaux de construction tels que le béton et l'asphalte.

Ils peuvent être classés en deux catégories

- Les granulats importés qui sont essentiellement des granulats de roches massives. Ils sont utilisés dans la réalisation des couches de roulement et dans les couches de chaussées lorsque les caractéristiques des matériaux régionaux n'en permettent pas l'usage pour le trafic envisagé.
- Les matériaux régionaux dont les ressources sont très limitées pour certains d'entre eux, comprennent les graves et sables alluvionnaires, les sables de dessablage, les sables fins et les graves calcaires concassées. A ces matériaux naturels s'ajoutent ceux relevant du recyclage des produits de démolition, de la valorisation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères et certains types de sols qui après traitement avec un liant hydraulique peuvent, avec des limitations de trafic, être utilisés en couche de chaussée.

Pendant longtemps, l'importance cruciale de la qualité des granulats dans le domaine de la construction routière a été négligée. Cependant, grâce aux avancées techniques, les ingénieurs routiers ont progressivement pris conscience de l'importance de ces particules, qui constituent généralement entre 90 et 95 % du poids des couches de roulement et 100 % des fondations des routes dans la plupart des cas. Ces granulats sont exposés à diverses contraintes et sollicitations. Il suffit de mentionner

- Les pneus à crampons ;
- L'action polissant des pneus ;
- Le trafic lourd et intense ;
- Le gel et dégel ;
- L'action de l'équipement de chantier lors de la construction de routes.

Ainsi, afin de contrer l'usure et la détérioration des revêtements routiers lors de la construction de routes, il est impératif de bien comprendre et de caractériser de manière précise ces agrégats. (Guy, 2007)

I.6.2. Les caractéristiques exigées des granulats

Les caractéristiques des granulats utilisés dans la construction routière dépendent de plusieurs facteurs, notamment du type de route, des conditions environnementales et du trafic prévu.

- **Granularité** : La taille des particules de granulats est un facteur crucial. Les granulats sont généralement classés en granulats fins (comme le sable) et granulats grossiers (comme le gravier). La granulométrie influence la résistance et la durabilité du matériau.
- **Forme des particules** : Les granulats peuvent avoir différentes formes, telles que cubique, angulaire, arrondie ou concassée. La forme des particules affecte la compacité et la résistance du matériau final.
- **Propreté** : Les granulats doivent être exempts de contaminants tels que la poussière, l'argile, les particules organiques et les matières étrangères, car ces impuretés peuvent compromettre l'adhérence et la durabilité du revêtement routier.
- **Dureté** : La résistance des granulats à l'abrasion et à l'usure est essentielle pour assurer la longévité du revêtement routier, en particulier dans les zones à fort trafic.

- **Résistance à la compression** : Les granulats doivent avoir une résistance adéquate à la compression pour supporter les charges du trafic routier et éviter la déformation ou la rupture prématurée.
- **Stabilité** : Les granulats doivent être stables et ne pas se dégrader sous l'effet des conditions climatiques telles que le gel-dégel, l'humidité et les variations de température.
- **Adhérence** : Une bonne adhérence entre les granulats et le liant utilisé (tel que le bitume ou le ciment) est essentielle pour assurer la cohésion et la résistance du revêtement routier.

I.6.3. Choix des catégories de granulats

Le choix est à effectuer en fonction du type de route ; conditions environnementales ; niveau de trafic ; disponibilité locale ; normes et spécifications ; durabilité et coût.

En fonction de ces facteurs, on sélectionne les catégories de granulats appropriées pour chaque couche de la chaussée, y compris la couche de base, la couche de sous-base et la couche de roulement, afin d'assurer la qualité et la durabilité de la route.

I.6.4. Les matériaux pour assises de chaussées

- **Graves non traités**

Ils sont des matériaux granulaires utilisés dans la construction de chaussées, constitués de différents granulats (sable, gravier, pierres concassées) sans ajout de liants. Ces matériaux sont essentiels pour la structure de la chaussée, offrant une base stable et durable.

- **Avantages**

Coût : Moins cher que les matériaux traités, car ils n'ont pas besoin d'ajout de liants.

Disponibilité : Faciles à obtenir dans la plupart des régions.

Simplicité de mise en œuvre : Ne nécessitent pas de traitements supplémentaires avant leur utilisation.

- **Inconvénients**

Résistance : Moins résistants que les graves traitées aux liants.

Sensibilité à l'eau : Plus susceptibles de se dégrader en présence d'eau, nécessitant un bon drainage.

Moins de Cohésion : Comparés aux matériaux traités, ils offrent moins de cohésion et peuvent nécessiter des épaisseurs plus importantes pour atteindre la même performance.

- **Graves traitées aux liants**

Ils sont des matériaux, où des liants sont ajoutés à des granulats pour améliorer leurs propriétés mécaniques et leur durabilité. Les principaux types de liants utilisés sont le ciment, la chaux et le bitume. Chaque liant donne plusieurs avantages et aussi en résulte d'inconvénients. On résume tous leurs avantages et inconvénients ci-dessous.

➤ **Avantages**

Excellente résistance à la compression, bonne durabilité, amélioration de la portance.
Bonne flexibilité, résistance à l'eau, capacité à absorber les déformations.
Amélioration de la stabilité des sols argileux, réduction de la plasticité, augmentation de la portance.

➤ **Inconvénients**

Rigidité élevée qui peut entraîner des fissures sous des charges cycliques ou des variations thermiques.
Coût plus élevé, sensibilité aux variations de température.
Efficacité dépendante du type de sol et de la quantité du liant utilisé.

• **Béton de ciment**

Il est un matériau courant dans le bâtiment, génie civil ou les ouvrages d'art, largement utilisé dans le domaine des chaussées. Le mélange est mis en place par vibration et moulage. Ainsi, le matériau et ses constituants ne subissent pas de sollicitations dommageables pendant l'opération. La principale fonction du ciment est de donner au béton durci sa résistance mécanique, il joue aussi un rôle très important dans la maniabilité du mélange. (Presse de l'école nationale des ponts et des chaussées)

➤ **Avantages**

Durabilité : Longue durée de vie avec peu d'entretien.
Forte résistance à la compression.
Largement disponible et relativement économique.
Peut-être moulé dans presque n'importe quelle forme.

➤ **Inconvénients**

Faible Résistance à la Traction : Nécessite une armature pour des applications structurelles.
Poids : Très lourd, ce qui peut poser des défis pour le transport et la mise en œuvre.
Temps de Prise : Nécessite du temps pour durcir et atteindre sa résistance maximale.
Sensibilité aux Fissures : Peut se fissurer sous des charges de tension ou des changements de température.

I.7. DEGRADATIONS DES CHAUSSEES

I.7.1. Causes des dégradations des chaussées

Les dégradations des chaussées peuvent être causées par une variété de facteurs. Voici les principales causes. (Yang, 2004)

• **Les conditions météorologiques**

- **Gel-dégel** : Les cycles de gel et de dégel provoquent l'expansion et la contraction de l'eau dans les matériaux de la chaussée, créant des fissures et des nids-de-poule.
- **Précipitations** : L'eau peut pénétrer dans les fissures de la chaussée, affaiblir la structure de la route et causer des dommages lorsqu'elle gèle et se dilate.
- **Changements climatiques** : Les conditions météorologiques extrêmes et imprévisibles peuvent accélérer l'usure des chaussées.

- **Circulation intense**
 - **Poids des véhicules** : les véhicules lourds, exercent une pression importante sur la chaussée, accélérant son usure.
 - **Le volume du trafic** : un trafic élevé contribue à l'usure progressive de la surface de la route.
- **Conception et construction inadéquates**
 - **Matériaux de mauvaise qualité** : Utiliser des matériaux de qualité inférieure ou inappropriés pour la construction de la chaussée peut entraîner des dégradations rapides.
 - **Erreurs de conception** : Une mauvaise conception de la structure de la chaussée peut réduire sa capacité à supporter le trafic et les conditions climatiques.
 - **Problèmes de drainage** : Un drainage insuffisant peut entraîner une accumulation d'eau sur ou sous la chaussée, accélérant sa détérioration.
- **Entretien insuffisant**
 - **Retards dans les réparations** : Ne pas réparer rapidement les petites fissures et les dégradations mineures permet à ces problèmes de s'aggraver.
- **Facteurs environnementaux**
 - **Végétation** : Les racines des arbres peuvent pénétrer sous la chaussée et causer des fissures et des soulèvements.
- **Facteurs géotechniques**
 - **Instabilité du sol** : Les mouvements et les instabilités du sol sous-jacent peuvent entraîner des affaissements et des fissurations de la chaussée.

I.8. TYPES DE DEGRADATIONS DES CHAUSSEES

I.8.1. Les déformations

a. L'orniérage à grand rayon

Est une forme spécifique de déformation longitudinale de la chaussée qui se manifeste par la formation de dépressions dans les voies de circulation, mais sur des rayons plus larges par rapport à l'orniérage typique dont la largeur est supérieure à 80 cm.



Figure I.13. Orniérage à grand rayon (MTQ, 2002)

➤ Causes préalables

La fatigue de la chaussée par tassement des couches inférieures due à un défaut de portance du sol ;

Les charges répétées exercées sur la chaussée ;

Insuffisance de la résistance des matériaux à la déformation plastique ;

Les températures élevées peuvent ramollir le bitume, rendant la chaussée plus susceptible à la déformation sous les charges.

b. L'orniérage à faible rayon

Déformation permanente longitudinale qui se crée sous le passage des roues et dont la largeur est inférieure à 80 cm, elle peut concerner l'une ou les deux bandes de roulements. (HARIZI, 2012).



Figure I.14. Orniérage à faible rayon (Zemmiri, 2008)

➤ **Causes préalables**

Humidité importante dans les couches inférieures de la chaussée ;

Compactage insuffisant de l'enrobé lors de la mise en place.

c. L'affaissement de rive

Est un type de dégradation caractérisé par le déplacement ou la déformation des bords de la route, souvent provoqué par une combinaison de facteurs environnementaux, de conception et de charges de trafic.

➤ **Causes préalables**

L'accumulation et le flux d'eau le long des bords de la route peuvent éroder les matériaux de base, particulièrement en l'absence de systèmes de drainage adéquats ;

Insuffisance du corps de chaussée ou du sol support ;

Charge du trafic ;

Mauvais compactage des matériaux lors de la construction.



Figure I.15. Affaissement de rive (MTQ, 2002)

d. L'affaissement hors rive

Est une forme de dégradation qui se manifeste par une dépression ou un enfoncement localisé de la surface de la route, mais pas nécessairement le long des bords.



Figure I.16. Affaissement hors rive (LCPC, 1998)

➤ Causes préalables

Une mauvaise gestion de l'eau de surface et des eaux souterraines peut affaiblir les fondations de la chaussée ;

Les charges lourdes et répétées des véhicules ;

Gonflement du sol à cause de l'humidité ;

Le vieillissement et la dégradation des matériaux de la chaussée et de la base.

e. Soulèvement différentiel

Est une forme de dégradation où des sections de la surface de la route se soulèvent de manière inégale, créant des ondulations ou des fissures qui peuvent rendre la conduite difficile et dangereuse.



Figure I.17. Soulèvement différentiel (MTQ, 2002)

➤ **Causes préalables**

Gel et dégel ;

La poussée des racines des arbres sous la chaussée ;

Mauvaises conditions de drainage ;

Mauvaise conception ou construction.

I.8.2. Les fissurations

a) Fissures longitudinales

Type de dégradation, qui se manifestent sous la forme de fissures orientées parallèlement à l'axe de la chaussée.



Figure I.18. Fissures longitudinales (Beghin, 2003)

➤ **Causes préalables**

Fatigue de la chaussée due à une structure insuffisante vis-à-vis du trafic, ou d'une portance insuffisante du sol ;

Les variations de température provoquent l'expansion et la contraction des matériaux de la chaussée ;

Faible support de la base : une base insuffisamment compactée ou affaiblie peut permettre des mouvements de la surface ;

Retrait du sol argileux à la suite d'une longue période de sécheresse.

b) Fissures transversales

Fissuration sensiblement perpendiculaire à l'axe de la chaussée, isolée ou périodique d'espacement variable sur tout ou partie de la largeur de chaussée.



Figure I.19. Fissures transversales (MTQ, 2002)

➤ Causes préalables

Retrait thermique ;

Remontée de fissures après des travaux de surfacage ;

Diminution de la section du revêtement ;

Joint de construction mal exécuté ;

Défaut de plasticité du matériau de la couche de roulement.

c) Le faïençage dans les bandes de roulements

Un type de dégradation de la chaussée qui se caractérise par un réseau de petites fissures interconnectées ressemblant à des mailles de filet ou à la surface craquelée de la porcelaine émaillée.



Figure I.20. Le faïençage (Btpnews, 2022)

➤ **Causes préalables**

Décollement de la couche de roulement ;

Portance insuffisante ;

Fatigue de la chaussée ;

Infiltration d'Eau dans les couches inférieures causera l'affaiblissement la structure de la chaussée.

I.8.3. Les arrachements et Des enrobages

Sont des types de dégradations des chaussées qui se caractérisent par le décollement ou le détachement de la couche de revêtement de la chaussée.

a) Nid de poule

C'est une cavité presque circulaire qui se creuse dans la chaussée.



Figure I.21. Nid de poule (Tremblay, 2007)

➤ **Causes préalables**

Le gel et le dégel répétés peuvent affaiblir la chaussée et provoquer des fissures et des déformations ;

Les fissures existantes dans la chaussée peuvent s'aggraver sous l'impact du trafic ;

La détérioration des matériaux de la chaussée, tels que l'asphalte ou le béton, peut entraîner des défauts de surface ;

Défauts de drainage.

b) Pelade

Elle fait référence à une détérioration localisée de la surface de la route, où une partie du revêtement ou de l'agrégat s'est érodée ou a été enlevée, laissant une zone dénudée ou endommagée.



Figure I.22. Pelade (Aivar, 2012)

➤ **Causes préalables**

L'érosion causée par l'eau, le vent ou le trafic peut entraîner le détachement et l'enlèvement de la couche de surface de la chaussée ;

Fatigue de la chaussée ;

Mauvais drainage ;

Vieillessement des matériaux.

c) Plumage

Détérioration de la surface de la route où des agrégats ou des matériaux de la chaussée se détachent progressivement, créant une texture rugueuse et inégale.



Figure I.23. Plumage (MTQ, 2002)

I.8.4. Les remontées

a) Ressuage

Il fait référence à un phénomène où une partie du liant bitumineux utilisé dans le revêtement de la chaussée remonte à la surface, créant une apparence brillante ou huileuse.



Figure I.24. Le ressuage (MTQ, 2002).

➤ Causes probables

Excès de liants ;

Conditions climatiques ;

Compactage et drainage inadéquats.

I.9. CONCLUSION

Les chaussées sont fréquemment construites à partir de granulats naturels extraits de carrières. En conséquence, la demande en agrégats augmente constamment, à tel point que les sources naturelles ne parviennent parfois pas à répondre aux besoins nationaux. Ces dernières années, de nouveaux matériaux ont été testés pour pallier, au moins en partie, le manque de granulats.

Le prochain chapitre est consacré au développement de la filière du recyclage ainsi que les différents matériaux recyclés, utilisés dans le secteur du bâtiment et des travaux publics(BTP).

CHAPITRE II

LES MATERIAUX RECYCLES

II.1. INTRODUCTION

Dans le domaine du Génie Civil réputé par sa grande consommation de matériaux naturels, les avancées scientifiques ont permis de valoriser différentes variétés de sous-produits industriels dans les applications de béton et en technique routière. D'après l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie [ADEME] (loi du 13 juillet 1992), la valorisation des déchets est le réemploi, le recyclage ou toute autre action visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie.

La valorisation des déchets est un processus clé dans la gestion durable des ressources. Cette approche s'inscrit dans une démarche d'économie circulaire, où les matériaux sont continuellement réintroduits dans le cycle de production, réduisant ainsi la dépendance aux ressources naturelles et minimisant l'impact environnemental des déchets.

Dans ce chapitre nous allons présenter de manière générale le recyclage et la valorisation des déchets particulièrement dans le domaine du génie civil.

II.2. GENERALITES SUR LES DECHETS

II.2.1. Définition des déchets

Un déchet est toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire. Les déchets sont générés par les activités humaines et peuvent provenir de diverses sources, telles que les ménages, les industries, l'agriculture, les soins de santé et la construction.

D'après le code français de l'environnement, le déchet est ainsi qualifié de façon essentiellement subjective, où l'acte ou l'intention du détenteur d'éliminer/abandonner importe plus que de savoir si l'objet est devenu impropre à l'usage, a perdu toute valeur économique ou présente un danger pour l'environnement. (Pimienta et Remond, 1997)

II.2.2. Origine de la production des déchets

La production des déchets est inéluctable pour les raisons suivantes :

- Biologiques : tout cycle de vie produit des métabolites.
- Technologiques : tout procédé industriel conduit à la production de déchet.
- Economiques : les produits en une durée de vie limitée.
- Ecologiques : les activités de la dépollution (eau, air) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessiteront une gestion spécifique.
- Accidentelles : les inévitables dysfonctionnements des systèmes de production et de consommation sont eux aussi à l'origine des déchets. (Pimienta et Remond, 1997)

II.2.3. Gestion des Déchets

La gestion des déchets comprend plusieurs étapes essentielles :

- **Collecte et transport** : Récupération des déchets depuis leur point de génération et transport vers des installations de traitement ou de recyclage. Dans la sphère domestique,

nous jetons les ordures, mais dans la sphère industrielle, le processus est beaucoup plus complexe. La complexité est telle que les entreprises ou les industries qui produisent des déchets passent des contrats avec d'autres entreprises pour leur gestion ou, dans certains cas, disposent de leurs propres méthodes de transport.

- **Tri et traitement** : Les déchets sont unifiés en fonction de leur typologie et rassemblés en différents groupes pour être transportés et traités séparément.
- **Recyclage** : Transformation des déchets en nouveaux produits ou matières premières.
- **Valorisation énergétique** : Conversion des déchets en énergie, comme l'incinération avec récupération d'énergie ou la méthanisation.
- **Élimination** : Disposition finale des déchets non recyclables, souvent par enfouissement ou incinération sans récupération d'énergie.

II.2.4. Les grandes catégories de déchets de chantier

a) Les déchets inertes

Matériaux qui ne posent pas de risques immédiats pour la santé ou l'environnement, ils représentent la majorité des déchets de chantier, constituant 72 % de ces déchets. Il s'agit de déchets minéraux qui, une fois stockés, conservent leurs caractéristiques physico-chimiques intactes. Ces déchets sont une sous-catégorie de déchets non dangereux, issus des activités de rénovation et de construction.

Les déchets inertes ne sont pas biodégradables et ne se décomposent pas ; ils n'entraînent donc pas non plus la détérioration des autres matières et matériaux stockés avec eux. Les déchets alimentaires, les déchets de jardinage, matériaux de terrassements, céramique, béton, parpaing, tuiles, briques, pierres naturelles, gravats, verre : l'élimination de ces déchets nécessite des installations de recyclage ou s'effectue dans des Installations de Stockage des Déchets Inertes [ISDI].



Figure II.1. Les déchets inertes (Radisson, 2014)

✓ La valorisation des déchets inertes

La valorisation des déchets de chantier inertes ouvre de nombreuses possibilités de réutilisation. Par exemple, les pierres naturelles, la terre et les produits en béton peuvent être transformés en granulats, remplaçant ainsi les granulats naturels dans les travaux de renforcement

d'infrastructures. Le recyclage des déchets de chantier inertes favorise une approche plus durable dans le secteur du bâtiment et des travaux publics [BTP].

b) Les déchets non dangereux non inertes

Les déchets non dangereux non inertes représentent 26 % des déchets du secteur du BTP. Bien qu'ils ne soient pas inertes, ils ne sont pas dangereux non plus : ils ne sont ni corrosifs ni explosifs. On les appelle déchets industriels banals [DIB].

Ces déchets incluent le bois, le plastique, les emballages, le plâtre, les métaux et les isolants. Ils sont stockés pour leur part dans des Installations de Stockage des Déchets Non Dangereux [ISDND].

Ces déchets de chantier ne sont ni recyclables ni incinérables. En l'absence de tri, leur élimination doit se faire en déchetterie.



Figure II.2. Les déchets non dangereux non inertes (Graindorge, 2015)

✓ Valorisation des déchets non dangereux non inertes

La valorisation des déchets non dangereux est plus complexe. Elle se réalise soit par valorisation énergétique, soit par valorisation matière. Par exemple, le bois peut être utilisé dans des chaufferies pour produire de l'énergie ou transformé en pâte à papier ou en panneaux. Les métaux peuvent être refondus et utilisés en métallurgie, tandis que le plastique et les emballages peuvent être réutilisés directement.

c) Les déchets dangereux

Matériaux qui présentent un risque significatif pour la santé humaine ou l'environnement, Ils constituent 2% des déchets de bâtiments

Parmi eux, on trouve le goudron, les hydrocarbures et leurs dérivés, les produits chimiques toxiques, les déchets radioactifs, les substances inflammables, les piles, l'amiante, le plomb, les bouteilles de gaz, ainsi que les peintures et vernis.

Le traitement des déchets dangereux nécessite une attention particulière, tant pour les produits eux-mêmes que pour leurs contenants éventuels. Lors de la collecte, ils ne doivent jamais être mélangés avec d'autres déchets de chantiers. Ils doivent également être emballés et étiquetés correctement.

Si ces déchets dangereux ne peuvent pas être valorisés, ils sont alors stockés dans des Installations de Stockage des Déchets Dangereux [ISDD].



Figure II.3. Les déchets dangereux sur un site de construction, le revêtement bitumineux de démolition (Caporusso, 2014)

✓ Valorisation des déchets dangereux

La gestion des déchets dangereux inclut également des processus de valorisation, bien que plus coûteux. Par exemple, les matériaux revêtus de peintures au plomb peuvent être traités par vitrification ou par sablage dans des installations spécialisées. La loi oblige les artisans à établir un suivi documenté de l'évacuation des déchets dangereux.

Le bordereau de suivi des déchets dangereux [BSDD] doit être renseigné et signé par tous les intermédiaires, qu'ils soient producteurs, collecteurs, transporteurs ou exploitants de l'installation destinataire. Ce suivi garantit la traçabilité des déchets de chantier et prouve leur élimination conformément aux normes en vigueur. (Fauconnier, 2023)

II.2.5. Types de matériaux qui peuvent être réutilisés

Pour les matériaux qui peuvent être réutilisés, nous distinguons deux types :

- a) Les déchets provenant des travaux de construction et de démolition, ils sont destinés à la production de granulats, qui seront ensuite transformés en béton dans une usine de fabrication de béton. Cependant, ils peuvent être utilisés d'autres manières.
- b) Les matériaux tels que les métaux, le verre, le papier, etc., arrivent ensemble dans les stations d'épuration et sont séparés et triés, le plus souvent manuellement. Une fois séparés, il y a deux options : envoyer les déchets qui ne peuvent pas être recyclés dans des dépôts contrôlés ; ou stocker les déchets qui peuvent être réutilisés dans des dépôts de matières classées.

Enfin, la commercialisation des matériaux réutilisables par les entreprises entre en jeu. Ces entreprises utiliseront les matériaux à recycler et les transformeront en nouveaux produits que nous retrouverons ensuite dans notre vie quotidienne.

II.2.6. Principaux déchets de construction et de démolition

Comme dans un ménage, tous les matériaux ne sont pas recyclables et ne peuvent être réutilisés. La qualité des déchets doit être vérifiée avant le recyclage, afin de s'assurer que les nouveaux matériaux répondent aux conditions et aux exigences d'une nouvelle construction.

Les déchets de construction et de démolition représenteraient approximativement 30% de l'ensemble des déchets (en tonnes par an), générés par la Région. La partie majoritaire de cet important gisement de déchets est produite durant les travaux ; une petite partie du gisement est constituée de matériaux neufs non-utilisés. La nature des déchets produits varie fortement en fonction du type de travaux ou de bâtiment. Il s'agit majoritairement de déchets inertes. 75 à 80% des déchets de construction et de démolition seraient recyclés, essentiellement sous forme de remblais. (Thoumelin & Brula, 2005)

Parmi les matériaux qui peuvent faire l'objet d'une seconde utilisation, on trouve :

- **Asphalte** : les restes d'une chaussée peuvent être réutilisés dans la construction de nouvelles routes.
- **Béton** : ses résidus sont utilisés pour la base des constructions routières et c'est l'un des composants pour produire du nouveau béton.
- **Bois** : même s'il s'agit de bois contaminé par la peinture, nous pouvons le récupérer pour lui donner une autre utilité. Le traitement du bois peut être utilisé pour produire du combustible ou comme décoration paysagère.
- **Métaux** : les portes, les tuyaux, les tôles et les cadres de fenêtres sont quelques-uns des métaux qui peuvent être réutilisés en toute sécurité. Nous fondons le fer et l'acier pour les réutiliser. Si les matériaux récupérés sont des pièces entières, ils peuvent être vendus à des marchands de ferraille.
- **Plastique et verre** : bien qu'il s'agisse de matériaux difficiles à trouver dans une démolition, leur réutilisation est possible grâce à l'industrie du recyclage, comme dans la maison.

II.2.7. La valorisation des déchets

Selon Torregrossa et al., (2006) avant de valoriser un déchet, il faut connaître son origine, l'analyser, caractériser son état actuel et son comportement dans le temps et évaluer sa tartinabilité. Il s'agit donc de mesurer pour connaître et connaître pour agir. L'approche globale du déchet permettra d'en définir son devenir, à savoir quel type de valorisation choisir.

Il existe plusieurs types de valorisation des déchets :

- **Le recyclage** : Le recyclage des déchets implique leur transformation en matières premières secondaires, qui peuvent être utilisées à nouveau dans la production de nouveaux produits, réduisant ainsi la consommation de ressources naturelles.
- **Le compostage** : est une forme de valorisation organique qui consiste à dégrader les déchets biodégradables en amendements organiques, tels que le compost, pour améliorer la fertilisation des sols.
- **La régénération** : signifie leur transformation en un autre produit ou matériau, souvent avec des modifications plus importantes, pour une nouvelle fonction ou un autre usage.

- **La valorisation énergétique** : consiste à récupérer et à valoriser l'énergie produite lors du traitement des déchets sous forme de chaleur, d'électricité, de carburant, ou de biogaz.

II.2.8. Objectif de la valorisation

Différentes lois, notamment celles du 15 juillet 1975 et du 3 juillet 1992, regroupées et inscrites dans le code de l'environnement, fixent les objectifs à respecter pour gérer correctement les déchets

- Prévenir ou réduire la production et la nocivité des déchets ;
- Organiser le transport des déchets ;
- Valoriser les déchets par réemploi, recyclage ou toute action visant à obtenir des matériaux réutilisables ou de l'énergie ;
- Informer le public des effets pour l'environnement et la santé publique ;
- Limiter le stockage définitif aux seuls déchets résiduels, ultimes.

II.2.9. Utilisation des déchets dans le domaine du génie civil

L'idée d'employer des déchets, y compris les sous-produits de l'industrie, n'est pas neuve pour l'homme. Les déchets produits par les industries du charbon ou de l'acier sont relativement facilement assimilables à des granulats ou incorporables dans des liants : étude de l'emploi du laitier granulé en cimenterie en 1880. En génie civil, le développement de l'emploi de certains déchets s'est fait en parallèle avec le développement de l'industrie lourde dans le temps.

En général, les besoins du génie civil peuvent être résumés en termes de quatre ordres séquentiels :

- 1- Matériaux, sur lesquels pèsent de faibles exigences et consommés en grande masse.
- 2- Granulats, qui doivent répondre à des spécifications diverses suivant leur utilisation.
- 3- Liants, qui doivent répondre à des spécifications précises et dont les propriétés doivent rester constantes dans le temps.
- 4- Activant, qui seront utilisés en petites quantités, ce qui peut poser des problèmes de collecte, stockage, distribution et régularité.

II.2.10. Les avantages des matériaux recyclés

Les matériaux recyclés offrent plusieurs avantages pour l'environnement, les consommateurs et les entreprises. Voici quelques-uns des principaux avantages : (Sorevo, 2023)

- **Limitation de l'extraction de matières premières non renouvelables** : Le recyclage permet de réduire la pression sur les ressources naturelles, en utilisant des matériaux déjà existants et en réduisant ainsi la dépendance à des ressources extraites à grande échelle.
- **Réduction de la pollution** : Le recyclage réduit la quantité de déchets qui finissent dans les décharges et les océans, ainsi que les émissions de carbone liées à la production de nouveaux matériaux.
- **Création d'emplois locaux** : Le secteur du recyclage est en constante croissance et emploie environ 2 millions de personnes à l'échelle mondiale, ce qui contribue à la réindustrialisation locale et à la création d'opportunités économiques.

- **Production de matières premières secondaires** : Les matériaux recyclés peuvent être transformés en matières premières secondaires, qui sont à la fois plus durables et plus respectueuses de l'environnement que les matériaux nouveaux.
- **Innovation et durabilité** : Les technologies de recyclage avancées permettent de séparer et de traiter efficacement les matériaux, ce qui encourage l'adoption de pratiques circulaires et la conception de produits durables.

II.2.11. Les inconvénients des matériaux recyclés

Les inconvénients des matériaux recyclés sont principalement liés à la qualité et à la sécurité des produits finis, parmi les : (Ineris, 2018)

- **Contamination** : Les déchets peuvent être contaminés par des substances dangereuses, telles que des additifs chimiques, ce qui peut compromettre la qualité et la sécurité des produits recyclés.
- **Coûts élevés** : Le recyclage nécessite des infrastructures et des équipements coûteux, ce qui peut rendre le processus moins attractif pour les entreprises et les communautés.
- **Qualité des produits** : Les produits recyclés peuvent avoir une qualité inférieure à celle des produits nouveaux, ce qui peut affecter leur durabilité et leur fonctionnalité.
- **Limitations techniques** : Le recyclage peut nécessiter des techniques spécifiques et des équipements spécialisés, ce qui peut limiter son application à certaines industries ou régions.
- **Risques sanitaires** : Le recyclage de déchets contenant des substances dangereuses peut présenter des risques sanitaires pour les travailleurs et les consommateurs, notamment si ces substances ne sont pas correctement éliminées ou recyclées.

II.3. GENERALITE SUR LES DEBRIS DE BETON

Le terme de débris fait référence d'une part à l'origine des déchets, c'est-à-dire les décombres de bâtiments effondrés et, d'autre part, à leur nature, celle de gravats (des déchets inertes). Cette double étymologie revêt une connotation négative, puisqu'elle est associée aux produits de la destruction de la ville. De plus, le terme de débris tend à restreindre la diversité des types de déchets pris en compte, car il n'inclut que les déchets inertes, assimilables essentiellement à des déchets du bâtiment et des travaux publics

II.3.1. Définition

Le béton est un matériau composite présentant une forte hétérogénéité d'un mélange de granulats, d'une pâte de ciment incorporant éventuellement des adjuvants et additions. Le béton peut aussi être considéré comme un matériau multiphasique contenant trois phases ; solide (granulats et partie cimentaire), liquide (eau libre et adsorbée) et gazeuse (air et vapeur d'eau). Ses propriétés mécaniques se développent grâce à l'hydrations du ciment. (Bensafi et Belkacem, 2018).

C'est le matériau de construction le plus important sur la planète, en termes de volume et de chiffre d'affaires. Son succès provient, entre autres raisons, de son extraordinaire polyvalence et de sa disponibilité pratiquement partout sur terre, en tant que matériau essentiellement local.



Figure II.4. Eprouvettes de béton

II.3.2. Valorisation du béton

Actuellement, 80% des bétons de déconstruction sont déjà valorisés dans diverses applications routières (couches de forme, couches d'assise de chaussées, etc.) et 20% de ces bétons sont acheminés dans des installations de stockage de déchets inertes (ISDI). La valorisation des bétons de déconstruction reste en revanche très réduite dans les bâtiments. Ainsi, un des principaux enjeux est de montrer que l'on peut utiliser dans un bâtiment le béton issu du recyclage sans modifier les méthodes de mise en œuvre utilisées avec un béton traditionnel. (Ordener, 2021)

Lors des chantiers de construction sur les bâtiments ou les ouvrages, d'importants volumes de gravats sont produits et de nombreux matériaux se retrouvent mélangés. Les enjeux du recyclage sont donc considérables pour assurer son traitement dans une logique d'économie circulaire.

Selon la nature et l'ampleur des travaux ou du chantier, deux solutions existent :

- Tri des déchets directement sur le site avec des engins adaptés ;
- Collecte des gravats de béton par des entreprises spécialisées avant d'être acheminés vers un centre de tri dédié.

Un tri s'opère pour diriger ensuite les déchets vers la bonne filière et procéder au recyclage de ces tonnes de béton. Isolé des autres déchets, la valorisation peut commencer. Dans tous les cas, le procédé est le même.

Une fois les déchets triés et séparés, le béton est concassé, puis passé au crible. Des traitements complémentaires peuvent avoir lieu si l'on souhaite rendre la matière finale encore plus pure. Après ces opérations, le béton se retrouve sous forme de gravillons ou de gravats. Il subit un contrôle en laboratoire pour vérifier la composition du produit fini et écarter tout risque de pollution.

Le béton se recycle très bien et trouve une seconde vie sur les routes où il est utilisé comme sous-couche ou pour le terrassement. Environ 80 % du béton issu du recyclage est valorisé de cette manière. Une infime partie (environ 2 %) peut servir à la fabrication de nouveaux bétons si la qualité et la finesse des grains obtenus le permettent.

La valorisation de béton se fait essentiellement dans le domaine routier. (De Larrard et Colina, 2018)

II.4. GENERALITES SUR LA BRIQUE

II.4.1. Définition de la brique

Une brique est l'un des plus anciens matériaux de construction, c'est un produit fait d'argile ou d'autre matière argileuse avec ajout ou non de sable, combustible ou autre adjuvants, portée à une température suffisamment élevée pour former une liaison céramique. Elle est à la fois un isolant, un régulateur thermique et un matériau résistant.

Elle est simplement définie dans le dictionnaire du BTP comme élément de construction à base d'argile cuite, aux formes et utilisations très variables, obtenue par moulage ou extrusion.

II.4.2. Techniques de production de brique

Les techniques de production de briques peuvent varier en fonction de la région, des matériaux utilisés et des méthodes traditionnelles ou modernes employées. (Soyeh, 2018)

- **Extraction de l'argile** : L'argile est extraite d'argilières, préférentiellement locales, en fonction de la spécificité de la granulométrie de chaque sol. L'argile est essentielle pour la qualité et la couleur de la brique.
- **Préparation de la Pâte** : Les matières premières sont concassées et broyées pour obtenir une poudre fine. L'argile est mélangée à l'eau pour obtenir une pâte élastique et plastique, facilitant les opérations de moulage à venir.
- **Façonnage** : La pâte est façonnée en briques en utilisant des moules en bois ou en plastique. Les briques peuvent être moulées à la main ou mécaniquement.
- **Séchage** : Les briques crues sont placées sur des palettes de bois et laissées sécher pendant deux à quatre jours pour éliminer l'eau contenue dans la brique.
- **Cuisson** : La cuisson est la dernière étape de fabrication. Les briques sont placées dans des fours continus ou discontinus à une température comprise entre 850 °C et 1 200 °C, en fonction de l'argile utilisée. La cuisson permet d'influencer les propriétés mécaniques de la brique.
- **Conditionnement** : Après la cuisson, les briques sont prêtes à être transportées et livrées sur chantier. Elles sont préalablement empilées sur des palettes et emballées pour minimiser l'emballage utilisé.

II.4.3. Différents types de brique

Les différents types de brique sont :

- **La brique rouge** : utilisée pour la construction de maisons, elle est faite de terre cuite et offre des propriétés isolantes et résistantes. Elle est traditionnelle et authentique, mais a des propriétés médiocres en termes d'isolation thermique et est plus lourde que les matériaux creux.



Figure II.5. Brique rouge (Lamy Expertise, 2022)

- **La brique creuse** : très populaire en Algérie et même en France, elle est fabriquée en terre cuite et présente des perforations horizontales ou verticales. Elle offre de bonnes performances en matière d'isolation thermique et est utilisée pour les murs intérieurs et extérieurs, porteurs ou non.



Figure II.6. Brique creuse.

- **La brique de parement** : utilisée principalement pour les façades, elle est fabriquée en terre cuite ou en matériaux reconstitués et offre une touche décorative. Elle est disponible en deux formes : moulées pour un aspect contemporain et pressées pour un aspect authentique.



Figure II.7. Brique parement (Raujolles, 2024)

- **La brique réfractaire** : résistante aux fortes températures, elle est utilisée dans la construction de fours, cheminées, et autres applications où la résistance thermique est essentielle. Elle est cependant plus coûteuse que les autres types de briques.



Figure II.8. Brique réfractaire (Amrouche, 2020)

- **La brique de verre** : un matériau isolant et personnalisable, elle est utilisée pour créer des cloisons et des murs avec des propriétés acoustiques et thermiques de qualité. Elle est plus coûteuse que les autres types de briques et nécessite des précautions spécifiques pour sa pose.



Figure II.9. Brique en verre (Chatard, 2022)

- **La brique monomur** : utilisée pour les murs, elle offre des performances thermiques bonnes et est plus légère que la brique pleine.



Figure II.10. Brique monomur (Futura sciences, 2009)

II.4.4. Domaines d'utilisation des briques recyclées

a. Matériaux de remplissage et de stabilisation dans les infrastructures

- **Routes Secondaires** : Pendant de nombreuses années, les déchets de maçonnerie et les rebuts de briques ont été utilisés pour remplir et stabiliser les routes secondaires, en particulier dans les zones humides telles que les bois et les champs. Cette pratique est courante dans les pays qui manquent de réserves de pierre suffisantes comme le Danemark. Ce matériau est généralement utilisé non broyé.
- **Routes principales** : Les briques, les tuiles et autres maçonneries en terre cuite broyée peuvent être utilisées dans des projets de construction routiers plus importants, en particulier sous forme de couche de base non traitée. Elle est utilisée dans la construction des routes dans des pays tels que la Suisse, la Hollande, le Royaume-Uni et le Danemark. Bien que la maçonnerie broyée puisse être utilisée dans la construction des routes peu fréquentées, elle n'est pas adaptée pour les routes à grande circulation en raison du risque de déformation.

Ce matériau remplace les matériaux naturels tels que le sable et le gravier qui sont généralement utilisés en grandes quantités à cette fin. Dans certains cas, la maçonnerie broyée peut faire partie d'un mélange pouvant également contenir du béton et des agrégats naturels (Jourdin, 1966)

b. Agrégats pour béton in situ et préfabriqué et mortiers

Les briques en terre cuite broyée et autres maçonneries peuvent également être utilisées pour niveler et remplir les tranchées de canalisations. Le matériau broyé remplacera les matériaux naturels tels que le sable et perturbera donc moins le paysage. Une granulométrie fine d'environ 0-4 mm est généralement utilisée pour le matériau de remplissage des tranchées de canalisations qui se compose essentiellement de maçonnerie broyée. Des particules plus grossières peuvent être utilisées dans d'autres applications. (Bedjou, 2003)

II.5. CONCLUSION

Un traitement et une gestion appropriés des déchets permettent de réduire les impacts négatifs sur l'environnement et la santé, tout en offrant de nouvelles ressources renouvelables et

durables. Cela contribue à l'innovation dans le domaine des matériaux de construction, notamment par la valorisation des déchets de béton et de brique sous forme de granulats pour les travaux routiers et diverses applications en génie civil. Cependant, leur utilisation doit respecter les exigences techniques définies par les normes en vigueur.

La présente étude est réalisée dans ce contexte, à savoir, la valorisation de mélanges de brique et béton dans les couches de chaussées. Ainsi, de nombreux essais, incluant des essais d'identification et des essais mécaniques sont réalisés pour valider cette piste. L'identification des matériaux utilisés dans ce travail fera l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE III

IDENTIFICATION DES MATERIAUX

III.1. INTRODUCTION

Avant d'étudier le comportement mécanique de tout matériau, il est crucial de déterminer un ensemble de propriétés (physiques, chimiques, minéralogiques...) qui permettent de le caractériser et de mieux comprendre son comportement sous différentes sollicitations. Ces propriétés sont obtenues grâce à des essais de laboratoire, connus sous le nom de « essais d'identification » :

- La teneur en eau (w).
- Masse volumique des grains solides (ρ_s).
- Masse volumique humide (ρ_h).
- Masse volumique sèche (ρ_d).
- L'indice des vides (e).
- La porosité (n).
- Le degré de saturation (S_r).

Nous allons initier la partie expérimentale par cet ensemble d'essais d'identification et de caractérisation des matériaux utilisés.

III.2. PRESENTATION ET IDENTIFICATION DES MATERIAUX

Dans cette étude, les échantillons étudiés sont reconstitués en mélanges de deux matériaux essentiels : les débris de béton et les débris de brique.

Les matériaux utilisés sont collectés à partir de décharges illicites aux bords des routes, ensuite concassés par des moyens mécaniques et manuels selon la granulométrie désirée aux laboratoires de mécanique des sols [MDS] et Géo-matériaux Environnement & Aménagement [LGEA] de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

III.2.1 Les débris de béton

Comme nous l'avons défini dans le chapitre précédent, débris fait référence d'une part à l'origine des déchets, c'est-à-dire les décombres de bâtiments effondrés et, d'autre part, à leur nature, celle de gravats.

Débris de béton également appelés béton concassé ou gravats de béton, sont les fragments résultant de la démolition ou de la rénovation des structures en béton. Ces matériaux, souvent considérés comme des déchets, peuvent être recyclés et réutilisés dans diverses applications de construction, contribuant ainsi à la durabilité et à la réduction des déchets de construction.

III.2.2. Les débris de brique

Les débris de brique proviennent de la démolition ou de la rénovation de structures en maçonnerie. Bien que souvent considérés comme des résidus, ces matériaux peuvent être recyclés et réintégrés dans différentes applications de construction, jouant ainsi un rôle crucial

dans la durabilité et la gestion des déchets du secteur de la construction.

III.3. PREPARATION DES DEBRIS DE BETON

III.3.1. Concassage et tamisage

Les débris de béton sont transportés au laboratoire sous forme de blocs. Avant leur traitement, une étape de tri a été effectuée pour éliminer les impuretés telles que le plastique, les fils, le papier et la matière organique. Ensuite, ces blocs ont été réduits manuellement en petits fragments à l'aide d'un marteau. Cette préparation permet de faciliter le passage du matériau dans le concasseur, assurant ainsi une opération de concassage efficace.

Afin d'assurer l'homogénéité des échantillons durant tous les essais ; une grande quantité de débris béton a été concassée et mélangée.



Figure III.1. Le béton brisé manuellement



Figure III.2. Concassage du béton

Ensuite, le matériau est passé au tamisage pour séparer les grains selon leurs dimensions, permettant par la suite de reconstituer les échantillons selon la classe granulaire 0/20 mm

délimitée par le fuseau granulométrique relatif aux corps de chaussées, prescrit par la norme NF EN 13-285(2010).

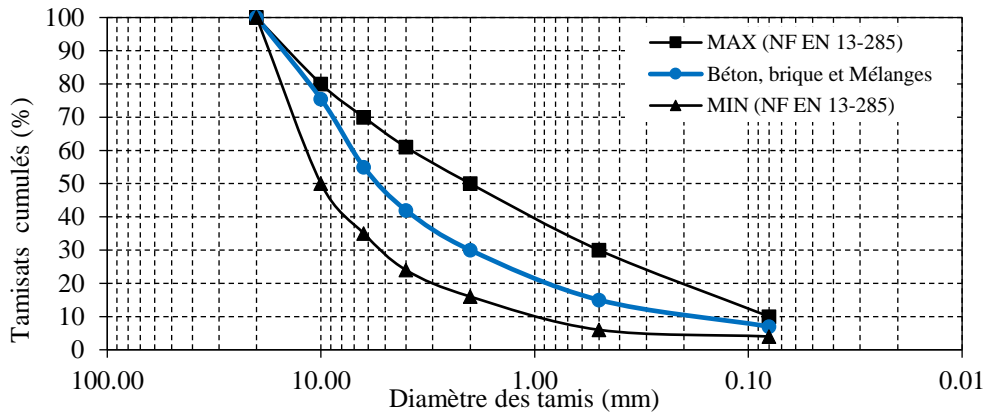


Figure III.3. Courbe granulométrique des matériaux et des mélanges étudiés (NF EN 13-285, 2010)



Figure III.4. Tamisage électrique (Dans les cas des petits grains)



Figure III.5. Tamisage du béton à la main (Dans les cas des gros grains)

III.3.2. Teneur en eau (w) (NF P94-050)

La teneur en eau est le quotient de la masse de l'eau interstitielle (M_w) par la masse des grains solides ; est déterminée selon la norme NFP94-050 (méthode par étuvage). L'essai de détermination de la teneur en eau, consiste à peser un échantillon humide puis le passer à l'étuve à 75°C pendant 24 heures et le peser une autre fois à sec. Donc la teneur en eau pondérale est calculée comme suit :

$$w = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100$$

w : teneur en eau

M_h : masse humide

M_s : masse sèche

Tableau III.1. Détermination de la teneur en eau.

Matériau	w (%)
Matériau : béton	2.04

Les résultats montrent que, la teneur en eau naturelle des débris utilisés dans ce travail est faible. Ceci est prévisible, du fait que le matériau étudié est granulaire non argileux, très perméable, et donc il emmagasine une faible quantité d'eau même en périodes humides.

III.3.3. Les masses volumiques

a. La masse volumique sèche ρ_d (NF P94-064)

La masse volumique sèche d'un échantillon de roche est déterminée par pesée hydrostatique (avec échantillon paraffiné) selon la norme. L'essai consiste à peser l'échantillon à l'air libre, puis à établir une deuxième pesée après paraffinage, et enfin, repeser le tout plongé dans l'eau.



III.6. Mode opératoire de l'essai par pesée hydrostatique

La masse volumique déterminée par l'équation suivante :

$$\rho_d = \frac{M_r}{\frac{M_{rp} - M'_{rp}}{\rho_w} - \frac{M_{rp} - M_r}{\rho_p}}$$

Avec :

M_r : Masse de la roche

M_{rp} : Masse de la roche paraffinée à l'air libre ;

M'_{rp} : Masse de la roche paraffinée dans l'eau ;

ρ_p : Masse volumique de la paraffine = 0,88g/cm³ ;

ρ_w : Masse volumique de l'eau = 1g/cm³.

Tableau III.2. Résultats de la détermination de la masse volumique sèche.

Paramètre	1 ^{er} essai	2 ^{ème} essai	3 ^{ème} essai
Masse de la roche (M_r) (g)	64,9	85,9	75,3
Masse de la roche paraffinée à l'air libre (M_{rp}) (g)	70,2	93,2	82,1
Masse de la roche paraffinée dans l'eau (M'_{rp}) (g)	37,4	48,8	42,4
Masse volumique sèche ρ_d (g/cm ³)	2,42	2,37	2,35
Moyenne	2,38g/cm³		

Le tableau III.3 : présente la classification des matériaux selon la masse volumique sèche permet de classer le matériau utilisé :

Tableau III.3. Classification de la densité en fonction de la masse volumique sèche.

ρ_d (g/cm ³)	Appréciation
< 1.6	Faible
1.6 – 1.8	moyenne
> 1.8	Dense

En se référant au tableau III.3, on constate que le béton utilisé est dense. (Norme NF P94-064)

b. La masse volumique humide ρ_h (NF P94-053)

La masse volumique humide est calculée selon la formule suivante :

$$\rho_h = \rho_d \times (1 + w)$$

Avec :

W : Teneur en eau du matériau ;

ρ_d : Masse volumique sèche.

Application numérique de l'équation : $\rho_h = 2.38 \times (1 + 0.0204)$

$$\rho_h = 2.42 \text{ g/cm}^3$$

c. La masse volumique des particules solide ρ_s (NFP94-054)

La détermination de la masse volumique des particules solides est effectuée selon la norme NFP94-054. Elle consiste à mesurer le volume des particules solides par un pycnomètre en utilisant l'eau distillée ou déminéralisée. ρ_s est utilisée pour connaître l'indice des vides, le degré de saturation et la porosité. L'échantillon de sol est séché à l'étuve puis pesé. Le volume des particules est déduit par pesée à l'aide d'un pycnomètre en substituant de l'eau de masse volumique connue aux particules solides.



Figure III.7. Exécution de l'essai au pycnomètre

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

$$\rho_s = \frac{\rho_w(M_2 - M_1)}{(M_4 - M_1 + M_2 - M_3)}$$

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau III.4.

Tableau III.4. Résultats de la détermination de la masse volumique des particules solides.

Masses	Valeurs en (g)
M1	208
M2	263
M3	790
M4	756
ρ_s	2.61 (g/cm³)

Avec :

M1 : Masse du pycnomètre vide +bouchon ;

M2 : Masse du pycnomètre+ particule solide +bouchon ;

M3 : Masse du pycnomètre + particule solide + eau + bouchon ;

M4 : Masse du pycnomètre +eau +bouchon ;

ρ_w : Masse volumique de l'eau égale à 1(g/cm³).

III.3.4. Indice des vides (e)

L'indice des vides est le rapport entre le volume des vides et le volume des particules solides.

Il est déterminé par la relation suivante :

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (\text{l'indice des vides peut être supérieur à 1}).$$

Sachant que l'indice des vides dépend aussi des paramètres déjà déterminés (ρ_s et ρ_d) selon la formule :

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad e = \frac{2,61}{2,38} - 1 = 0,096 \quad e = 0,096$$

III.3.5. Degré de saturation (Sr)

Le degré de saturation définit le volume d'eau contenue dans un échantillon de sol, il est égal au rapport du volume de l'eau au volume des vides d'un sol. Il s'exprime en pourcentage. Le degré de saturation peut varier de 0 % (sol sec) à 100% (sol saturé). Il peut aussi être défini par la formule suivante :

$$Sr = \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \left(\frac{w}{e} \right) = \left(\frac{2,61}{1,00} \right) \left(\frac{2,04}{0,096} \right) = 55,46 \quad Sr = 55,46\%$$

Avec :

w : Teneur en eau ;

e : Indice des vides ;

ρ_s : Masse volumique sèche ;

ρ_w : Masse volumique de l'eau.

Tableau III.5. Détermination du degré de saturation. (D'après TERZAGHI).

Saturation(%)	Appréciation
100	Saturé
76– 99	Détrempé
51– 75	Mouillé
26– 50	Humide
1– 25	Légèrement humide
0	Sec

D'après les valeurs du tableau III.5, les débris de béton étudiés sont dans un état mouillé.

III.3.6. Porosité

La porosité est le rapport du volume des vides (V_v) au volume total (V). Elle peut s'exprimer en pourcentage ou sans dimension.

$$n = \frac{V_v}{V}$$

La porosité a une signification analogue à celle de l'indice des vides. Elles sont liées par la formule :

$$n = \frac{e}{(e + 1)} = 8,75\% \quad n = 0,087$$

Les résultats de tous les essais d'identification sont résumés dans le tableau qui suit :

Tableau III.6. Les résultats des essais d'identification

Caractéristique déterminée	Résultat moyen
Teneur en eau naturelle : w (%)	2.04
La masse volumique sèche ρ_d (g/cm ³)	2.38
La masse volumique humide ρ_h (g/cm ³)	2.42
La masse volumique des particules solide ρ_s (g/cm ³)	2.61
Indice des vides (%)	9.6
Degré de saturation S_r (%)	55.46
Porosité (%)	8.75

A partir de ces résultats, nous constatons que les débris de béton étudiés sont denses d'une teneur en eau, un indice des vides faibles et un degré de saturation un peu élevé.

III.4. PREPARATION DES DEBRIS DE BRIQUE

III.4.1. Concassage et tamisage des débris de brique

Les débris de brique sont transportés au laboratoire sous forme de blocs. Avant leur traitement, une étape de tri a été effectuée pour éliminer les impuretés telles que le plastique, les fils, le papier et la matière organique. Ensuite, ces blocs ont été brisés manuellement en petits fragments à l'aide d'un marteau, puis broyée par des moyens mécaniques selon la granulométrie désirée (0/2) représentant la fraction sableuse du matériau.



Figure III.8. Concassage et tamisage des débris de brique.

III.4.2. Caractéristiques physico-chimique des débris de brique

Les types d'argiles qui sont dans les briques cuites sont : les illitiques (couleur marron gris à rouge) les kaoliniques et les bravaistiques (couleur orange à rose), les éléments métalliques sont aussi trouvés dans la pâte argileuse. Ces éléments dits « réfractaires » le degré de fusion est très supérieur à celui de la température (800° à 1000°) des fours à brique, la silice (SiO₂) et de l'aluminium (AL₂O₃). Les déterminants de la couleur basique de la brique (les colorants) ce sont : (Manuel de sensibilisation, 2006)

- L'oxyde de fer.
- L'oxyde de titane.
- L'oxyde de manganèse.

Les fondants aussi ce sont à deux types :

- Les oxydes alcalins (oxyde de sodium et potassium).
- Les oxydes alcalino-terreux (chaux et magnésie).

La composition minéralogique de déchet de brique rouge a été déterminée par fluorescence X. Le tableau III.7 présente les résultats obtenus qui mettent en évidence des pourcentages élevés en silice et en alumine. (Aissa, 2016)

Tableau III.7. Composition minéralogique de déchets de briques. (Aissa, 2016).

Eléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P.F
Pourcentages (%)	6.06	66.52	14.20	5.45	2.35	0.73	2.09	0.73	1.00

Tableau III.8. Fiche technique des débris de brique (brique 12 trous).
(Safcergroup, 2019)

Type de Produit : Briques P 12 TROUS Dimension nominale: 300X150X200

Désignations	Résultats		Tolérances NF EN 7711- +A1/CN
	Mini	Max	
Planéité (mm)	0.22	1.25	< 5 mm
Rectitude (mm)	0.19	0.62	
Dimensions (mm)	Valeur Moyenne		± 3%
Longueur	297.6		
Largeur	150.1		
Hauteur	196.8		
Epaisseur des Parois:			
Exterieurs	7.7		
Cloisons	6.6		
Eclatements	0		Aucun cratère de Ømoy Supérieur à 10 mm pas plus de 3cratères par décimètre carré De Ømoy compris entre 5 et 10 mm
	0		
Taux initial D'absorption d'eau	0.2		≤ 2 (KG/m ² min)
Ecart	0.2		≤ 0.4 (Kg/m ² min)
Résistance à la Compression (N/mm ²)	Moy :	3.0	RC 28 Moy : 2.8

III.5. PREPARATION DES ECHANTILLONS

Les échantillons soumis aux essais mécaniques, ont été préparés en mélange de débris de béton et de débris de brique selon les proportions suivantes :

- Echantillon 1 : débris de béton seuls ;
- Echantillon 2 : Mélange de débris de béton + 5% de débris de brique ;
- Echantillon3 : Mélange de débris de béton + 10% de débris de brique ;

- Echantillon 4 : Mélange de débris de béton + 30% de débris de brique ;

Les mélanges sont formés de telle sorte à garder la même classe granulaire (0/20) correspondant à la courbe granulométrique présentée sur la figure III.9.

III.6. CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à l'identification des matériaux utilisés, mettant en lumière leurs caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques. Les résultats obtenus ont permis d'acquérir une compréhension approfondie de la nature de ces matériaux, ce qui est essentiel pour mieux comprendre et interpréter leur comportement mécanique sous divers types de sollicitations appliquées.

Dans le chapitre suivant, nous aborderons la première série d'essais mécaniques, à savoir les essais de compactage au Proctor modifié ainsi que les essais de portance CBR avant et après immersion.

CHAPITRE IV

COMPACTAGE ET PORTANCE

DES MATERIAUX ETUDIÉS

IV.1. INTRODUCTION

Les méthodes d'amélioration et de stabilisation des sols sont variées et incluent souvent les procédés suivants : le traitement chimique, l'injection ou le malaxage de chaux et de ciment, le traitement thermique, le traitement électrique, ainsi que le traitement mécanique, dont la densification ou le compactage. Parmi ces techniques, le compactage se distingue comme l'une des plus anciennes méthodes. Sa simplicité et sa maîtrise en font une pratique très fréquente et indispensable, notamment dans les travaux de construction de routes et de barrages.

L'essai CBR (California Bearing Ratio), qui évalue la portance des sols avant et après immersion, est directement lié au compactage. Cet essai est indispensable pour tous travaux routiers, car il permet de dimensionner les chaussées.

Dans ce chapitre, nous présenterons principalement les résultats des essais de compactage ainsi que ceux des essais CBR avant et après immersion.

IV.2. ESSAIS DE COMPACTAGE

IV. 2.1 Définition du compactage

Compacter un matériau, c'est réduire le volume des vides de ce matériau et réorganiser la structure des grains de manière à obtenir un assemblage plus stable. Cette opération qui s'appelle le compactage peut être obtenue par des sollicitations statiques (compactage statique), dynamiques (compactage dynamique), ou par vibrations (compactage in situ). L'opération de compactage conduit à une diminution des vides remplis d'air sans expulsion d'eau. C'est la différence fondamentale entre le compactage et la consolidation. (Degoutte, 2002)

IV. 2.2. Objectif du compactage

Il a pour but d'améliorer la capacité portante du sol par le resserrement des grains et la réduction du volume des vides existants.

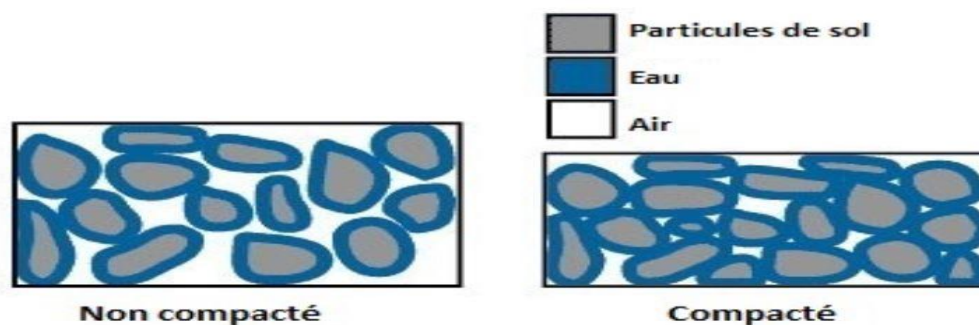


Figure IV.1. Différence de porosité entre un sol compacté et un sol non compacté (DeJong-Hughes, 2001).

IV.3. LES FACTEURS QUI INFLUENCENT LE COMPACTAGE

A partir de 1930, il est devenu nécessaire de mieux comprendre le phénomène de compactage et son influence sur les propriétés du sol afin de mieux contrôler le compactage et de développer les engins de compactage. C'est à l'ingénieur américain R. PROCTOR (1933) que l'on doit les premières études. (Djedid et al ,1998)

IV.3.1. Energie de compactage

Plus l'énergie de compactage est grande, plus la densité sèche maximale est grande, on obtient une meilleure imbrication des particules de terre, d'où une meilleure résistance au cisaillement et une étanchéité accrue. Pour des énergies de compactage de plus en plus grandes en prenant les terres avec leur teneur en eau optimale, qui donne un éventail de droite qui montrent que la cohésion c et l'angle de frottement interne ϕ augmentent avec l'énergie de compactage. POST et LONDE, dans leur livre sur les barrages en terre compactée, signalent que ces conclusions ne s'entendent que pour les résistances de cisaillement supérieure à celle des terres sableuses, tout au moins pour de très fortes énergies de compactage. (Varlet, 1966)

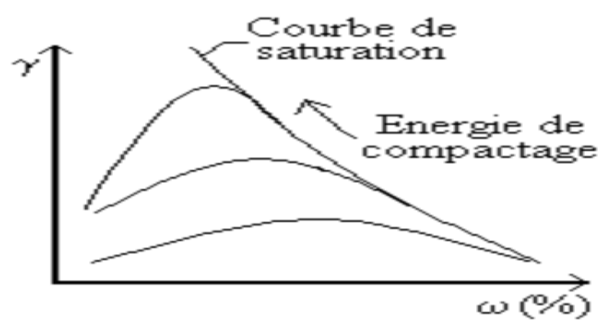


Figure IV.2. Influence de l'énergie de compactage (Bekkouche et Benyelles, 2016)

IV.3.2. Teneur en eau

La teneur en eau joue un rôle crucial dans la conduite du compactage. En fonction de sa valeur, les résultats obtenus peuvent varier en efficacité pour une même quantité d'énergie appliquée. Lors d'un essai de compactage, si on fait varier la teneur en eau de l'échantillon et qu'on trace la variation de la densité sèche (γ_d) en fonction de la teneur en eau (w), on obtient une courbe en forme de cloche. Cette forme est due à l'effet des forces capillaires qui offrent une résistance au réarrangement des grains. (Varlet, 1966)



Faible teneur en eau
Frottements internes élevés
Faible densité

Teneur en eau optimale
meilleur compactage
densité maximale

Teneur en eau élevée
pression élevée de l'eau
faible densité

Figure IV.3. Influence de la teneur en eau sur le compactage. (Varlet, 1966)

IV.3.3. Nature du sol

L'allure des courbes de compactage varie avec la nature du sol, très aplatie pour une argile plastique. Lorsque la courbe est très aplatie. Le compactage est influencé par la teneur en eau. Un sol dont le compactage sera fortement influencé par la teneur en eau présentera une courbe de compactage avec un maximum très marqué. A l'inverse, un sol dont la teneur en eau influence peu le compactage sera caractérisé par une courbe de compactage très plate. Les sols de ce type font généralement les meilleurs remblais

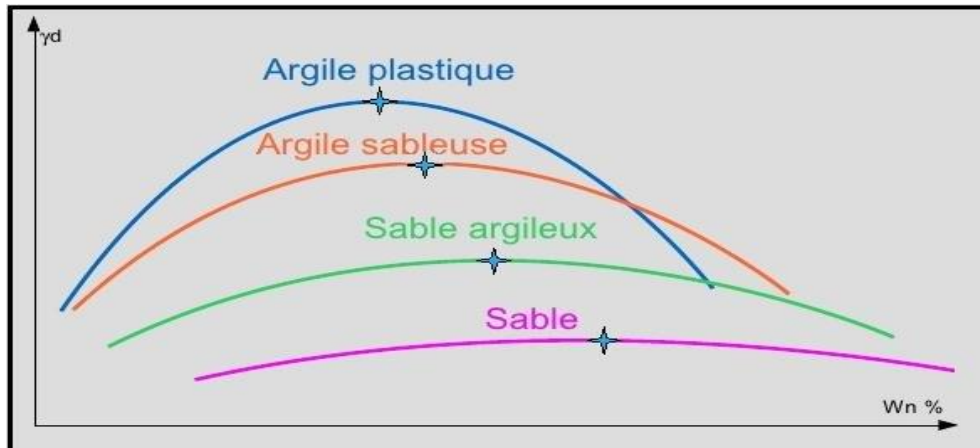


Figure IV.4. Influence de la nature du sol sur la courbe Proctor. (Hadji, 2020)

IV.4. Les essais de compactage au laboratoire

Les essais de compactage réalisés en laboratoire permettent de déterminer la densité sèche maximale pour une énergie de compactage spécifique. En comparant cette valeur obtenue en laboratoire avec la densité sèche mesurée sur le chantier après les opérations de compactage, on peut vérifier si le compactage a été suffisant et ainsi s'assurer de la qualité des travaux. (Robitaille et Tremblay, 1997)

Les principaux types d'essais de compactage en laboratoire pratiqués sont les suivants :

- Les essais Proctor ;
- L'essai à la table vibrante.

IV.4.1. Essai Proctor normal (NF P 94-093)

L'essai consiste à mesurer le poids volumique sec d'un sol disposé en trois couches dans un moule de volume connu, chaque couche étant compactée avec un marteau tombant d'une hauteur libre.

On répète l'essai plusieurs fois, en faisant varier la teneur en eau du sol, puis on trace la courbe de compactage.

IV.4.2. Essai Proctor modifié (NF P 94-093)

L'essai est réalisé en cinq couches de plus ou moins 2,5 cm d'épaisseur qui reçoivent chacune 25 coups pour le moule Proctor et 55 coups pour le moule CBR.

On répète l'essai plusieurs fois, en faisant varier la teneur en eau du sol, puis on trace la courbe de compactage.

a. Matériel utilisé

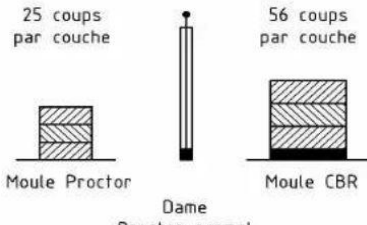
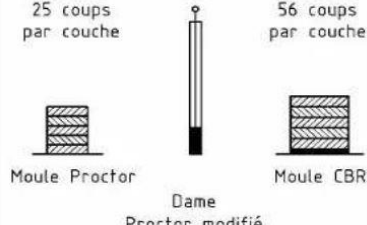
- Moule Proctor ;
- D'une dame Proctor ;
- D'une règle à araser ;
- D'une balance ;
- D'une étuve ;
- D'une éprouvette graduée.



Figure IV.5. Appareillage de l'essai Proctor modifié

b. Mode opératoire

Tableau IV.1. Modalités d'exécution des essais Proctor normal et modifié

Nature de l'essai	Caractéristiques de l'essai	Moule A	Moule B	Schéma récapitulatif
Essai Proctor Normal	Masse de la dame	2 500 g	2 500 g	3 couches, à raison de: 25 coups par couche 56 coups par couche 
	Diamètre du mouton	50 mm	50 mm	
	Hauteur de chute	305 mm	305 mm	
	Nombre de couches	3	3	
	Nombre de coups par couche	25	56	
Essai Proctor Modifié	Masse de la dame	4 500 g	4 500 g	5 couches, à raison de: 25 coups par couche 56 coups par couche 
	Diamètre du mouton	50 mm	50 mm	
	Hauteur de chute	457 mm	457 mm	
	Nombre de couches	5	5	
	Nombre de coups par couche	25	56	

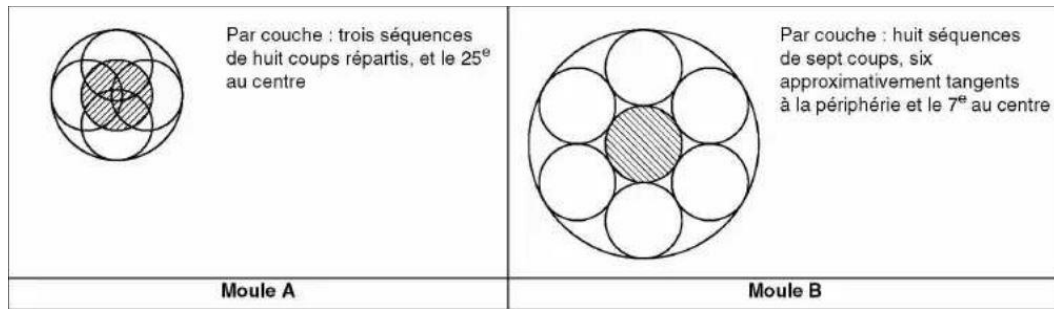


Figure IV.6. Schéma de principe de la répartition des coups de dame sur une couche



Figure IV.7. Préparation du matériau

IV.5. ESSAIS REALISES

Une série d'essai Proctor modifié a été réalisée dans la présente étude sur des échantillons de débris de béton avec différentes proportions des débris de brique, à savoir

- ✓ Débris de béton seuls.
- ✓ Débris de béton + 5% de débris de brique.
- ✓ Débris de béton + 10% de débris de brique.
- ✓ Débris de béton + 30% de débris de brique.



Figure IV.8. Préparation du mélange débris de béton et débris de brique

IV.5.1. Expression des résultats

On portera chaque mesure de la densité sèche sur un graphe en fonction de la teneur en eau correspondante. Les résultats obtenus sont présentés au fur et à mesure sous forme de tableaux et de courbes

- **Débris de béton seuls**

Tableau IV.2. Résultats de l'essai Proctor modifié pour les débris de béton seuls.

Essais	Teneur en eau w (%)	Densité sèche (γ_d/γ_w)
Echantillon N°1	11	1,94
Echantillon N°2	11,71	1,99
Echantillon N°3	12,25	1,97
Echantillon N °4	12,6	1,94

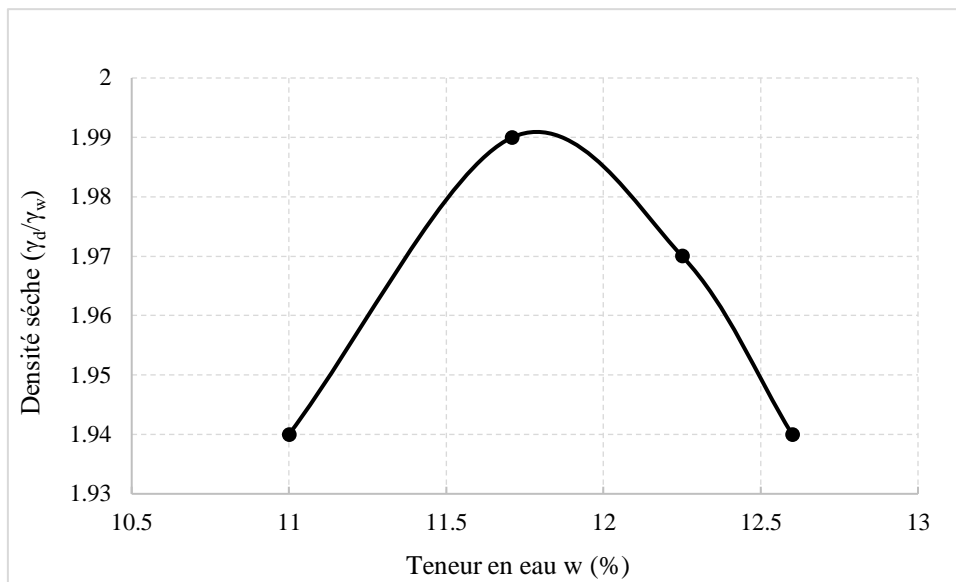


Figure IV.9. Courbe Proctor pour les débris de béton seuls.

- **Mélange de débris de béton + 5% de débris de brique**

Tableau IV.3. Résultats de compactage des débris de béton + 5% de débris de brique

Essais	Teneur en eau (w%)	Densité sèche (γ_d/γ_w)
Echantillon N°1	9,22	1,97
Echantillon N°2	9,6	2
Echantillon N°3	10,3	2,05
Echantillon N °4	11	2,01
Echantillon N°5	11,35	1,98

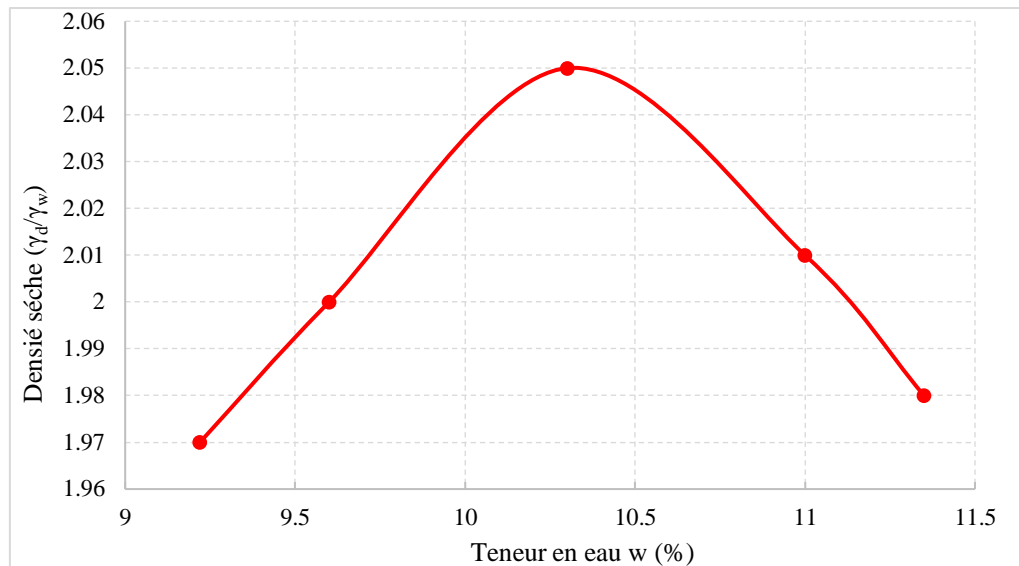


Figure IV.10. Courbe Proctor pour le mélange de débris de béton + 5% de débris de brique

- **Mélange de débris de béton + 10% de débris de brique**

Tableau IV.4. Résultats de compactage des débris de béton et 10% de débris de brique

Essais	Teneur en eau (w%)	Densité sèche (γ _d /γ _w)
Echantillon N°1	11	1,9
Echantillon N°2	11,45	1,92
Echantillon N°3	12,12	1,94
Echantillon N °4	12,47	1,93
Echantillon N°5	12,9	1,915

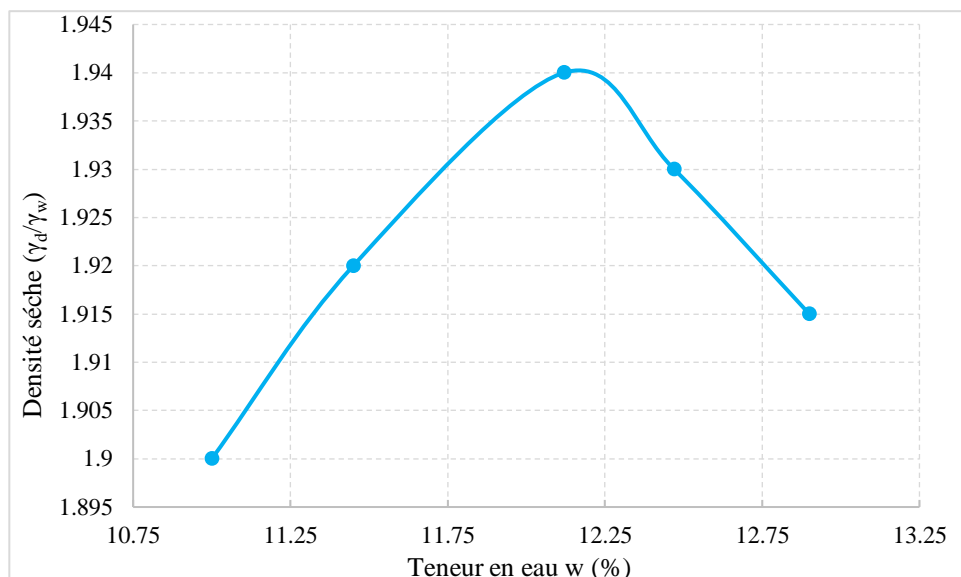


Figure IV.11. Courbe Proctor pour le mélange de débris de béton et 10% de débris de brique

• **Mélange de débris de béton + 30% de débris de brique**

Tableau IV.5. Résultats de compactage des débris de béton et 30% de débris de brique

Essais	Teneur en eau (w%)	Densité sèche (γ_d/γ_w)
Echantillon N°1	9,4	1,895
Echantillon N°2	9,9	1,905
Echantillon N°3	10,79	1,92
Echantillon N °4	11,77	1,9

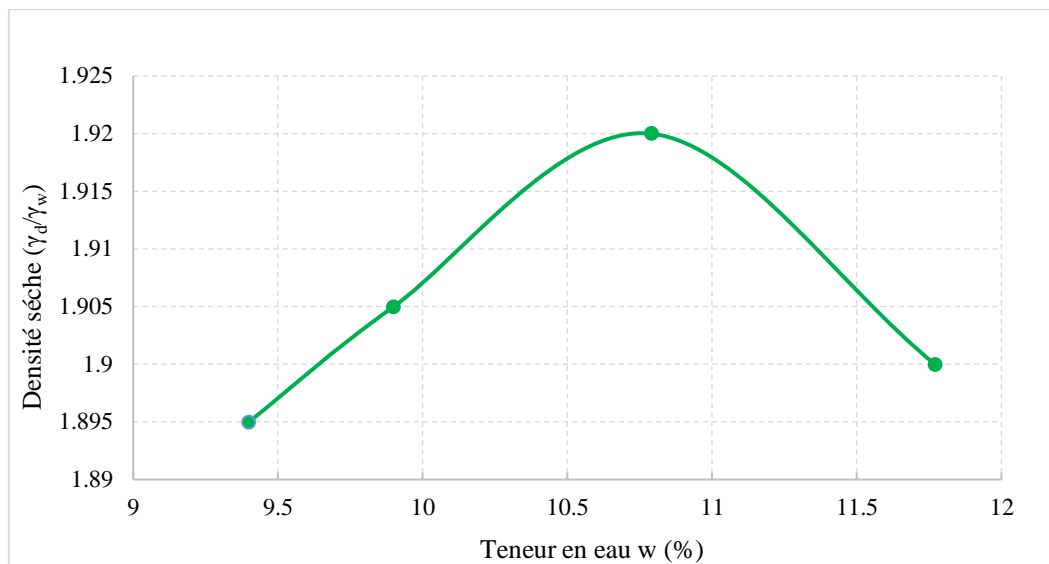


Figure IV.12. Courbe Proctor pour le mélange de débris de béton et 30% de débris de brique

• **Courbes comparatives de tous les échantillons**

Les courbes Proctor obtenues pour les différents mélanges sont regroupées sur la figure ci-dessous.

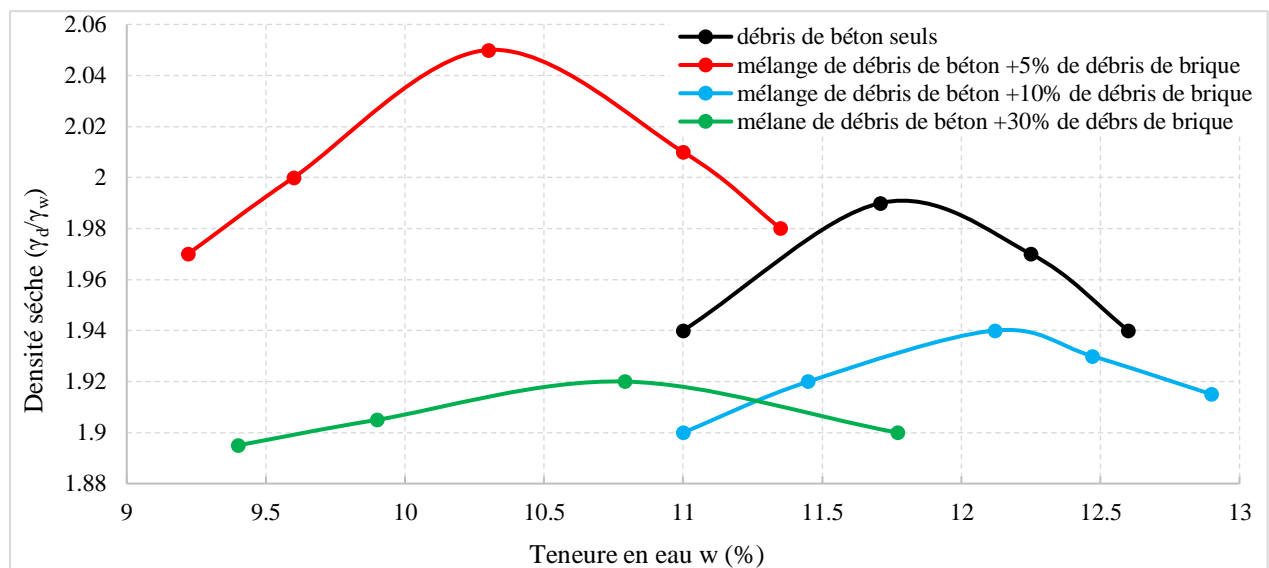


Figure IV.13. Courbes comparatives de tous les échantillons.

En se référant à la (figure IV.13), nous constatons que les courbes Proctor obtenues montrent une allure en forme de cloche, elles présentent généralement un pic plus ou moins apparent présentant la teneur en eau optimale (w_{opt}) appelée "optimum Proctor". Ce point représente la teneur en eau optimale nécessaire pour avoir la densité sèche maximale du matériau utilisé.

Avec l'ajout des débris de briques (5%, 10% et 30 %), on constate que les courbes deviennent de plus en plus aplaties.

Ceci, permet de conclure que l'ajout des débris de brique rend les échantillons moins sensibles à l'eau.

Tableau IV.6. Récapitulatif des teneurs en eau optimales et des densités sèches maximales.

Echantillons	Teneurs en eau optimales w_{opt} (%)	Densités sèches maximales (γ_d/γ_w max)
Débris de béton seuls	11,8	1,992
Débris de béton + 5% de débris de brique	10,25	2,05
Débris de béton + 10% de débris de brique	12,2	1,94
Débris de béton + 30% de débris de brique	10,75	1,92

- **Densités sèches maximales pour les mélanges de débris de béton + % de débris de briques**

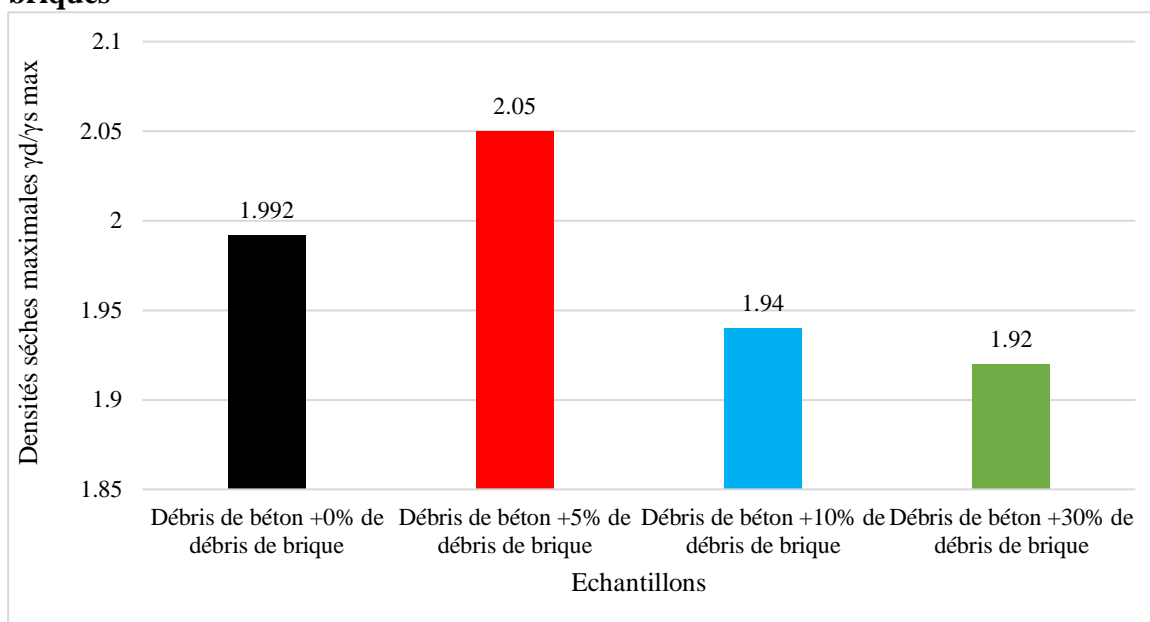


Figure IV.14. Évolutions des densités sèches maximales en fonction du pourcentage de débris de briques.

Les résultats présentés sur la figure (IV.14) relatifs au compactage des différents échantillons (mélanges), permettent de constater que les densités sèches maximales s'améliorent avec l'ajout de 5% de débris de brique. Au-delà de cette proportion (5%), les densités sèches maximales diminuent de plus en plus avec l'ajout des débris de brique. Toutefois, ces densités sont supérieures à 1.90 pour tous les mélanges. Ceci vérifie amplement les valeurs de référence

exigées par les normes en vigueur. Cependant, l'utilisation de tels mélanges peut être réalisée avec un traitement éventuel pour les couches de chaussées, notamment de moyen à fort trafic. Ils peuvent être utilisés par contre en l'état, dans d'autres projets moins importants (remblais, chaussées communales à faible trafic léger, ...).

La proportion de 5% pourrait combler efficacement les vides entre les particules de béton, améliorant ainsi la compacité et la résistance du mélange. À des pourcentages plus élevés (10% et 30%), les débris de brique pourraient perturber cette densité optimale, entraînant une diminution de la densité globale.

- **Teneurs en eau optimales pour les mélanges de débris de béton + % de débris de briques**

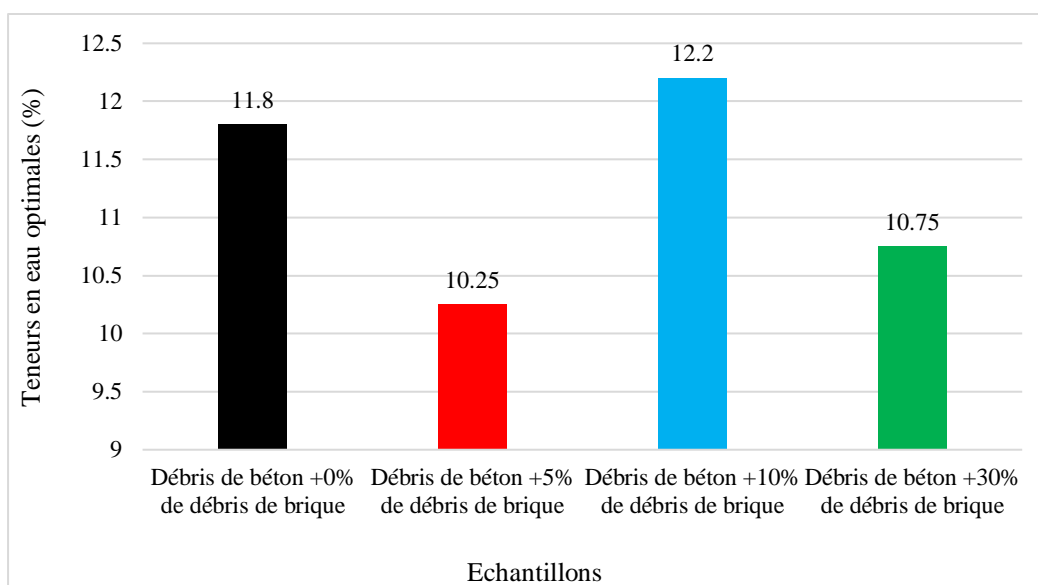


Figure IV.15. Évolutions des teneurs en eau en fonction du pourcentage de débris de briques.

D'après la figure (IV.15), on remarque que les teneurs en eau optimales varient d'une manière aléatoire pour les différents mélanges. Ceci peut être dû à l'influence de la nature de la brique après passage au four à de fortes températures lors de sa fabrication.

En se basant sur l'ensemble des résultats obtenus aux essais Proctor, nous pouvons conclure que les mélanges étudiés ont présenté des caractéristiques intéressantes au compactage, notamment le mélange à 5% de débris de brique (densité supérieure à 2). Ils peuvent être ainsi proposés pour une utilisation dans les couches inférieures de chaussées notamment sous de faibles à moyens trafics.

IV.6. ESSAI DE PORTANCE CBR (California Bearing Ratio) (NF P 94-078)

L'essai CBR est l'un des principaux essais routiers, utilisés pour le dimensionnement des chaussées, il fut entrepris à l'origine par le département des routes de l'état de Californie peu avant la 2^{ème} guerre mondiale. Le corps des ingénieurs de l'armée américaine adopta cette méthode pendant la guerre puis la développa et l'améliora. Plus tard, elle fut utilisée pratiquement par tous les pays du monde.

IV.6.1. But de l'essai

L'essai CBR a pour but, d'évaluer la portance ou la résistance au poinçonnement d'un sol ou d'un matériau utilisé dans la construction des ouvrages en terre ou des assises de chaussées. En d'autres termes, il sert à évaluer l'aptitude des matériaux à supporter les charges verticales ayant tendance à les poinçonner. Cette caractéristique est indispensable dans les travaux routiers, en particulier pour la confection des remblais et les couches de forme, dans lesquels où sont admises que de faibles déformations.

L'indice CBR permet donc de :

- Établir une classification des sols GTR (Guide des Terrassements Routier) ;
- Évaluer la traficabilité des engins de terrassement ;
- Dimensionner les couches de fondation nécessaires à la construction d'une chaussée en fonction du sol sous-jacent, du trafic et des charges par essieu et des conditions hydriques futures que subira la route (l'épaisseur des couches diminue lorsque l'indice CBR augmente).

IV.6.2. Principe de l'essai (NF P 94-078)

Le principe général de l'essai consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette de matériau. Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué deux enfoncements conventionnels sont respectivement rapportées aux valeurs des forces observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements.

On relève les valeurs des forces correspondant à des enfoncements de 2.5 et 5 mm. On rapporte ces valeurs à celles obtenues sur un matériau de référence pour en déduire la valeur de l'indice portant recherché.

L'essai CBR permet la détermination de trois types d'indices CBR, à savoir :

- L'indice Portant Immédiat (IPI), pour évaluer l'aptitude d'un sol ou d'un matériau à supporter la circulation des engins pendant la réalisation du chantier. Dans ce cas, le matériau est compacté à sa teneur en eau naturelle ou dans la plage de teneurs en eau dans laquelle est susceptible d'évoluer. L'échantillon est compacté à l'énergie Proctor normale dans le cas d'un sol et à l'énergie Proctor modifié dans le cas d'un matériau d'assise de chaussée.
- L'indice CBR immédiat (CBR immédiat), c'est pour évaluer la portance d'un sol ou d'un matériau à supporter les surcharges appliquées (par le trafic) sur la chaussée. L'échantillon dans ce cas est généralement humidifié à la teneur en eau optimale déterminée au Proctor normal et ensuite compacté à l'énergie Proctor modifié.
- L'indice CBR après immersion (CBR immersion), c'est pour évaluer la portance d'un sol ou d'un matériau à supporter les surcharges appliquées (par le trafic) sur la chaussée dans les plus mauvaises conditions hygrométriques (présence d'eau, climat agressif). Dans ce cas le matériau est compacté à plusieurs teneurs en eau, puis immergé dans l'eau pendant 4 jours, 96 heures (cas général). Toutefois, la durée d'immersion peut être diminuée ou augmentée selon les conditions climatiques réelles auxquelles est soumise la chaussée à réaliser.

L'indice CBR est par convention, la plus grande des deux valeurs suivantes :

- $I(2,5) = \frac{\text{force de pénétration à 2,5 mm (KN)} \times 100}{13,35}$

- $I(5) = \frac{\text{force de pénétration à 5 mm (KN)} \times 100}{19,93}$

La capacité portante du sol est d'autant meilleure que l'indice CBR est plus élevé. Dans le cas de l'indice CBR après immersion, est calculé le gonflement linéaire relatif G :

$$G = \left(\frac{\Delta h}{H} \right) \times 100$$

Avec :

Δh : variation de hauteur mesurée (mm) et H : hauteur initiale de l'éprouvette, soit 116 mm.

IV.6.3. Matériels utilisés

- **Matériels de confection des éprouvettes**
 - Le moule CBR ;
 - Les dames ou machine de compactage Proctor normal et modifié ;
 - L'ensemble des accessoires (plaque de base, rehausse, disque d'espacement, règle araser) ;
 - Le matériel d'usage courant (balance, étuve, bacs...).
- **L'ensemble pour CBR immersion (NF P 94-078)**
 - Plateau de gonflement.
 - Support comparateur.
 - Anneau de surcharge rond (2,3kg).
 - Anneau de surcharge fendu (2,3kg).
 - Comparateur 30mm/0,1mm.
 - Bac d'immersion.



Figure IV.16. Appareillage pour CBR immersion

- **Matériels de poinçonnement**

Selon la norme NF P 94-078, il comprend une presse d'une capacité efficace d'au moins 50 kN et possédant une course d'au moins 10 mm. Cette presse doit être équipée :

- D'un poinçon cylindrique en acier de $49,6 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ de diamètre, soit une section circulaire de $19,32 \text{ cm}^2 \pm 0,08 \text{ cm}^2$, et d'une dizaine de centimètres de longueur minimum ;
- D'un dispositif permettant l'enfoncement du poinçon dans le matériau à une vitesse de $1,27 \text{ mm/min} \pm 0,1 \text{ mm/min}$;
- D'un dispositif de mesure de l'enfoncement du poinçon garantissant la mesure avec une incertitude absolue maximum de $0,1 \text{ mm}$;
- D'un dispositif de mesure des efforts de poinçonnement. La capacité de ce dispositif doit être adaptée à l'effort mesuré. Sa précision doit garantir la mesure avec une incertitude relative maximum de 1% .

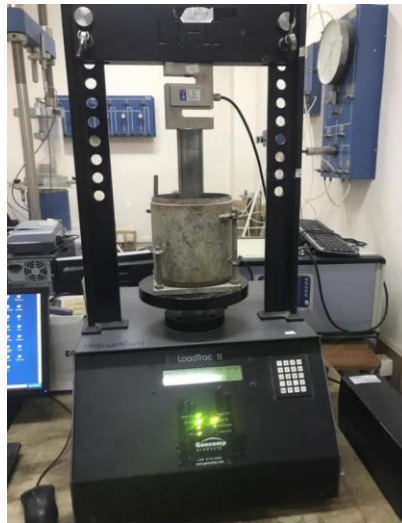


Figure IV.17. La machine de poinçonnement LoadTrac II (LGEA)

IV.6.4. Mode opératoire (NF P 94-078)

Les échantillons sont humidifiés à leurs teneurs en eau optimales de compactage reproduisant leur état réel de mise en œuvre, et sont soumis ensuite aux essais CBR avant et après immersion selon la norme NF P 94-078 permettant d'étudier respectivement leur portance immédiate (IPI) et leur portance après immersion (CBRimm).

IV.6.4.1. Confection des éprouvettes

Il convient tout d'abord de choisir les différents ensembles de conditions d'état du sol (masse volumique sèche, teneur en eau, état de saturation), pour lesquels on veut réaliser l'essai. Lorsque la dimension maximale des éléments du sol à étudier est inférieure à 20 mm , l'intégralité du sol est soumise à l'essai. Si le sol contient des éléments supérieurs à 20 mm dans une proportion inférieure à 30% , ils sont éliminés par tamisage. L'essai est alors réalisé sur la fraction restante.

Pour chaque ensemble de conditions d'état considéré, il convient de préparer, $5,5 \text{ kg}$ minimum de matériau dans le cas où l'on recherche l'indice CBR immédiat ou l'IPI et 7 kg minimum de matériau dans le cas où l'on recherche l'indice CBR immersion. On procède ensuite à la préparation du sol et au compactage dans les moules suivant les modalités décrites dans la

norme NF P 94-093. Dans le cas où l'on détermine l'indice CBR immersion, la teneur en eau de confection de l'éprouvette est déterminée à partir du surplus de matériau, selon une des méthodes normalisées.

Le moule contenant l'éprouvette est ensuite désolidarisé de sa plaque de base, retourné pour que la face supérieure de l'éprouvette se retrouve en contact avec l'embase. Celle-ci est alors à nouveau solidarisée avec le moule. Procéder à l'extraction du disque d'espacement puis à l'exécution du poinçonnement ou à la mise en immersion selon l'indice recherché.

IV.6.4.2. Exécution du poinçonnement

Les modalités d'exécution du poinçonnement diffèrent selon que l'on détermine l'IPI, l'I.CBR immédiat ou l'I.CBR immersion.

- Si l'objet de l'essai est la détermination de l'IPI, placer l'ensemble embase, moule, éprouvette sur la presse, en position centrée par rapport au piston de poinçonnement et procéder au poinçonnement de la manière suivante : mettre en contact la surface supérieure de l'éprouvette avec le piston ; initialiser les dispositifs de mesure des forces et des enfoncements ; exécuter le poinçonnement en maintenant la vitesse de pénétration à $1,27 \text{ mm/min} \pm 0,1 \text{ mm/min}$; établir la courbe effort-déformation correspondant, au moins, aux enfoncements de 1,25 mm ; 2 mm; 2,5 mm; 5 mm; 7,5 mm et 10 mm; déterminer la teneur en eau de l'éprouvette selon une des méthodes normalisées.
- Si l'objet de l'essai est la détermination de l'indice CBR immédiat, interposer deux surcharges dans le volume libéré par le disque d'espacement. S'il est prévu que la contrainte apportée par la chaussée sur le sol soit supérieure aux 4,6 kg des surcharges ainsi constituées, il y a lieu d'ajouter autant de surcharges que nécessaire. L'ensemble moule plaque de base et surcharges est alors posé sur la presse. Exécuter ensuite le poinçonnement comme indiqué précédemment.
- Si l'objet de l'essai est la détermination de l'indice CBR immersion : positionner le disque de gonflement sur l'éprouvette avant de mettre en place les surcharges comme indiqué précédemment ; mettre en place et initialiser le dispositif de mesure de gonflement ; immerger l'ensemble de sorte que l'éprouvette soit recouverte par une hauteur d'eau d'au moins 20 mm et qu'une lame d'eau d'au moins 10 mm de hauteur soit présente sous le moule. Après quatre jours d'immersion ($\pm 2 \text{ h}$), relever la valeur de gonflement total atteint. Retirer le moule et l'éprouvette du bac à immersion et après égouttage, exécuter le poinçonnement comme indiqué précédemment.

IV.7. EXPRESSION DES RESULTATS

Une série d'essais CBR a été réalisée dans la présente étude sur des échantillons des débris de béton et de débris de brique, afin de déterminer les indices portant immédiats (IPI) et les indices CBR après immersion.

Plusieurs échantillons ont été préparés, à savoir :

- Débris de béton seuls ;

- Mélange de débris de béton + 5 % de débris de brique ;
- Mélange de débris de béton + 10% de débris de brique ;
- Mélange de débris de béton + 30% de débris de brique.

✓ **CBR immédiat**

- Débris de béton seuls

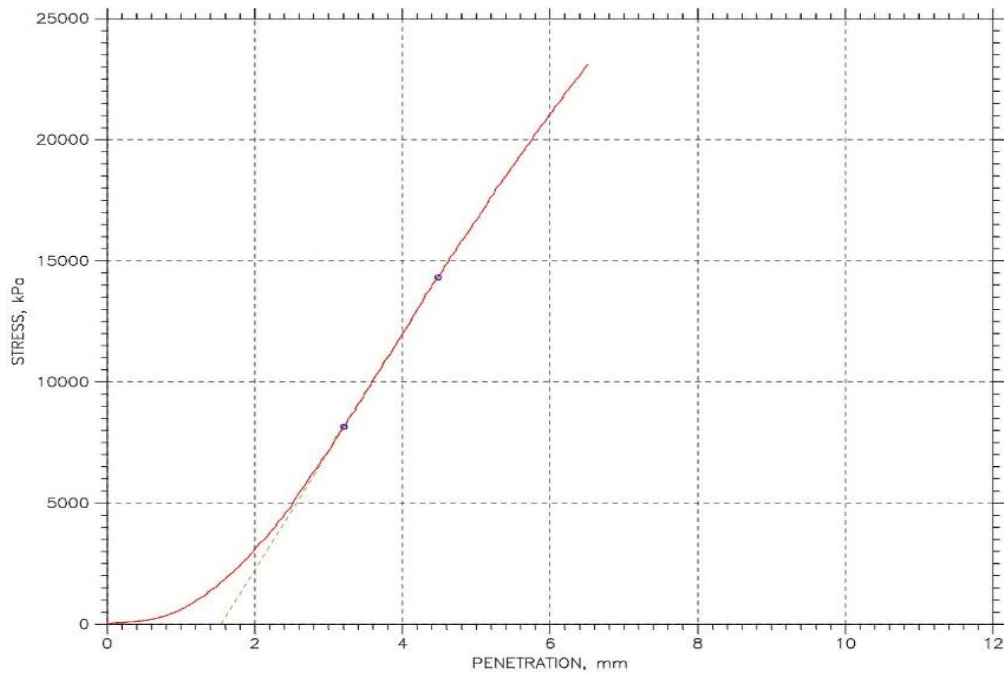


Figure IV.18. Courbe enfoncements-forces des débris de béton seuls (CBR immédiat)

- Débris de béton + 5% de débris de brique

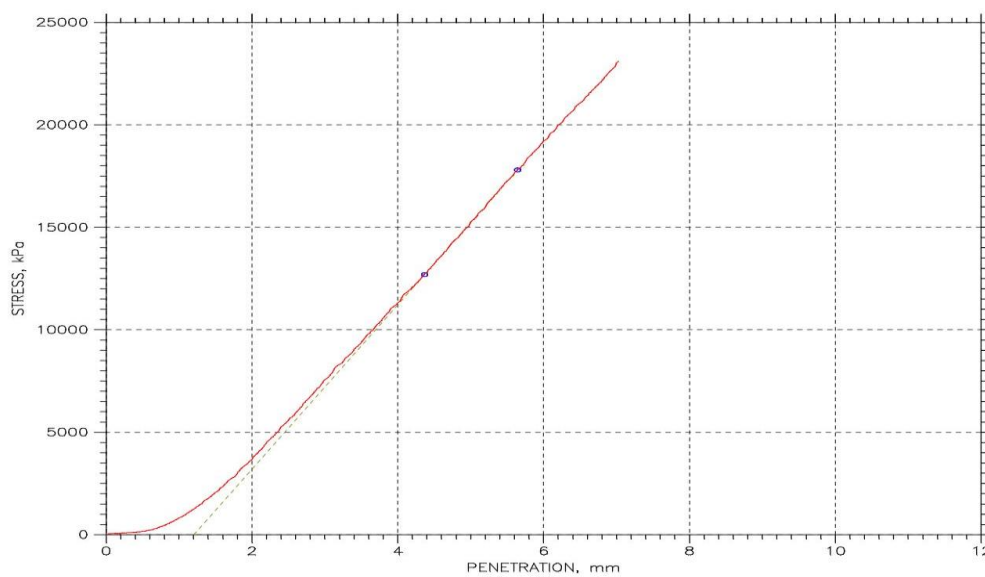


Figure IV.19. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + 5% de débris de brique (CBR immédiat)

- Débris de béton + 10% de débris de brique

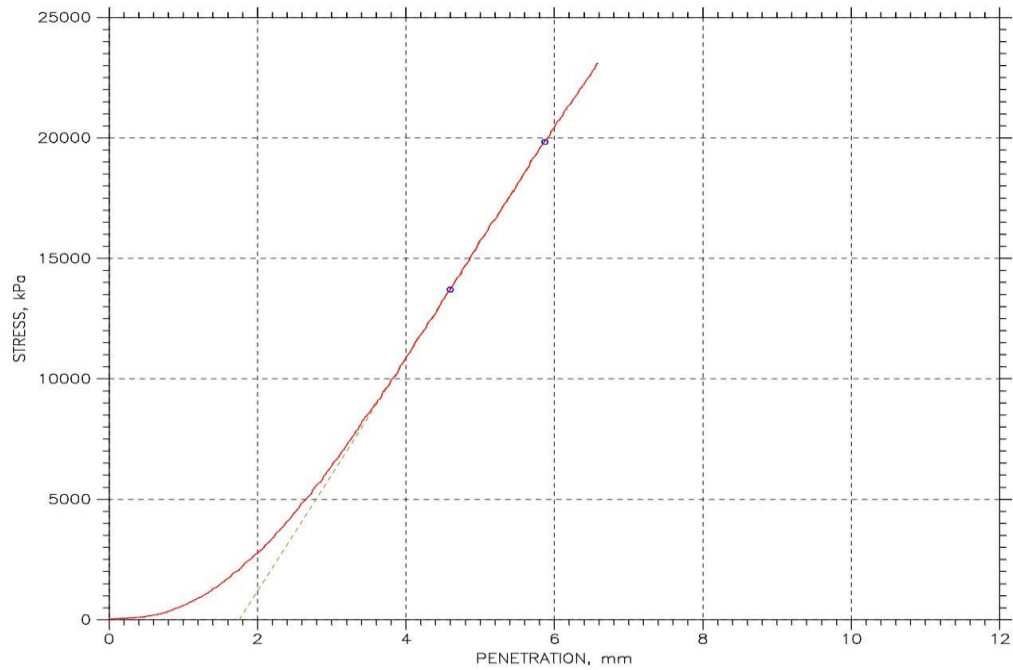


Figure IV.20. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + 10% de débris de brique (CBR immédiat)

- Débris de béton + 30% de débris de brique

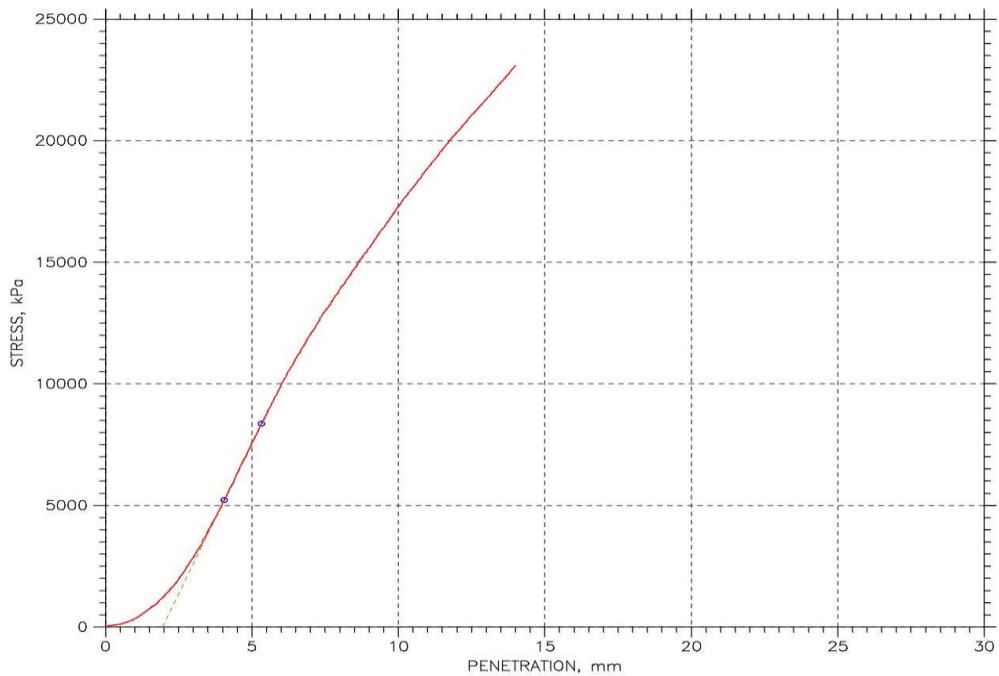


Figure IV.21. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + 30% de débris de brique (CBR immédiat)

Tableau IV.7. Résultats des essais CBR immédiat

Echantillons	Indice CBR immédiat (CBR)		
	I(2,5)	I(5)	CBR (%)
Débris de béton seuls	179	N/A	N/A
Débris de béton +5% de débris de brique	150	196	159
Débris de béton +10% de débris de brique	179	146	146
Débris de béton +30% de débris de brique	92	117	117

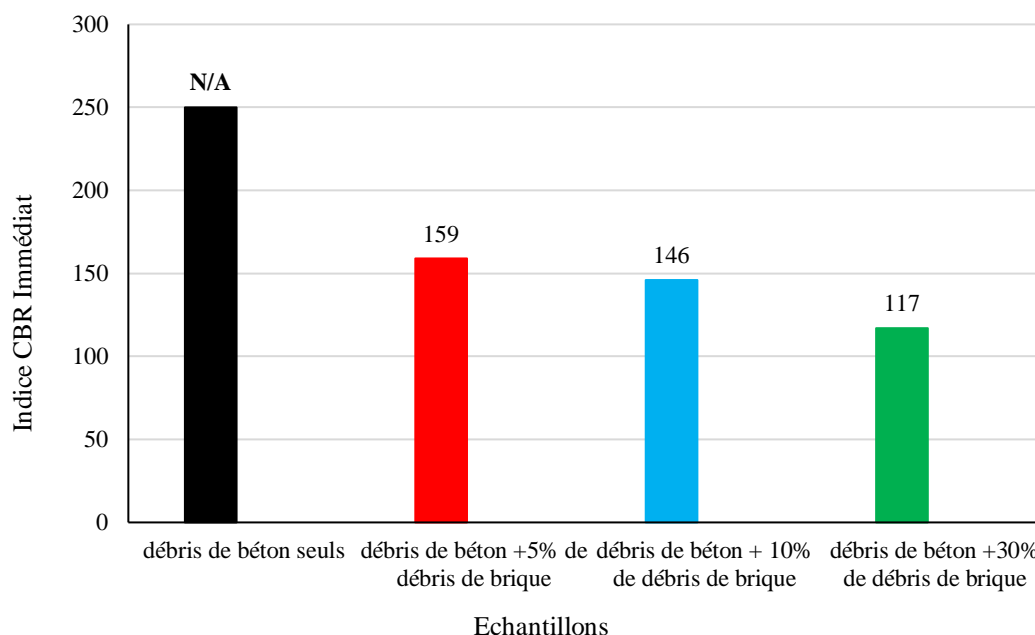


Figure IV.22. Evolution des indices CBR immédiat en fonction de la teneur en débris de brique.

Les résultats des essais de portance CBR réalisés avant immersion présentés dans le tableau IV.6 et illustrés sur les figures IV.18, IV.19, IV.20 et la figure IV.21, permettent de constater que la portance des mélanges diminue de plus en plus avec l'ajout des débris de brique. Toutefois, ces portances sont toutes supérieures à 80, seuil exigé par les normes et les entreprises locales des travaux routiers.

Particulièrement, les débris de béton seuls ont développé une portance très élevée (mentionnée N/A) dépassant la capacité maximale de la presse CBR disponible dans notre laboratoire.

En se basant sur ces résultats, on peut dire que leur utilisation en couches inférieures de chaussées est fortement envisageable.

- ✓ **CBR immersion**
- Débris de béton seuls

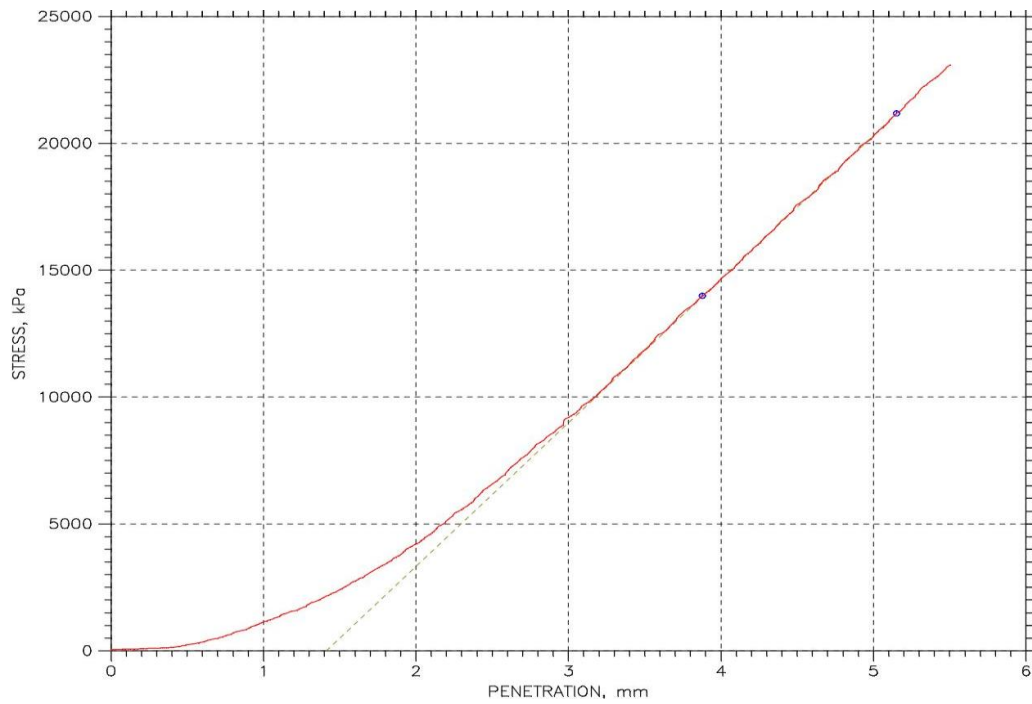


Figure IV.23. Courbe enfoncements-forces de débris de béton seul (CBR immersion)

- Débris de béton + 5% de débris de brique

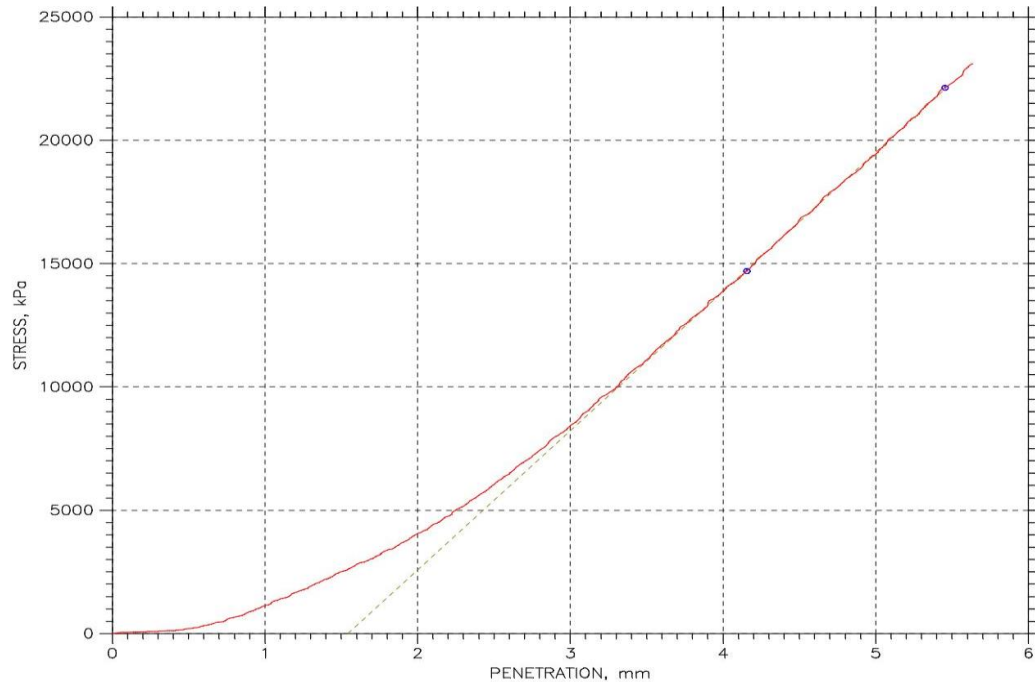


Figure IV.24. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + 5% de débris de brique (CBR immersion)

- Débris de béton +10% de débris de brique

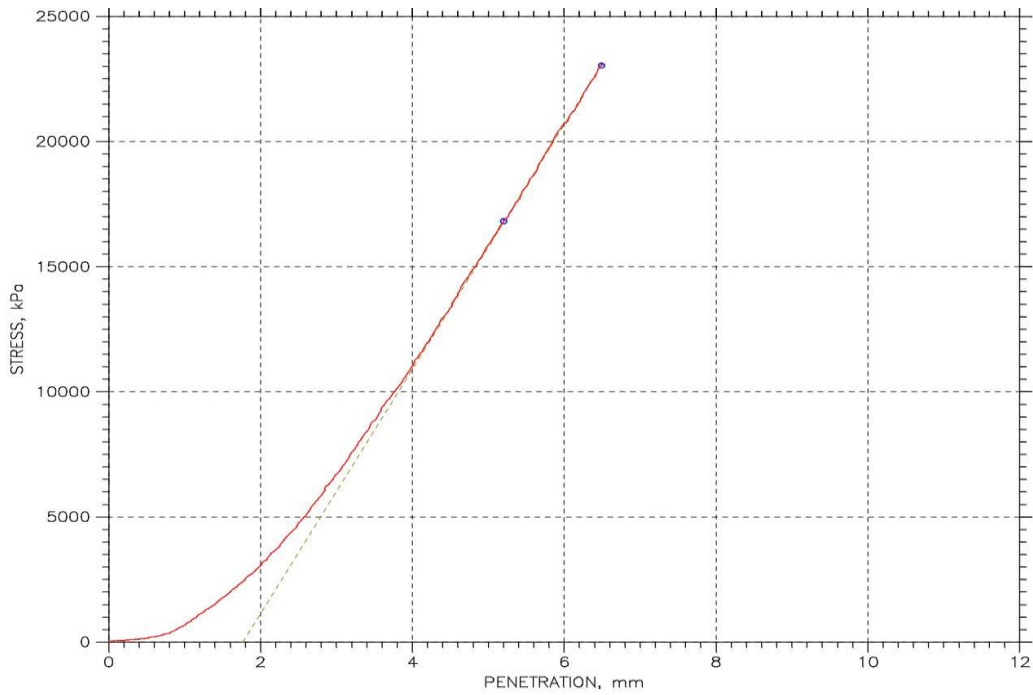


Figure IV.25. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + 10% de débris de brique (CBR immersion)

- Débris de béton +30% de débris de brique

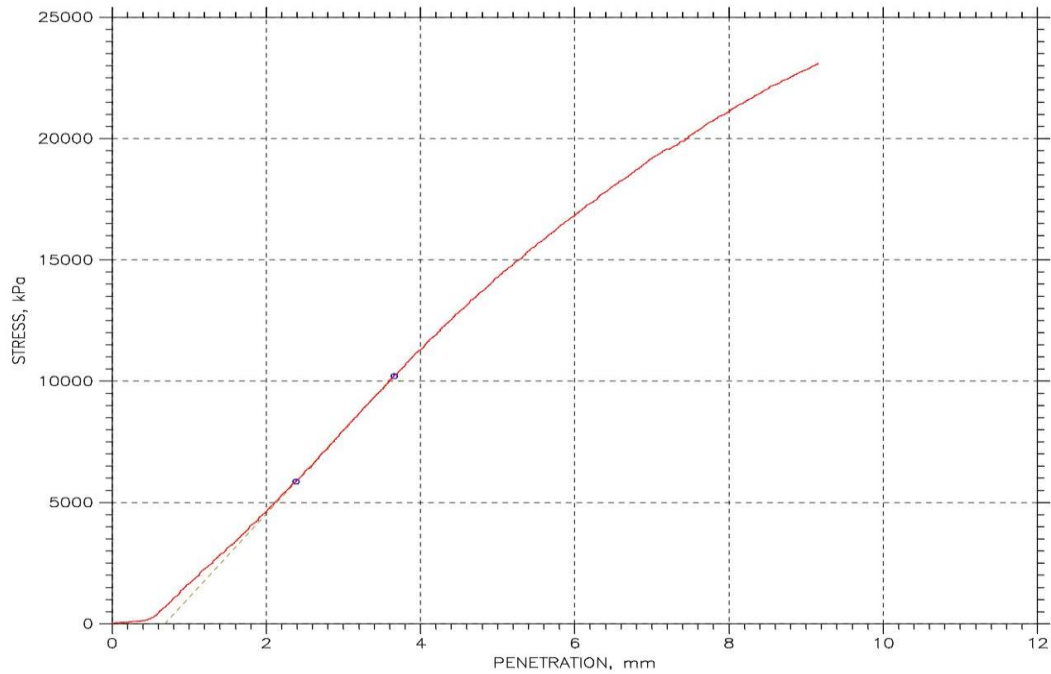


Figure IV.26. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + 30% de débris de brique (CBR immersion)

Tableau IV.8. Résultats des essais CBR immersion (CBRimm)

Echantillons	Indice CBR immersion		
	I(2,5)	I(5)	CBRimm (%)
Débris de béton seuls	208	N/A	N/A
Débris de béton +5% de débris de brique	207	N/A	N/A
Débris de béton +10% de débris de brique	181	N/A	N/A
Débris de béton +30% de débris de brique	127	157	157

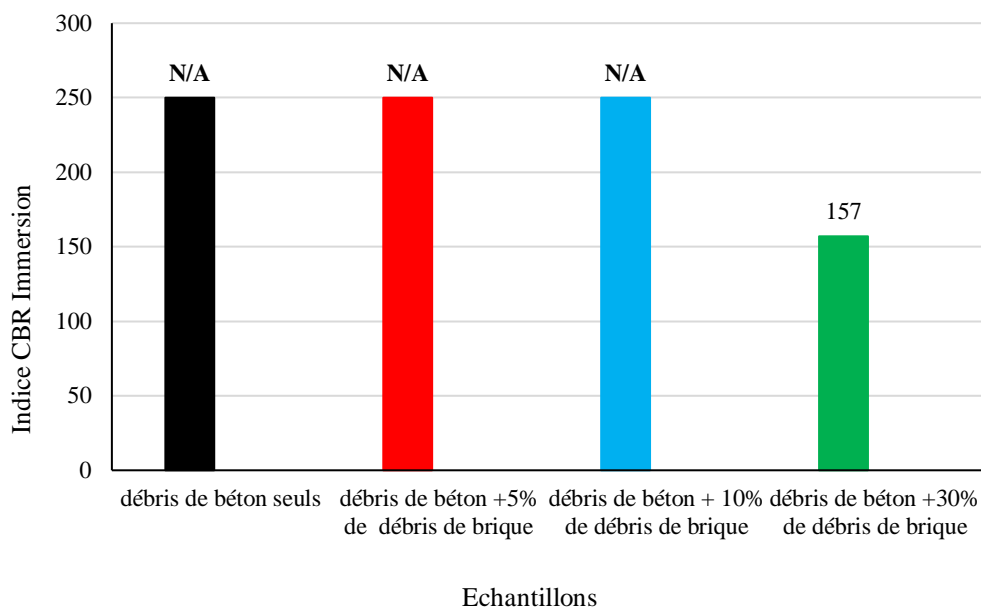


Figure IV.27. Evolution des indices CBR après immersion en fonction de la teneur en débris de brique.

Les résultats des essais CBR réalisés après immersion présentés sur la figure IV.27, montre que les mélanges reconstitués des débris de béton et de briques dont la proportion est inférieure à 10% (de brique) développent des portances très élevées en contact avec l'eau (mentionnée N/A) dépassant la capacité maximale de la presse CBR.

Au-delà de cette teneur en brique, notamment à 30% de débris de brique, les mélanges perdent sensiblement de leur portance après immersion. La fraction de brique après immersion de 96 heures dans l'eau rend les mélanges moins résistants au poinçonnement. Ceci peut être dû au fait que la brique est fabriquée à base d'argile.

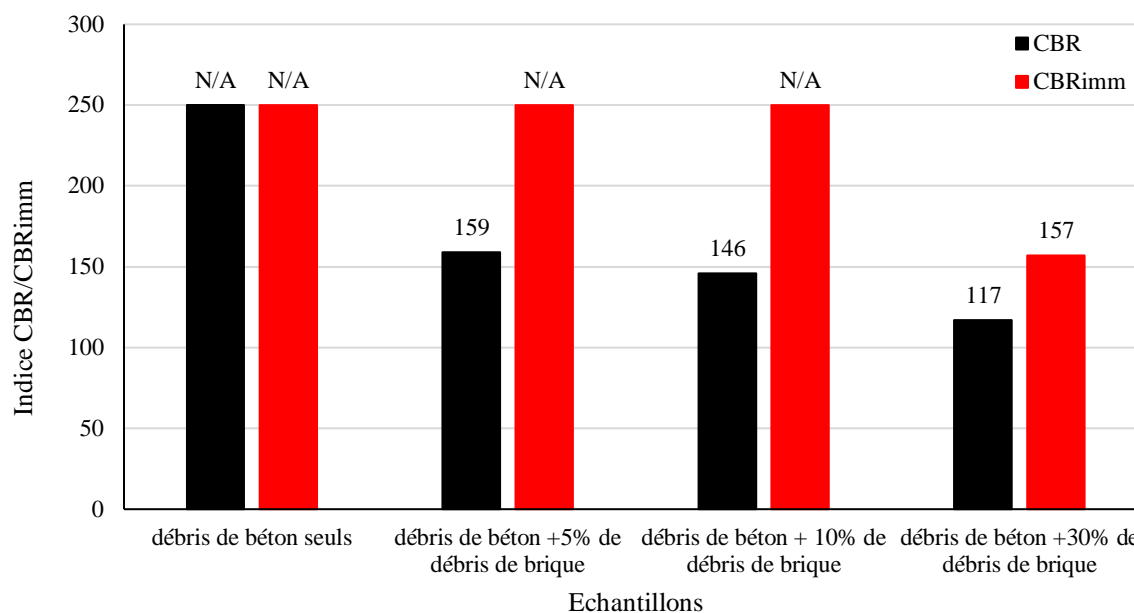


Figure IV.28 : Comparaison des indices CBR et CBRimm des différents pourcentages de débris de brique.

A titre de comparaison, les résultats ci-dessus permettent de constater que les portances développées par les échantillons après immersion sont nettement supérieures à celles développées avant immersion ; ce qui n'est pas le cas de la plupart des matériaux naturels qui perdent de leur résistance à l'état humide.

Cette augmentation de portance à l'état humide peut être due aux fractions fines des matériaux étudiés qui réagissent avec l'eau (phénomène de cimentation). Ce qui rend les mélanges plus résistants.

L'écart entre les indices CBR avant et après immersion est non négligeable. Il est ainsi à prendre en considération lors de la mise en service de ces matériaux dans des zones à climat variable (périodes hivernales et estivales).

A l'issue des différents résultats obtenus, on peut dire que les matériaux étudiés peuvent être utilisés en couches de chaussées de faible à moyen trafic.

IV.8. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats obtenus aux essais de compactage Proctor et aux essais de portance CBR. En se basant particulièrement sur ces résultats, nous pouvons conclure que les matériaux étudiés (mélange de débris de béton + débris de brique) ont présenté dans certains cas des comportements très intéressants.

Les caractéristiques mécaniques obtenues se révèlent très satisfaisantes et répondent aux exigences des normes en vigueur.

CHAPITRE V

ESSAIS ROUTIERS

V.1. INTRODUCTION

Bien qu'après son extraction, un déblai rocheux puisse être transformé en un matériau partiellement assimilable à un sol meuble, il est crucial de pouvoir prévoir le comportement de ce matériau après abattage en se basant sur la roche en place. Pour répondre à ce besoin, un classement des matériaux rocheux a été établi, prenant en compte leur nature géologique ainsi que les résultats d'essais spécifiques tels que le degré d'usure, la fragmentabilité et la dégradabilité qui permettent de reproduire certaines sollicitations propres aux usages spécifiques des granulats.

Dans ce chapitre, nous allons présenter en général ces essais et interpréter les résultats obtenus.

V.2. ESSAI MICRO DEVAL (NF P18-572)

V.2.1. Définition et but de l'essai

L'essai Micro-Deval (MDE) permet de déterminer la résistance à l'usure d'un échantillon de granulats par frottements dans la machine Micro-Deval en présence d'eau, par contact avec des billes d'acier à l'intérieur d'un cylindre en rotation.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les classes granulaires : 4-6.3mm ; 6.3-10 mm ; 10-14 mm ; 25-50 mm. Pour les essais effectués sur les gravillons entre 4 et 14 mm, une charge abrasive est utilisée.



Figure V.1. Machine Micro-Deval

V.2.2. Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite d'un matériau soumis à l'essai.

V.2.3. Mode opératoire

L'essai Micro-Deval est également facile à réaliser avec un appareillage simple et facile à manipuler.

1. Appareillage

- La machine Micro-Deval à quatre cylindres creux.
- Une série de Tamis : 1,6-4 -6,3- 8- 10- 14- 25- 40 et 50 mm.
- Une charge abrasive constituée de billes sphériques de 10mm de diamètre en acier inox.
- Un moteur assurant aux cylindres une vitesse de rotation régulière de 100tr/ min.
- Un bac pour recueillir le matériau après essai.
- Une balance de précision.
- Une étuve.

2. Préparation du matériau (NF P18-572)

Tamiser l'échantillon à sec sur chacun des tamis de la classe granulaire choisie, en commençant par le tamis le plus grand.

Laver le matériau tamisé et le sécher à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante.

La masse de l'échantillon pour essai sera de 500 g pour la classe granulaire 4-14 mm et 10000 g pour la classe granulaire 25-50 mm.

Introduire avec précaution la charge abrasive correspondant à la classe granulaire choisie, puis l'échantillon pour essai, la charge abrasive est fixée conformément aux indications du tableau (V.1), puis rajouter 2,5 L d'eau dans le cas de classe granulaire 4-14mm et 2 L d'eau dans le cas de 25-50 mm.

-Mettre les cylindres en rotation à une vitesse de 100tr/min pendant 2h00 pour la classe granulaire 4-14 mm et pendant 2h 20min pour la classe granulaire 25-50mm.

-Recueillir le granulat et la charge dans un bac.

-Laver soigneusement l'intérieur du cylindre, en recueillant l'eau et les particules dans le bac.

-Emboîter les tamis de 8mm et 1,6mm, laver et tamiser manuellement.

-La charge abrasive sera retenue sur le tamis 8mm, recueillir le refus du tamis 1,6 avec le reste coincé dans le tamis 8mm.

-Sécher le refus du tamis 1,6mm à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante.

-Peser ce refus une fois séché. Soit M'le résultat de la pesée.



Figure V.2. La charge abrasive et le matériau pesé



Figure V.3. Préparation du matériau



Figure V.4. Tamisage du matériau

Tableau V.1. Charge de boulets suivant le type de classe granulaire (NF P 18-572)

Classe granulaire (mm)	Poids de l'échantillon (g)	Poids de la charge (g)
4- 6,3	500 ± 2	2000 ± 5
6,3- 10	500 ± 2	4000 ± 5
10-14	500 ± 2	5000 ± 5

La résistance à l'usure s'exprime par le coefficient Micro-Deval qui s'écrit :

$$M_{DE} = \frac{M - M'}{M} \times 100$$

M : la masse sèche totale de l'échantillon soumise à l'essai selon la granulométrie utilisée.

M' : la masse sèche du refus au tamis de 1,6mm (à la fin de l'essai).

V.2.4. Matériaux utilisés

On a réalisé des essais micro Deval sur la classe granulaire 6.3-10 mm pour les débris de béton seuls et sur la classe granulaire 4-6,3mm pour les débris de brique seuls.

V.2.5. Résultats de l'essai

Calcul du coefficient Micro-Deval

- Débris de béton seuls : $M_{DE} = \frac{500 - 285,3}{500} \times 100 = 42,94$
- Débris de brique seuls : $M_{DE} = \frac{500 - 322}{500} \times 100 = 35,6$

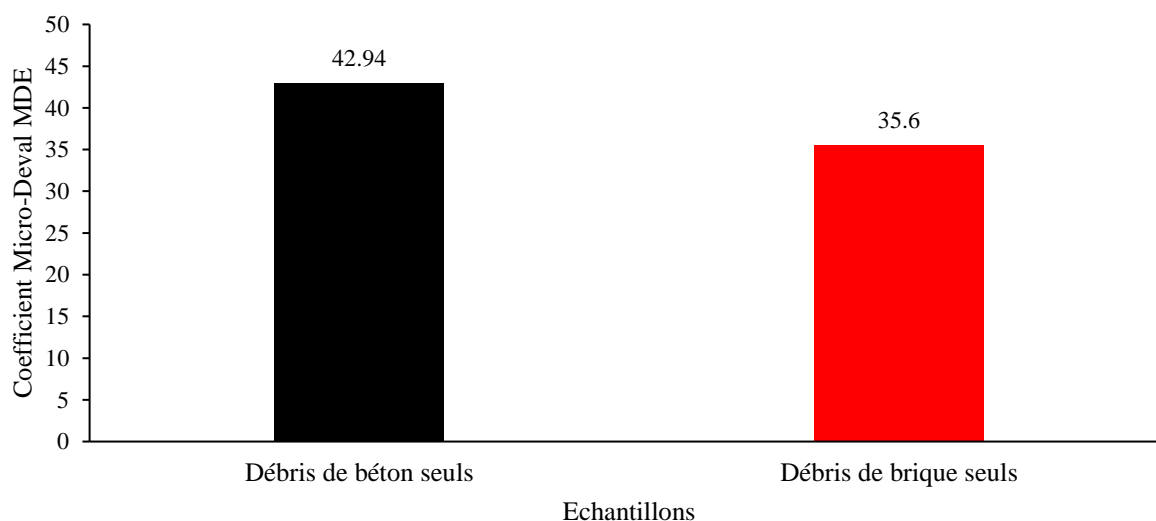


Figure V.5. Histogramme de comparaison des essais micro Deval.

Les résultats obtenus et récapitulés sur la figure (V.5), montrent que le coefficient MDE déterminé pour les débris de brique est inférieur à celui déterminé pour les débris de béton.

La brique est composée essentiellement d'argile et de sable, cuite à de très hautes températures le produit final (débris de briques) est un matériau homogène qui développe une très bonne résistance aux chocs et à l'eau.

V.3. ESSAI DE LOS ANGELES (NF P 18-573)

V.3.1. Définition et but de l'essai

L'essai Los Angeles (L_A) vise à mesurer les résistances combinées des granulats à la fragmentation par chocs et à l'usure par frictions dans la machine Los Angeles.

Cet essai s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle utilisés pour la constitution des assises de chaussées, y compris les couches de roulement.



Figure V.6. La machine Los Angeles

V.3.2. Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés et aux frottements réciproques dans la machine Los Angeles.

V.3.3. Mode opératoire

1. Appareillage

- Une série de tamis (1,6-4-6,3-10-14-16-20-25-31,5-40 et 50mm).
- Une machine Los Angeles.
- Charge de boulets en acier de 47mm de diamètre pesant entre 420g et 445g.
- Un bac pour recueillir les matériaux après essai.
- Une balance de précision.
- Une étuve.

2. Exécution de l'essai

-Tamiser l'échantillon à sec sur chacun des tamis de la classe granulaire choisie, en commençant par le tamis le plus grand.

-Laver le matériau tamisé et le sécher à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante.

-La masse de l'échantillon pour essai sera de 5000 ± 5 g.

-Introduire avec précaution la charge de boulets correspondant à la classe granulaire choisie, puis l'échantillon pour essai, la charge de boulet est fixée conformément aux indications du tableau (V.2).

-Faire effectuer à la machine 500 rotations, sauf pour la classe granulaire 25-50 mm où l'on effectue 1000 rotations, à une vitesse régulière comprise entre 30 tr/min et 33 tr/min.

-Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture, juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes du matériau.

-Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1,6 mm, le matériau étant pris en plusieurs fois afin de faciliter l'opération.

-Laver le refus au tamis de 1,6 mm. Egoutter et sécher à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante.

-Peser ce refus une fois séché. Soit M' le résultat de la pesée.

Le coefficient Los Angeles (L_A) est calculé en utilisant la relation suivante :

$$L_A = \frac{(M - M')}{M} \times 100$$

M : la masse sèche totale de l'échantillon soumise à l'essai (M=5000g).

M' : la masse sèche du refus au tamis de 1,6mm (à la fin de l'essai).

Tableau V.2. : Charge de boulets suivant la classe granulaire. (NF P 18-573)

Classes granulaire (mm)	Nombre de boulets	Masse totale de la charge (g)	
4 - 6,3	07	3080	+20
6,3 - 10	09	3960	à
10 - 14	11	4840	-150
10 - 25,0	11	4840	+20
16 - 31,5	12	5280	à
25 - 50,0	12	5280	-150

V.3.4. Matériaux utilisés

On a réalisé des essais Los Angeles sur la classe granulaire 6.3-10 mm pour les débris de béton seuls et sur la classe granulaire 4-6,3mm pour les débris de brique seuls.



Figure V.7. Etapes d'exécution de l'essai.

V.3.5. Résultats de l'essai

Calcul du coefficient Los Angeles

- Débris de béton seuls : $L_A = \frac{5000 - 3342,7}{5000} \times 100 = 33,146$
- Débris de brique seuls : $L_A = \frac{5000 - 3140}{5000} \times 100 = 37,2$

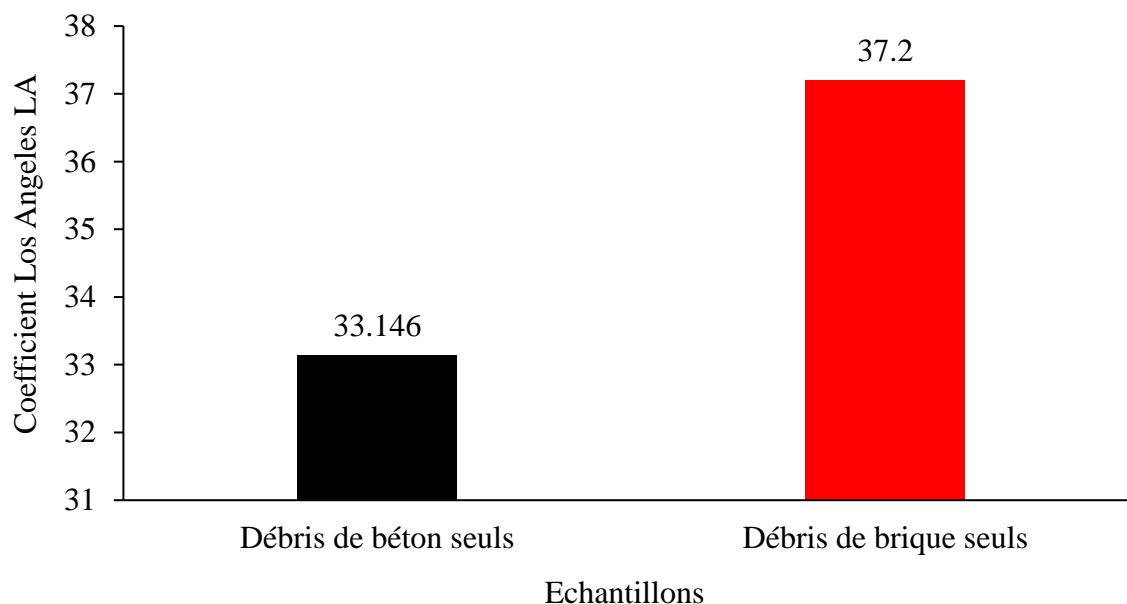


Figure V.8. Histogramme de comparaison des essais Los Angeles

Les résultats obtenus et récapitulés sur la figure (V.9), montrent que la différence entre les coefficients LA déterminés pour les deux matériaux étudiés est pratiquement négligeable. On peut dire ainsi que les deux matériaux se comportent pratiquement de la même manière sous ce type de sollicitations.

Tableau V.3. Coefficients LA et MDE pour les différents échantillons

Echantillon	LA	MDE	LA+MDE	Catégories
Débris de béton seuls	33,146	42,94	76,086	E
Débris de brique seuls	37,2	35,6	72,8	E

Tableau V.4. Catégories des granulats selon la résistance aux chocs et à l'usure (NF P 18-573)

Catégorie	LA	MDE	LA+MDE	Domaine d'utilisation
A	≤ 20	≤ 15	≤ 25	Matériau utilisable pour toutes couches de chaussées, tout trafic, y compris les couches de roulement à trafic important.
B	≤ 25	≤ 20	≤ 35	Matériau utilisable pour toutes couches de chaussées, tout trafic, sauf couches de roulement de trafic important.
C	≤ 30	≤ 25	≤ 45	Matériau utilisable pour couches de fondations, et couche de base tout trafic
D	≤ 35	≤ 30	≤ 55	Matériau utilisable pour couches de fondations toutes chaussées, et couches de base pour chaussées à moyen trafic
E	≤ 45	≤ 45	≤ 80	Matériau utilisable pour couches de chaussées, Avec ou sans traitement, à définir selon le trafic.
F	> 45	> 45	> 80	Matériau utilisable pour couches de chaussées avec un traitement éventuel en fonction de l'intensité du trafic.

On constate, en se référant au tableau des catégories des granulats selon la résistance aux chocs et à l'usure (tableau V.4) que les deux matériaux peuvent être insérés dans la catégorie E. Leur utilisation peut être envisagée pour des couches de chaussées, avec ou sans traitement, à définie selon le trafic.

V.4. ESSAI DE DEGRADABILITE DES MATERIAUX ROCHEUX (NF P 94-067)

V.4.1. Définition et but de l'essai

L'essai de dégradabilité, exprimé par le coefficient de dégradabilité (DR) permet l'identification et la classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières (NF P 11-300).

Il vise à évaluer la sensibilité du matériau rocheux aux sollicitations hydriques, et donc le risque d'évolution à long terme sous l'action combinée de l'eau et des sollicitations mécaniques.

V.4.2. Principe de l'essai

L'essai consiste à déterminer la réduction du D_{10} d'un échantillon de granularité d/D donnée, soumis à quatre cycles (imbibition- séchage) conventionnels.

V.4.3. Mode opératoire

1. Appareillage

- Une série de tamis de mailles (1- 2-5-10-16-20-40-50 ou 63-80mm)
- Une étuve.
- Bacs métalliques.
- Une balance portée 3000g, précision $\pm 1g$.

2. Exécution de l'essai

Prélever un échantillon représentatif de la nature du matériau considéré par prélèvement soir carotté ; soit la pelle hydraulique ; soit sur affleurements ; soit directement sur le site en cours d'extraction, puis préparer la fraction d/D qui sera soumise à l'essai.

Cette fraction d/D est obtenue en fragmentant si nécessaire l'échantillon avec un marteau, puis en procédant à son tamisage au travers des tamis suivants

10-20mm : pour les matériaux issus des roches argileuses de types marnes, argilites, pelites.

40-80 mm : pour les matériaux issus des roches argileuses de type schistes sédimentaires.

Les refus des tamis 20 et 80mm correspondant respectivement aux dimensions D des deux fractions granulaires soumises à l'essai peuvent être réintégrées dans la prise d'essai après fragmentation au marteau et repassage aux travers des tamis respectifs 10/20 mm ou 40/80 mm.

La prise d'essai doit être de 2 kg.

Pour tracer la courbe granulométrique initiales avec trois points, tamiser la fraction 10/20 mm ou 40/80 mm préalablement préparée respectivement au travers des tamis de 16 mm et 50 ou 63 mm, peser et noter les refus à ces tamis.

Reconstituer et ré homogénéiser la fraction d/D après ce tamisage et la répartir dans le bac métallique. Celui-ci est alors placé alternativement quatre fois successives en immersion dans le grand bac, puis dans l'étuve réglée à 105°C.

Le premier cycle débute par une mise en immersion et le quatrième cycle se termine par un séchage.

La durée d'un cycle est de : 8heures \pm 1heure d'immersion et 16heures \pm 1heure de séchage.
Après chaque phase d'immersion et avant l'introduction de l'échantillon dans l'étuve, procéder au siphonnage de l'eau restant dans le bac métallique (sans entrainement de particules du matériau).

A la fin du quatrième cycle, procéder au tamisage à sec de l'échantillon au travers les colonnes de tamis suivantes

- 1,2, 5, 10 et 16mm lorsque la fraction soumise à l'essai est 10/20mm.
- 5,10,20, 40 et 50mm lorsque la fraction soumise à l'essai est 40/80mm.

Procéder enfin à la pesée des refus sur chacun des tamis.



Figure V.9. Pesée et immersion et tamisage du matériau.

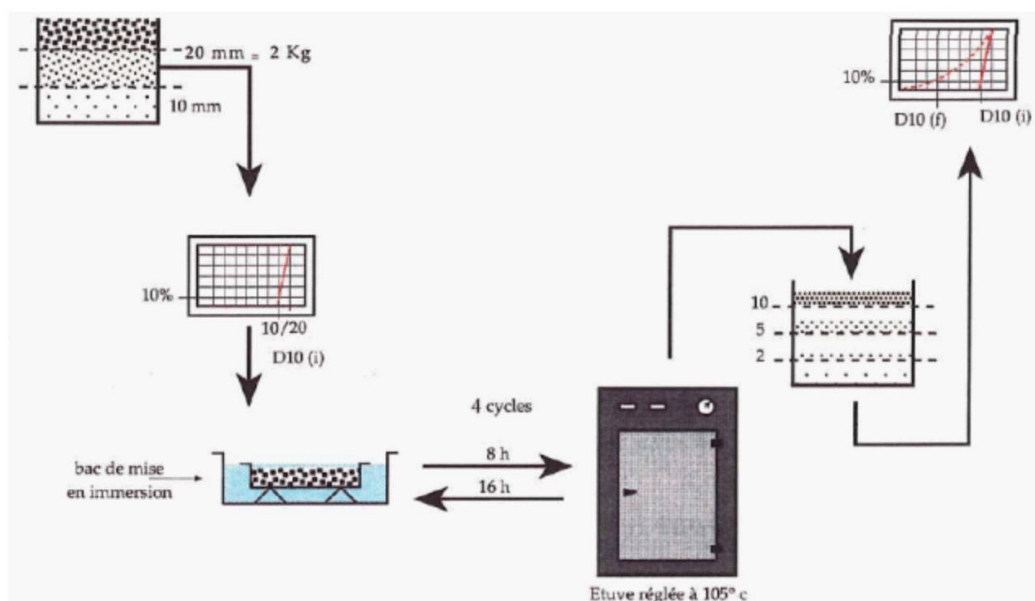


Figure V.10. Exécution de l'essai de dégradabilité (Boudlal, 2016)

Le coefficient de dégradabilité DR est calculé en utilisant l'expression suivante :

$$DR = \frac{D_{10} \text{ avant le 1er cycle imbéition \ séchage (avant essai)}}{D_{10} \text{ après 4ème cycle imbéition \ séchage (après essai)}}$$

Avec : D_{10} : Diamètre du tamis correspondant à 10% de tamisât.

V.4.4. Matériaux utilisés

On a réalisé des essais de dégradabilité sur la classe granulaire 10-20 mm pour les débris de béton seuls et les débris de brique seuls.

V.4.5. Résultats obtenus

1. Débris de béton seuls

- Avant essai

Tableau V.5. Récapitulatif des refus avant essai

Les tamis (mm)	Refus (g)	Tamisâts cumulés (g)	Tamisâts cumulés (%)
20	0	2000	100
16	800	1200	60
10	1200	0	0

- Après essai

Tableau V.6. Récapitulatif des refus après essai

Les tamis (mm)	Refus (g)	Tamisâts cumulés (g)	Tamisâts cumulés (%)
20	0	1998,3	100
16	666,3	1332	66,65
10	1254,1	77,9	3,89
5	51,8	26,1	1,30
2	11,1	15	0,75
1	8	7	0,35
Fond	7	0	0

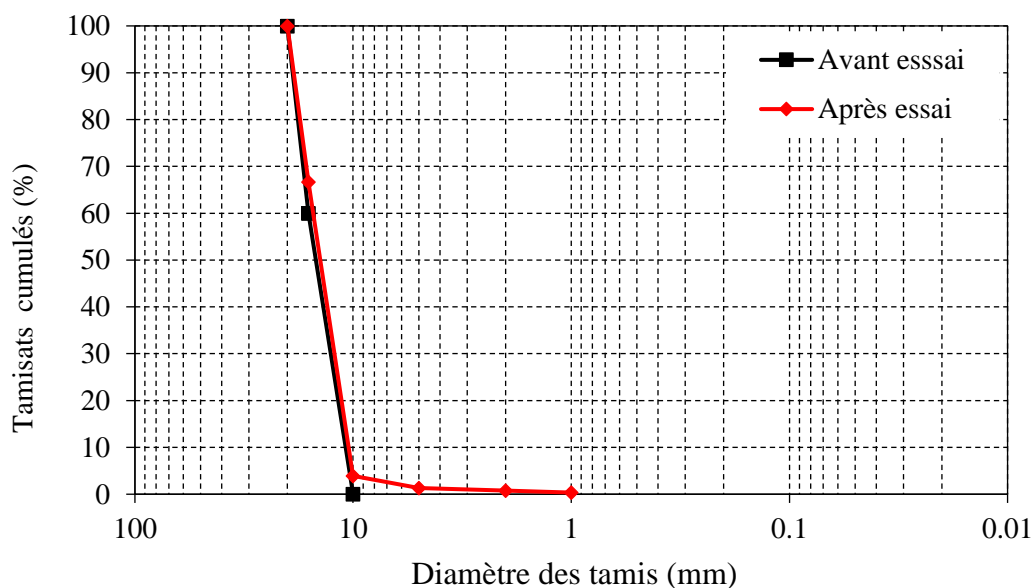


Figure V. 11. Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité (Débris de béton seuls)

Le coefficient de dégradabilité DG est déterminé par la relation suivante :

$$DR = \frac{D10 \text{ avant essai}}{D10 \text{ après essai}} = \frac{10,5}{10,5} = 1$$

Tableau V.7. Classification des matériaux rocheux

Coefficient de dégradabilité DG	Nature du matériau
DG > 20	Matériau rocheux très dégradables
5 < DG < 20	Matériau rocheux moyennement dégradables
DG < 5	Matériau rocheux peu dégradables

En comparant les résultats obtenus aux résultats de référence présentés dans le tableau V.7, nous constatons que les débris de béton étudiés font partie des matériaux rocheux peu dégradables ($DG = 1 < 5$).

2. Débris de brique seuls

- Avant essai

Tableau V.8. Récapitulatif des refus avant essai

Les tamis (mm)	Refus (g)	Tamisats cumulés (g)	Tamisats cumulés (%)
20	0	2000	100
16	800	1200	60
10	1200	0	0
Fond	0	0	0

- Après essai

Tableau V.9. Récapitulatif des refus après essai

Les tamis (mm)	Refus (g)	Tamisâts cumulés (g)	Tamisâts cumulés (%)
20	0	1998,5	100
16	775	1223,5	61,22
10	1175	48,5	2,42
5	40	8,5	0,42
2	2,3	6,2	0,31
1	3,2	3	0,15
Fond	3	0	0

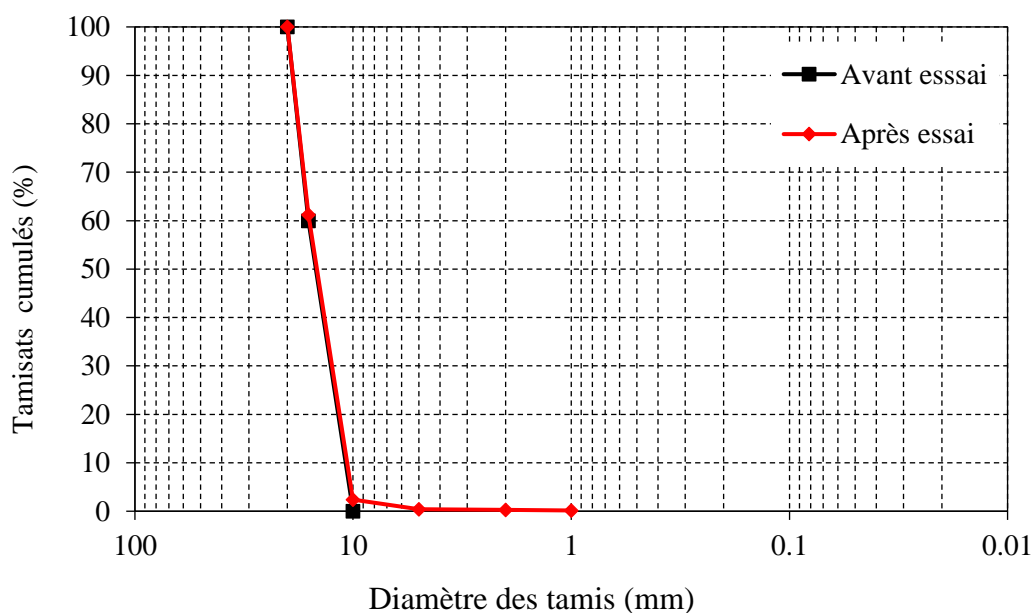


Figure V. 12. Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité
(débris de brique seuls)

Le coefficient de dégradabilité DG est déterminé par la relation suivante :

$$DR = \frac{D10 \text{ avant essai}}{D10 \text{ après essai}} = \frac{10,5}{10,6} = 0,99$$

En comparant les résultats obtenus aux valeurs de référence présentés dans le tableau V.7, nous constatons que les débris de brique étudiés font partie des matériaux rocheux peu dégradables ($DG = 0,99 < 5$).

Les résultats obtenus des différents essais permettent de constater que les matériaux étudiés sont considérés peu dégradables et leur utilisation en couches de chaussées, particulièrement en couches inférieures (couches de forme, couches de fondations) peut être recommandée.

V.5. ESSAI DE FRAGMENTABILITE DES MATERIAUX ROCHEUX (NF P 94-066)

V.5.1. Définition et but de l'essai

L'essai de fragmentabilité exprimé par le coefficient de fragmentabilité (FR) permet de traduire l'évolution continue de la granularité de certains matériaux rocheux depuis leur extraction jusqu'à leur mise en œuvre et qui, pour quelques-uns d'entre eux, se poursuit encore durant la vie des ouvrages dans lesquels sont utilisés.

C'est un des paramètres d'identification retenu dans la classification des matériaux pour remblais et couches de formes d'infrastructures routières (norme NF P 11-300).

V.5.2. Principe de l'essai

L'essai consiste à déterminer la réduction du D10 d'un échantillon de granularité d/D donnée, soumis à un pilonnage conventionnel.

V.5.3. Mode opératoire

1. Appareillage

- Moule CBR
- Dame Proctor normal
- Une série de tamis de mailles (1- 2-5-10-16-20-40-50 ou 63-80mm)
- Une étuve.
- Bacs métalliques.

2. Exécution de l'essai

-Peser 2kg du matériau de fraction 10-20mm pour les matériaux issus des roches argileuses du type marnes, argilites ... ou 40-80mm pour les matériaux issus des roches argileuses du type schistes sédimentaires.

-Sécher le matériau à faible température.

-Tamiser la fraction 10/20 mm ou 40/80 mm préalablement préparée respectivement au travers des tamis de 16mm et 50 ou 63mm, peser et noter les refus à ces tamis.

-Mélanger tous le matériau pour reconstituer de nouveau la fraction d/D et la répartir dans le moule CBR.

-Les éléments sont arrangés manuellement en appliquant de légers coups sur les parois du moule et avoir la surface supérieure de l'échantillon aussi régulière que possible.

-Appliquer à la surface de l'échantillon 100 coups de dame Proctor Normal distribués conformément au mode opératoire de compactage dans l'essai Proctor.

-A la fin du pilonnage, récupérer tout le matériau contenu dans le moule CBR et le tamiser et peser les refus des tamis suivants

- 1,2, 5, 10 et 16mm lorsque la fraction soumise à l'essai est 10/20mm.
- 5,10,20, 40 et 50mm lorsque la fraction soumise à l'essai est 40/80mm.

Procéder enfin à la pesée des refus sur chacun des tamis.

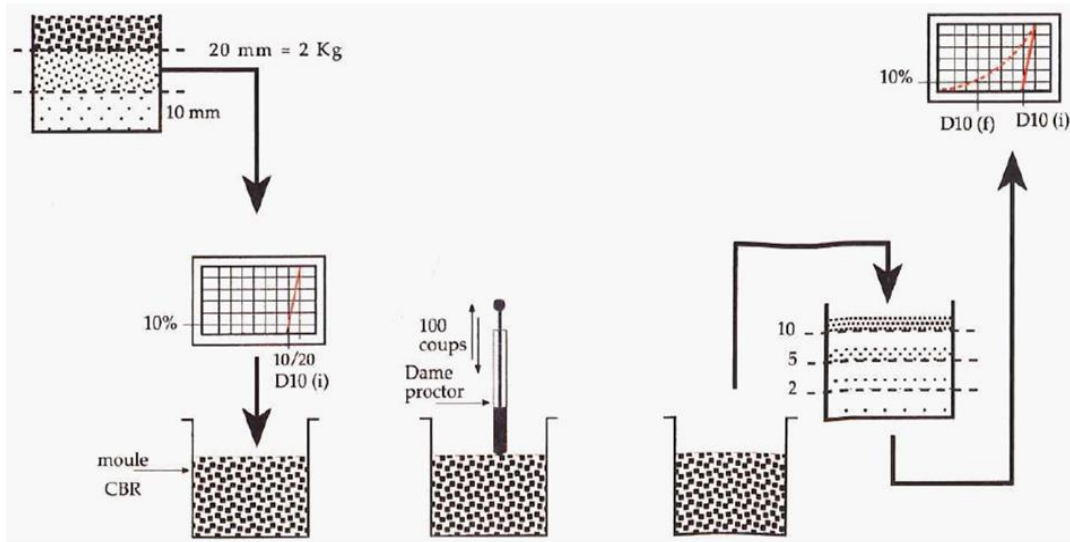


Figure V.13. Exécution de l'essai de fragmentabilité (Boudlal, 2016)

Le coefficient de fragmentabilité FR est calculé en utilisant l'expression suivante

$$FR = \frac{D10 \text{ avant pilonnage}}{D10 \text{ après pilonnage}}$$

V.5.4. Matériaux utilisés

On a réalisé des essais de fragmentabilité sur la classe granulaire 10-20 mm pour les débris de béton seuls et les débris de brique seuls.



Figure V.14. Pesée et mise du matériau dans le moule CBR

V.5.5. Résultats de l'essai

1. Débris de béton seuls

- Avant essai

Tableau V.10. Récapitulatif des refus avant essai

Les tamis (mm)	Refus (g)	Tamisâts cumulés (g)	Tamisâts cumulés (%)
20	0	2000	100
16	800	1200	60
10	1200	0	0

- Après essai

Tableau V.11. Récapitulatif des refus après essai

Les tamis (mm)	Refus (g)	Tamisâts cumulés (g)	Tamisâts cumulés (%)
20	0	2000	100
16	499,4	1500,6	75,03
10	1048	452,6	22,63
5	263,2	189,4	9,47
2	106,2	83,2	4,16
1	34,3	48,9	2,445
Fond	48,9	0	0

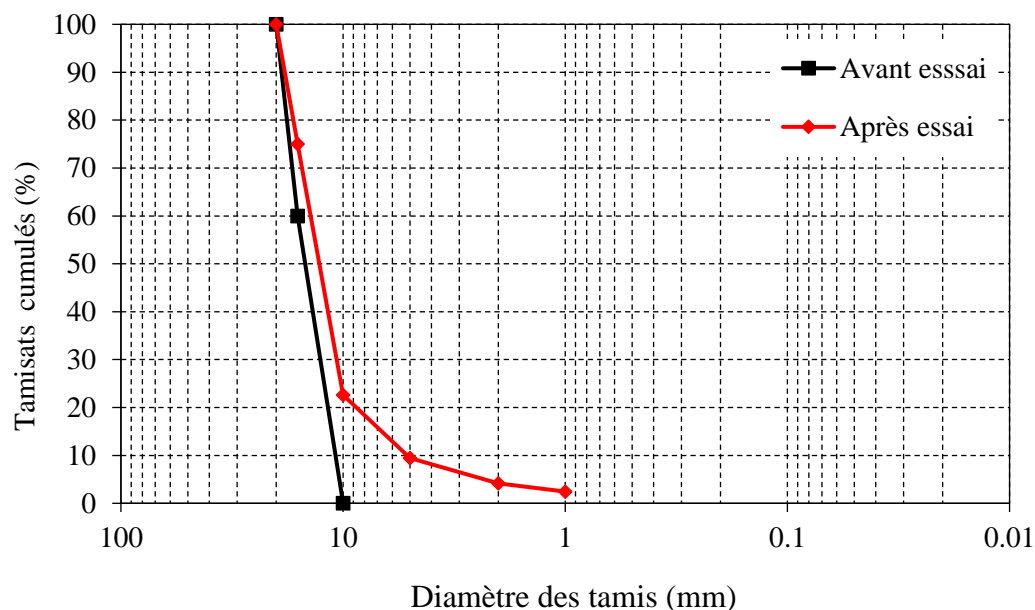


Figure V.15. Courbes granulométriques avant et après essais (débris de béton seuls)

Le coefficient de fragmentabilité FR est calculé en utilisant l'expression suivante :

$$FR = \frac{D_{10} \text{ avant pilonnage}}{D_{10} \text{ après pilonnage}} = \frac{10,5}{5} = 2,1$$

Tableau V.12. Classification des matériaux rocheux selon le coefficient FR

Coefficient de fragmentabilité	Nature du matériau
FR < 7	Roche peu fragmentable
FR > 7	Roche fragmentable

En se référant au tableau V.12, nous déduirons que les débris de béton étudiés peuvent être insérés dans la catégorie des roches peu fragmentables (FR = 2,1 < 7)

2. Débris de brique seuls

- Avant essai

Tableau V.13. Récapitulatif des refus avant essai

Les tamis (mm)	Refus (g)	Tamisâts cumulés (g)	Tamisâts cumulés (%)
20	0	2000	100
16	800	1200	60
10	1200	0	0

- Après essai

Tableau V.14. Récapitulatif des refus après essai

Les tamis (mm)	Refus (g)	Tamisâts cumulés (g)	Tamisâts cumulés (%)
20	0	1993	100
16	166	1827	91,67
10	1018	809	40,59
5	314	495	24,83
2	176	319	16
1	176	143	7,17
Fond	143	0	0

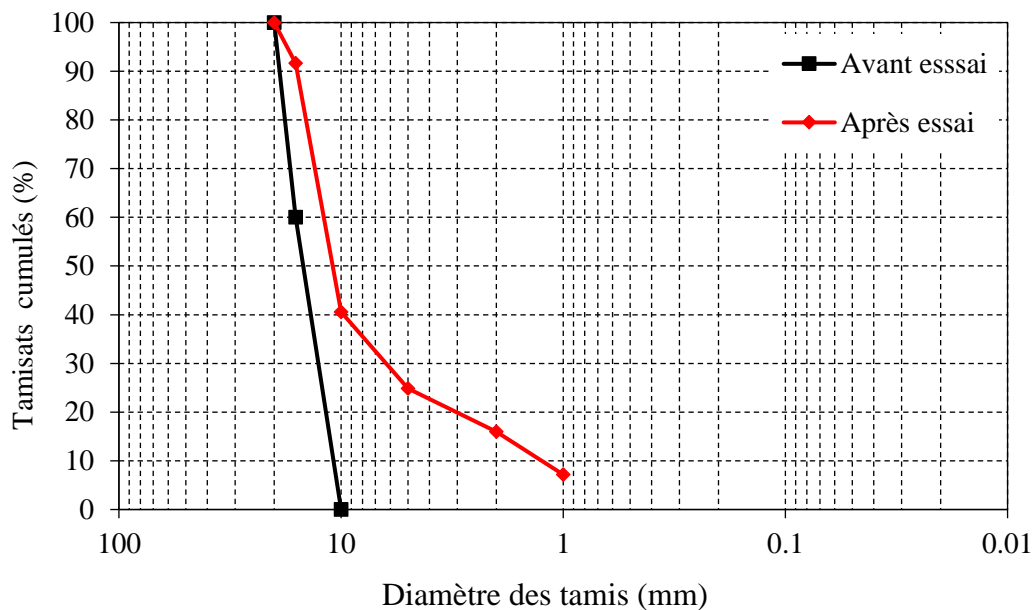


Figure V.16. Courbes granulométriques avant et après essais (débris de briques seuls)

Le coefficient de fragmentabilité FR est calculé en utilisant l'expression suivante :

$$FR = \frac{D10 \text{ avant pilonnage}}{D10 \text{ après pilonnage}} = \frac{10,5}{1,4} = 7,5$$

En se référant au tableau V.12, nous déduisons que les débris de brique étudiés peuvent être insérés dans la catégorie des roches fragmentables ($FR = 7,5 > 7$)

D'une manière générale, les résultats obtenus à l'issue des essais de fragmentabilité montrent que les matériaux présentés peuvent être classés dans la catégorie des roches peu fragmentables pour les débris de béton et fragmentables pour les débris de brique.

L'utilisation des débris de béton pour construction routière est recommandée, par contre les débris de brique nécessitent une attention particulière lors de la mise en œuvre et du compactage.

V.6. CONCLUSION

Une série d'essais en laboratoire a été réalisée pour évaluer la résistance des différents matériaux aux sollicitations typiques rencontrées sur les routes. Ces essais permettent de caractériser les propriétés mécaniques et la durabilité des matériaux sous l'effet de diverses contraintes.

Les résultats obtenus aux essais Los Angeles, Micro-Deval, fragmentabilité et dégradabilité permettent d'avoir une meilleure compréhension du comportement des matériaux étudiés sous les sollicitations routières. Cette connaissance approfondie des propriétés des matériaux est essentielle pour prévenir les désordres à court terme et anticiper les problèmes à long terme.

CONCLUSION GENERALE

L'étude menée sur le comportement des débris de béton et de briques en vue de leur valorisation en construction routière met en lumière des perspectives prometteuses pour la gestion durable des déchets de construction et de démolition. À travers une série d'essais et d'analyses, nous avons pu évaluer les propriétés mécaniques et physiques de ces matériaux recyclés, démontrant leur potentiel à être utilisés efficacement dans les infrastructures routières.

La faisabilité de cette valorisation est également soutenue par les avantages environnementaux notables, notamment la diminution de l'extraction de nouvelles ressources naturelles et la réduction des émissions de gaz à effet de serre associées à la production et au transport de matériaux de construction neufs. En réutilisant les débris de béton et de briques, il est possible de créer une boucle vertueuse dans l'industrie de la construction, alignée avec les objectifs de développement durable et les réglementations environnementales actuelles.

Cependant, pour une adoption généralisée de ces pratiques, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour optimiser les proportions des mélanges et pour adapter les techniques de traitement des débris en fonction des spécificités des projets routiers. De plus, la mise en place de normes et de directives claires est essentielle pour assurer la qualité et la performance des matériaux recyclés dans le long terme.

Les résultats obtenus à l'issue des essais réalisés sur des échantillons reconstitués en mélanges à base de débris de béton et des débris de briques permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Les mélanges étudiés développent des densités sèches très intéressantes avec l'ajout de 5% de briques, au-delà de cette proportion de brique, les densités sèches des mélanges diminuent, néanmoins, elles restent assez importantes et satisfaisantes comparativement aux seuils fixés par les normes dans le cas d'un matériau routier.
- Les matériaux étudiés ont présenté des résistances au poinçonnement très intéressantes et répondent amplement aux exigences des normes en vigueur notamment après immersion. Toutefois, l'écart de portance parfois important avant et après immersion, doit être impérativement pris en considération pour éviter les instabilités éventuelles des matériaux présentés face aux variations climatiques (périodes hivernales et estivales).
- En ce qui concerne la résistance aux chocs, les débris de béton présente une meilleure résistance par rapport aux débris de brique, par contre pour la résistance à l'usure les débris de brique résistent mieux. Par ailleurs, les essais de dégradabilité et de fragmentabilité révèlent respectivement que les matériaux débris de béton et débris de brique sont peu dégradables sous sollicitations hydriques et les débris de béton sont peu fragmentables sous sollicitations mécaniques.
- Les mélanges étudiés (débris de béton + débris de brique) présentent ainsi des comportements et des propriétés mécaniques très intéressantes, notamment pour de faibles teneurs en débris de brique (5%). Ces résultats permettent de les proposer

initialement pour une utilisation dans les corps de chaussées de faible à moyen trafic, notamment en couches de forme et en couches de fondations.

- Toutefois, d'autres essais sont indispensables pour mieux cerner la réponse de ces matériaux sous d'autres types de sollicitations et confirmer davantage leur utilisation dans le domaine routier, à savoir les essais cycliques et les essais à long terme sous l'effet d'agents climatiques.

Les résultats obtenus montrent que les mélanges de débris de béton et de brique possèdent des caractéristiques mécaniques comparables, voire supérieures, à certains matériaux traditionnels utilisés en construction routière. Leur durabilité et leur comportement sous diverses conditions de charge confirment leur aptitude pour des applications telles que les couches de base ou de fondation des chaussées. De plus, l'utilisation de ces matériaux recyclés contribue significativement à la réduction des déchets de construction envoyés en décharge, offrant ainsi une solution écologique et économique.

En conclusion, cette étude a démontré que les débris de béton et de briques, souvent perçus comme des déchets inutiles, peuvent être transformés en ressources précieuses pour la construction routière. En intégrant ces matériaux recyclés dans les pratiques courantes de construction, nous pouvons non seulement améliorer la durabilité de nos infrastructures mais aussi répondre aux défis environnementaux de notre époque. La valorisation des déchets de construction s'impose donc comme une stratégie incontournable pour une gestion plus responsable et innovante des ressources dans le secteur des travaux publics.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

ADEME, (2014). Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie. Les déchets.

Aissa, S (2016). Effet de l'activation mécanique de l'argile cuite (déchets de briques) sur le comportement mécanique du mortier. Mémoire de master, université Mohamed Boudiaf M'sila, Algérie.

Aivar, C, " Pelade", 2012. [En ligne].

<https://www.flickr.com/photos/cifa-tp/7716463568> [consulté le 1 juin 2024].

Amrouche, A, " Brique réfractaire", Ouedkniss, 2020. [En ligne].

https://www.ouedkniss.com/blida-larbaa-algerie-materiaux-de-construction-brique-refractaire-d15715345?lang=fr#google_vignette. [Consulté le 1 juin 2024].

Bedjou, S (2003). Etude du recyclage de débris de briques. Thèse de Magister, ENP, Algérie.

Beghin, A, " Fissuration longitudinale sur une chaussée", researchgate, 2003. [En ligne].

https://www.researchgate.net/figure/Fissuration-longitudinale-sur-une-chaussee_fig2_30512830 [consulté le 1 juin 2024].

Bensafi, B & Belkacem, O-S (2018). Valorisation des bétons à base de granulats recyclés (granulats de brique) sous l'effet de température. Mémoire de master, centre universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain Temouchent, Algérie.

Bibliothèque Patrimoniale Hendrik Conscience. (2023), routes en béton de ciment, Belgique.

Boudlal, O. (2016). Principaux Essais de mécanique des sols et de géotechnique routière (Essais de laboratoire). Algérie.

Brunot, A et Coquand, R. (1982), Le corps des ponts et chaussées. Éditions du centre national de la recherche scientifique, France.

Btp news, "Pathologies et entretiens des routes", 2022. [En ligne].

<https://www.btpnews.ma/pathologie-et-entretiens-des-routes-partie-ii-iii/> [consulté le 1 juin 2024].

Caporusso, V, "Déchets dangereux sur un site de construction, le revêtement bitumineux de démolition". [En ligne]. <https://www.alamyimages.fr/photo-image-dechets-dangereux-sur-un-site-de-construction-le-revetement-bitumineux-de-demolition-78832965.html> [consulté le 4 juin 2024].

Catalogue briqueterie, 2022. [En ligne].

<https://www.safcergroup.com/BRIQUE/CATALOGUE%20BRIQUETERIE%20SAFCER.pdf> [consulté le 6 juin 2024]. Algérie.

Chatard, C, " Mur en brique de verre : installation, prix et matériel à utiliser ", 2022. [En ligne].

<https://www.lesbonsartisans.fr/mur-brique-de-verre/> [consulté le 6 juin 2024]. Algérie.

Chevalier, C., & Petit, G. (2012). Congrès de l'IDRRIM. Techniques d'entretien des chaussées routières : Les chaussées en béton. Lyon Eurexpo.

(CFTR), (2004). Comité français pour les techniques routières. Guide technique : Retraitement des chaussées et recyclage des matériaux bitumineux de chaussées.

De Brandois, P& Babics. (2006). Manuel de sensibilisation à la restauration de la maçonnerie.

DeJong-Hughes, J, "Impact du compactage du sol sur le développement des cultures". [En ligne]. <https://www.agrifind.fr/impact-compactage-du-sol-developpement-cultures/> [consulté le 8 juin 2024].

De Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4, 792 pages, ISBN 978-2-85782-747-4.

ENSTP, (2015). Ecole nationale supérieure des travaux publics. Dimensionnement d'une chaussée souple.

EXACOMPARE, "Quels sont les différents types de briques pour la construction ?". [En ligne]. <https://blog.exacompare.fr/actualite/quels-sont-les-differents-types-de-briques-pour-la-construction/> [consulté le 6 juin 2024].

Fauconnier, M, " La gestion des déchets de chantier dans le BTP : tout savoir ", oba blog 2022. [En ligne]. <https://www.oba.fr/blog/gestion-dechets-de-chantier/#les-grandes-categories-de-dechets-de-chantier> [consulté le 5 juin 2024].

Faure, M. (1997). Cours de routes –Tome 1. Aléas, France.

Faure, M. (2002). Cours de routes –Tome 2. Aléas, France.

Futura sciences, <https://www.futura-sciences.com/maison/dossiers/isolation-maison-energie-positive-874/page/5/>. [Consulté le 5 juin 2024].

Graindorge, J, Stockage des déchets non dangereux : de nouvelles prescriptions techniques pour 2016 ", club techni.cités [En ligne].<https://www.lagazettedescommunes.com/415003/stockage-des-dechets-non-dangereux-de-nouvelles-prescriptions-techniques-pour-2016/> [consulté le 6 juin 2024].

Groupe pigeon, " les différents types de chaussées ", [En ligne]. <https://www.groupe-pigeon.com/fr/notre-groupe/notre-actualite/les-differents-types-de-chaussees> [consulté le 1 juin 2024].

Guide de gestion des déchets, 2002. [En ligne]. <https://www.dgdr.cnrs.fr/sst/cnps/guides/doc/dechets/guidedechets.pdf> [consulté le 6 juin 2024]. France.

Guide technique de conception et de dimensionnement des structures de chaussées métropolitaines, 2017. [En ligne].

https://www.grandlyon.com/fileadmin/user_upload/media/pdf/voirie/20180619_gl_voirie_gui_de_conception_structures_de_chaussees.pdf [consulté le 30 mai 2024]. Grand Lyon.

Guy, D. (2007). Les granulats. Direction des Sols & Matériaux.

Hadji, R, " Influence de la nature du sol sur la courbe Proctor ". [En ligne]. https://www.researchgate.net/figure/Influence-de-la-nature-du-sol-sur-la-courbe-Proctor_fig11_341714091 [consulté le 10 juin 2024].

Harizi, I (2012). Amélioration de module de rigidité des enrobé bitumineux par l'ajout d'un additif. Mémoire de magister, université de Saad Dahlab de Blida, Algérie

INERIS, (2018). Institut national de l'environnement industriel et des risques. Avantages et inconvénients du recyclage des matériaux contenant des additifs dangereux : Une approche économique et son illustration avec le cas du PVC souple et du DEHP.

Jeuffroy, G et Sauterey, R. (1989), cours de routes – chaussées en béton de ciment. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées. Paris, France.

Jourdain, A. (1966). La technologie des produits céramiques réfractaires. Gauthier-Villars, Paris.

Kettar, J, " Notions générales sur les structures routières ", cours génie civil. 2011. [En ligne]. <https://www.4geniecivil.com/2018/02/structures-des-routes-notions-generales.html#0> [consulté le 30 mai 2024].

Laboratoire LABGEO, "Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais", 2017. [En ligne].

https://issuu.com/laboratoirelabgeo/docs/labgeo_classification_des_mat__riau [consulté le 28 mai 2024].

Lamy Expertise, " Les liants traditionnels pour rénover une maison ancienne ", 2022. [En ligne]. <https://www.lamy-expertise.fr/liants-traditionnels> [consulté le 30 mai 2024].

LCPC, (1994). Laboratoire centrale des ponts et chaussées. Guide Technique. Conception et dimensionnement des structures de chaussées.

LCPC, (1998). Laboratoire centrale des ponts et chaussées. Catalogue des dégradations de surface des chaussées.

Lenoir, J," La structure de la chaussée ", wikiterritorial, 2019. [En ligne]. <https://www.wikiterritorial.cnfpt.fr/xwiki/bin/view/vitrine/La%20structure%20de%20la%20chauss%C3%A9e%20> [consulté le 30 mai 2024].

Lo, S et Ndiaye M (2009). Elaboration d'un catalogue des dégradations des chaussées au SENEGAL. Projet de fin d'études, école supérieure polytechnique, Thiès, Sénégal.

Marquet, M, " L'enrobé routier : composition et rôle dans la construction des chaussées", Vinci autoroutes, 2023. [En ligne]. <https://radio.vinci-autoroutes.com/article/l-enrobe-routier-composition-et-role-dans-la-construction-des-chaussees-8541> [consulté le 30 mai 2024].

Meraga, A et Meghaouzel, A (2020). Analyse et conception du corps de chaussées de l'infrastructure d'un viaduc du tronçon routier de la liaison autoroutière 4ème rocade M'sila-Boussaâda (PK 16+000 au PK 19+000. Mémoire de master, université Saad Dahleb de Blida, Algérie.

MTQ, Ministère des transports et de la mobilité durable de Québec (2002). Manuel d'identification des dégradations des chaussées souples.

NF P 18-572 (2011). Norme Française, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 1 : détermination de la résistance à l'usure (Micro-Deval).

NF P 18-573 (2010). Norme Française, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 2 : méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation (Los Angeles).

NF P 94 – 050 (1995). Norme Française, Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Méthode par étuvage.

NF P 94 – 053 (1991) Norme Française, reconnaissance et essais. Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire. Méthodes de la trousse coupante, du moule et de l'immersion dans l'eau.

NF P 94 – 054 (1991) Norme Française, reconnaissance et essais. Détermination de la masse volumique des particules solides des sols. Méthode du pycnomètre à eau.

NF P 94 – 064 (1993) Norme Française, Sols : reconnaissance et essais. Détermination de la masse volumique sèche d'un élément de roche. Méthode par pesée hydrostatique.

NF P 94 – 066 (1992) Norme Française, Sols : reconnaissance et essais. Détermination du Coefficient de fragmentabilité des matériaux rocheux.

NF P 94 – 067 (1992) Norme Française, Sols : reconnaissance et essais. Détermination du Coefficient de dégradabilité des matériaux rocheux.

NF P 94 – 078 (1997) Norme française, Sols : reconnaissance et essais. Indice CBR après immersion, Indice CBR Immédiat, Indice Portant Immédiat.

NF P 94 – 093 (2014) Norme française, Sols : reconnaissance et essais. Détermination des références de compactage d'un matériau. Essai Proctor Normal, Essai Proctor Modifié.

Nguyen, P (2008). Étude en place et au laboratoire du comportement en petites déformations des sols argileux naturels. Thèse de Doctorat, ENPC, France.

Ordener, L, " Déchets du BTP : recyclage et valorisation du béton de déconstruction", concrete dispatch, 2021. [En ligne].

<https://www.concretedispatch.eu/blog/recyclage-du-beton-de-deconstruction/> [consulté le 6 juin 2024].

Ordener, L, "La structure de la chaussée routière", concrete dispatch, 2023. [En ligne].

<https://www.concretedispatch.eu/blog/structure-chaussee-routiere/> [consulté le 28 mai 2024].

Ordener, L, " Déchets du BTP : recyclage et valorisation du béton de déconstruction", concrete dispatch, 2021. [En ligne]. <https://www.concretedispatch.eu/blog/recyclage-du-beton-de-deconstruction/> [consulté le 7 juin 2024].

Oubahdou, Y (2022). Etude expérimentale et rationnelle de la dégradation des couches de surfaces de chaussées. Thèse de doctorat, Ecole doctorale Sciences et ingénierie des matériaux, mécanique, énergétique (Poitiers ; 2018-2022), France.

Oubaoug, R, "dimensionnement des structures de chaussées", CERET [En ligne]. <https://fr.scribd.com/document/700446001/Chap-1-Generalites> [consulté le 28 mai 2024].

Peirs, G. (2004), La brique. (1ère édition). Librairie Eyrolles, France.

Pimienta. P & Remond. (1997). Bétons de déchets : prévenir les risques. CSTB magazine, n° 109, France.

Radisson, L, (2014), " Le stockage de déchets inertes relèvera du régime d'enregistrement ICPE", Environnement et technique. France.

Raujolles, " Plaquette de parement rouge ", Terre cuite de Raujolles, [En ligne]. <https://www.terres-cuites-raujolles.fr/fr/20-parement-deco> [consulté le 5 juin 2024].

Robitaille, V et Tremblay, D. (2014), Mécanique des sols –Théorie et pratique. (2 ème édition), Modulo éditeur, Québec.

Sorevo environnement, "Six avantages du recyclage pour notre société ", sorevo 2023. [En ligne]. <https://www.sorevo.com/avantages-recyclage> [consulté le 5 juin 2024].

Souyeh, " Processus de fabrication de brique ", groupe souyeh 2018. [En ligne]. <https://www.groupe-souyeh.dz/processus-de-production/> [consulté le 6 juin 2024].

Torregrossa et al. (2006). Somatic chimerism, genetic inheritance, and mapping of the fleshless berry (flb) mutation in grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Genome*

Tp demain, "les différents types de chaussées " [En ligne].

<https://tpdemain.com/module/les-differents-types-de-chaussee/> [consulté le 1 juin 2024].

Thoumelin, P & Brula, P. (2005), Risques sanitaires engendrés par la valorisation des déchets (recyclage et réutilisation) : état des connaissances : Rapport intermédiaire. Record Lyon, France.

Tremblay, M, 2024, " Nid de poule". [En ligne].

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Nid-de-poule#> [consulté le 1 juin 2024].

Yang H. Huang, (2004), Pavement Analysis and Design., Kentucky, USA, 776 pages.

Zemmiri, A (2008). Comparaison des formulations d'enrobés à chaud pour couches de roulement des chaussées très circulées utilisées en France et en Algérie du point de vue sécurité (glissance) et orniérage. Mémoire de fin d'études, ENTPE, Lyon, France.