

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO)

Faculté du Génie de la Construction

Département de Génie Civil



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

*En vue de l'obtention du diplôme de Master
de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou*

Filière : Génie Civil

Spécialité : Géotechnique

Thème

**Elaboration d'un matériau à base de débris
de béton, de brique et de laitier pour une
valorisation en construction routière**

Présenté par :

M^r OULD BELKACEM Ghilas

Devant le jury composé de :

Mme MEZIANI Farroudja.....Maitre de conférences classe A à l'UMMTO.....Présidente.

Mme MOBAREK Houria.....Maitre assistante classe A à l'UMMTO..... Examinatrice.

Mr BOUDLAL Omar.....Maitre de conférences classe A à l'UMMTO.....Encadrant.

Promotion : 2024 / 2025

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Avant tout, je remercie chaleureusement Mr BOUDLAL Omar, pour son accompagnement, ses conseils précieux, sa disponibilité et son encadrement tout au long de ce travail.

Je souhaite également remercier Mme MEZIANI Farroudja, maitre de conférences classe A à l'UMMTO pour l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant de présider le jury de cette soutenance.

Je souhaite également remercier Mme MOBAREK Houria, maitre assistante classe A à l'UMMTO pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent également aux 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 le temps qu'ils m'ont accordé et les informations précieuses qu'ils m'ont fournies.

Je n'oublie pas ma famille et mes amis, dont le soutien moral, les encouragements et la bienveillance m'ont été d'un grand secours tout au long de cette période exigeante.

À toutes et à tous, merci.

Ghilas

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à mes chers parents,

Pour leur amour, leur patience et leur soutien constant. Merci de m'avoir toujours encouragé, même dans les moments difficiles. Vous avez été ma source de force et de motivation.

À ma famille toute entière,

Merci pour votre présence, vos encouragements et vos prières. Votre confiance en moi m'a beaucoup aidé à persévérer jusqu'au bout.

À mes frères et sœurs,

Merci pour vos mots réconfortants, vos blagues qui m'ont redonné le sourire, et votre soutien discret mais précieux.

À mes amis proches,

Qui m'ont accompagné dans ce parcours, de près ou de loin. Merci pour votre écoute, vos conseils et vos encouragements dans les moments de doute.

Je pense aussi à tous ceux qui m'ont soutenu, parfois sans le savoir, à travers un mot gentil, un sourire ou une simple présence.

A tous mes camarades de ma promo M2 géotechnique et tous mes amis de longue date.

Ghilas

LISTE DES PRINCIPALES NOTIONS, INDICES ET ABRÉVIATIONS

$(\gamma_d/\gamma_w)_{\max}$: Densité sèche maximale ;

ρ : Masse volumique totale ;

ρ_d : Masse volumique sèche ;

ρ_h : Masse volumique humide ;

ρ_s : Masse volumique des grains solides ;

ρ_w : Masse volumique de l'eau ;

CBR : Indice CBR immédiat ;

CBR_{imm} : Indice CBR après immersion ;

D10 : Diamètre correspondant à 10% des tamisats cumulés ;

DEEE : Déchets électriques et électroniques.

DG : Coefficient de dégradabilité ;

DIB : Déchets industriels banals ;

e : Indice des vides ;

EPA : Agence de protection de l'environnement des États-Unis ;

FAO : Food and agriculture organization of the united nations ;

FR : Coefficient de fragmentabilité ;

G : Gonflement linéaire relatif ;

ISDD : Installations de stockage des déchets dangereux ;

ISDI : Installations de stockage des déchets inertes ;

ISDND : Installations de stockage des déchets non dangereux ;

L_A : Coefficient Los Angeles ;

MDE : Coefficient Micro-Deval ;

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

M_s : Masse des particules solides ;

n : Porosité ;

OCDE : Organisation de coopération et de développement économique ;

S_r : Degré de saturation ;

USGS : United states geological survey.

V_a : Volume de l'air ;

V_s : Volume des particules solides ;

V_t : Volume total ;

V_v : Volume des vides ;

V_w : Volume de l'eau ;

w : Teneur en eau naturelle ;

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

γ : Poids volumique total ;

γ_h : Poids volumique humide ;

γ_s : Poids volumique des grains solides ;

γ_w : Poids volumique de l'eau ;

γ_d : Poids volumique sec ;

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

| | |
|---|----|
| Figure I.1. Les différentes couches de la chaussée routière | 4 |
| Figure I.2. Structure d'une chaussée souple..... | 6 |
| Figure I.3. Structure d'une chaussée semi-rigide..... | 6 |
| Figure I.4. Structure d'une chaussée rigide..... | 7 |
| Figure I.5. Structure d'une chaussée mixte..... | 7 |
| Figure I.6. Structure d'une chaussée inverse | 8 |
| Figure I.7. Structure d'une chaussée bitumineuse épaisse..... | 8 |
| Figure I.8. Orniérage d'une route | 10 |
| Figure I.9. Affaissement de rive | 11 |
| Figure I.10. Les flaches | 11 |
| Figure I.11. Fissurations longitudinales en France | 12 |
| Figure I.12. Fissures transversales de la chaussée | 13 |
| Figure I.13. Faiénçage d' une chaussée | 13 |
| Figure I.14. Fissuration par fatigue | 14 |
| Figure I.15. Nid de poule a Villeray, Canada | 14 |
| Figure I.16. La pelade | 15 |
| Figure I.17. Le plumage d'une chaussée..... | 16 |
| Figure I.18. Le Ressuage d'une chaussée..... | 16 |
| Figure I.19. Marché mondiale des granulats de construction | 21 |

Chapitre II

| | |
|---|----|
| Figure II.1. Centre des déchets inertes de seghirate, commune de Thenia | 26 |
| Figure II.2. Déchets non dangereux non inertes..... | 26 |
| Figure II.3. Déchets dangereux, peintures et vernis | 27 |
| Figure II.4. Déchets de construction..... | 29 |
| Figure II.5. Travaux de démolition à Tizi Ouzou en 2022..... | 30 |
| Figure II.6. Déchets de béton contaminé..... | 30 |
| Figure II.7. Déchets de béton armé | 31 |
| Figure II.8. Déchets de béton contenant de l'amiante | 31 |
| Figure II.9. Déchets de brique neuve..... | 32 |
| Figure II.10. Déchets de démolition de brique..... | 32 |

| | |
|---|----|
| Figure II.11. Déchets de Brique contaminée..... | 33 |
| Figure II.12. Déchets de laitier granulé..... | 33 |
| Figure II.13. Déchets de laitier cristallisé..... | 34 |
| Figure II.14. Le compostage..... | 36 |
| Figure II.15. Centrale de recyclage de béton | 37 |
| Figure II.16. Brique pleine | 37 |
| Figure II.17. Brique réfractaire..... | 37 |
| Figure II.18. Brique creuse..... | 38 |
| Figure II.19. Brique monomur | 38 |
| Figure II.20. Brique parement | 38 |
| Figure II.21. Brique de verre | 38 |
| Figure II.22. Production du laitier haut fourneau | 39 |
| Figure II.23. Laitier granulé | 40 |
| Figure II.24. Laitier cristallisé..... | 40 |

Chapitre III

| | |
|---|----|
| Figure III.1. Les blocs de béton réduits manuellement | 44 |
| Figure III.2. Concassage du béton au concasseur mécanique. | 44 |
| Figure III.3. Courbe granulométrique des matériaux et des mélanges étudiés(NF EN 13-285, 2010)..... | 45 |
| Figure III.4. Tamisage électrique (Dans les cas des gros grains)..... | 45 |
| Figure III.5. Tamisage du béton à la main (Dans les cas des petits grains) | 45 |
| Figure III.6. Concassage de la brique..... | 46 |
| Figure III.7. Tamisage de la brique selon les fractions fin, moyen et grossier. | 46 |
| Figure III.8. Mode opératoire (Pesée hydrostatique). | 47 |
| Figure III.9. Exécution de l'essai au pycnomètre..... | 50 |
| Figure III.10. Broyage de laitier..... | 53 |
| Figure III.11. Tamisage de laitier selon les fractions fin, moyen et grossier | 53 |
| Figure III.12. Les différentes fractions des matériaux substitués | 55 |

Chapitre IV

| | |
|--|----|
| Figure IV.1. Compactage des sols | 56 |
| Figure IV.2. Influence de l'énergie de compactage | 57 |
| Figure IV.3. Influence de la teneur en eau sur le compactage | 58 |

| | |
|--|----|
| Figure IV.4. Influence de la nature du sol sur la courbe Proctor | 58 |
| Figure IV.5. Répartition des coups de compactage dans les moules Proctor et CBR..... | 60 |
| Figure IV.6. Mode opératoire des essais Proctor modifié réalisés. | 61 |
| Figure IV.7. Courbes Proctor relatives au compactage des mélanges des débris de béton avec des débris de brique..... | 62 |
| Figure IV.8. Densités sèches maximales (débris de béton + débris de brique)..... | 63 |
| Figure IV.9. Évolutions des teneurs en eau en fonction de l'ajout de débris de brique..... | 64 |
| Figure IV.10. Courbe Proctor de béton avec l'ajout d'éléments du laitier. | 65 |
| Figure IV.11. Évolutions des densités sèches maximales en fonction de l'ajout des éléments du laitier..... | 66 |
| Figure IV.12. Évolutions des teneurs en eau en fonction de l'ajout d'éléments du laitier..... | 67 |
| Figure IV.13. Courbe Proctor comparative de tous les échantillons..... | 67 |
| Figure IV.14. Évolutions des densités sèches maximales en fonction de tous les échantillons. | 68 |
| Figure IV.15. Évolutions des teneurs en eau en fonction de tous les échantillons. | 68 |
| Figure IV.16. Confection de l'éprouvette pour essai CBR. | 71 |
| Figure IV.17. Appareillage pour CBR immersion. | 71 |
| Figure IV.18. La machine de poinçonnement LoadTrac II (LGEA)..... | 71 |
| Figure IV.19. Poinçonnement des éprouvettes laboratoire LGEA..... | 72 |
| Figure IV.20. Essai CBR après immersion, imbibition et gonflement..... | 72 |
| Figure IV.21. Courbe enfoncements-forces de Débris de béton seul..... | 73 |
| Figure IV.22. Courbe enfoncements-forces de Débris de béton + brique fine | 73 |
| Figure IV.23. Courbe enfoncements-forces de Débris de béton + brique fine et moyenne..... | 73 |
| Figure IV.24. Courbe enfoncements-forces de Débris de béton + brique fine, moyenne et grossière..... | 73 |
| Figure IV.25. Evolution des indices CBR immédiats en fonction de la teneur en brique. | 74 |
| Figure IV.26. Courbe enfoncements-forces de débris de béton seul..... | 75 |
| Figure IV.27. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + brique fine | 75 |
| Figure IV.28. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + brique fine et moyenne..... | 75 |
| Figure IV.29. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + brique fine, moyenne et grossière..... | 75 |
| Figure IV.30. Evolution des indices CBR après immersion en fonction de la teneur en brique | 76 |

| | |
|--|----|
| Figure IV.31. Courbes comparatives des CBR et CBR_{imm} des différents ajouts de débris de brique..... | 77 |
| Figure IV.32. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + laitier fin | 78 |
| Figure IV.33. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + laitier fin et moyen | 78 |
| Figure IV.34. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + laitier fin, moyen et grossier | 78 |
| Figure IV.35. Evolution des indices CBR immédiats en fonction de la teneur en laitier. | 79 |
| Figure IV.36. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + laitier fin | 79 |
| Figure IV.37. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + laitier fin et moyen | 79 |
| Figure IV.38. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + laitier fin, moyen et grossier | 80 |
| Figure IV.39. Évolution des indices CBR immersion en fonction de la teneur en laitier. | 80 |
| Figure IV.40. Courbes comparatives des CBR et CBR_{imm} des différents ajouts d'éléments de laitier..... | 81 |
| Figure IV.41. Courbes comparatives des indices CBR immédiats pour les différents échantillons..... | 82 |
| Figure IV.42. Courbes comparatives des indices CBR_{imm} pour les différents échantillons..... | 83 |

Chapitre V

| | |
|---|----|
| Figure V.1. Machine Micro-Deval. | 85 |
| Figure V.2. Mode opératoire de l'essai Micro-Deval. | 86 |
| Figure V.3. Résultats des essais micro Deval. | 87 |
| Figure V.4. Machine d'essai Los Angeles. | 88 |
| Figure V.5. Mode opératoire de l'essai micro Deval. | 89 |
| Figure V.6. Résultats des essais Los Angeles. | 90 |
| Figure V.7. Mode opératoire de l'essai de dégradabilité. | 92 |
| Figure V.8. Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité (béton seul)..... | 93 |
| Figure V.9. Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité (brique seul).... | 94 |
| Figure V.10. Pesée et mise du matériau dans le moule CBR. | 95 |
| Figure V.11. Courbes granulométriques avant et après essai de fragmentabilité(béton seul) | 96 |
| Figure V.12. Courbes granulométriques avant et après essai de fragmentabilité(brique seul) | 97 |

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II

| | |
|--|----|
| Tableau II.1. La durée de vie des déchets dans la nature | 25 |
| Tableau II.2. La composition chimique de Laitier d'EL HADJAR. | 40 |

Chapitre III

| | |
|--|----|
| Tableau III.1. Fiche technique des débris de brique (brique 12 trous)..... | 46 |
| Tableau III.2. Détermination de la teneur en eau. | 47 |
| Tableau III.3. Résultats de la détermination de la masse volumique sèche de débris de béton | 48 |
| Tableau III.4. Résultats de la détermination de la masse volumique sèche de débris de brique | 48 |
| Tableau III.5. Appréciation de la masse volumique sèche selon la norme NF P94-064..... | 49 |
| Tableau III.6. Résultats de la détermination de la masse volumique des particules solides. ... | 50 |
| Tableau III.7. Appréciation du degré de saturation. (D'après TERZAGHI). | 52 |
| Tableau III.8. Détermination de la porosité. | 52 |
| Tableau III.9. Récapitulatif des résultats des essais d'identification. | 52 |
| Tableau III.10. Caractérisation physico-chimique et mécanique du laitier..... | 54 |

Chapitre IV

| | |
|--|----|
| Tableau IV.1. Conditions des essais Proctor normal et modifié NF P 94-078..... | 59 |
| Tableau IV.2. Teneurs en eau optimales et densités sèches maximales (débris de béton + débris de brique)..... | 62 |
| Tableau IV.3. Teneurs en eau optimales et des densités sèches maximales des différents mélanges (débris de béton + éléments de laitier) | 64 |
| Tableau IV.4. Résultats des essais CBR immédiats..... | 74 |
| Tableau IV.5. Résultats des essais CBR après immersions | 76 |
| Tableau IV.6. Résultats d'essai CBR (CBR et CBR imm)..... | 77 |
| Tableau IV.7. Résultats des essais CBR immédiats (CBR). | 80 |
| Tableau IV.8. Résultats des essais CBR immersions (CBR). | 80 |
| Tableau IV.9. Récapitulatif des résultats d'essais CBR (CBR et CBR _{imm}) pour les échantillons des débris de béton + laitier..... | 81 |

Chapitre V

| | |
|---|----|
| Tableau V.1. Charge de boulets suivant le type de classe granulaire (NF P18-572). | 86 |
| Tableau V.2. Charge de boulets suivant le type de classe granulaire (NF P 18-573). | 89 |
| Tableau V.3. Catégories des granulats selon la résistance aux chocs et à l'usure (NF P 18-573). | 91 |
| Tableau V.4. Coefficients LA et MDE pour les différents échantillons. | 91 |
| Tableau V.5. Classification des matériaux rocheux (NF P 94-067). | 93 |
| Tableau V.6. Classification des matériaux rocheux selon le coefficient FR (NF P 94-066). .. | 96 |

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS ET DEDICACES.

LISTE DES PRINCIPALES NOTIONS, INDICES ET ABRÉVIATIONS.

LISTE DES FIGURES.

LISTE DES TABLEAUX.

INTRODUCTION GÉNÉRALE..... 1

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES CHAUSSÉES

| | |
|---|----|
| I.1. Introduction..... | 3 |
| I.2. Définition et rôle d'une chaussée..... | 3 |
| I.3. Les différents couches d'une chaussée | 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 | 4 |
| I.3.2.1. Couche de base | 4 |
| I.3.2.1. Couche de fondation..... | 4 |
| I.3.3. Plateforme support de chaussée (PFSC) | 5 |
| I.3.3.1. Le sol support | 5 |
| I.3.3.2. Couche de forme (CdF)..... | 5 |
| I.4. Les différentes types de chaussées..... | 5 |
| I.4.1. Les chaussées souples ou flexibles..... | 5 |
| I.4.2. Les chaussées semi-rigides..... | 5 |
| I.4.3. Les chaussées rigides | 6 |
| I.4.4. Les chaussées mixtes..... | 6 |
| I.4.5. Les chaussées inverses | 7 |
| I.4.6. Les chaussées bitumineuses épaisses | 7 |
| I.5. Facteurs considérés pour le dimensionnement d'une chaussée | 8 |
| I.6. Dégradations des chaussées | 8 |
| I.6.1. Causes des dégradations..... | 8 |
| I.6.2. Types des dégradations des chaussées | 9 |
| I.6.2.1. Les déformations | 10 |
| I.6.2.2. Fissuration | 12 |

| | |
|--|----|
| I.6.2.3. Arrachements..... | 14 |
| I.6.2.4. Remontées | 16 |
| I.7. Les matériaux routiers..... | 17 |
| I.7.1. Les granulats | 17 |
| I.7.2. Les paramètres exigées pour les granulats | 17 |
| I.7.3. Les origines des granulats | 18 |
| I.7.4. Les matériaux pour assises de chaussées | 18 |
| I.8. Production des granulats dans de monde | 20 |
| I.9. Conclusion | 21 |

CHAPITRE II : RECYCLAGE ET VALORISATION DES DÉCHETS

| | |
|--|----|
| II.1. Introduction..... | 22 |
| II.2. Généralités sur les déchets | 22 |
| II.2.1. Définition d'un déchet | 22 |
| II.2.2. Les différents types des déchets | 22 |
| II.2.3. Origine de la production des déchets | 23 |
| II.2.4. Les déchets de chantier | 25 |
| II.2.5. Différents types de déchets en génie civil..... | 27 |
| II.2.5.1. Les déchets de construction..... | 27 |
| II.2.5.2. Les déchets de démolition | 28 |
| II.2.6. Différents types de déchets (débris) de béton | 29 |
| II.2.7. Différents types de déchets (débris) de brique..... | 30 |
| II.2.8. Différents types de déchets du haut fourneau (laitier) | 32 |
| II.3. Recyclage et valorisation des déchets..... | 33 |
| II.3.1. Définition de la valorisation des déchets | 33 |
| II.3.2. Objectifs de recyclage et valorisation des déchets | 33 |
| II.3.3. Les différentes techniques de valorisation des déchets..... | 34 |
| II.3.4. Valorisation des déchets de béton | 35 |
| II.3.5. Les différents types de la brique | 36 |
| II.3.6. Domaines d'utilisation des briques recyclées | 37 |
| II.4. Généralités sur le laitier de haut-fourneau | 38 |
| II.4.1. Laitier de haut-fourneau granulé..... | 39 |
| II.4.2. Laitier de haut-fourneau cristallisé | 39 |
| II.4.2.1. La Composition chimique du laitier cristallisé | 40 |

| | |
|---|----|
| II.4.2.2. Valorisation du laitier cristallisé | 40 |
| II.5. Conclusion | 41 |

CHAPITRE III : IDENTIFICATION DES MATERIAUX ET PREPARATION DES ECHANTILLONS

| | |
|---|----|
| III.1. Introduction | 42 |
| III.2. Présentation et identification des matériaux..... | 42 |
| III.2.1 Les débris de béton | 42 |
| III.2.2. Les débris de brique..... | 43 |
| III.2.3. Les débris de laitier..... | 43 |
| III.3. Préparation des débris de béton et de brique..... | 43 |
| III.3.1. Concassage et tamisage des débris de béton | 43 |
| III.3.2. Concassage et tamisage de la brique | 45 |
| III.3.3. Teneur en eau (w) (NF P94-050)..... | 46 |
| III.3.4. Les masses volumiques | 47 |
| a) La masse volumique sèche ρ_d (NF P94-064)..... | 47 |
| b) La masse volumique humide ρ_h (NF P94-053)..... | 49 |
| c) La masse volumique des particules solide ρ_s (NFP94-054)..... | 49 |
| III.3.5. Indice des vides (e) | 50 |
| III.3.6. Degré de saturation (S_r) | 51 |
| III.3.7. Porosité | 52 |
| III.4. Préparation du laitier | 53 |
| III.4.1. Concassage et tamisage du laitier utilisé | 53 |
| III.4.2. Quelques propriétés du laitier cristallisé d'EL HADJAR | 54 |
| III.5. Préparation des échantillons | 54 |
| III.6. Conclusion..... | 55 |

CHAPITRE IV : COMPACTAGE ET PORTANCE DES MATERIAUX ETUDIÉS

| | |
|--|----|
| IV.1. Introduction | 56 |
| IV.2. Essais de compactage..... | 56 |
| IV.2.1. Définition du compactage | 56 |
| IV.2.2. But du compactage | 57 |

| | |
|--|----|
| IV.3. Les facteurs qui influencent le compactage | 57 |
| IV.3.1. Energie de compactage..... | 57 |
| IV.3.2. Teneur en eau | 58 |
| IV.3.3. Nature du sol | 58 |
| IV.4. Les essais de compactage au laboratoire..... | 59 |
| IV.4.1. Essai Proctor normal (NF P 94-093) | 59 |
| IV.4.2. Essai Proctor modifié (NF P 94-093) | 59 |
| IV.4.3. Essais réalisés | 60 |
| IV.4.4. Expression des résultats..... | 62 |
| IV.5. Essais de portance CBR (California Bearing Ratio) NF P 94-078 | 69 |
| IV.5.1. But de l'essai | 69 |
| IV.5.2. Principe de l'essai (NF P 94-078) | 69 |
| IV.5.3. Mode opératoire (NF P 94-078) | 71 |
| IV.5.4. Détermination de l'indice CBR immédiat..... | 72 |
| IV.5.5. Détermination de l'indice CBR après immersion (mesure du gonflement relatif) | 72 |
| IV.6. Expression des résultats | 73 |
| IV.6.1. Interprétation des résultats de débris de béton avec débris brique | 73 |
| IV.6.2. Interprétation des résultats de débris de béton avec éléments du laitier..... | 78 |
| IV.6.3. Interprétation des résultats des différents mélanges avant et après immersion..... | 82 |
| IV.7. Conclusion..... | 84 |

CHAPITRE V : AUTRES ESSAIS ROUTIERS

| | |
|---|----|
| V.1. Introduction | 85 |
| V.2. Essai Micro-Deval..... | 85 |
| V.2.1. Définition et but de l'essai (NF P18-572)..... | 85 |
| V.2.2. Principe de l'essai | 86 |
| V.2.3. Matériaux utilisées | 87 |
| V.2.4. Résultats de l'essai..... | 87 |
| V.3. Essai Los Angeles (NF P 18-573) | 88 |
| V.3.1. Définition et but de l'essai | 88 |
| V.3.2. Principe de l'essai | 88 |
| V.3.3. Matériaux utilisés..... | 90 |
| V.3.4. Résultats des essais | 90 |
| V.4. Essai de dégradabilité des matériaux rocheux (NF P 94-067) | 92 |

| | |
|--|----|
| V.4.1. Principe de l'essai | 92 |
| V.4.2. Exécution de l'essai | 92 |
| V.4.3. Matériaux utilisés..... | 93 |
| V.4.4. Résultats obtenus | 93 |
| V.5. Essai de fragmentabilité des matériaux rocheux (NF P 94-066)..... | 94 |
| V.5.1. Principe de l'essai..... | 94 |
| V.5.2. Exécution de l'essai | 95 |
| V.5.3. Matériaux utilisés..... | 95 |
| V.5.4. Résultats des essais | 96 |
| V.6. Conclusion..... | 97 |
| | |
| CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES..... | 98 |
| RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES. | |
| ANNEXES. | |

INTRODUCTION GENERALE

Dans un contexte mondial marqué par l'épuisement progressif des ressources naturelles, l'urbanisation croissante et la pression environnementale liée à la gestion des déchets issus du secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP), la valorisation des matériaux recyclés représente une solution stratégique et durable. Chaque année, des millions de tonnes de débris inertes tels que le béton, la brique et de sous-produits industriels comme le laitier de hauts fourneaux sont générés ; posant des problèmes considérables de stockage, de transport et d'impacts environnementaux. Dans cette optique, leur réintégration dans les filières de production, notamment dans le domaine de la construction routière, constitue une opportunité à fort potentiel aussi bien sur le plan technique qu'économique et écologique.

Les matériaux issus de la démolition, tels que les débris de béton et de briques, possèdent des caractéristiques granulométriques et mécaniques intéressantes qui, après traitement, peuvent permettre leur utilisation comme matériaux de substitution aux granulats naturels. De même, le laitier, sous-produit de l'industrie sidérurgique, présente des propriétés hydrauliques et une stabilité chimique qui en font un matériau pertinent pour les applications routières, notamment dans les couches de fondation et les couches de base. L'utilisation conjointe de ces matériaux recyclés permettrait de réduire considérablement la dépendance aux carrières, de limiter les impacts liés à l'extraction de matériaux vierges et de favoriser une économie circulaire dans les secteurs du bâtiment et des travaux publics (BTP).

Cependant, la valorisation de ces matériaux dans les travaux routiers ne peut être envisagée sans une caractérisation rigoureuse de leurs propriétés physiques, mécaniques et environnementales. Leur comportement sous chargement, leur capacité de portance, leur durabilité dans le temps ainsi que leur compatibilité avec les exigences normatives en vigueur sont autant de paramètres à évaluer pour garantir la qualité et la sécurité des ouvrages.

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans cette dynamique de recherche et d'innovation sur le recyclage, il a pour objectif, l'étude du comportement de mélanges reconstitués de débris de béton, de briques et de laitier pour une utilisation dans les couches inférieures de chaussées.

Après avoir identifié et concassé les matériaux récupérés selon une granulométrie bien définie, des échantillons sont reconstitués en mélanges de débris de béton+ brique et débris de béton+ laitier. Afin d'analyser la performance des matériaux étudiés, les échantillons sont soumis aux principaux essais mécaniques et routiers en laboratoire, à savoir : les essais de compactage au

Proctor modifié, les essais de portance CBR avant et après immersion, les différents essais routiers proprement dits (Los Angeles, Micro Deval, fragmentabilité et dégradabilité). Les principaux résultats obtenus, sont comparés ensuite aux exigences des normes en vigueur pour classification.

Pour présenter le travail réalisé dans ce mémoire, nous avons scindé ce dernier en cinq chapitres synthétisés par des conclusions et quelques perspectives.

Le chapitre I, présente des généralités sur les chaussées. Il traite principalement, les définitions des différentes couches constituant une chaussée, les différents types de chaussées, leurs dégradations, ...

Le chapitre II, est consacré aux généralités sur le recyclage à savoir, les matériaux recyclés, l'importance du recyclage dans le génie civil et quelques statistiques sur le recyclage. Il s'intéresse particulièrement aux débris de bétons, aux débris de briques ainsi qu'aux déchets de laitiers.

Le chapitre III introduit la partie expérimentale de cette étude. Il est consacré aux différents essais d'identification des matériaux utilisés afin de déterminer les caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques. Il présente également le protocole expérimental adopté, notamment en ce qui concerne la préparation des différents échantillons (granulométries, proportions, ...).

Dans le chapitre IV, nous avons présenté la première série d'essais mécaniques réalisés au laboratoire à savoir, les essais de compactage au Proctor modifié et les essais de portance CBR. Ces essais permettent d'évaluer l'aptitude des mélanges étudiés au compactage ainsi que leur portance à l'état normal et sous les plus mauvaises conditions hygrométriques.

Le chapitre V, porte sur les principaux essais routiers proprement dit, indispensables pour valider tout matériau destiné aux corps de chaussées. Sont présentés les résultats des différents échantillons soumis aux essais Los Angeles, aux essais Micro-Deval, aux essais de dégradabilité et aux essais de fragmentabilité.

Enfin, le présent mémoire est terminé par des conclusions synthétisant les principaux résultats obtenus et quelques perspectives et recommandations pour de futures recherches dans le même domaine.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR LES CHAUSSÉES

I.1. Introduction

Sur le plan des chaussées de très nombreuses évolutions s'opèrent au fil du temps, répondant aux préoccupations accrues du trafic, aux progrès accomplis dans le domaine des œuvres de construction. Comme leur développement se fait sur une étude très précise du terrain, du sol et des risques climatiques, leur performance est maximale. Aujourd'hui la réalisation des chaussées adopte des méthodes nouvelles plus performantes pour sa durabilité et réduisant son impact environnemental. Il s'agit dans ce chapitre de décrire de manière globale les caractéristiques des routes modernes en donnant des informations complémentaires sur les différentes couches que constitue une chaussée et les types de revêtements, en additionnant aussi les données déterminantes de leur conception. Il traitera également les effets de déformation constatés sur les revêtements souples.

I.2. Définition et rôle d'une chaussée

La chaussée est définie comme la portion d'une voie aménagée pour le passage des engins de transport moteurs ou non moteurs. Elle est souvent considérée comme une couche plane, créée pour absorber les agressions du trafic qui n'a pas à atteindre le sol sur lequel elle repose. La chaussée a une fonction de supporter le poids des véhicules et les déformations exercées sur le sol support. (Carillo et al..., 2024)

Il est important de noter que la chaussée est composée de plusieurs couches, chacune ayant une fonction spécifique. La couche supérieure, souvent appelée revêtement. Elle doit être suffisamment résistante pour supporter les charges et les conditions climatiques variées. En dessous, des couches intermédiaires et une base sont également présentes, contribuant à la stabilité et à la durabilité de l'ensemble de la structure.

La fonction première de la chaussée est de faciliter les déplacements des usagers et le transport des marchandises les mieux que de sécurité et de confort possibles. Voici à cela les eaux pluviales et tout ce qui implique la gestion d'une eau de pluie afin d'éviter l'accumulation de l'eau au-dessus d'un réseau routier ce qui permet d'arranger les lieux pour les besoins de la sécurité routière. En plus de cela, la voie de circulation doit être conçue pour faire face à l'usure provoquée par la circulation routière quotidienne et aussi aux températures et aux conditions pluviométriques. (LCPC, 1994)

I.3. Les différents couches d'une chaussée

Les différentes couches d'une chaussée sont essentielles pour assurer sa durabilité et sa fonctionnalité (LCPC, 1994). Voici un aperçu des principales couches qui composent une chaussée :

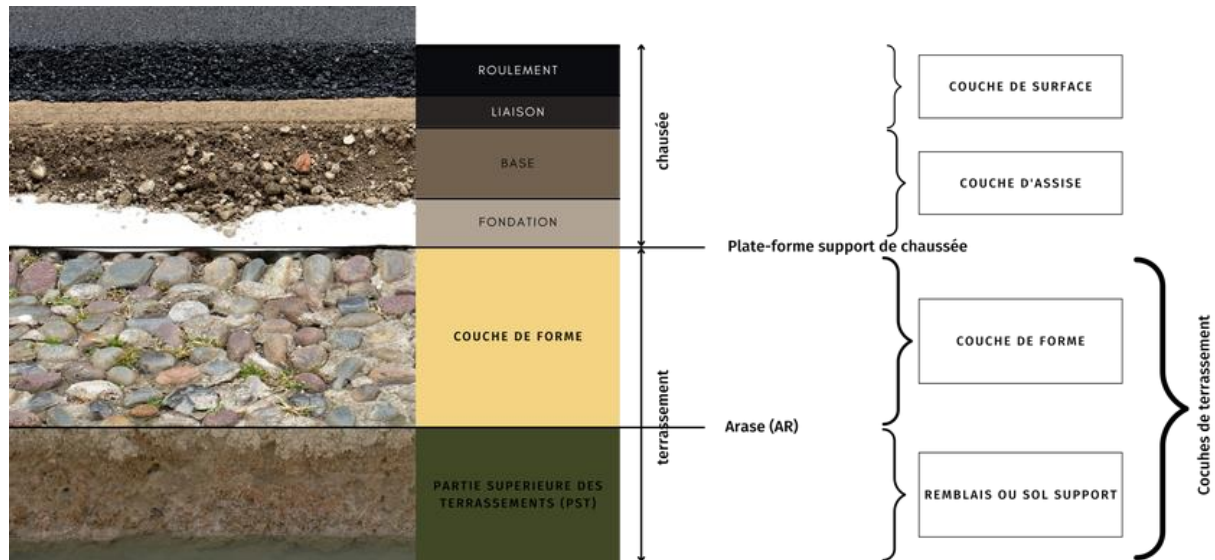


Figure I.1. Les différentes couches de la chaussée routière (Ordener, 2023).

I.3.1. Couche de surface

La couche de surface d'une chaussée désigne la couche supérieure de la structure de chaussée lorsqu'elle est en contact direct des agressions conjuguées du trafic et du climat, Elle est composée de la couche de roulement et la couche de liaison.

I.3.1.1. Couche de roulement

C'est la partie supérieure de la chaussée, laquelle peut s'appuyer – soit sur le béton, soit sur le bitume. Elle doit présenter une bonne adhérence et résistance aux intempéries et à l'érosion causé par le trafic.

I.3.1.2. Couche de liaison

La couche de liaison est une couche de transition entre la couche de base et la couche de roulement de la chaussée. Sa composition (nature, granulométrie) doit être intermédiaire entre les compositions des couches inférieures et supérieures. La couche de liaison permet d'adapter les spécificités de la couche de roulement au confort et à la sécurité des usagers.

I.3.2. Couche d'assise

Elle est constituée d'une couche de fondation surmontée d'une couche de base, apportant une structure supplémentaire à la chaussée.

I.3.2.1. Couche de base

Elle est souvent faite de grave bitume de classe 3 ou de GNT de type B2. Cette couche joue un rôle clé dans la résistance à la déformation et à l'usure.

I.3.2.2. Couche de fondation

Généralement composée de graviers non traités (GNT) de type B1 ou B2. Cette couche est cruciale pour la stabilité de la chaussée et aide à supporter les charges de circulation.

I.3.3. Plateforme support de chaussée (PFSC)

La plate-forme support de chaussée (PFSC), qui fait le lien entre la partie chaussée et la partie terrassement et est la surface supérieure de la couche de forme.

I.3.3.1. Le sol support

Elle 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.

I.3.3.2. Couche de forme (CdF)

C'est la géométrie base de la chaussée, généralement composée d'origines naturelles ou d'esters. Elle permet de professer le profil de la chaussée et de répartir le poids.

I.4. Les différents types de chaussées

Il existe différents types de chaussées qui sont utilisées en fonction des besoins, des conditions climatiques et des volumes de trafic. Voici les types de chaussées les plus courants indiquer selon (Nguyen, 2008)

I.4.1. Les chaussées souples ou flexibles

Les chaussées souples sont à base d'une couche de surface en matériaux bitumeux. En dessous, il y a une assise support physique réalisée en matières granulaires non traitées composée d'une ou plusieurs couche(s). Cette épaisseur totale de la chaussée est généralement de 30 à 60 cm. On observe que la qualité du sol support a un impact très notable sur la durabilité de la chaussée sur le long terme.

La structure type se présente comme suit :

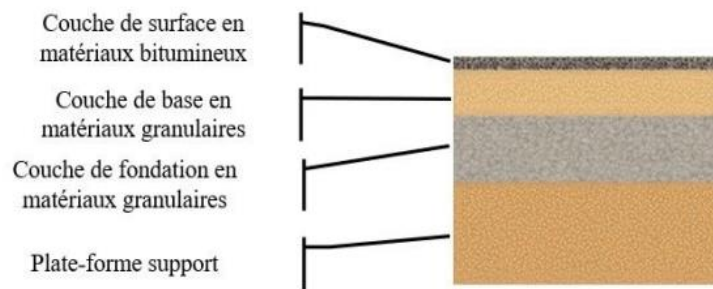


Figure I.2. Structure d'une chaussée souple (Nguyen, 2008).

I.4.2. Les chaussées semi-rigides

Ce type de chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques comprend une couche de surface bitumineuse posée sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques de 20 à 50 cm d'épaisseur. En raison du risque de grands retraits thermiques, des fissures peuvent se former et remonter jusqu'à la couche de surface.

La structure type se présente comme suit :

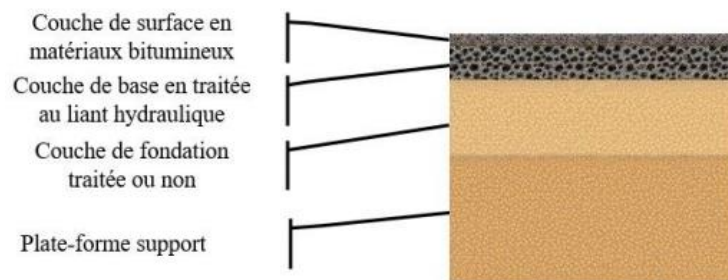


Figure I.3. Structure d'une chaussée semi-rigide (Nguyen, 2008).

I.4.3. Les chaussées rigides

Les chaussées rigides, elles sont faites de revêtement en béton de ciment pervibré ou fluide. Ce genre de chaussée est capable de supporter les sollicitations et transmet peu de contraintes sur le sol.

La structure type se présente comme suit :

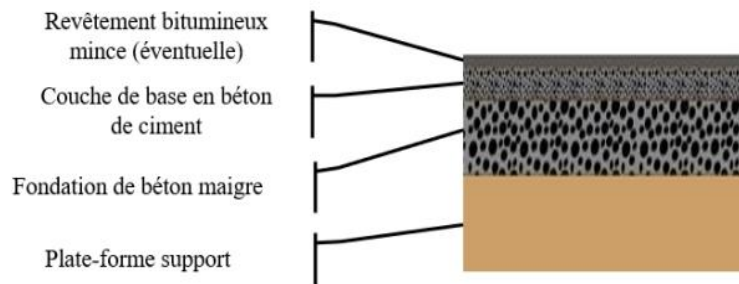


Figure I.4. Structure d'une chaussée rigide (Nguyen, 2008).

II.4.4. Les chaussées mixtes

Ces structures comportent une couche de roulement et une couche de base de revêtement en matériaux bitumineux, d'une épaisseur de base de 10 à 20 cm reposant sur une couche de fondation de revêtement des matériaux traités aux liants hydrauliques d'une épaisseur de 20 à 40 cm qui a pour fonction de lisser les efforts et d'accueillir les sols support.

La structure type se présente comme suit :

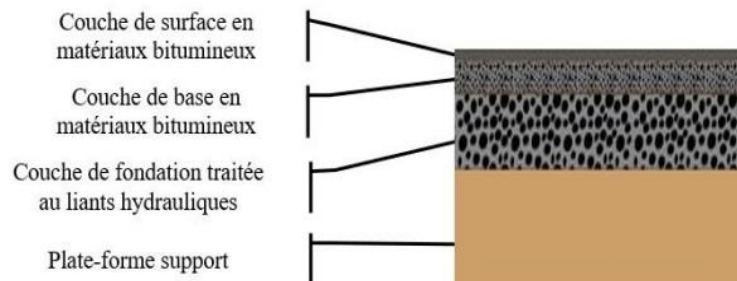


Figure I.5. Structure d'une chaussée mixte (Nguyen, 2008).

I.4.5. Les chaussées inverses

Ces voies sont composées en couches bitumineuses d'une épaisseur totale d'environ 15 centimètres sur une couche grave non-traité d'une épaisseur d'environ 12 centimètres, lui-même rejetant une couche de fondation constitué de matériaux aux liants hydrauliques. L'épaisseur de la structure complète est de 60 à 80 cm.

La structure type se présente comme suit :

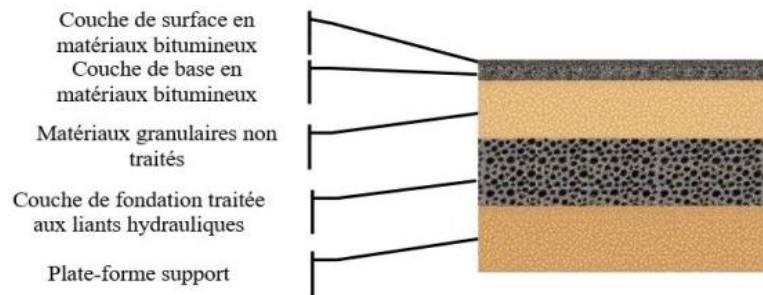


Figure I.6. Structure d'une chaussée inverse (Nguyen, 2008).

I.4.6. Les chaussées bitumineuses épaisses

Les chaussées bitumineuses réputées épaisses composés de revêtements bitumineux et d'une assise constituée de terrain traité avec le lié hydrocarbonée, une hauteur de 15 à 40 cm, avoir une certaine rigidité ces matériaux ont offrir le partage des pressions verticales et le diminuer l'efforts en bas du sol support.

La structure type se présente comme suit :

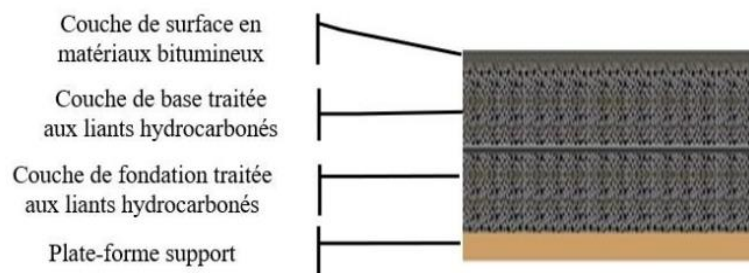


Figure I.7. Structure d'une chaussée bitumineuse épaisse (Nguyen, 2008).

I.5. Facteurs considérés pour le dimensionnement d'une chaussée

La conception d'une chaussée est selon Coquand (1978) et Faure (1998), fondée sur quatre paramètres essentiels. Celle-ci doit être conçue de telle sorte qu'elle assure une qualité suffisante et une longévité satisfaisante et reste également réalisable économiquement.

L'effet du trafic : La bonne intégration du trafic est centrale dans l'élaboration d'une voie de circulation. En effet, les matériaux des éléments doivent être sélectionnés en fonction de la charge qu'ils devront assurer à l'avenir.

L'influence de l'environnement : Le climat exerce un effet très vite dans la tenue des chaussées. La température modifie les caractéristiques des enrobés bitumineux et provoque des changements de fissuration des matériaux liés aux liants hydrauliques.

Le rôle du sol support : Le sol de la plateforme de base qui fait office de fondation pour l'ensemble de la structure routière. Celui-ci peut être solidarisé et complété par une couche de forme si besoin pour ajuster sa solidité.

L'importance de matériau : Les sables utilisés doivent être en état de supporter les souffrances cycliques engendrées par le passage fréquent des poids lourds de telle sorte que la chaussée reste stable et performante.

I.6. Dégradations des chaussées

I.6.1. Causes des dégradations

Les cinq principaux facteurs de destruction des chaussées sont

a. Le trafic routier

Le chevauchement permanent et la surcharge des véhicules percent des fissures, des ornières et fatigue du goudron.

b. Les conditions climatiques

Les températures plus basses (gel/dégel), les intempéries (force de pluie) et l'érosion minent la structure et accélèrent la formation de nids-de-poule.

c. L'infiltration d'eau

L'eau filtre à travers les vides, attaque la couche située en dessous et provoque des bourrelets et désordres de la chaussée.

d. Les défauts de construction

Un mauvais enrobe, des matières de mauvaise qualité ou une mauvaise conception diminuent la résistance et la durée d'utilisation de la piste.

e. Les agressions chimiques et biologiques

Les hydrocarbures, le salé, les racines d'arbres, les toutes sortes de réactions chimiques détériorent la surface, fragilisent la chaussée.

I.6.2. Types des dégradations des chaussées

I.6.2.1. Les déformations

a) Orniérage

L'orniérage est un tassement longitudinal de la chaussée localisé au niveau des bandes de roulement qui est dû à une fatigue de la chaussée par tassement des couches inférieures, lié à un défaut de portance du sol, ou à un sous-dimensionnement de la structure de la chaussée.



Figure I.8. Orniérage d'une route (Sienicki, 2011).

○ Causes préalables

- Trafic intense (surcharges répétées des poids lourds) ;
- Structure sous-dimensionnée (couches de base ou de fondation insuffisantes) ;
- Températures élevées (ramollissement du bitume).

b) Affaissements de rive

Les affaissements de rive sont des tassements en rive de chaussée formant une cuvette accompagnée d'un bourrelet à l'extérieur de la chaussée. Ils sont dus à une épaisseur de matériaux insuffisante en rive de chaussée et/ou à un problème de drainage accentué par l'infiltration des eaux stagnantes dans la cuvette formée.

L'affaissement de rive s'il n'est pas réparé peut évoluer en faïençage, puis en arrachage de couche de surface et en nid-de-poule.



Figure I.9. Affaissement de rive (Dal Pos, 2020).

○ **Causes préalables**

- Infiltration d'eau (décollement des couches latérales) ;
- Compactage insuffisant des matériaux en bordure ;
- Absence de dispositifs de drainage.

c) Flaches

Les flaches sont des tassements localisés en pleine voirie, de forme ovale. Ils sont le résultat d'une fatigue localisée sur les chaussées souples dû à un défaut de portance du sol. Ils entraînent un faïençage, puis un départ de matériaux qui forme un nid-de-poule.



Figure I.10. Les flaches (McClean, 2020).

- **Causes préalables**

- Portance inadéquate du sol support (sol argileux gonflant ou tassent) ;
- Défaut de contrôle géotechnique lors de la construction.

I.6.2.2. Fissuration

a) Fissures longitudinales

Cassures parallèles à l'axe de la route, liées à la fatigue des matériaux ou à des retraits de sols argileux (Simonnot et Bouyahbar, 2021).



Figure I.11. Fissurations longitudinales en France.

- **Causes préalables**

- Retrait des matériaux (liant bitumineux vieillissant ou sol argileux sec) ;
- Fatigue structurelle (charges excessives répétées) ;
- Sous-dimensionnement des couches inférieures de structure.

b) Fissures transversales

Les fissures transversales sont des cassures de la couche de roulement perpendiculairement à l'axe de la chaussée. Elles sont dues à un retrait des couches d'assise traitées aux liants blancs, au séchage de ces dernières, voire encore à un défaut de joint de reprise des enrobés. Là encore, la situation peut évoluer en faïençages, flaches, départs de matériaux et à terme en nids de poule.



Figure I.12. Fissures transversales de la chaussée.

○ **Causes préalables**

- Variations thermiques (dilatation/contraction non compensée) ;
- Défauts de joints de dilatation (mauvaise exécution ou absence).

c) Faïençage

Réseau de fissures interconnectées (en peau de crocodile), signe d'une fatigue avancée de la couche de roulement.



Figure I.13. Faïençage d'une chaussée.

○ **Causes préalables**

- Vieillissement du liant bitumineux (oxydation accélérée par les UV) ;
- Couche de roulement trop mince (incapacité à répartir les charges).

d) Fissuration par fatigue

Microfissures progressives sous l'effet répété des charges de trafic lorsque la chaussée va subir un trafic cumulé supérieure à une valeur limite admissible, remontant vers la surface.



Figure I.14. Fissuration par fatigue.

o Causes préalables

- Surcharges dynamiques (trafic lourd mal réparti) ;
- Conception inadaptée (épaisseur insuffisante des couches).

I.6.2.3. Arrachements

a) Nids de poule

Cavités exposant les couches inférieures, provoquées par l'érosion hydrique et le départ des matériaux (BAAJ, 2012). Les nids-de-poule sont des trous présents à la surface de la chaussée qui laissent apparaître les couches de structure. Ils sont dus à un départ du matériau facilité par l'infiltration et l'accumulation des eaux de ruissellement. À ce stade, si aucune réparation n'est réalisée, l'étanchéité de la structure de la chaussée n'est plus assurée et sa dégradation va rapidement se propager.



Figure I.15. Nid de poule a Villeray, Canada. (Tremblay, 2007).

- **Causes préalables**

- Érosion hydrique (eau stagnante dans les fissures) ;
- Adhérence insuffisante entre les couches.

- b) Pelades**

La pelade est un arrachement de la couche de surface par plaques entières. Elle peut être le résultat d'un sous-dimensionnement de la couche de roulement qui la rend incapable de résister aux efforts horizontaux liés au trafic routier. Elle peut également résulter d'un défaut de collage de la couche de roulement sur la couche d'assise. Si la pelade n'est pas réparée, l'étanchéité de la chaussée risque de ne plus être assurée, et la pathologie peut évoluer jusqu'au stade du nid-de-poule.



Figure I.16. La pelade (Dal Pos, 2020).

- **Causes préalables**

- Défaut d'adhésion entre couches (absence de couche de liaison) ;
- Compactage insuffisant lors de la pose.

- c) Plumage**

On appelle plumage l'arrachement progressif des gravillons d'enduit superficiel. Le plumage peut être causé par un sous dosage du liant bitumineux utilisé lors de la mise en œuvre, à un défaut de propreté des gravillons utilisés, ou à un défaut de compactage.

Suite à un plumage important, la couche de roulement n'est plus étanche, ce qui augmente le risque d'apparition de dommages dus aux infiltrations de ruissellement dans les couches de structure de la chaussée.



Figure I.17. Le plumage d'une chaussée (Dal Pos, 2020).

○ **Causes préalables**

- Manque de liant dans l'enrobé (sous-dosage en bitume) ;
- Compactage défectueux des gravillons.

I.6.2.4. Remontées

a) Ressuage

On désigne par ressuage une remontée en période de fortes chaleurs du liant bitumineux à la surface de la couche de roulement. Cette pathologie peut être causée par un excès de bitume, ou un enfoncement excessif des granulats dans un support trop mou. Cette pathologie peut causer des arrachements de la couche de surface, en particulier lors du passage d'engins lourds (tracteurs, poids lourds).



Figure I.18. Le Ressuage d'une chaussée (Dal Pos, 2020).

- **Causes préalables**

- Températures extrêmes (exsudation du bitume en surface) ;
- Excès de liant dans la formulation de l'enrobé.

I.7. Les matériaux routiers

I.7.1. Les granulats

Les granulats sont présents partout dans notre cadre de vie. Chaque année la construction routière utilise 400 millions de tonnes.

Les routes sont composées de 80 à 90 % de granulats, mis en œuvre de différentes façons sur une épaisseur globale de 20 à 70 cm.

Les carrières fabriquent à la demande des granulats de la grosseur désirée en fonction des travaux auxquels ils sont destinés :

- ◆ Les granulats de grosse taille (60 mm) sont utilisés pour réaliser les sous-couches de chaussée
- ◆ Les granulats de taille moyenne (30 mm) sont utilisés en couche de chaussée
- ◆ Les gravillons de granulométrie (6 à 10 mm) sont utilisés dans la confection des bétons hydrauliques ou bitumineux
- ◆ Une grave est un mélange de granulats de tailles diverses, selon une formulation particulière. Elle doit contenir des éléments fins, moyens et gros, pour faciliter leur mise en place en couches compactées.

Dans le cas où les granulats (gravillons) sont utilisés pour confectionner des bétons, ils doivent être propres et débarrassés de toute poussière ou traces d'argile. En effet, un gravillon poussiéreux aura une adhérence moins importante qu'un gravillon propre et le béton produit sera de moins bonne qualité.

Avec la multiplication des matières plastiques, le plastique devient une ressource utilisable dans la confection des chaussées.

I.7.2. Les paramètres exigés pour les granulats

Les granulats doivent répondre à des exigences et des critères de qualité et de régularité qui dépendent, d'une part, de la nature de la roche (résistance aux chocs et à l'usure, caractéristiques physico-chimiques...) et, d'autre part, de caractéristiques physiques liées au processus d'élaboration des granulats (dimensions, formes, propreté...).

Les granulats sont donc spécifiés par deux types de caractéristiques : Caractéristiques intrinsèques, liées à la nature minéralogique de la roche et à la qualité du gisement, telles que, par exemple :

- la masse volumique réelle,
- l'absorption d'eau et la porosité,
- la sensibilité au gel,
- la résistance à la fragmentation et au polissage,
- la gélivité.

Caractéristiques de fabrication, liées aux procédés d'exploitation et de production des granulats telles que, en particulier :

- la granularité,
- la forme (aplatissement),
- la propreté des sables.

Les caractéristiques des granulats sont fonction de leur famille (gravillons, sables, sablons, fillers) et font l'objet de méthode d'essais et de détermination adaptée.

I.7.3. Les origines des granulats

Un granulats, en fonction de sa nature et de son origine, peut-être :

- **Naturel** : d'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions fluviales ou marines) ou de roches massives (roches éruptives, calcaires, métamorphiques...), n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage).
- **Artificiel** : d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant par exemple des transformations thermiques : sous-produits industriels, granulats réfractaires
- **Recyclé** : obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments ou des structures de chaussées.

I.7.4. Les matériaux pour assises de chaussées

❖ Les graves non traités (GNT)

La GNT est couramment mise en place comme couche de fondation dans la construction de routes. Elle assure la répartition des charges au sol et la stabilité de la chaussée. Son application en couche de base permet de créer une structure solide sur laquelle les couches de revêtement peuvent être appliquées

✓ Avantages

- Réduction de l’empreinte carbone par rapport aux graves traitées ou au béton.
- Pas de frais liés aux liants (ciment, chaux) ou à des processus de mélange industriels.
- Les graves non traitées peuvent être réutilisées facilement après déconstruction, sans nécessiter de traitement complexe.

✓ Inconvénients

- Résistance mécanique limitée : Non adaptées aux charges lourdes ou aux ouvrages nécessitant une forte portance (ex. autoroutes, bâtiments).
- Sensibilité à l’érosion : En présence d’eau à fort débit, les particules fines peuvent être entraînées.
- Compatibilité géotechnique : Nécessitent une étude préalable du sol pour éviter les tassements excessifs.

❖ Graves traitées aux liants

Les graves traitées aux liants hydrauliques sont issues d’un mélange à froid de granulats, d’eau avec un liant hydraulique selon une formulation appropriée à l’usage prévue pour la grave. Le grave hydraulique est constitué de granulats de différentes classes granulométriques, d’eau et de liant hydraulique.

✓ Avantages

- Compatible avec différents types de liants (ciment, chaux, laitier) selon les besoins techniques.
- Améliorent la portance et la capacité de charge, idéal pour les chaussées soumises à des trafics lourds.
- Résistance à l’érosion et à l’eau grâce à la stabilisation.
- Adapté aux environnements humides ou instables.

✓ Inconvénients

- Risque de pollution des sols en cas de mauvaise gestion des liants.
- Nécessité de joints de dilatation ou de couches de roulement flexibles.
- Investissement initial élevé en matériel et expertise.
- Précision requise dans le dosage, le mélange et le compactage.

❖ Béton de ciment

Le béton de ciment est un matériau composite constitué principalement de ciment, granulats, eau, adjuvants pour modifier ses propriétés. Il est caractérisé par sa résistance mécanique, sa durabilité et sa capacité à être moulé sous différentes formes. Il est l'un des matériaux les plus utilisés en génie civil pour les structures porteuses (bâtiments, ponts, barrages) et les chaussées. En conception routière, il est utilisé pour réaliser des chaussées rigides, par opposition aux chaussées souples (enrobés bitumineux). Ses applications typiques incluent Dalles de roulement, Chaussées urbaines, Chaussées industrielles.

✓ Avantages

- Peu sensible aux variations de température une fois durci.
- Surface claire améliorant la visibilité nocturne et réduisant l'effet d'îlot de chaleur urbain.
- Adapté aux zones de stationnement ou industrielles.

✓ Inconvénients

- Sensible aux retraits thermique et hydrique, nécessitant des ****joints de dilatation**** pour contrôler les fissures.
- Matériaux et mise en œuvre plus coûteux que les enrobés bitumineux.
- Moins tolérant aux tassements différentiels du sol support (risque de fissuration si la fondation est déficiente)
- Retarde l'ouverture à la circulation (cure de 7 à 28 jours pour une résistance optimale).

I.8. Production des granulats dans le monde

Les granulats de construction sont devenus un matériau important pour les applications de construction en raison d'une pénurie de ressources naturelles utilisées dans la construction. De plus, malgré de graves préoccupations concernant l'épuisement des ressources naturelles, les granulats de construction sont toujours utilisés dans les projets d'infrastructures, commerciaux, industriels et de développement de logements.

Le marché mondial des agrégats de construction était évalué à 373,5 milliards USD en 2021 et devrait atteindre 646,56 milliards USD d'ici 2029, enregistrant un TCAC de 7,1 % au cours de la période de prévision 2022-2029. En plus des informations sur les scénarios de marché tels que la valeur marchande, le taux de croissance, la segmentation, la couverture géographique et les principaux acteurs, les rapports de marché organisés par Data Bridge Market Research comprennent également une analyse approfondie des experts, une production et une capacité géographiquement représentées par l'entreprise, des configurations de réseau de distributeurs

et de partenaires, une analyse détaillée et actualisée des tendances des prix et une analyse des déficits de la chaîne d’approvisionnement et de la demande.



Figure I.19. Marché mondiale des granulats de construction (Data bridge, 2022).

I.9. Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons présenté les notions fondamentales relatives aux chaussées, leur rôle dans le réseau routier, ainsi que les différentes structures (souples, semi-rigides, rigides) et couches qui les composent. La compréhension de ces éléments est essentielle pour évaluer la performance des matériaux utilisés, notamment dans le cadre de l’intégration de matériaux recyclés. Ces généralités constituent donc une base technique indispensable pour aborder l’étude de la valorisation des déchets de construction en tant que matériaux alternatifs pour les couches de chaussée.

Dans le prochain chapitre nous allons présenter les différents secteurs de recyclage notamment ceux en relation avec le domaine de construction routière.

CHAPITRE II

RECYCLAGE ET VALORISATION DES DÉCHETS

II.1. Introduction

Le recyclage des déchets est devenu une nécessité face aux défis environnementaux actuels, notamment la gestion des ressources naturelles et la réduction de la pollution. Il consiste à transformer les déchets en nouveaux matériaux ou produits, ce qui permet de réutiliser des ressources qui auraient autrement été perdues. Ce processus contribue non seulement à la préservation de l'environnement, mais aussi à la réduction des coûts liés à l'extraction de nouvelles matières premières. Dans ce chapitre, nous aborderons de manière générale le recyclage et la valorisation des déchets, en particulier dans le secteur du génie civil.

II.2. Généralités sur les déchets

II.2.1. Définition d'un déchet

Selon le code de l'environnement (art. L541-1), un déchet est « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien, meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon ». Autrement dit, tout élément qui est abandonné est un déchet. Ce n'est pas pour autant que cet élément est inutilisable, en l'état ou après modification. Seuls ceux qui sont qualifiés de déchets ultimes sont réellement inutilisables et doivent être stockés pour éviter des pollutions de l'environnement.

II.2.2. Les différents types des déchets

- **Les déchets ménagers et assimilés** : Un grand nombre de ces déchets à l'origine des activités courantes des ménages, des commerçants et des administrations publiques. Ils concernent les déchets résiduels non recyclables de la canicule (ménage), les déchets d'emballage, les déchets ménagers (épluchures, restes), les déchets textiles et les encombrants tels que les meubles, les électro-ménagers. Leur gestion joue un rôle important due à leur volume, à l'ampleur de leurs impacts sur les décharges.
- **Les déchets industriels** : Ont pour origine les activités de production manufacturière et se répartissent en deux sous-catégories
 - ◆ **Non dangereux** : Chute de métal, copeaux de bois, demande déchets organiques (alimentaire).

- ◆ **Dangereux** : solvants, alcalis, acides, résidus chimiques (industrie pharmaceutique, pétrochimie).
- **Déchets de bâtiments et des travaux publics (BTP)** : Originaire de la construction, de la rénovation, la démolition, les déchets issus de ces activités sont pour l'essentiel inertes (béton, briques) mais peuvent comporter des matières dangereuses (amiante, peinture plomb). Ce sont les déchets en volume le plus élevés en France. Environ 227 millions de tonnes produites en France en 2020, taux de recyclage de 68 % (Ministère de la Transition écologique, 2021).
- **Les déchets dangereux** : Substances dangereuses, inflammables, corrosives dangereuses pour la santé et/ou l'environnement. Ils sont issus des industries (villes en général), des ménages (pile, commerce des produits chimiques), les hôpitaux (déchets infectieux), déchets radioactifs (centrales), sous le code de l'environnement et directive communautaire 2008/98/CE.
- **Déchets électriques et électroniques (DEEE)** : Appareils en fin de vie composés de métaux précieux (cuivre, or) et de substances toxiques (plomb, mercure). Compte tenu des petits (téléphones) vêtements et les grands équipements (machines à laver). Seuls 17 % des 53,6 millions de tonnes mondiales (2019) sont recyclés selon l'ONU.
- **Déchets agricoles et agroalimentaires** : Résidus organiques (fumier, déchets de cultures) ou chimiques (pesticides, engrais) provenant de l'agriculture et de la production agroalimentaire, notamment celle de la viande. Une mauvaise gestion de ces déchets peut polluer les sols et contaminer les nappes phréatiques par diffusion. Environ 1,3 milliard de tonnes sont produites chaque année dans le monde (FAO, 2021).
- **Déchets plastiques** : Matériaux synthétiques non biodégradables, principalement issus des déchets d'emballage (45 %), des produits jetables de tout type et de l'industrie textile. Ils contribuent à la formation de microplastiques, mettant en danger les écosystèmes marins. Environ 353 millions de tonnes ont été produites en 2019 (OCDE), dont au maximum 10 % ont été recyclées.

II.2.3. Origine de la production des déchets

La production des déchets est inéluctable pour les raisons suivantes ;

- **Biologiques** : Toute vie ou cycle de vie produisent des métabolites résiduels (déchets organiques, excréments) liés aux fonctions vitales.
- **Technologiques** : Les processus industriels, eux aussi plus ou moins optimisés, génèrent des déchets non valorisables (chutes de fabrication, sous-produits toxiques).
- **Économiques** : Le responsable modèle linéaire majeur « extraire, créer, consommer, jeter » transforme toujours les ressources en déchets, comme le remarque Lemoigne (2014). Ce système est basé sur des activités fortes en utilisations des matières premières et des énergies.
- **Écologiques** : Les interventions de dépollution traitement de l'eau, d'air, produisent à leur tour des déchets secondaires (boues filtrations rejetées) nécessitant une gestion spécifique.
- **Accidentels** : Les défaillances d'organismes productifs ou de consommateurs (fuites, erreurs de conception) viennent nourrir le déchet pour les causes imprévues, selon Pimienta et Remond (1997).

❖ La Durée de vie de quelques déchets

La durée de vie des déchets dans la nature varie fortement selon leur composition. Les déchets organiques comme les restes alimentaires se dégradent en quelques semaines, tandis que le papier peut persister plusieurs mois. En revanche, certains matériaux de construction, comme les débris de béton, les briques cassées et le laitier (résidu de la sidérurgie), sont quasi inertes et peuvent rester dans l'environnement des centaines et milliers d'années sans se décomposer naturellement. Leur accumulation pose des problèmes d'encombrement et de pollution visuelle, mais leur forte stabilité chimique permet de les valoriser dans le secteur du BTP, notamment en tant que matériaux recyclés pour les travaux routiers. Ces déchets minéraux, non biodégradables, n'émettent pas de substances toxiques dans le sol, mais leur abandon en pleine nature nuit au paysage et occupe de l'espace durablement. Cette situation renforce l'intérêt pour le recyclage et la réutilisation de ces matériaux dans des applications techniques adaptées, contribuant ainsi à une économie circulaire plus durable (Blengini & Garbarino, 2010).

Tableau II.1. La durée de vie des déchets dans la nature (Alias, 2022)

| Objets | Durée de vie |
|---------------------------|-------------------------|
| Papier toilette | 2 semaines à 1 mois |
| Trognon de pommes | quelques jours à 6 mois |
| Pelures de fruits | 3 à 6 mois |
| Mouchoirs en papier | 3 mois |
| Papier journal | 3 à 12 mois |
| Allumettes | 6 mois |
| Ticket de bus ou de métro | 1 an |
| Mégot de cigarette | 1 à 2 ans |
| Chewing-gum | 5 ans |
| Couverts en bois | 10 ans |
| Paquet de chips | 10 ans |
| Boîtes de conserve | 10 à 100 ans |
| Pneu | 100 ans |
| Briquet | 100 ans |
| Cannettes de boisson | 100 à 200 ans |
| Piles | 200 ans |
| Capsules de café | 200 ans |
| Gobelets en carton | 200 ans |
| Sacs en plastique | 450 ans |
| Bouteilles en plastique | 100 à 1000 ans |
| Verre | 4000 ans |
| Débris de béton | 50 à 100 ans |
| Débris de brique | 80 à 150 ans |
| Laitier sidérurgique | 50 à 100 ans |

II.2.4. Les déchets de chantier

✓ Les déchets inertes

La gestion des déchets inertes représente la majorité des déchets de chantier avec une part de 72 %. Il s'agit de déchets minéraux qui, une fois stockés, conservent des caractéristiques physico-chimiques intactes. C'est une sous-catégorie de déchets non dangereux qui sont 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. Terre, 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 ISDI (Installations de Stockage des Déchets Inertes).



Figure II.1. Centre des déchets inertes de Seghirate, commune de Thenia (Est de Boumerdes, 2021).

✓ **Les déchets non dangereux non inertes**

Les déchets non dangereux non inertes représentent quant à eux 26 % des déchets dans le secteur du BTP. Sans être des déchets inertes, ils ne sont pour autant pas dangereux : ils ne sont ni corrosifs, ni explosifs. On parle alors de déchets industriels banals (DIB).

Parmi les déchets non dangereux non inertes, on retrouve par exemple le bois, le plastique, les emballages, le plâtre, les métaux et les isolants. Ils sont stockés pour leur part dans des ISDND (Installations de Stockage des Déchets Non Dangereux).



Figure II.2. Déchets non dangereux non inertes.

Ces déchets de chantier ne sont pas recyclables et ne sont pas éligibles à une incinération. S'ils n'ont pas été triés, il faut se rendre dans une déchetterie pour procéder à leur élimination.

✓ **Les déchets dangereux**

Enfin, la gestion des déchets dangereux constitue 2 % des déchets du bâtiment. Comme leur nom l'indique clairement, ils sont dangereux puisqu'ils contiennent des substances toxiques.

On y retrouve notamment les huiles, le goudron, les hydrocarbures et leurs dérivés, les piles, l'amiante, le plomb, les appareils et produits contenant du PCB ou des gaz fluorés, les bouteilles de gaz ou encore les peintures et vernis.



Figure II.3. Déchets dangereux, peintures et vernis.

Le traitement des déchets dangereux exige une attention particulière, que ce soit pour les produits en eux-mêmes ou leurs contenants éventuels. Au moment de la collecte, ils ne doivent jamais être mélangés avec d'autres déchets de chantiers. Ils doivent également être emballés et étiquetés.

Dans la mesure où ils ne pourraient pas être valorisés, ces déchets dangereux sont alors stockés dans des ISDD (Installations de Stockage des Déchets Dangereux).

II.2.5. Différents types de déchets en génie civil

II.2.5.1. Les déchets de construction

Les déchets de construction comprennent une variété de matériaux utilisés sur les chantiers et qui deviennent des résidus après les travaux. Voici quelques exemples courants ;

- **Béton** : morceaux de béton provenant de la démolition de structures.
- **Bois** : chutes de bois, palettes cassées, planches inutilisées.
- **Métaux** : ferraille, câbles électriques usagés, tuyaux métalliques.
- **Verre** : vitres cassées, restes de fenêtres et miroirs.
- **Plastiques** : tuyaux, emballages, revêtements de sol.
- **Matériaux isolants** : laine de verre, polystyrène, mousses isolantes.
- **Débris de maçonnerie** : briques, carrelage, pierres



Figure II.4. Déchets de construction.

II.2.5.2. Les déchets de démolition

Les déchets de démolition sont les matériaux résultant de la destruction de bâtiments et d'infrastructures. Ils incluent ;

- **Béton et ciment** : fragments de dalles, poutres et fondations.
- **Briques et pierres** : provenant de murs et façades.
- **Métaux** : armatures métalliques, câbles, tuyaux en acier ou en cuivre.
- **Bois** : planches, portes, fenêtres, charpentes.
- **Verre** : vitres cassées, miroirs, panneaux de verre.
- **Plastiques et PVC** : canalisations, revêtements, éléments décoratifs.
- **Plâtre et plaques de plâtre** : issus des cloisons et faux plafonds.
- **Déchets dangereux** : peintures, colles, solvants, amiante (nécessitant une gestion spécifique).

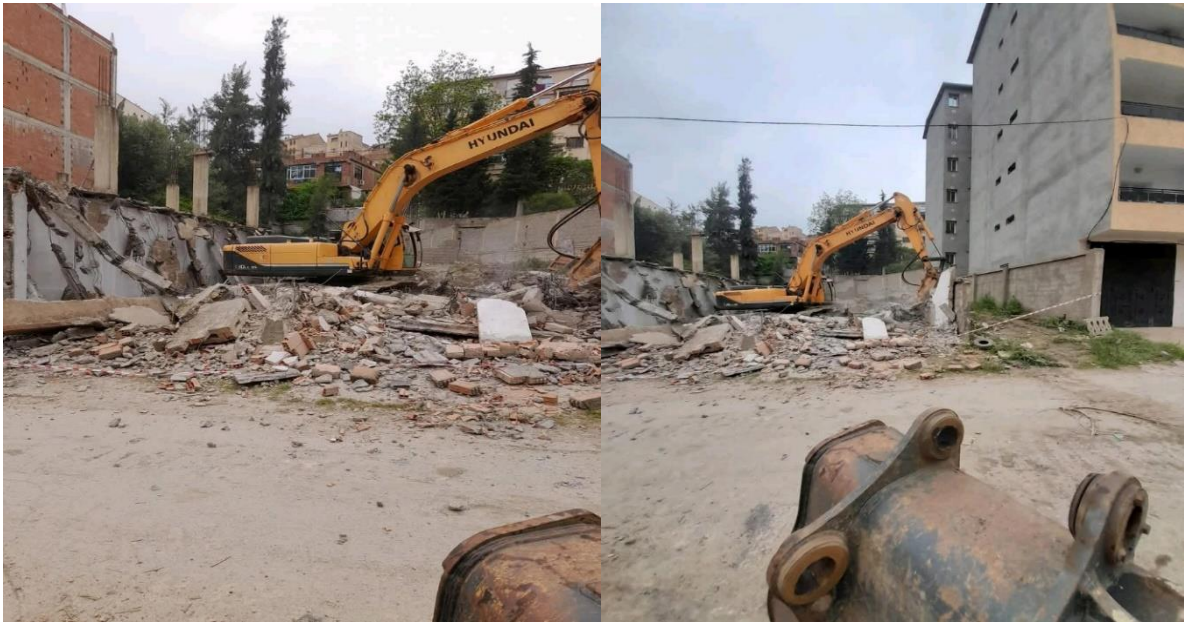


Figure II.5. Travaux de démolition à Tizi Ouzou en 2022.

II.2.6. Différents types de déchets (débris) de béton

a. Déchets de béton non contaminé (Inerte)

Ce béton propre (gravats, dalles) est recyclé en granulats pour les travaux publics. Il représente la majorité des déchets inertes et est traité selon les normes de l'économie circulaire. (Union européenne, 2008)

b. Déchets de béton contaminé (Dangereux)

Ce béton pollué par des hydrocarbures, métaux lourds ou produits chimiques nécessite une décontamination avant recyclage.



Figure II.6. Déchets de béton contaminé.

c. Déchets de béton armé (avec ferrailage)

Les poutres ou dalles en béton armé sont broyées pour séparer l'acier, puis valorisées en granulats. (Xiao et al., 2018).



Figure II.7. Déchets de béton armé.

d. Déchets de retours de béton frais

Ces résidus de bétonnières ou camions-toupies sont réutilisés pour fabriquer des éléments préfabriqués ou durcis avant concassage. (EPA, 2016)

e. Déchets de béton contenant de l'amiante

Anciens bétons liés à l'amiante (années 1970-1990) nécessitant une élimination sécurisée pour éviter l'exposition aux fibres cancérogènes. (Convention de Bâle, 2023)



Figure II.8. Déchets de béton contenant de l'amiante.

II.2.7. Différents types de déchets (débris) de brique

a. Déchets de brique neuve (défauts de fabrication)

Ils s'agissent de briques non conformes aux normes (fissurées, déformées, ou mal cuites) rejetées lors de la production. Ces déchets sont souvent réutilisés comme granulats ou recyclés. (Coelho et al., 2013)



Figure II.9. Déchets de brique neuve.

b. Déchets de chantier (résidus de construction)

Incluent les morceaux de brique issus de la coupe, des chutes ou des surplus non utilisés pendant la construction. Ces déchets peuvent représenter jusqu'à 10 % des matériaux achetés. (Ajayi et al., 2015)

c. Déchets de démolition (briques cassées ou vieilles)

Provenant de la destruction de bâtiments anciens, ces briques sont souvent mélangées à d'autres débris (béton, plâtre) et nécessitent un tri avant recyclage. (Commission européenne, 2018)



Figure II.10. Déchets de démolition de brique.

d. Poussières et fragments de brique

Générés lors du sciage, du perçage ou du ponçage des briques, ces résidus fins sont difficiles à réutiliser sans traitement spécifique. (EPA, 2020)

e. Briques contaminées (peintures, mortiers adhérents)

Les briques enduites de substances non minérales (peintures, colles) ou liées à des mortiers complexes sont moins recyclables en raison des impuretés. (Zhang et al., 2020)



Figure II.11. Déchets de Brique contaminée.

II.2.8. Différents types de déchets du haut fourneau (laitier)

a. Laitier refroidi à l'air

Le laitier refroidi à l'air est obtenu par un refroidissement lent à l'air ambiant, permettant une cristallisation naturelle. Ce processus génère une structure dense et dure, riche en minéraux comme la méillite et la magnétite. Utilisé principalement comme granulats dans les travaux routiers ou le béton, il offre une résistance mécanique comparable à celle des granulats naturels. Sa durabilité en fait un substitut écologique aux matériaux extraits. (Euroslag, 2018)

b. Laitier granulé

Ce laitier est produit par trempe rapide à l'eau ou à la vapeur, ce qui le vitrifie en granules amorphes. Broyé finement (GGBFS), il réagit avec l'eau et la chaux pour former des liants hydrauliques. Il améliore la résistance chimique et la durabilité du béton, réduisant l'empreinte carbone du ciment Portland. (ACI, 2017)



Figure II.12. Déchets de laitier granulé.

c. Laitier expansé

Un refroidissement contrôlé avec injection d'eau ou de gaz crée une structure poreuse et légère. Ce laitier, moins dense, est utilisé pour des bétons isolants ou des remblais légers. Ses propriétés acoustiques et thermiques le rendent idéal pour les applications en construction durable. (USGS, 2022)

d. Laitier pelletisé

Projecté en fusion dans des turbines, il forme des billes sphériques à granulométrie uniforme. Ces pellets, riches en silicates et oxydes, sont utilisés comme ajout cimentier ou engrais agricole (source de calcium et magnésium). Ils servent aussi dans la filtration des eaux usées. (Wang et al., 2020)

e. Laitier cristallisé

Un refroidissement lent avec ajout de modificateurs de phase (ex : silice) génère des cristaux orientés (wollastonite, pyroxène). Ce laitier, résistant aux hautes températures, est employé dans les matériaux réfractaires ou les céramiques techniques. (Zhang et al., 2021)



Figure II.13. Déchets de laitier cristallisé.

II.3. Recyclage et valorisation des déchets

II.3.1. Définition de la valorisation des déchets

L'ADEME décrit la valorisation des déchets comme un ensemble de procédés visant à transformer des déchets en produits utiles, que ce soit sous forme matérielle ou énergétique. Cette approche est privilégiée par rapport à l'élimination des déchets, conformément à la hiérarchie des modes de traitement des déchets.

II.3.2. Objectifs de recyclage et valorisation des déchets

Recycler signifie recueillir des matériaux usagés et les transformer en nouveaux produits plutôt que de les jeter. Ce processus est bénéfique pour l'environnement et nos communautés locales pour les raisons suivantes (Eska, 2020)

- Réduction de la quantité de déchets qui finissent dans les centres d'enfouissement et les usines d'incinération.
- Utilisation d'une quantité beaucoup plus faible d'énergie.
- Réduction des émissions de carbone.

- Diminution de la pollution de l'eau et de l'air.
- Préservation des ressources naturelles précieuses, dont les arbres et l'eau.
- Protection de la faune et des habitats naturels.
- Création d'emplois et soutien de l'économie.

II.3.3. Les différentes techniques de valorisation des déchets

Le traitement des déchets implique généralement plusieurs étapes, chacune étant importante pour garantir une gestion efficace des détrit. Ces étapes comprennent selon (Alexandre, 2024)

a) Collecte des déchets

La première étape du traitement des déchets consiste à collecter les détrit à partir de différentes sources, telles que les ménages, les entreprises, les industries, et les institutions. Une collecte bien organisée est essentielle pour assurer un tri efficace des déchets et faciliter les étapes ultérieures du processus.

b) Tri et séparation

Le tri et la séparation des déchets sont essentiels pour récupérer les matériaux recyclables et réduire la quantité de déchets destinés à l'élimination. Des installations spécialisées utilisent diverses techniques pour trier les détrit en fonction de leur composition, facilitant ainsi le recyclage et la valorisation.

c) Recyclage et réutilisation

Le recyclage est l'une des méthodes les plus importantes de traitement des déchets. Les matériaux recyclables tels que le plastique, le papier, le verre, et le métal sont collectés, traités, et transformés en nouvelles matières premières pour la fabrication de nouveaux produits.

La réutilisation d'objets et d'emballages est également une pratique importante pour réduire la demande en nouvelles ressources.

d) Valorisation énergétique

La valorisation énergétique consiste à convertir les déchets non recyclables en énergie, généralement sous forme de chaleur ou d'électricité.

Les déchets solides urbains peuvent être incinérés dans des installations spécialisées, produisant ainsi de l'énergie tout en réduisant le volume des déchets.

e) Compostage

Le compostage est une méthode de traitement des déchets organiques, tels que les déchets alimentaires et les résidus de jardin.



Figure II.14. Le compostage (Alexandre, 2024).

Ces débris se décomposent naturellement pour former un compost riche en nutriments, utilisé comme amendement du sol dans l'agriculture et l'horticulture.

f) Élimination des déchets dangereux

Les déchets dangereux, tels que les produits chimiques toxiques et les matériaux radioactifs, nécessitent une élimination spéciale pour éviter les risques sur la santé humaine et l'environnement. Des installations spécialisées assurent la manipulation et l'élimination sûre de ces déchets.

II.3.4. Valorisation des déchets de béton

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, 2 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 acheminé 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, déferraillé 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.



Figure II.15. Centrale de recyclage de béton (Schwing-stetter, 2019)

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 (Hubency, 2023).

II.3.5. Les différents types de la brique

La brique est un matériau de construction rectangulaire, constituée principalement d'argile, d'eau et parfois de sable ou de chamotte, cuits à haute température pour solidification (Kornmann, 2007). Nous distinguons les types suivants :

- La brique pleine



Figure II.16. Brique pleine
(Argile confort, 2025)

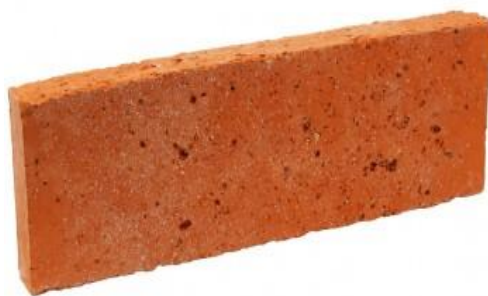
- La brique réfractaire



Figure II.17. Brique réfractaire
(Unicat, 2024).

- La brique creuse

Figure II.18. Brique creuse.

- La brique monomurFigure II.19. Brique monomur
(Futura sciences, 2009)**- La brique de parement**Figure II.20. Brique parement
(Raujolles, 2024)**- La brique de verre**Figure II.21. Brique de verre
(Materiaux archi, 2024)**II.3.6. Domaines d'utilisation des briques recyclées****a. Matériaux de remplissage et de stabilisation dans les infrastructures****• Routes secondaires**

Historiquement, les déchets de maçonnerie et les rebuts de briques ont été largement utilisés pour le remplissage et la stabilisation des routes secondaires, notamment dans les zones humides telles que les forêts et les terrains agricoles. Cette pratique demeure répandue dans les pays où les ressources naturelles en pierres sont limitées, à l'instar du Danemark. Dans ce contexte, les matériaux sont généralement utilisés sans être préalablement broyés.

- **Routes principales**

Dans les projets de construction routière de plus grande envergure, les briques, tuiles et autres éléments de maçonnerie en terre cuite peuvent être employés sous forme broyée, notamment comme couche de base non traitée. Cette technique est courante dans des pays tels que la Suisse, les Pays-Bas, le Royaume-Uni et le Danemark. Toutefois, bien que la maçonnerie broyée soit adaptée aux routes à faible trafic, elle ne convient pas aux routes à forte circulation en raison de sa susceptibilité à la déformation. Son usage permet de substituer des matériaux naturels comme le sable et le gravier, traditionnellement utilisés en grandes quantités. Par ailleurs, la maçonnerie broyée peut être incorporée à des mélanges comprenant également du béton et des agrégats naturels (Jourdin, 1966).

- b. Agrégats pour béton in situ, préfabriqué et mortiers**

Les éléments de maçonnerie en terre cuite broyée peuvent aussi servir de matériau de remblai pour le nivellement et le remplissage des tranchées de canalisations. En remplaçant les matériaux naturels tels que le sable, ils contribuent à une moindre altération du paysage. Pour ces applications, une granulométrie fine de l'ordre de 0 à 4 mm est généralement préconisée. Des fractions plus grossières peuvent toutefois être utilisées dans d'autres types d'applications (Bedjou, 2003).

II.4. Généralités sur le laitier de haut-fourneau

Le laitier de haut fourneau est un coproduit issu de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux. Il résulte de la fusion des impuretés du minerai de fer, des fondants tels que le calcaire, et des cendres du coke. Une fois séparé de la fonte en fusion, ce laitier peut être refroidi rapidement (pour produire un laitier granulé utilisé notamment en cimenterie) ou lentement (pour former un laitier cristallisé destiné aux travaux publics).



Figure II.22. Production du laitier haut fourneau (iStock, 2025).

Grâce à sa richesse en silicates et aluminates de calcium, il peut également être utilisé dans la formulation de liants hydrauliques alternatifs, notamment dans les matériaux alcali-activés (Oualit et al., 2022).

II.4.1. Laitier de haut-fourneau granulé

Le laitier granulé de haut fourneau, obtenu par refroidissement rapide à l'eau, est un matériau vitreux aux propriétés hydrauliques latentes. Une fois broyé finement, il peut être activé par des agents comme la chaux hydratée pour améliorer les caractéristiques géotechniques des sols, notamment leur portance, compacité et stabilité. Cette utilisation contribue à renforcer la maniabilité et la sécurité des sols en génie civil (Zemouli et Chelghoum, 2018).



Figure II.23. Laitier granulé (Howard, 2025)

II.4.2. Laitier de haut-fourneau cristallisé

Les laitiers cristallisés sont issus du refroidissement par aspersion d'eau du laitier en fusion coulé à terre. La solidification et le refroidissement du laitier amènent à son craquelage. Ce procédé est le premier historiquement réalisé : il ne nécessite qu'une fosse de stockage du laitier en fusion et des rampes d'arrosage. Son obtention ne consomme en outre que de faibles quantités d'eau. Cependant un concassage secondaire est généralement nécessaire pour utiliser ce matériau. L'inconvénient réside dans le fait que ce matériau présente une certaine hétérogénéité (Techno-Science, 2025).



Figure II.24. Laitier cristallisé.

II.4.2.1. La Composition chimique du laitier cristallisé

Lors d'un refroidissement lent en couche épaisse, le laitier cristallisé développe une texture poreuse principalement en raison de la libération de soufre pendant cette phase. Cette réaction est influencée par la teneur en sulfures et le potentiel d'oxydation du laitier. Les laitiers les plus désulfurant, donc les plus basiques et à température élevée favorisent des réactions soufre/oxygène plus intenses, ce qui accentue la formation de porosités. D'un point de vue chimique, le laitier cristallisé est constitué à 95 à 98 % d'un mélange de quatre oxydes principaux : SiO₂, CaO, Al₂O₃ et MgO. Le reste de la composition est formé d'oxydes secondaires tels que FeO et MnO, ainsi que de composés sulfurés.

Tableau II.2. La composition chimique de Laitier d'EL HADJAR (Charfa, 2009).

| Composition chimique en (%) | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-----------------|------------------|--------------------------------|------|--------------------------------|------------------|------------------|-------------------------------|------------------|-------|
| CaO | SO ₃ | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | Fe ₂ O ₃ | MnO ₃ | K ₂ O | P ₂ O ₅ | TiO ₂ | P.A.F |
| 45.78 | 0.38 | 34.99 | 9.79 | 3.92 | 0.67 | 2.47 | 0.86 | 0.01 | 0.34 | 0.50 |

II.4.2.2. Valorisation du laitier cristallisé

Le laitier cristallisé est utilisé dans des applications similaires à celles des roches naturelles présentant des caractéristiques physico-chimiques équivalentes. Il entre notamment dans la composition de granulats destinés aux bétons, aux enrobés bitumineux, aux graves traitées au liant hydraulique, au ballast ferroviaire, etc. Ces usages sont encadrés par les normes françaises et européennes relatives aux granulats.

a. Utilisation dans le béton

Le laitier cristallisé, après concassage, peut être employé comme gravillon en association avec du sable naturel roulé pour la fabrication de bétons mixtes binaires, communément appelés bétons de laitier. Lorsque le sable est également issu du laitier granulé (brut ou pré-broyé), le béton obtenu est qualifié de béton tout laitier.

b. Application en construction routière

Dans le domaine des infrastructures routières, le laitier cristallisé concassé est largement valorisé. Il est utilisé en combinaison avec des liants hydrauliques ou hydrocarbonés dans les différentes couches de chaussée, allant de la fondation à la couche de roulement. Ce matériau sert également de granulats dans les enrobés de surface et de composant des graves hydrauliques employées pour les assises de chaussée (couches de base et de fondation). Grâce à leur angularité et leur rugosité naturelles, les granulats de laitier cristallisé concassé assurent une

bonne adhérence dans les enrobés bitumineux, réduisant le risque de déchaussement. Ils peuvent être intégrés aux graves hydrauliques, indépendamment du type de liant utilisé.

c. Usage en ballast ferroviaire

L'utilisation du laitier cristallisé concassé et criblé comme ballast pour les voies ferrées constitue l'un de ses premiers emplois. Ce type d'application, initié vers 1885, s'est rapidement généralisé.

d. Autres domaines d'application

Outre les usages précités, le laitier cristallisé concassé est employé en préfabrication pour la réalisation d'éléments tels que blocs, panneaux, hourdis agglomérés, pavés, ou encore comme granulats dans des lits filtrants. Il est également utilisé en remblai, pour la réalisation de couches de forme, dans les travaux de viabilité, ainsi que dans les voiries et réseaux divers (VRD). Ses propriétés spécifiques, notamment sa grande polyvalence, en font un matériau de choix dans de nombreux domaines.

II.5. Conclusion

Le traitement des déchets est un défi environnemental, un investissement des plus importants à tous les étages économique et sociétal. Il permet de sauvegarder les ressources naturelles, d'éviter les importants volumes de déchets qui sont envoyés aux décharges ou aux incinérateurs et de mettre au point et de diminuer les émissions de gaz à effet de serre. A travers la valorisation des déchets à la fin de leur vie utile, le recyclage est un exercice qui se pratique dans une optique d'économie circulaire notamment dans la gestion durable des ressources. Pour fonctionner pleinement, cette démarche doit être accompagnée d'une forte sensibilisation des citoyens, d'une progression technologique continue, d'un cadre réglementaire adapté, incitant à la responsabilité des acteurs producteurs et à une participation active de tous les acteurs.

Dans le prochain chapitre, nous avons identifiés les différents matériaux et échantillons utilisés dans cette étude.

CHAPITRE III

IDENTIFICATION DES MATERIAUX ET PREPARATION DES ECHANTILLONS

III.1. Introduction

Avant d'étudier le comportement mécanique d'un matériau, il faut avant tout procéder à une caractérisation préliminaire par la recherche de ses principales propriétés physiques, chimiques ou minéralogiques. Cette étape est un prérequis nécessaire à la compréhension du comportement du matériau sous des sollicitations mécaniques diverses.

Ces propriétés sont appréciées à partir d'essais de laboratoire appelés essais d'identification, qui permettent de définir les principaux paramètres suivants :

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

III.2. Présentation et identification des matériaux

Dans ce travail de recherche, les échantillons étudiés sont reconstitués sous forme de mélanges à base de matériaux recyclés. Deux types de mélanges principaux ont été élaborés :

- Le premier comporte des débris de béton et de brique.
- Le deuxième comporte des débris de béton et du laitier de hauts fourneaux.

Les débris de béton et de brique ont été récupérés sur des chantiers de construction de bâtiments à la wilaya de Tizi-Ouzou. Ces matériaux sont ensuite broyés manuellement et mécaniquement au laboratoire afin d'obtenir une granulométrie conforme aux exigences expérimentales.

Le laitier a été récupéré sur le complexe sidérurgique d'El Hadjar, situé à Annaba, ensuite, préparé suivant le même procédé de concassage au laboratoire.

III.2.1 Les débris de béton

Le mot débris renvoie, d'une part, à la source du matériau : provenant des restes d'anciens bâtiments entrés en ruines ou en catastrophe et, d'autre part, à sa nature première divisée essentiellement en gravats.

Les débris de béton ont également recours à d'autres termes comme béton concassé ou gravats de béton, avec cette famille complète obsédée à remplacer des matériaux extérieurs, vu qu'ils proviennent des démolitions et de la rénovation de la structure béton. Avec la problématique du recyclage, bien souvent des grands morceaux sont perçus comme des déchets mais ils peuvent être valorisés par le recyclage et utilisés à diverses applications de la construction. Cette méthode améliore un modèle plus durable et réduit donc considérablement la quantité de déchets produits par le bâtiment.

III.2.2. Les débris de brique

Les débris de brique sont le résultat de démolitions ou de grosses rénovations de constructions en maçonnerie. Souvent vus comme des tout petits déchets, ces matériaux ont un excellent potentiel de valorisation. Ils peuvent être recyclés et réutilisés dans toute une multitude de chantiers de bâtiment ou projets routiers, où ils participent activement dans une approche plus durable et responsable de l'industrie.

III.2.3. Les débris de laitier

Les débris de laitier, proviennent des résidus solides générés lors du processus de fabrication de l'acier, notamment dans les hauts fourneaux. Ce sous-produit, composé principalement de silicates, d'aluminates et de chaux, est généralement stocké sous forme de blocs ou de granulats. Une fois refroidi, concassé et calibré, le laitier a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche dans l'optique de le recycler dans le domaine de la construction, notamment comme matériau granulaire dans les couches de fondation (Rouabah & Guetteche, 2008), les bétons ou les enrobés bitumineux. Son utilisation contribue à la valorisation des déchets industriels et à la réduction de l'exploitation des ressources naturelles (Hadj Sadok et al., 2016).

III.3. Préparation des débris de béton et de brique

III.3.1. Concassage et tamisage des débris de béton

Des blocs de béton issus sont acheminés vers le laboratoire pour être préparés. Avant leur traitement, une étape de tri a été effectuée pour éliminer les impuretés telles que l'acier, 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. Les blocs de béton réduits manuellement.



Figure III.2. Concassage du béton au concasseur mécanique.

L'opération de tamisage a été effectuée afin de classer les grains selon leur taille, dans le but de constituer des échantillons respectant la classe granulométrique 0/20 mm. Cette dernière est définie par un fuseau spécifique, conforme aux exigences de la norme NF EN 13-285 relative aux corps de chaussée. Un soin particulier a été apporté à cette étape afin de garantir l'homogénéité des échantillons et d'assurer la répétabilité des essais, en limitant l'impact des variations granulométriques.

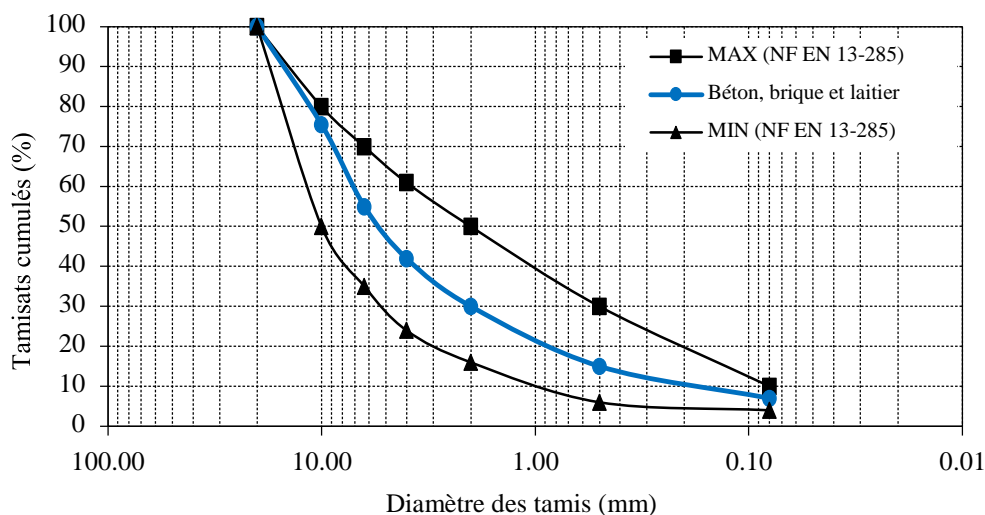


Figure III.3. Courbe granulométrique des matériaux et des mélanges étudiés (NF EN 13-285, 2010)



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



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

III.3.2. Concassage et tamisage de la 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. Les blocs sont brisés manuellement en petits fragments à l'aide d'un marteau avant de les faire passer au concasseur mécanique afin de les réduire d'avantage pour obtenir une classe granulaire 0/5 mm.

Les débris obtenus sont ensuite tamisés et préparés selon la norme NF EN 13-285 en trois fractions correspondant aux fractions sableuses :

- La fraction sable fin : 0/0.5 mm ;
- La fraction sable moyen : 0.5/2 mm ;
- La fraction sable grossier : 2/5 mm.



Figure III.6. Concassage de la brique.



Figure III.7. Tamisage de la brique.

Tableau III.1. 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 Ø moy Supérieur à 10 mm pas plus de 3cratères par décimètre carré De Ø moy 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.3.3. Teneur en eau (w) (NF P94-050)

La teneur en eau représente le rapport entre la masse de l'eau interstitielle (M_w) et la masse des particules solides sèches. Elle est déterminée conformément à la norme NF P 94-050, en appliquant la méthode par étuvage. L'essai consiste à peser un échantillon humide, puis à le placer dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures. Après séchage complet, l'échantillon est à nouveau pesé afin de déterminer sa masse sèche.

La teneur en eau pondérale (w) est alors calculée à l'aide de la formule suivante :

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

W : teneur en eau.

M_h : masse humide.

M_s : masse sèche.

Tableau III.2. Détermination de la teneur en eau.

| Matériau | w (%) |
|------------------|-------|
| Débris de béton | 2,52 |
| Débris de brique | 2,42 |

Les débris de béton et de brique présentent une faible teneur en eau du fait que les matériaux étudiés sont granulaires non argileux, très perméables, donc ils recueillent un peu d'eau même dans les climats humides.

III.3.4. 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.



Figure III.8. Mode opératoire (Pesée hydrostatique).

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 = 0,88 g/cm³ ;

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

Les résultats des essais réalisés sont récapitulés dans les tableaux ci-dessous :

- **Débris de béton**

Tableau III.3. Résultats de la détermination de la masse volumique sèche de débris de béton

| Paramètre | 1 ^{er} essai | 2 ^{ème} essai | 3 ^{ème} essai | 4 ^{ème} essai |
|---|------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Masse de la roche (M_r) (g) | 90,3 | 77,5 | 91,2 | 85 |
| Masse de la roche paraffinée à l'air libre (M_{rp}) (g) | 91,4 | 78,2 | 91,8 | 86,2 |
| Masse de la roche paraffinée dans l'eau (M'_{rp}) (g) | 52,0 | 44,2 | 52,2 | 48,7 |
| Masse volumique sèche ρ_d (g/cm ³) | 2,36 | 2,33 | 2,34 | 2,37 |
| Moyenne | 2,35 g/cm³ | | | |

- **Débris de brique**

Tableau III.4. Résultats de la détermination de la masse volumique sèche de débris de brique

| Paramètre | 1 ^{er} essai | 2 ^{ème} essai | 3 ^{ème} essai | 4 ^{ème} essai |
|---|------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Masse de la roche (M_r) (g) | 88,1 | 48,5 | 60,4 | 83 |
| Masse de la roche paraffinée à l'air libre (M_{rp}) (g) | 88,9 | 49,3 | 61,5 | 84,7 |
| Masse de la roche paraffinée dans l'eau (M'_{rp}) (g) | 44,9 | 24,8 | 30,8 | 42,4 |
| Masse volumique sèche ρ_d (g/cm ³) | 2,02 | 2,05 | 2,05 | 2,06 |
| Moyenne | 2,04 g/cm³ | | | |

Le tableau ci-dessous qui présente la classification des matériaux selon la masse volumique Sèche permet de classer le matériau utilisé ;

Tableau III.5. Appréciation de la masse volumique sèche selon la norme NF P94-064.

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

En se référant au tableau (III.5), on constate que le béton et la brique utilisés sont des matériaux denses.

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

La masse volumique humide est calculée selon la formule suivante

$$\rho_h = \frac{M_t}{V_t}$$

$$\text{D'où } \rho_h = \rho_d \times (1 + w)$$

Avec :

W : Teneur en eau du matériau ;

ρ_d : Masse volumique sèche.

- **Débris de béton**

L'application numérique donne : $\rho_h = 2.35 \times (1+0.02)$

$$\rho_h = 2.39 \text{ g/cm}^3$$

- **Débris de brique**

L'application numérique donne : $\rho_h = 2.04 \times (1+0.02)$

$$\rho_h = 2.08 \text{ g/cm}^3$$

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 NFP 94-054. 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.9. 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.6. Résultats de la détermination de la masse volumique des particules solides.

| Masses | Valeurs en (g) Débris de béton | Valeurs en (g) Débris de brique |
|----------|-----------------------------------|------------------------------------|
| M1 | 206 | 206 |
| M2 | 256 | 257 |
| M3 | 803 | 803 |
| M4 | 772 | 772 |
| ρ_s | 2.63 (g/cm³) | 2,55 (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.3.5. 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 :

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

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

$$\text{la formule : } e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$$

- **Débris de béton**

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 = \frac{2,63}{2,35} - 1 = 0,11$$

- **Débris de brique**

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 = \frac{2,55}{2,04} - 1 = 0,25$$

III.3.6. Degré de saturation (S_r)

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 sur le 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 :

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 = \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \left(\frac{w}{e} \right)$$

Avec :

w : Teneur en eau ;

e : indice des vides ;

ρ_s : Masse volumique sèche ;

ρ_w : Masse volumique de l'eau.

- **Débris de béton**

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 = \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \left(\frac{w}{e} \right) = \left(\frac{2,63}{1,00} \right) \left(\frac{2,52}{0,11} \right) = 60,25 \%$$

- **Débris de brique**

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 = \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \left(\frac{w}{e} \right) = \left(\frac{2,55}{1,00} \right) \left(\frac{2,42}{0,25} \right) = 24,68 \%$$

Tableau III.7. Appréciation 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 le tableau (III.7), les débris de béton étudiés sont dans un état mouillé, et les débris de brique sont légèrement humides.

III.3.7. 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 similaire à celle de l'indice des vides. Elles sont liées par la formule suivante :

$$n = \frac{e}{e+1}$$

Tableau III.8. Détermination de la porosité.

| Matériau | n (%) |
|------------------|---------|
| Débris de béton | 9,90 |
| Débris de brique | 20,0 |

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

Tableau III.9. Récapitulatif des résultats des essais d'identification.

| Caractéristiques déterminées | Débris de béton | Débris de brique |
|--|-----------------|------------------|
| Teneur en eau naturelle : w (%) | 2,52 | 2,42 |
| La masse volumique sèche ρ_d (g/cm^3) | 2,35 | 2,04 |
| La masse volumique humide ρ_h (g/cm^3) | 2,39 | 2,08 |
| La masse volumique des particules solide ρ_s (g/cm^3) | 2,63 | 2,55 |
| Indice des vides (%) | 11,00 | 25,00 |
| Degré de saturation S_r (%) | 60,25 | 24,68 |
| Porosité (%) | 9,90 | 20,00 |

Les débris de béton sont plus denses et moins poreux que les débris de brique, ce qui leur confère une structure plus compacte. En revanche, les débris de brique présentent une porosité et un indice des vides plus élevés, indiquant une capacité d'absorption et une légèreté supérieures. Ainsi, le béton est plus adapté aux structures portantes, tandis que la brique convient mieux aux usages nécessitant drainage ou isolation.

III.4. Préparation du laitier

III.4.1. Concassage et tamisage du laitier utilisé

Le laitier utilisé dans cette étude est de nature cristallisé, il est récupéré sous forme de blocs sur le complexe d'EL HADJAR, ensuite concassé par des moyens mécaniques selon la granulométrie désirée.

Dans ce cas, le laitier est concassé et ensuite tamisé de manière à avoir les mêmes fractions que les débris de brique, à savoir : la fraction sable fin (0/0.5 mm), la fraction sable moyen (0.5/2mm) et la fraction sable grossier (2/5 mm).



Figure III.10. Broyage de laitier.



Figure III.11. Tamisage de laitier selon les fractions fin, moyen et grossier.

III.4.2. Quelques propriétés du laitier cristallisé d'EL HADJAR

Tableau III.10. Caractérisation physico-chimique et mécanique du laitier selon (Cherfa et Ait Mokhetar, 2009).

| Caractéristiques | Valeurs |
|--|---------|
| Masse volumique absolue (g/cm ³) | 2,8 |
| Masse volumique apparente (g/cm ³) | 1,2 |
| Porosité (%) | 50 |
| Coefficient de réactivité α | 39 |
| Micro Deval Humide MDE (%) | 16 |
| Los Angeles L _A (%) | 26 |
| Coefficient d'aplatissement | 18 |

III.5. Préparation des échantillons

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

- Echantillon 1 : Débris de béton seuls (0/20) ;
- Echantillon 2 : Débris de béton avec remplacement de la fraction sable fin (0/0,5mm) par des débris de brique ;
- Echantillon 3 : Débris de béton avec remplacement des fractions sable fin et sable moyen (0/2 mm) par des débris de brique ;
- Echantillon 4 : Débris de béton avec remplacement des fractions sable fin, sable moyen et sable grossier (0/5 mm) par des débris de brique ;
- Echantillon 5 : Débris de béton avec remplacement de la fraction sable fin (0/0,5mm) par des éléments de laitier ;
- Echantillon 6 : Débris de béton avec remplacement des fractions sable fin et sable moyen (0/2 mm) par des éléments de laitier ;
- Echantillon 7 : Débris de béton avec remplacement des fractions sable fin, sable moyen et sable grossier (0/5 mm) par des éléments de laitier.

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.12.

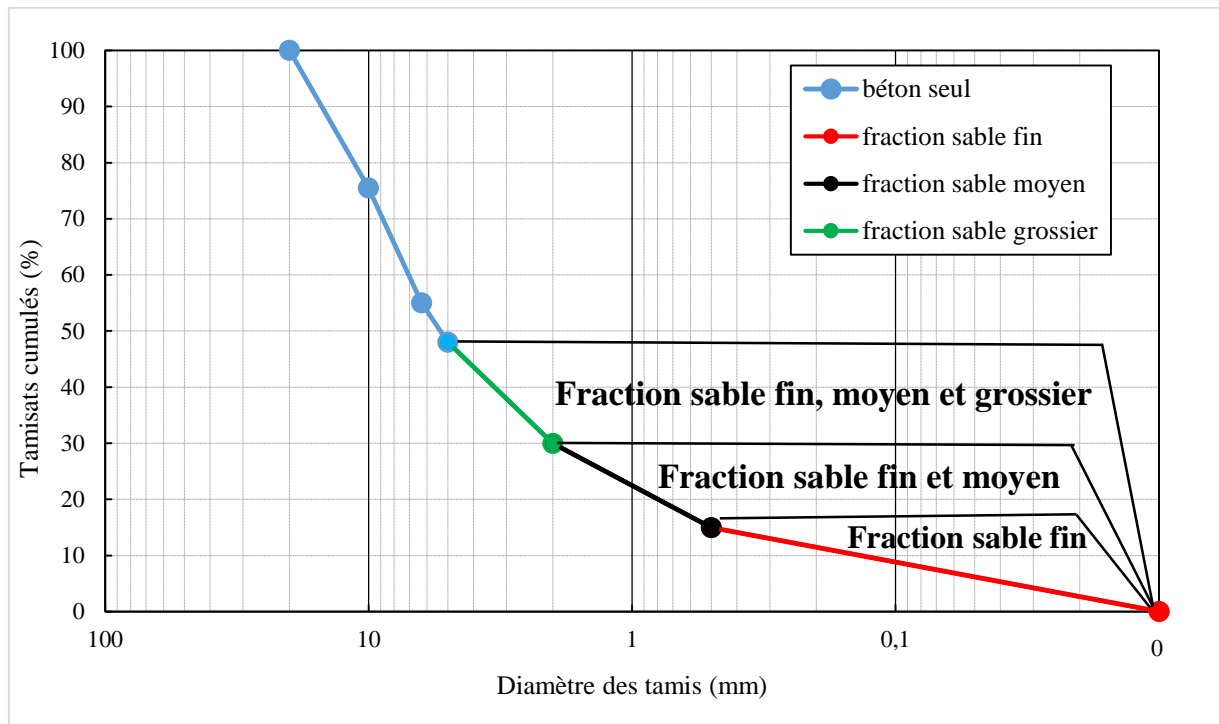


Figure III.12. Les différentes fractions des matériaux substitués.

La figure (III.12) présente les courbes granulométriques des matériaux utilisés dans le cadre de la valorisation des déchets de brique et de laitier. Ces matériaux ont été broyés puis tamisés afin d'obtenir trois fractions distinctes : sable fin, moyen et grossier, utilisées seules ou en combinaison pour remplacer partiellement les fines du béton recyclé. La courbe bleue représente le béton seul, servant de référence. Les autres courbes (rouge, noire, verte) traduisent les différentes fractions granulaires extraites des matériaux substitués. Ce tri granulométrique a permis de mieux maîtriser la distribution des mélanges et d'analyser l'influence de chaque fraction sur les performances mécaniques (densité sèche, portance). Cette figure résume donc la méthodologie adoptée pour préparer les matériaux recyclés en vue de leur utilisation en construction routière, en mettant en évidence l'importance du contrôle granulométrique.

III.6. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'identification des matériaux utilisés, afin de mieux présenter leurs aspects physiques et chimiques. Les résultats obtenus ont permis d'avoir une idée sur la nature de ces matériaux. Ceci contribue sensiblement à mettre en évidence leur comportement mécanique sous les différents types de sollicitations auxquelles ils seront soumis.

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

CHAPITRE IV

COMPACTAGE ET PORTANCE DES MATERIAUX ETUDIÉS

IV.1. Introduction

Les techniques d'amélioration et de stabilisation des sols comprennent divers procédés, tels que le traitement chimique, l'injection ou le malaxage de chaux et de ciment, ainsi que des méthodes thermiques, électriques et mécaniques, telles que la densification ou le compactage. Parmi ces approches, le compactage demeure l'une des plus anciennes méthodes couramment utilisées, particulièrement dans les travaux de construction routière et de barrages, en raison de sa simplicité et de son efficacité. L'essai CBR (California Bearing Ratio), qui mesure la portance des sols avant et après immersion, est essentiel pour le dimensionnement des chaussées. Dans ce chapitre sont présentés principalement les résultats des essais de compactage Proctor et de portance CBR, qui sont fondamentaux pour la conception des infrastructures routières.

IV.2. Essais de compactage

IV.2.1. Définition du compactage

Le compactage est un procédé mécanique appliqué aux sols ou matériaux granulaires dans le but de réduire les vides d'air, augmentant ainsi leur densité sèche. Cette opération améliore la portance, la stabilité et les propriétés mécaniques du sol, ce qui est essentiel pour les travaux de terrassement et de fondation. Selon le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), il s'agit de "l'action mécanique exercée sur un sol pour en réduire les vides d'air, donc pour augmenter sa densité sèche, et améliorer ses caractéristiques mécaniques" (LCPC, 1992).



Figure IV.1. Compactage des sols.

IV.2.2. But du compactage

Le compactage est un procédé technique visant à augmenter la densité d'un matériau (comme le sol, les enrobés routiers ou les déchets) en réduisant les vides entre les particules. Ses principaux objectifs sont (Fang et al., 2006) ;

- Améliorer la portance des sols pour les constructions.
- Réduire les tassements futurs en limitant la compressibilité.
- Diminuer la perméabilité (le cas des barrages en terre).
- Optimiser la durabilité des matériaux en génie civil.

IV.3. Les facteurs qui influencent le compactage

Dès 1930, il s'est avéré crucial d'approfondir la connaissance du phénomène de compactage et de ses effets sur les caractéristiques des sols, dans le but d'optimiser son contrôle et de perfectionner les équipements dédiés. Les recherches fondatrices dans ce domaine reviennent à l'ingénieur américain R. Proctor, dont les travaux pionniers ont marqué un tournant avec leur publication en 1933.

IV.3.1. Energie de compactage

L'énergie de compactage est l'énergie nécessaire pour réduire le volume d'un sol en augmentant sa densité, généralement par l'application de forces mécaniques. Elle joue un rôle fondamental dans les travaux de terrassement et de construction, car une bonne compaction améliore la portance du sol et réduit sa perméabilité, ce qui limite les tassements différentiels et augmente la stabilité des structures. L'énergie de compactage influence directement la densité sèche maximale et le contenu en eau optimal d'un sol, paramètres cruciaux dans la conception géotechnique. (Budhu, 2010)

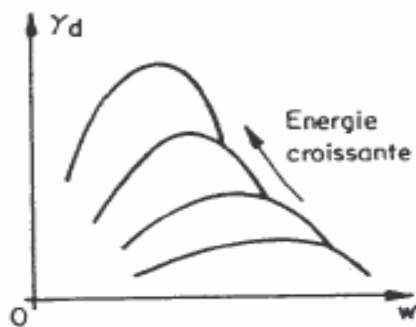


Figure IV.2. Influence de l'énergie de compactage.

IV.3.2. Teneur en eau

La teneur en eau influence fortement l'efficacité du compactage des sols. À faible teneur en eau, les particules du sol ne peuvent pas se réarranger efficacement en raison d'une friction interne élevée. En augmentant cette teneur, l'eau agit comme un lubrifiant, facilitant le glissement des grains, ce qui permet d'atteindre une densité sèche maximale à une teneur en eau dite optimale. Au-delà de ce point, un excès d'eau remplit les vides, réduisant la densité sèche obtenue car l'énergie de compactage est absorbée par l'eau plutôt que transmise aux particules solides (Das, 2016).



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

La nature du sol influence fortement son comportement lors du compactage. Les sols granulaires, comme les sables et les graviers, se compactent plus efficacement grâce à leur faible cohésion et leur capacité à réarranger leurs particules sous l'effet de vibrations ou de pressions mécaniques. En revanche, les sols fins, notamment les limons et les argiles, présentent une sensibilité accrue à la teneur en eau en raison de leur structure cohésive et de leur plasticité, ce qui rend leur compactage plus complexe et exige un contrôle précis de l'humidité (Lambe et al., 1969).

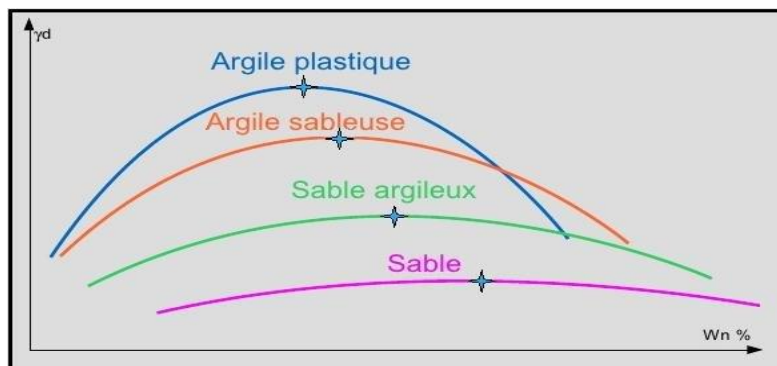


Figure IV.4. Influence de la nature du sol sur la courbe Proctor. (Hadji, 2020)

IV.4. Les essais de compactage au laboratoire

Les essais de compactage en laboratoire sont fondamentaux pour évaluer la capacité d'un sol à être densifié, en identifiant notamment la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale. Ces essais, comme celui de Proctor, permettent de mieux comprendre le comportement du sol en conditions contrôlées avant sa mise en œuvre sur le terrain. Selon Head (1992), ces essais « Fournissent des données essentielles pour établir les critères de compactage sur site et garantir la stabilité des structures géotechniques ».

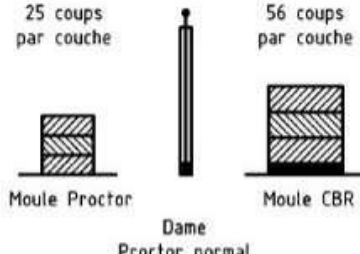
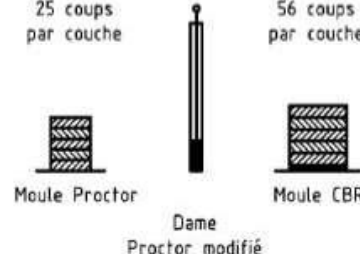
IV.4.1. Essai Proctor normal (NF P 94-093)

Le sol est compacté au moyen d'une dame de 2,490 kg, tombant d'une hauteur de 30,5 cm (1 pied). L'essai est réalisé en trois couches de plus ou moins 4 cm d'épaisseur qui reçoivent chacune 25 coups pour le moule Proctor et 56 coups pour le moule CBR.

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

Le sol est compacté au moyen d'une dame de 4,540 kg, tombant d'une hauteur de 45,7 cm (1,5 pied). 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 56 coups pour le moule CBR.

Tableau IV.1. Conditions des essais Proctor normal et modifié NF P 94-093.

| Nature de l'essai | Caractéristiques de l'essai | Moule Proctor | Moule CBR | Schéma récapitulatif |
|-----------------------|-----------------------------|---------------|-----------|--|
| Essai Proctor normal | Masse de la dame | 2 490 g | 2 490 g | <p>3 couches, à raison de :</p> <p>25 coups par couche 56 coups par couche</p>  <p>Moule Proctor Dame Proctor normal Moule CBR</p> |
| | Diamètre du mouton | 51 mm | 51 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 | 4 535 g | 4 535 g | <p>5 couches, à raison de :</p> <p>25 coups par couche 56 coups par couche</p>  <p>Moule Proctor Dame Proctor modifié Moule CBR</p> |
| | Diamètre du mouton | 51 mm | 51 mm | |
| | Hauteur de chute | 457 mm | 457 mm | |
| | Nombre de couches | 5 | 5 | |
| | Nombre de coups par couche | 25 | 56 | |

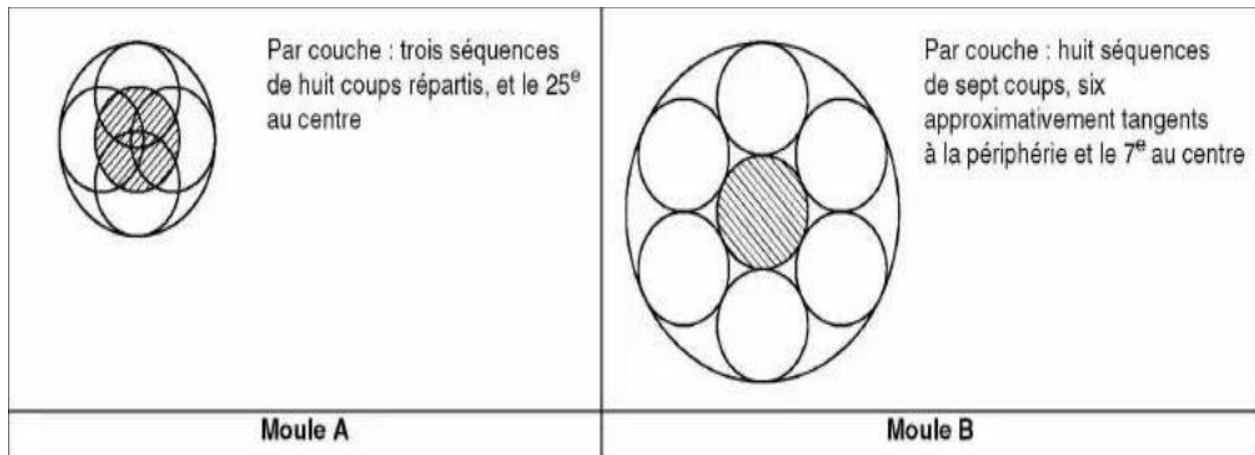


Figure IV.5. Schéma de principe de la répartition des coups de dame sur une couche NF P 94-093.

IV.4.3. Essais réalisés

Une série d'essai Proctor modifié a été réalisée sur les différents échantillons en mélanges de débris de béton et des débris de brique et des débris de béton avec des éléments du laitier :

- Débris de béton seuls (0/20)
- Débris de béton avec remplacement de la fraction sable fin (0/0,5mm) par des débris de brique ;
- Débris de béton avec remplacement des fractions sable fin et sable moyen (0/2 mm) par des débris de brique ;
- Débris de béton avec remplacement des fractions sable fin, sable moyen et sable grossier (0/5 mm) par des débris de brique ;
- Débris de béton avec remplacement de la fraction sable fin (0/0,5mm) par des éléments de laitier ;
- Débris de béton avec remplacement des fractions sable fin et sable moyen (0/2 mm) par des éléments de laitier ;
- Débris de béton avec remplacement des fractions sable fin, sable moyen et sable grossier (0/5 mm) par des éléments de laitier.



Figure IV.6. Mode opératoire des essais Proctor modifié réalisés.

IV.4.4. 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

➤ **Mélanges de débris de béton avec des débris de brique**

Les courbes Proctor obtenues pour le mélange comportant des débris de béton avec des débris de brique sont regroupées sur la figure (IV.7)

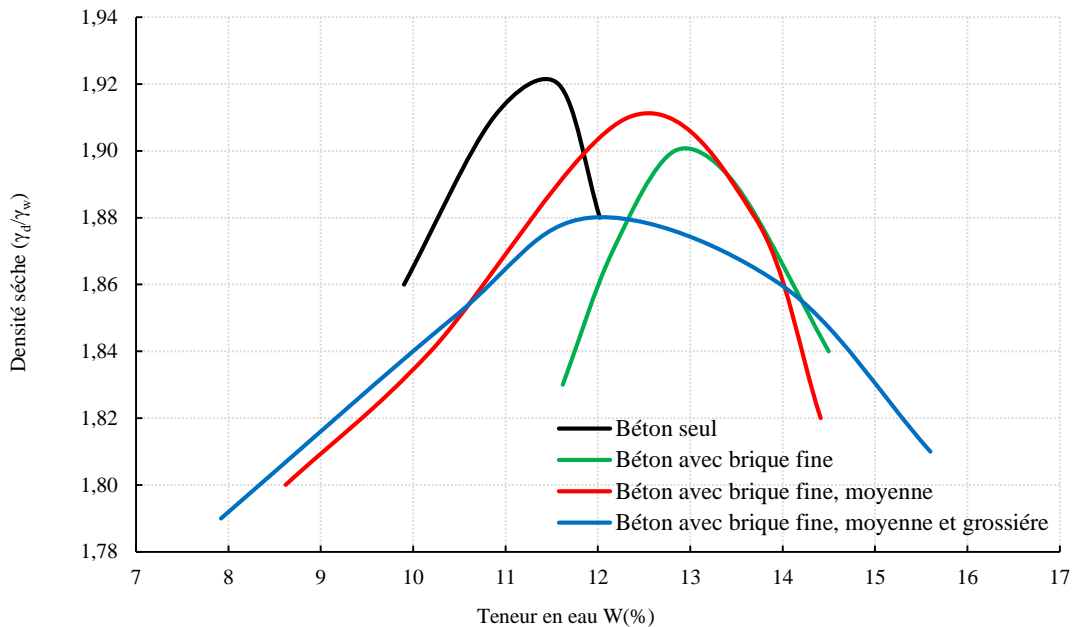


Figure IV.7. Courbes Proctor relatives au compactage des mélanges des débris de béton avec des débris de brique.

La figure (IV.7) montre que les courbes Proctor présentent une allure en cloche, avec des pics plus ou moins marqués relatifs à la teneur en eau optimale (w_{opt}) et à la densité sèche maximale (γ_d/γ_w). Le béton seul est caractérisé par une courbe plus bombée (signe de sensibilité à l'eau). Avec la présence des débris de briques, les courbes deviennent de plus en plus étalées (mélanges moins sensibles à l'eau relativement aux débris de béton seuls), notamment dans le cas des échantillons contenant toutes les fractions des débris de briques (fines, moyennes et grossières).

Les teneurs en eau optimales ainsi que les densités sèches maximales obtenues au compactage des différents mélanges sont résumées dans le tableau (IV.2)

Tableau IV.2. Teneurs en eau optimales et densités sèches maximales (débris de béton + débris de brique).

| Echantillons | w_{opt} (%) | Densités sèches maximales |
|--|---------------|---------------------------|
| Débris de béton seuls | 11,57 | 1,92 |
| Débris de béton +débris de brique fine | 12,83 | 1,90 |
| Débris de béton +débris de brique fine et moyenne | 12,33 | 1,91 |
| Débris de béton +débris de brique fine, moyenne et grossière | 11,91 | 1,88 |

Densités sèches maximales pour les différents mélanges (débris de béton + débris de brique)

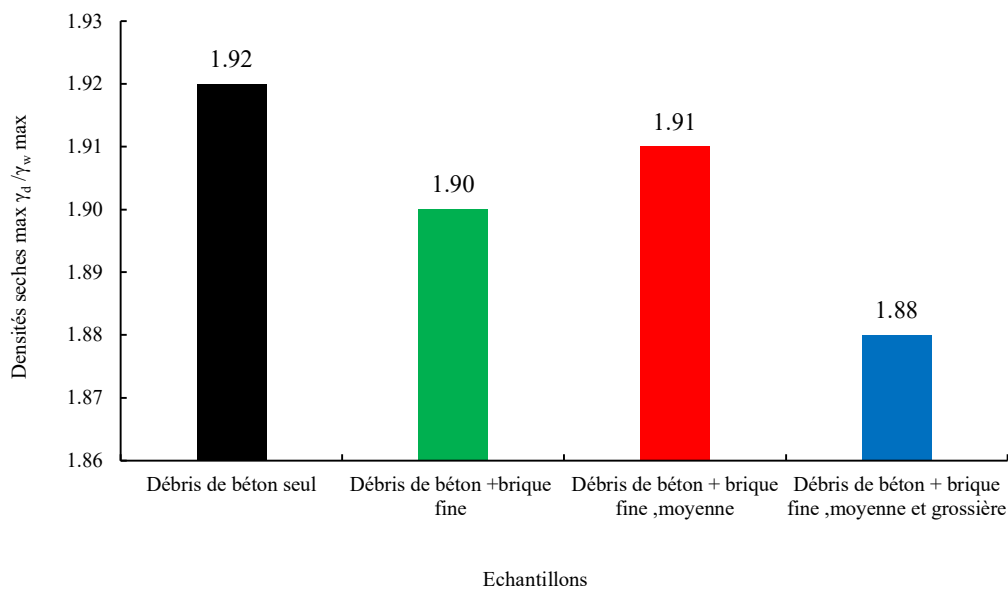


Figure IV.8. Densités sèches maximales (débris de béton + débris de brique).

Les résultats de la figure (IV.8) montrent que les densités sèches maximales (γ_d/γ_w) varient avec l'ajout des débris de brique. D'une manière générale, les densités sèches des différents mélanges contenant des débris de briques sont légèrement inférieures à celle développée au compactage des débris de béton seuls, cette diminution est plus apparente au compactage des mélanges comportant les trois fractions de brique (fine, moyenne et grossière). Ceci peut être dû à la forme aplatie des

grains de brique qui perturbe probablement la structure granulaire générale des mélanges en créant plus de vides entre les grains, ce qui les rend moins denses.

Teneurs en eau optimales les différents mélanges (débris de béton + débris de brique)

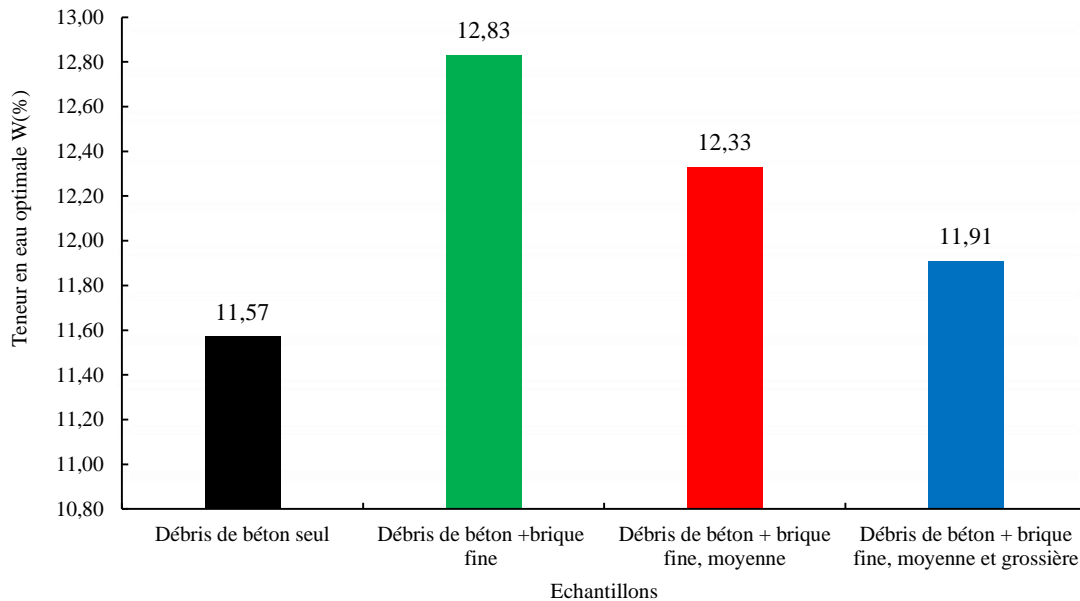


Figure IV.9. Évolutions des teneurs en eau en fonction de l'ajout de débris de brique.

Selon la figure (IV.9), les teneurs en eau optimales varient en fonction de la proportion et de la granulométrie des débris de brique que comporte l'échantillon. En effet, les mélanges comportant des débris de briques (comportant plus de vides) nécessitent des teneurs en eau légèrement plus importantes que celles nécessaires au compactage des débris de béton seuls. Toutefois, l'écart entre les différentes teneurs en eau (11,57% - 12,83%) est relativement restreint (ne dépasse pas 1.5%).

Cependant, on peut dire que les teneurs en eau nécessaires au compactage des matériaux présentés dans cette étude sont assez importantes relativement à celles nécessaires au compactage des granulats naturels (w_{opt} varie généralement de 5% à 10%).

Par ailleurs, cette caractéristique peut avoir un impact sur la consommation d'eau et donc sur l'évaluation environnementale des projets intégrant ces matériaux.

➤ Mélange de débris de béton avec des éléments de laitier

Les courbes Proctor obtenues pour le mélange débris de béton avec éléments du laitier sont regroupées sur la figure (IV.10)

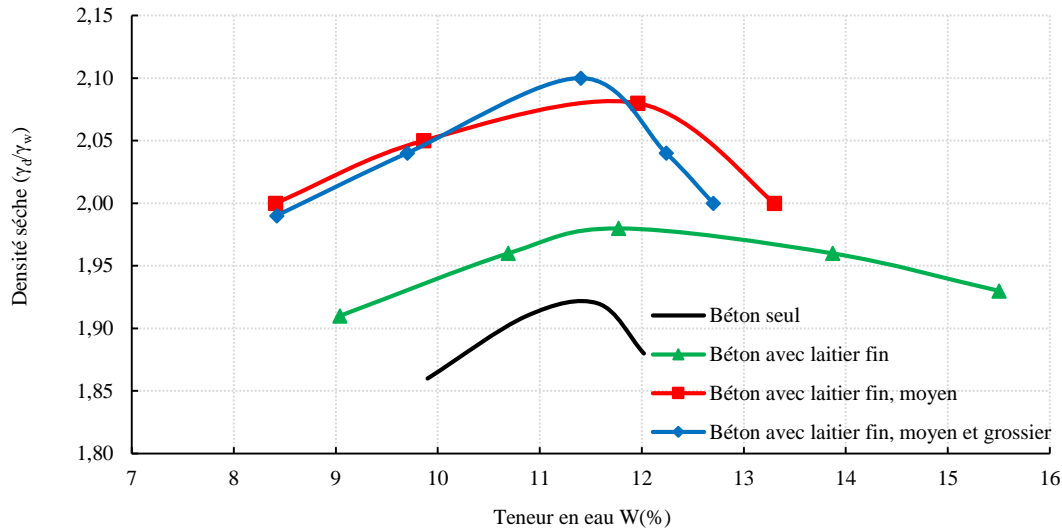


Figure IV.10. Courbe Proctor de béton avec l'ajout d'éléments du laitier.

En se référant à la (figure IV.10), nous constatons que les courbes Proctor relatives aux différents échantillons (débris de béton + éléments de laitier) présentent une allure en cloche, caractérisée par des pics plus ou moins marqués correspondant aux teneurs en eau optimales et aux densités sèches maximales. Avec l'introduction des éléments du laitier, les courbes deviennent moins bombées. Ceci signifie que les mélanges contenant du laitier sont moins sensibles à l'eau. On peut dire ainsi, que l'ajout des éléments du laitier montre une influence notable sur la variation de l'allure des courbes relatives aux mélanges.

Cette moindre sensibilité à l'eau peut être considérée comme un avantage en conditions de chantier, car elle permet une plus grande tolérance aux variations d'humidité lors du compactage, facilitant ainsi la mise en œuvre du matériau sans affecter significativement ses performances mécaniques.

Les teneurs en eau optimales ainsi que les densités sèches maximales obtenues sont résumées dans le tableau (IV.3).

Tableau IV.3. Teneurs en eau optimales et des densités sèches maximales des différents mélanges (débris de béton + éléments de laitier).

| Echantillons | w_{opt} (%) | Densités sèches maximales |
|--|---------------|---------------------------|
| Débris de béton seuls | 11,57 | 1,92 |
| Débris de béton + éléments de laitier fin | 11,77 | 1,98 |
| Débris de béton + éléments de laitier fin et moyen | 11,96 | 2,08 |
| Débris de béton + éléments de laitier fin, moyen et grossier | 11,40 | 2,10 |

Densités sèches maximales pour le mélange de béton avec laitier

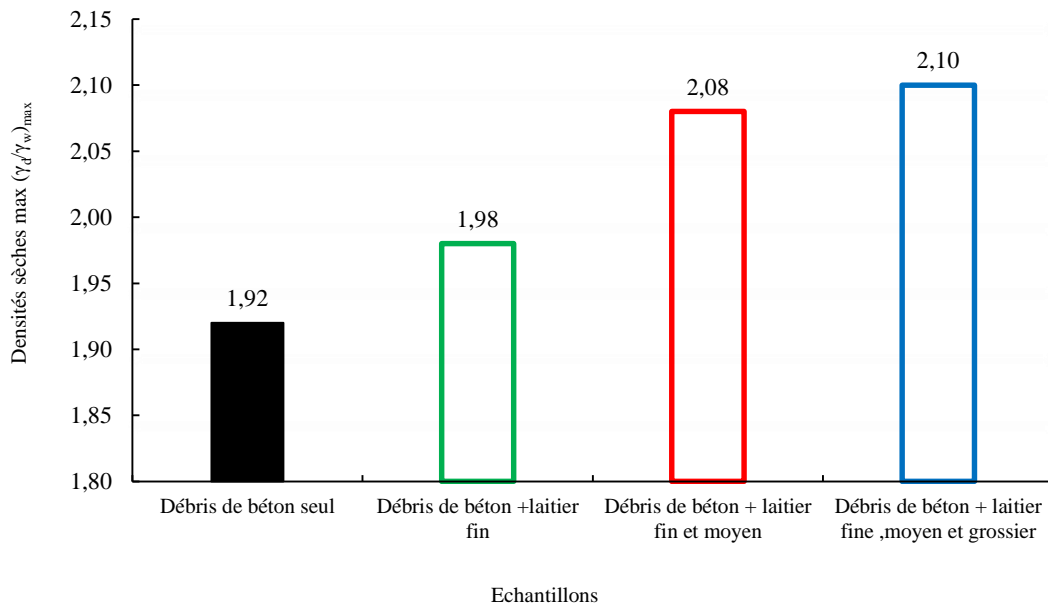


Figure IV.11. Évolutions des densités sèches maximales en fonction de l'ajout des éléments du laitier.

Les résultats de la figure (IV.11) montrent que les densités sèches maximales varient en fonction de l'ajout progressif de laitier de différentes granulométries. La densité sèche maximale s'améliore avec la substitution des différentes fractions de laitier aux débris de béton pour atteindre sa valeur maximale de 2,10 avec les trois fractions (fin + moyen + grossier).

Cette amélioration peut être expliquée par la combinaison des éléments de laitier plus denses et de différentes tailles qui présentent un meilleur arrangement des grains, réduisant ainsi les vides intergranulaires ce qui améliore la compacité globale du mélange.

Teneurs en eau optimales pour le mélange de débris de béton avec débris de laitier

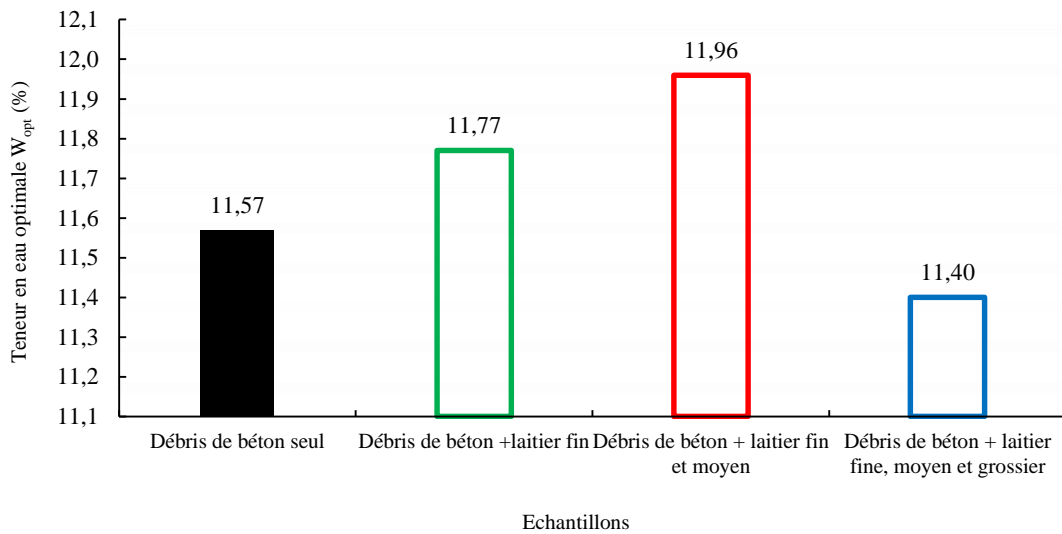


Figure IV.12. Évolutions des teneurs en eau en fonction de l'ajout d'éléments du laitier.

La figure (IV.12) illustre l'évolution des teneurs en eau optimales en fonction de la proportion et de la granulométrie des éléments de laitier que comporte l'échantillon. Les teneurs en eau varient dans un intervalle très restreint (11,40 à 11,96 %), ce qui indique que les ajouts des éléments de laitier n'influent pas notablement la quantité d'eau nécessaire au compactage des différents mélanges. Il est à signaler toutefois, que les mélanges contenant les fractions de laitier (fin, moyen et grossier) développent les teneurs en eau les plus faibles et les densités sèches les plus élevées.

Les courbes Proctor obtenues pour tous les mélanges (débris de béton avec différents fractions débris de brique, débris de béton avec différentes fractions des éléments du laitier) sont regroupées sur la figure (IV.13)

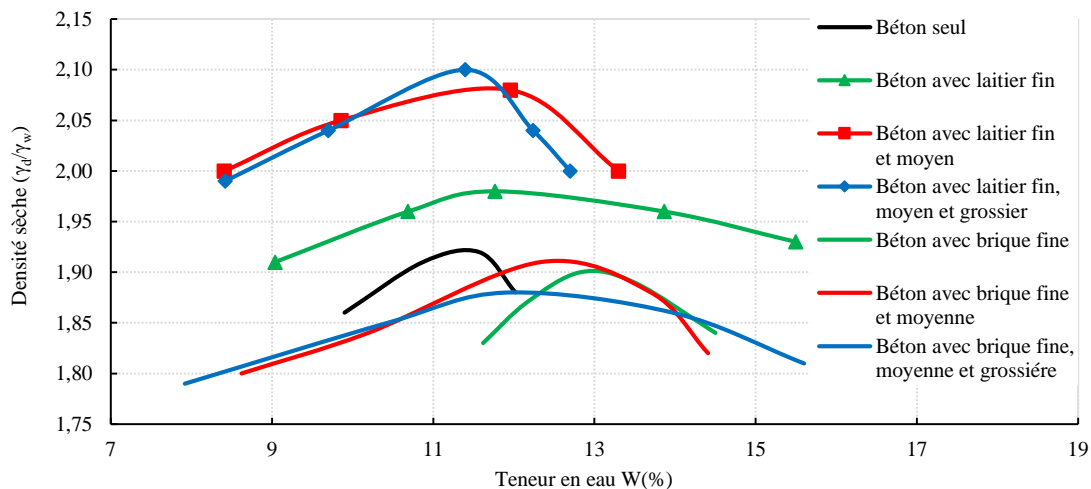


Figure IV.13. Courbe Proctor comparative de tous les échantillons.

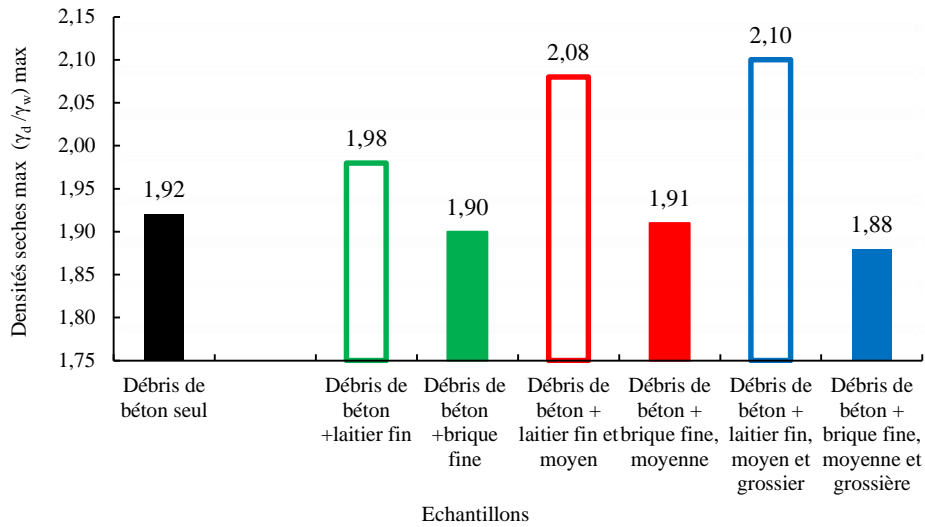


Figure IV.14. Évolutions des densités sèches maximales en fonction de tous les échantillons.

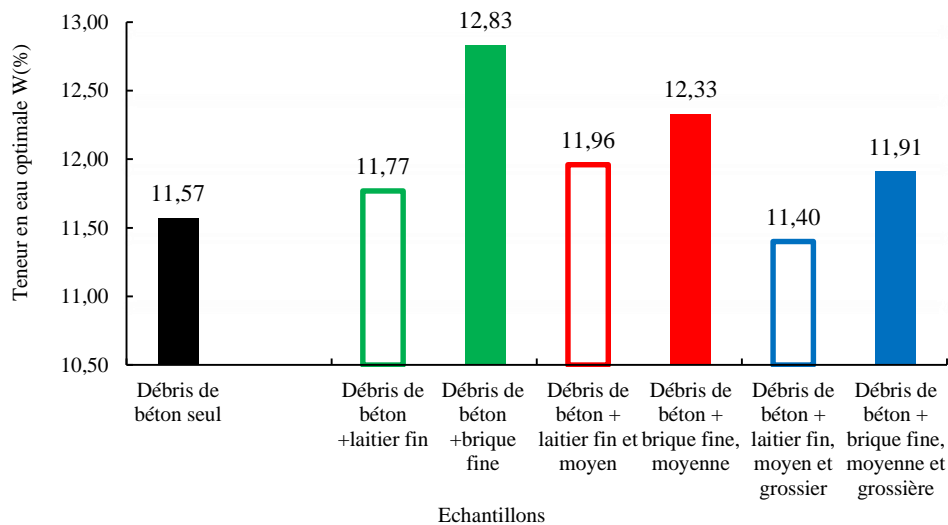


Figure IV.15. Évolutions des teneurs en eau en fonction de tous les échantillons.

Les figures (IV.13, IV.14 et IV.15) illustrent la variation des densités sèches maximales et des teneurs en eau optimales pour les différents mélanges (débris de béton + débris de brique) et (débris de béton + éléments de laitier).

D'une manière globale, les mélanges contenant du laitier présentent des densités sèches plus élevées que celles contenant de la brique, quelles que soient les tailles de particules utilisées. Cela reflète une compacité et une performance mécanique potentiellement meilleures avec le laitier. Le béton avec le laitier fin, moyen et grossier atteint les densités sèches les plus élevées (2,1), tandis

que les mélanges à base de débris de béton et de briques développent des densités ne dépassant pas 1,91.

Le laitier offre des particules de formes volumineuses denses qui s'insèrent dans la matrice granulaire du mélange, ce qui les rend plus denses. Tandis que les débris de brique sont généralement de formes aplaties, ce qui perturbe la structure granulaire des mélanges et les rend moins denses.

En ce qui concerne les teneurs en eau optimales, on remarque que les mélanges contenant du laitier se compactent avec des teneurs en eau réduites relativement aux mélanges contenant de la brique. En effet, ces derniers sont moins denses, ainsi, ils comportent plus de vides entre les grains, ces vides récupèrent ainsi une partie d'eau de compactage.

Le laitier, grâce à sa texture et sa répartition granulométrique, offre un meilleur compactage avec moins d'eau, ce qui en fait un matériau plus performant et plus économique pour les applications en génie civil utilisant des matériaux recyclés.

Ainsi, dans une optique de valorisation des matériaux de recyclage, le laitier se présente comme une option plus performante que la brique en termes de compactage.

IV.5. Essais 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.5.1. But de l'essai

L'essai CBR mesure la portance d'un sol ou d'un matériau pour évaluer sa capacité à supporter des charges, utilisé principalement en génie civil pour la conception des chaussées. Il consiste à enfoncer un piston normalisé dans un échantillon compacté et humide, puis à comparer la résistance obtenue à celle d'un matériau de référence. Les résultats contribuent au dimensionnement des couches de fondations des routes, de pistes ou de plateformes. (Horonjeff & Jones, 1953)

IV.5.2. Principe de l'essai (NF P 94-078)

Le principe de l'essai CBR consiste à mesurer la résistance d'un matériau (sol, granulats) à la pénétration d'un piston normalisé sous charge, après compactage et saturation, en comparant les

contraintes nécessaires à 2,5 mm et 5 mm d'enfoncement à celles d'un matériau de référence. Le rapport (en %) donne l'indice CBR, utilisé pour dimensionner les chaussées. La valeur retenue est la plus élevée des deux mesures.

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 :

$$I(2,5) = \frac{\text{Effort de penetration a 2,5mm d'enfoncement en kN}}{13,35} \times 100$$

$$I(5) = \frac{\text{Effort de penetration a 5mm d'enfoncement en kN}}{20} \times 100$$

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 :

$$G = \frac{\Delta h}{H} \times 100$$

Avec :

Δh : variation de hauteur mesurée (mm).

H : hauteur initiale de l'éprouvette, soit 116mm.

IV.5.3. 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 (CBR) et leur portance après immersion (CBR_{imm}).

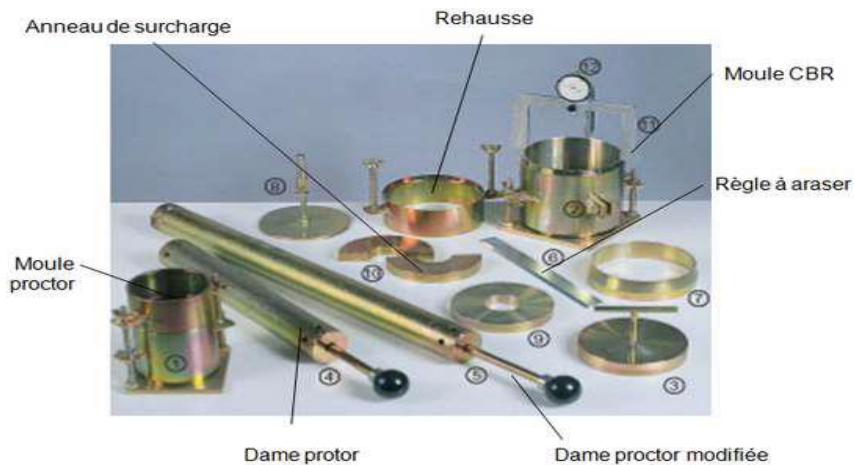


Figure IV.16. Confection de l'éprouvette pour essai CBR.



Figure IV.17. Appareillage pour CBR immersion.



Figure IV.18. La machine de poinçonnement LoadTrac II (LGEA).

IV.5.4. Détermination de l'indice CBR immédiat

Figure IV.19. Poinçonnement des éprouvettes laboratoire LGEA.

IV.5.5. Détermination de l'indice CBR après immersion (mesure du gonflement relatif)

Les essais de portance CBR après immersion sont réalisés sur les échantillons après quatre jours d'immersion dans l'eau.



Figure IV.20. Essai CBR après immersion, imbibition et gonflement.

IV.6. Expression des résultats

Dans cette étude des essais CBR ont été réalisés pour différents types d'échantillons (débris de béton seul, débris de béton + débris de briques et débris de béton + des éléments de laitier), afin de déterminer les indices portants immédiats (IPI) et les indices CBR après immersion.

IV.6.1. Interprétation des résultats des débris de béton avec des débris de brique

❖ Indices CBR immédiats (CBR)

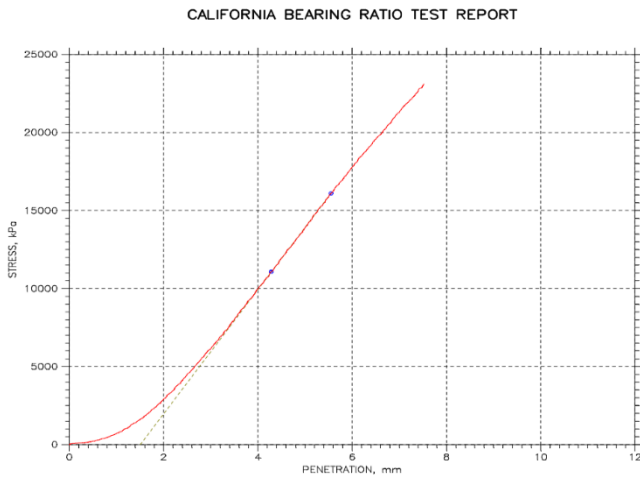


Figure IV.21. Courbe enfoncements-forces de Débris de béton seul

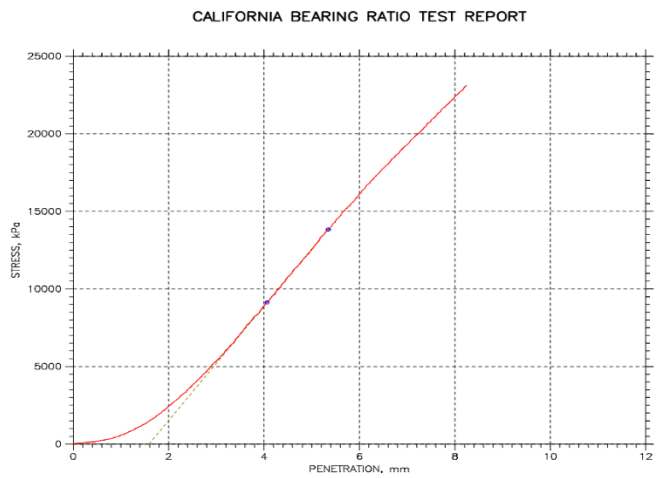


Figure IV.22. Courbe enfoncements-forces de Débris de béton + brique fine

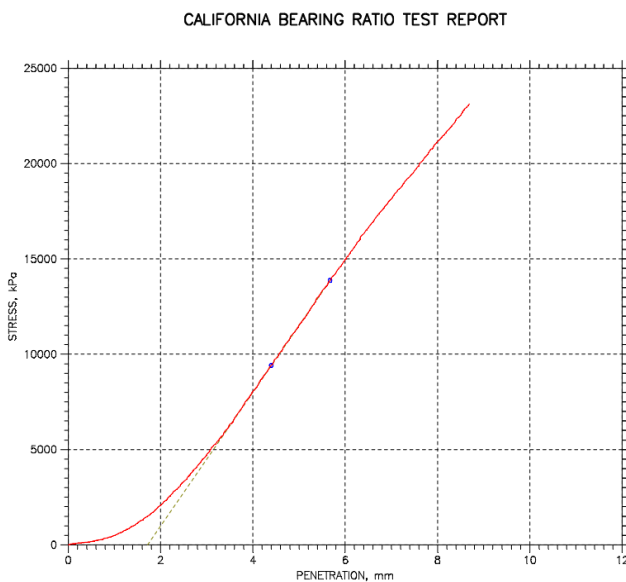


Figure IV.23. Courbe enfoncements-forces de Débris de béton + brique fine et moyenne

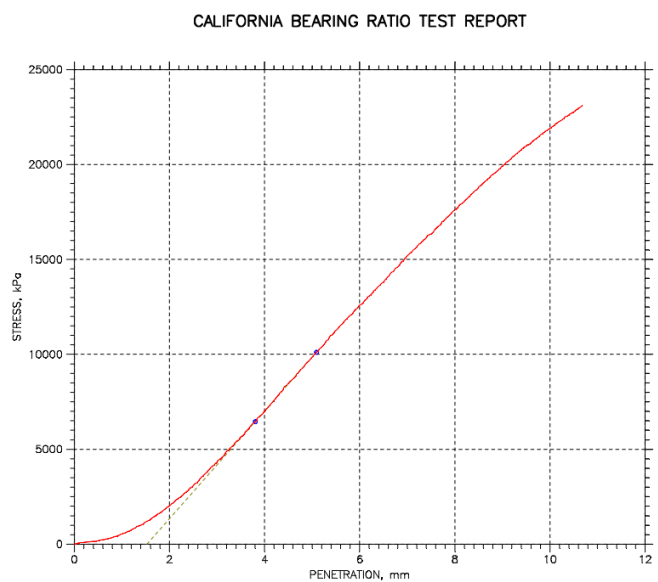


Figure IV.24. Courbe enfoncements-forces de Débris de béton + brique fine, moyenne et grossière

Tableau IV.4. Résultats des essais CBR immédiats.

| Echantillons | Indices CBR immédiats | | |
|---|-----------------------|------------------|---------|
| | I _(2,5) | I ₍₅₎ | CBR (%) |
| Débris de béton seul | 147 | 192 | 192 |
| Débris de béton + fraction fine de débris de brique | 136 | 177 | 177 |
| Débris de béton + fraction fine et moyenne de débris de brique | 130 | 170 | 170 |
| Débris de béton + fraction fine, moyenne et grossière de débris de brique | 104 | 137 | 137 |

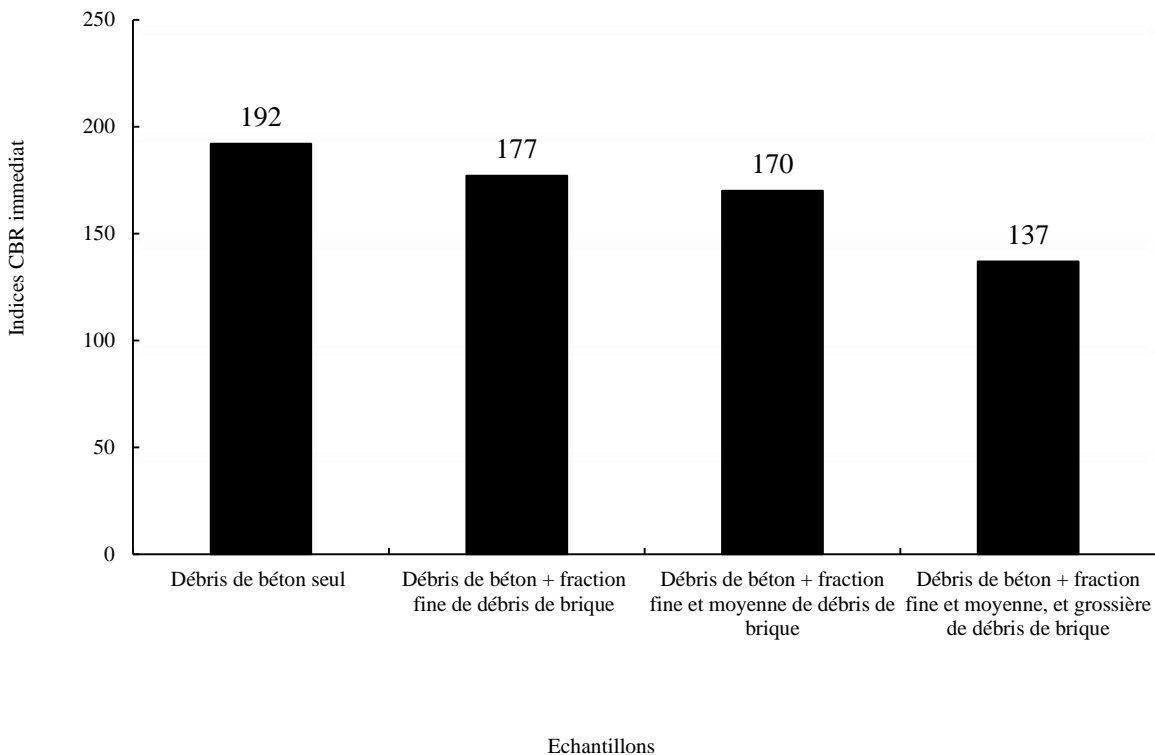


Figure IV.25. Evolution des indices CBR immédiats en fonction de la teneur en brique.

La figure (IV.25) illustre l'évolution des indices CBR immédiats en fonction de la teneur en débris de brique substitués aux débris de béton. Le béton seul présente l'indice CBR immédiat le plus élevé (192). L'incorporation des débris de briques (fractions fine, moyenne et grossière) réduit de plus en plus les indices CBR des mélanges. Ceci peut être dû au fait de combiner deux matériaux de natures différentes et que les débris de brique peuvent être de faible résistance relativement aux

granulats de béton. Ce qui fait que les mélanges développent des résistances au poinçonnement plus faibles que celles développées par les débris de béton seuls (échantillons plus ou moins homogènes).

Cependant, l'ensemble des mélanges présentent des indices CBR assez importants (supérieurs à 80) relativement à ceux développés par les matériaux habituels routiers (sable et gravier naturels).

❖ **Indices CBR immersion (CBR_{imm})**

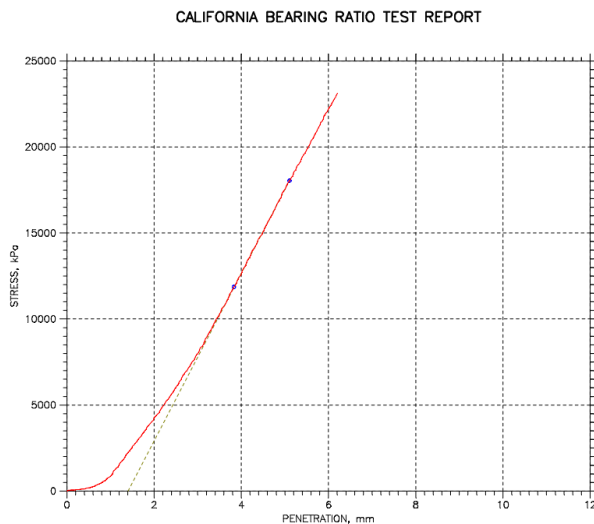


Figure IV.26. Courbe enfoncements-forces de débris de béton seul

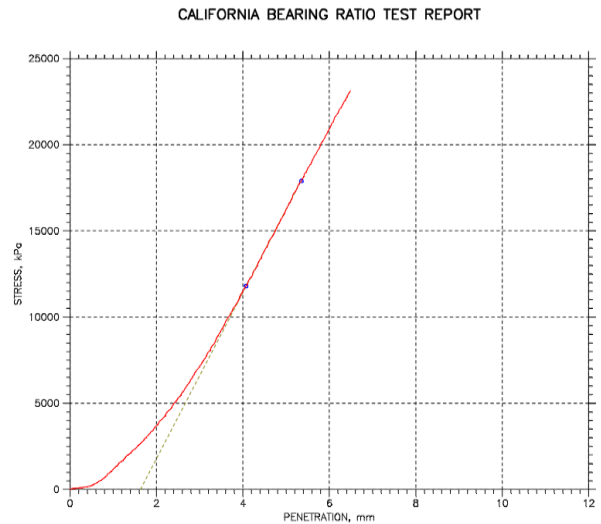


Figure IV.27. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + brique fine

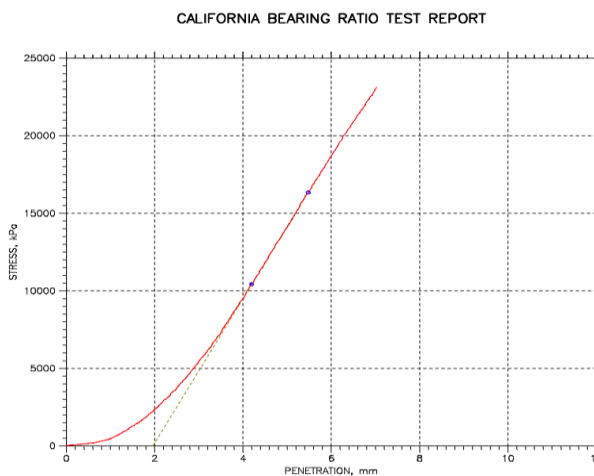


Figure IV.28. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + brique fine et moyenne

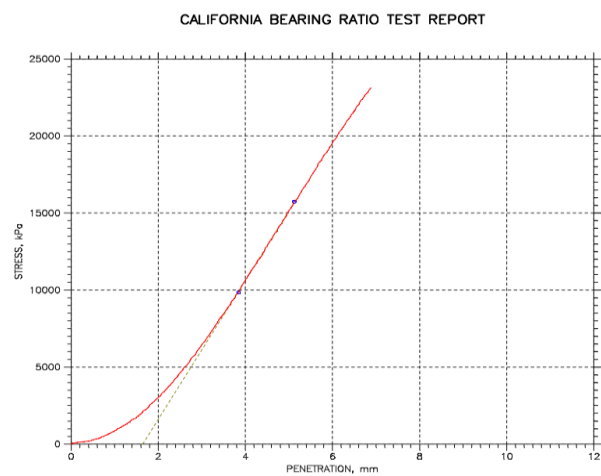


Figure IV.29. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + brique fine, moyenne et grossière

Tableau IV.5. Résultats des essais CBR après immersion.

| Echantillons | Indices CBR immersions | | |
|---|------------------------|------------------|------------------------|
| | I _(2,5) | I ₍₅₎ | CBR _{imm} (%) |
| Débris de béton seul | 180 | N/A | N/A |
| Débris de béton + fraction fine de débris de brique | 178 | N/A | N/A |
| Débris de béton + fraction fine et moyenne de débris de brique | 172 | N/A | N/A |
| Débris de béton + fraction fine, moyenne et grossière de débris de brique | 166 | 218 | 218 |

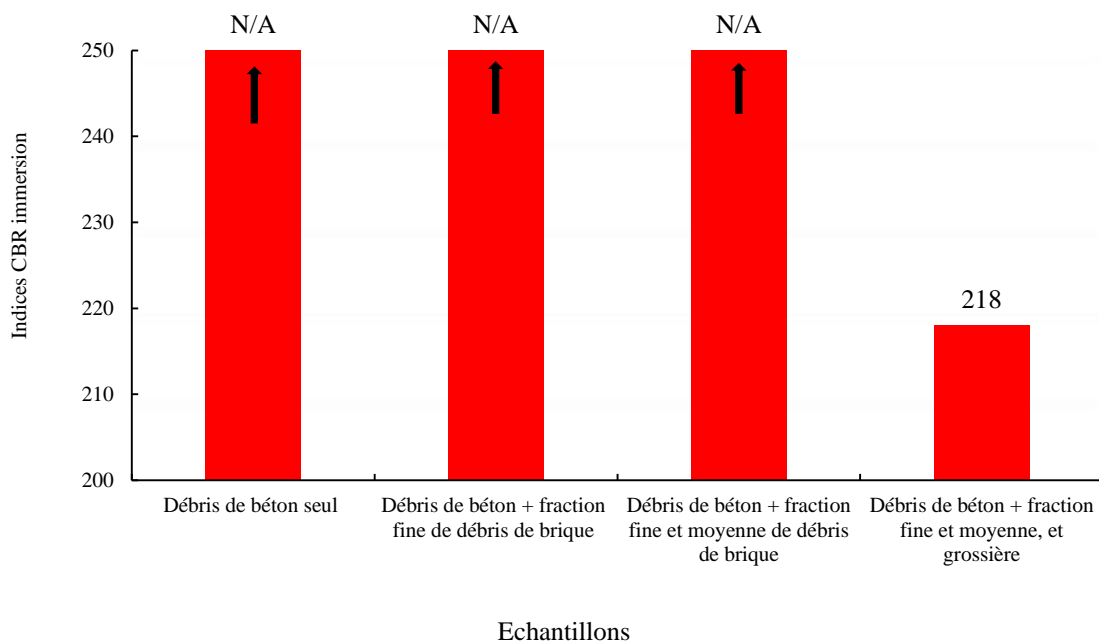
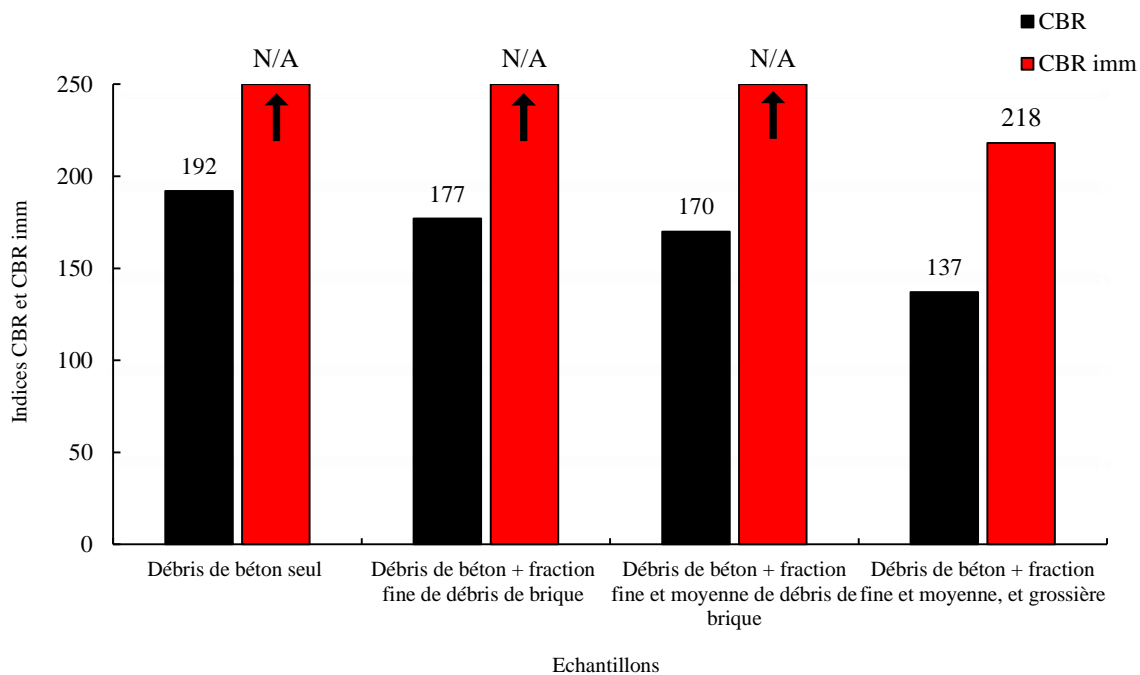


Figure IV.30. Evolution des indices CBR après immersions en fonction de la teneur en brique.

La figure (IV.30) présente l'évolution des indices CBR après immersion pour les différents mélanges de débris de béton et de brique. Les échantillons contenant des débris de béton seul, ainsi que ceux contenant des fractions fines à moyennes de brique, ont présenté des résistances au poinçonnement après immersion très impressionnantes dépassant même la capacité maximale de l'appareil utilisé au laboratoire (N/A > 250). En passant par contre, à la fraction grossière de brique (béton + brique fine, moyenne et grossière), la portance des mélanges diminue mais reste toujours au-delà des seuils préconisés par les normes relatives aux granulats routiers. On peut constater ainsi que la portance des échantillons diminue avec leur teneur en brique.

Tableau IV.6. Résultats d'essai CBR (CBR et CBR_{imm}).

| Echantillons | CBR | CBR _{imm} |
|---|-----|--------------------|
| Débris de béton seul | 192 | N/A |
| Débris de béton + fraction fine de débris de brique | 177 | N/A |
| Débris de béton + fraction fine et moyenne de débris de brique | 170 | N/A |
| Débris de béton + fraction fine, moyenne et grossière de débris de brique | 137 | 218 |

Figure IV.31. Courbes comparatives des CBR et CBR_{imm} des différents ajouts de débris de brique.

A titre de comparaison, la figure (IV.31) montre que les mélanges étudiés développent des portances plus intéressantes après immersion dans l'eau. Cette amélioration après immersion révèle un rôle bénéfique de l'eau sur la portance des mélanges qui peut être expliqué probablement par la cimentation des échantillons en contact avec l'eau suite à l'activation de liants (fraction fine, notamment des débris de béton).

Cependant, la présence de granulats de brique en forte proportion (fine, moyenne et grossière) atténue cet effet.

IV.6.2. Interprétation des résultats des débris de béton avec des éléments du laitier

❖ Indice CBR immédiats (CBR)

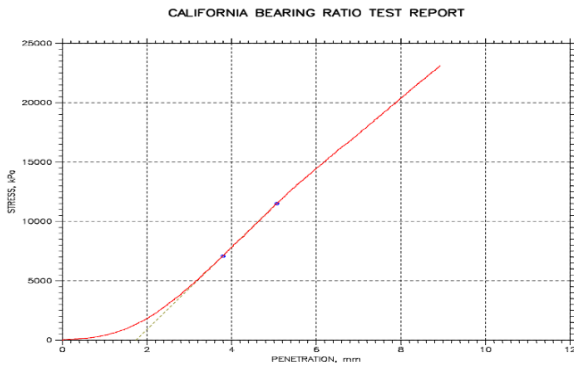


Figure IV.32. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + laitier fin

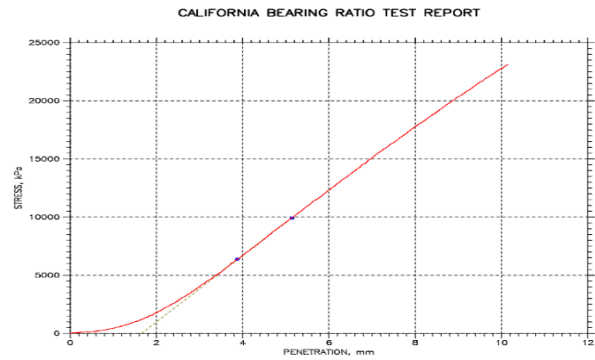


Figure IV.33. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + laitier fin et moyen

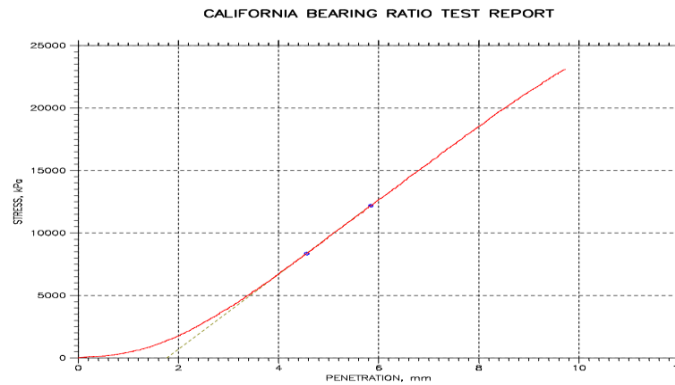


Figure IV.34. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + laitier fin, moyen et grossier

Tableau IV.7. Résultats des essais CBR immédiats.

| Echantillons | Indices CBR immédiats | | |
|---|-----------------------|------------------|---------|
| | I _(2,5) | I ₍₅₎ | CBR (%) |
| Débris de béton seul | 147 | 192 | 192 |
| Débris de béton + fraction fin d'éléments de laitier | 127 | 163 | 163 |
| Débris de béton + fraction fin et moyen d'éléments de laitier | 105 | 139 | 139 |
| Débris de béton + fraction fin, moyen et grossier d'éléments de laitier | 111 | 127 | 127 |

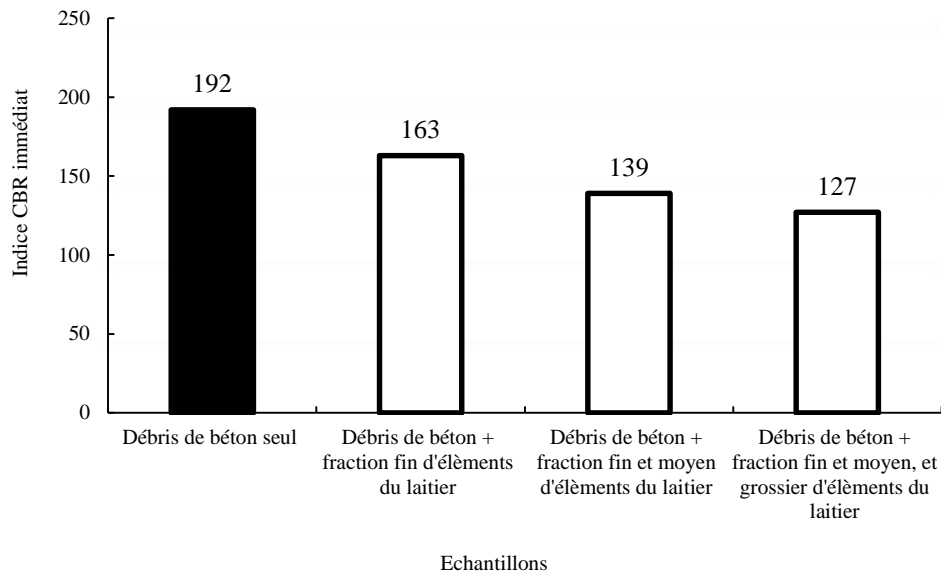


Figure IV.35. Evolution des indices CBR immédiats en fonction de la teneur en laitier.

La Figure (IV.35) montre une diminution progressive des indices CBR immédiats avec l'ajout des éléments de laitier.

En effet, l'incorporation du laitier avec toutes ses fractions (fin, moyen et grossier) réduit la portance des mélanges en passant de la valeur maximale de 192 pour les débris de béton seuls à 127 dans le cas des échantillons à forte teneur en laitier. Toutefois, la portance avant immersion des différents mélanges contenant du laitier reste satisfaisante et dépasse le seuil exigé par les normes pour un matériau routier.

❖ Indices CBR immersions (CBR_{imm})

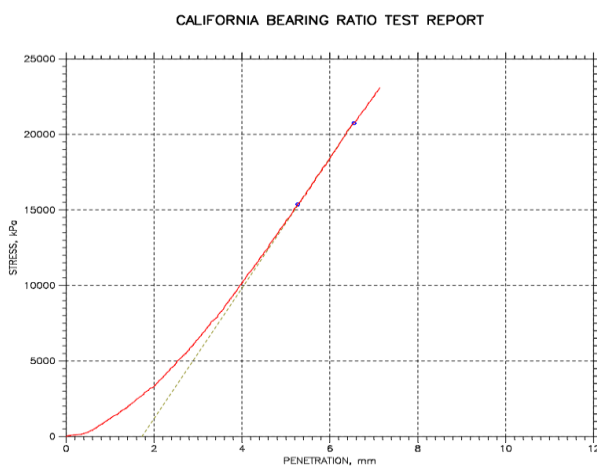


Figure IV.36. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + laitier fin

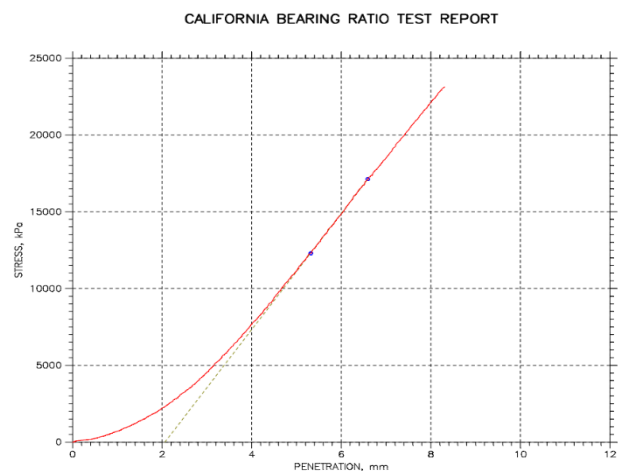


Figure IV.37. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + laitier fin et moyen

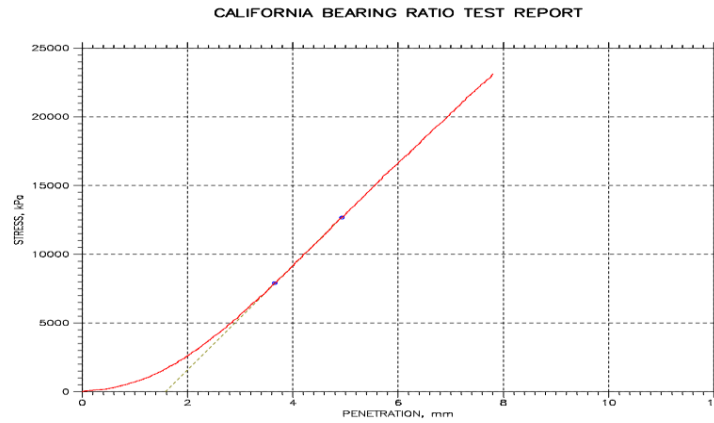


Figure IV.38. Courbe enfoncements-forces de débris de béton + laitier fin, moyen et grossier

Tableau IV.8. Résultats des essais CBR immersion.

| Echantillons | Indices CBR immersions (CBR) | | |
|---|------------------------------|------------------|------------------------|
| | I _(2,5) | I ₍₅₎ | CBR _{imm} (%) |
| Débris de béton seul | 180 | N/A | N/A |
| Débris de béton + fraction fin d'éléments de laitier | 162 | 210 | 210 |
| Débris de béton + fraction fin et moyen d'éléments de laitier | 142 | 184 | 184 |
| Débris de béton + fraction fin, moyen et grossier d'éléments de laitier | 140 | 174 | 174 |

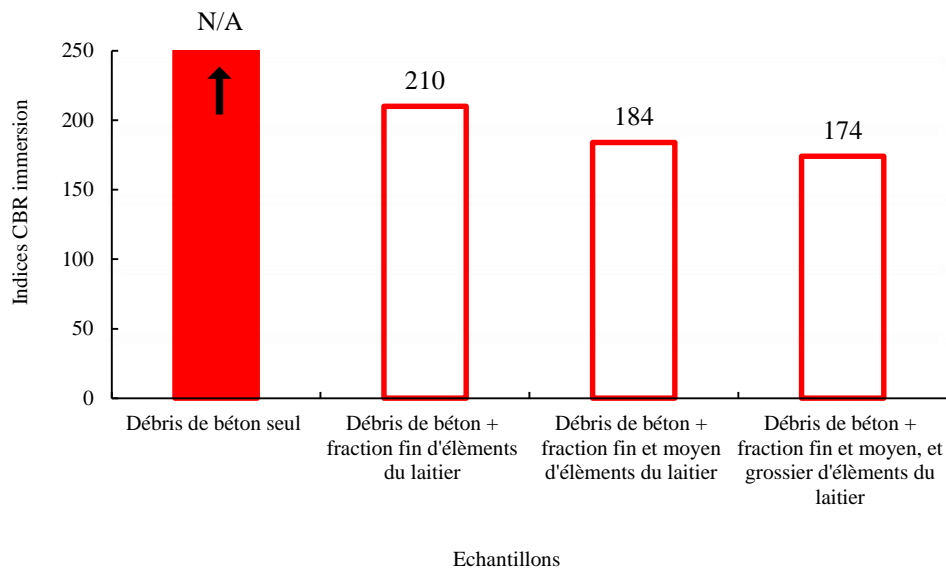


Figure IV.39. Évolution des indices CBR immersion en fonction de la teneur en laitier.

La figure (IV.39) montre que les indices CBR_{imm} des mélanges après immersion diminuent de plus en plus avec leur teneur en laitier. En effet, le béton seul présente une portance dépassant la capacité maximale de la machine ($CBR_{imm} > 250$), indiquant une résistance très élevée. L'ajout des fractions (fine, moyenne et grossière) du laitier réduit la portance des mélanges atteignant une valeur minimale de 174 %. Ces résultats montrent que la présence du laitier dans les mélanges, notamment en fortes proportions affecte négativement la performance mécanique des mélanges, réduisant leur capacité portante.

Tableau IV.9. Récapitulatif des résultats d'essais CBR (CBR et CBR_{imm}) pour les échantillons des débris de béton + laitier.

| Echantillons | CBR | CBR_{imm} |
|---|-----|-------------|
| Débris de béton seul | 192 | N/A |
| Débris de béton + fraction fin d'éléments de laitier | 163 | 210 |
| Débris de béton + fraction fin et moyen d'éléments de laitier | 139 | 184 |
| Débris de béton + fraction fin, moyen et grossier d'éléments de laitier | 127 | 174 |

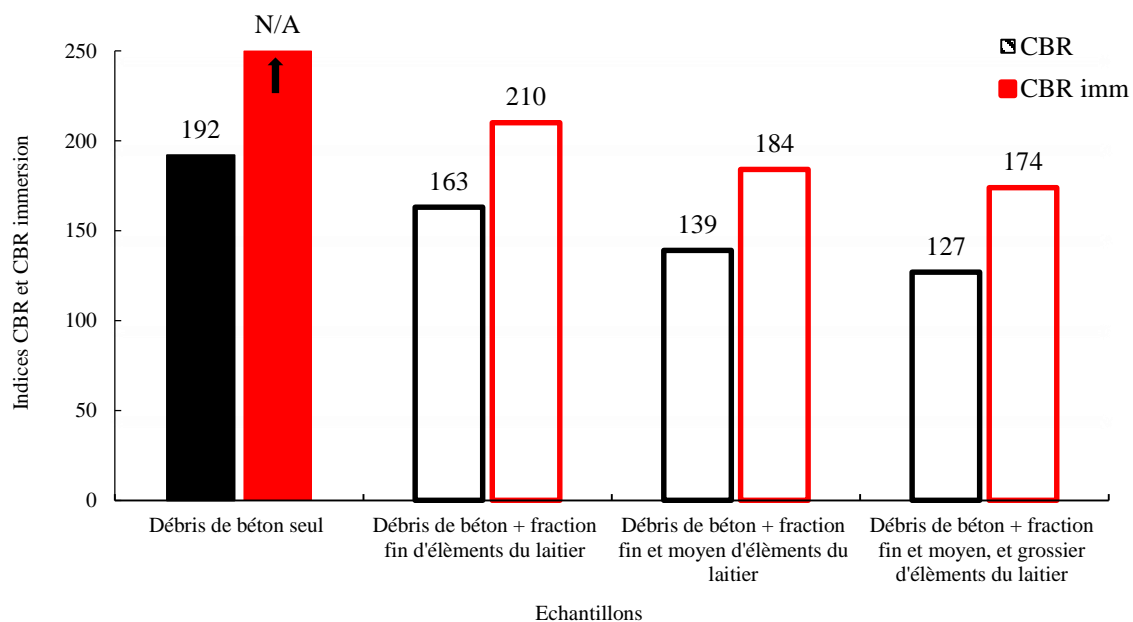


Figure IV.40. Courbes comparatives des CBR et CBR_{imm} des différents ajouts d'éléments de laitier.

La figure (IV.40) permet d'établir la comparaison des indices CBR immédiats et CBR_{imm} pour les différents mélanges reconstitués de débris de béton et de laitier. L'immersion provoque une amélioration systématique de la portance pour tous les échantillons. En effet, les débris de béton seuls développent une portance après immersion qui dépasse la capacité maximale de l'appareil utilisé ($N/A > 250$), nettement supérieure à celle développée avant immersion. Les mélanges comportant des éléments du laitier avec les différentes fractions confirment également cette tendance et développent des portances après immersion plus importantes que celles avant immersion.

Ceci peut être dû au fait que l'eau agit comme un activateur de propriétés liantes dans les mélanges béton-laitier, optimisant la structure granulaire plutôt que de la dégrader.

Il est à mettre en valeur également une certaine stabilité en passant de l'état sec à l'état humide des mélanges comportant du laitier relativement aux échantillons comportant des débris de béton seuls, traduite par l'écart réduit entre les indices CBR avant et après immersion développé par les mélanges comportant du laitier.

IV.6.3. Interprétation des résultats des différents mélanges avant et après immersion

Les figures (IV.41 et IV.42) présentent les résultats CBR et CBR_{imm} des différents mélanges (débris de béton + débris de brique) et (débris de béton + éléments de laitier)

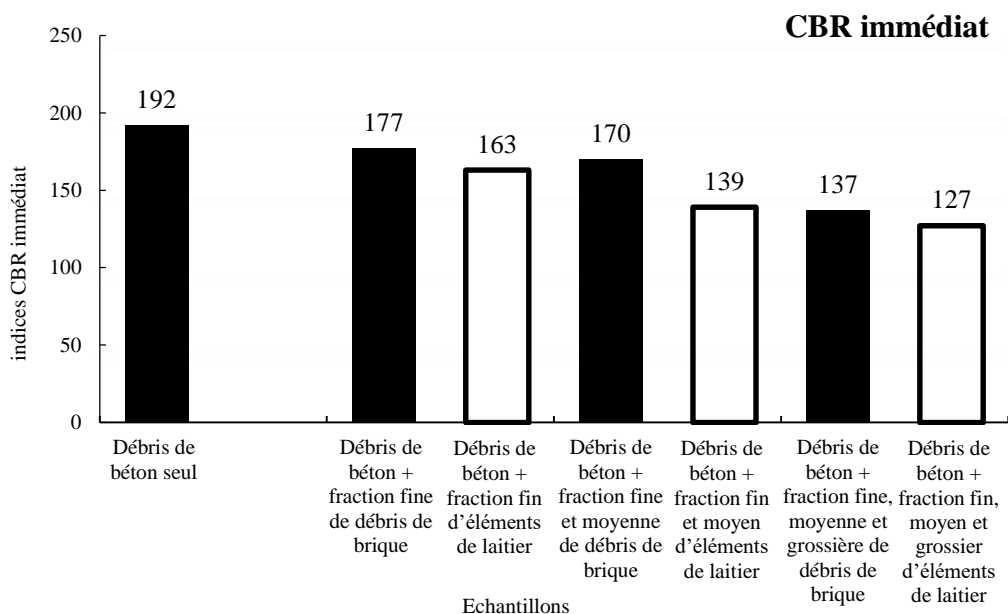


Figure IV.41. Courbes comparatives des indices CBR immédiats pour les différents échantillons.

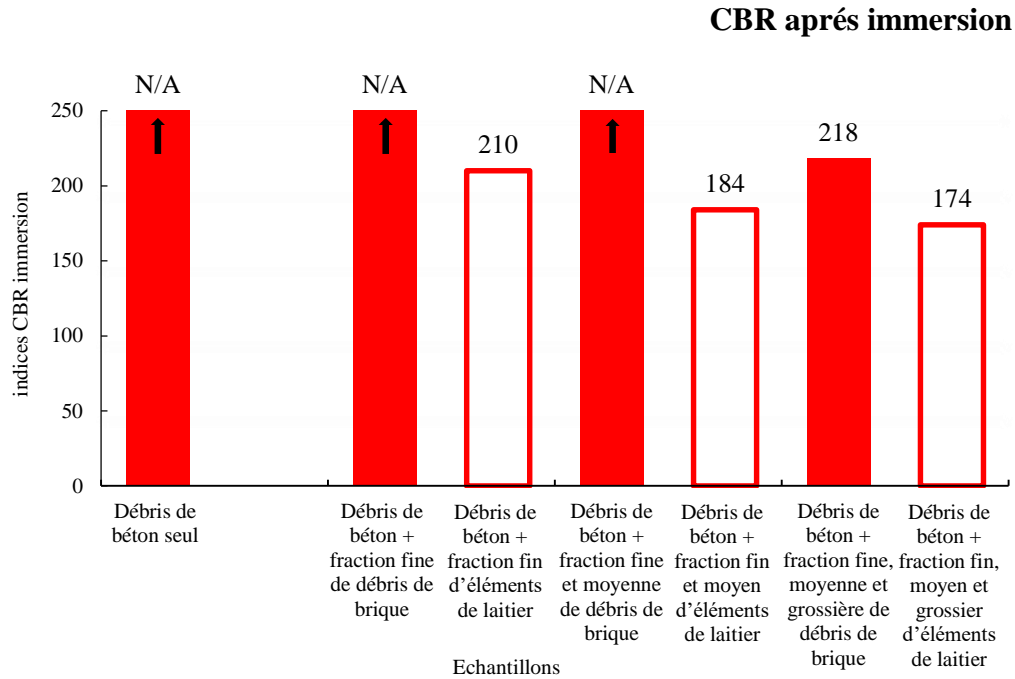


Figure IV.42. Courbes comparatives des indices CBR_{imm} pour les différents échantillons.

Les figures (IV.41 et IV.42) permettent une comparaison des portances des mélanges reconstitués de (débris de béton + débris de briques) et de (débris de béton + éléments de laitier) aux deux états avant et après immersion. Nous pouvons constater que les échantillons contenant des débris de brique (toutes fractions) présentent des indices CBR plus élevés que ceux développés par les échantillons contenant du laitier et ce, avant et après immersion.

Ceci peut être dû à la forme des débris de brique en position plate (horizontale) qui développent une résistance au poinçonnement assez importante et confèrent aux mélanges une structure plus stable au poinçonnement.

En résumé, nous constatons que les portances développées par les différents mélanges avant et après immersion sont très satisfaisantes et prometteuses. Elles répondent largement aux seuils fixés par les normes relatives aux granulats routiers ($CBR \gg 80$). Ceci est plus significatif dans le cas des mélanges comportant les fractions fines et moyennes de débris de briques ou de laitier.

IV.7. Conclusion

Les essais Proctor et CBR, présentés dans ce travail, ont révélé une réponse significative des mélanges face au compactage et aux poinçonnements, y compris dans des conditions extrêmes d'immersion. Les données expérimentales recueillies permettent de confirmer que les matériaux présentés développent des performances mécaniques optimales, en adéquation avec les critères normatifs établis. Ces observations encouragent leur intégration potentielle en tant que matériaux de chaussée, à condition d'approfondir leur évaluation avec d'autres essais spécifiques simulant des contraintes variées (usure, fragmentabilité, dégradabilité, etc.).

Cette validation complémentaire constituera l'axe central des investigations qui feront l'objet dans le prochain chapitre.

CHAPITRE V

AUTRES ESSAIS ROUTIERS

V.1. Introduction

Les essais routiers appliqués aux matériaux de chaussées sont essentiels pour évaluer leurs performances mécaniques et leur comportement face aux agressions extérieures. Ces essais permettent de simuler les conditions réelles d'utilisation afin de mesurer la résistance, la durabilité et la stabilité des matériaux utilisés dans la construction des routes. Ils servent notamment à anticiper le vieillissement, l'usure et les dégradations potentielles sous l'effet du trafic et des conditions climatiques. Grâce à ces évaluations en laboratoire ou en conditions contrôlées, il est possible de distinguer la qualité des matériaux et de choisir les plus adaptés aux exigences techniques d'un projet routier.

V.2. Essai Micro-Deval

V.2.1. Définition et but de l'essai (NF P18-572)

Selon la norme NF P18-572, l'essai Micro-Deval est un essai en laboratoire destiné à mesurer la résistance à l'usure par frottement humide des granulats utilisés dans les chaussées. Il consiste à faire tourner un tambour contenant une certaine masse de granulats, de billes en acier et d'eau pendant un nombre déterminé de révolutions. Ce frottement simule les conditions d'abrasion subies par les matériaux en présence d'eau, comme sur une route en service. Le but est de déterminer la tenue des granulats face à l'usure, afin d'évaluer leur durabilité. Le résultat est exprimé par un coefficient de Micro-Deval, plus il est faible, plus le granulat est résistant. Cet essai permet donc de sélectionner les matériaux les mieux adaptés pour les couches de roulement ou les structures soumises à forte sollicitation.



Figure V.1. Machine Micro-Deval.

V.2.2. Principe de l'essai

L'essai doit être réalisé sur un matériau dont la granularité correspond à l'une des quatre classes granulaires types suivantes : 4-6,3 mm ; 6,3-10 mm ; 10-14 mm ; ou 25-50 mm. Pour la classe 25-50 mm, il est impératif que 60 % des granulats soient compris entre 25 et 40 mm. L'échantillon doit être lavé, puis séché dans une étuve à 105 °C jusqu'à obtention d'un poids constant, pendant au moins 5 heures. Il est important de noter que cet essai n'est pas applicable aux sables : les granulats inférieurs à 4 mm ne s'usent plus par frottement, mais se fragmentent. L'échantillon sec doit être tamisé à l'aide des deux tamis correspondant à la classe granulaire choisie, en débutant par le tamis de plus grande ouverture. La masse de la prise d'essai est de 500 ± 2 g pour les classes 4-14 mm, et de $10 \text{ kg} \pm 20 \text{ g}$ pour la classe 25-50 mm. On ajoute ensuite 2,5 litres d'eau ainsi que la masse appropriée de billes en acier selon les valeurs indiquées ci-dessous :

Tableau V.1. Charge de boulets suivant le type de classe granulaire (NF P18-572).

| Classe granulaires (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 |

M est la masse du matériau soumis à l'essai, M' la masse des éléments supérieurs à 1,6mm produits au cours de l'essai, la résistance à l'usure s'exprime par le coefficient Micro-Deval qui s'écrit :

$$\text{MDE} = \frac{M - M'}{M} \times 100$$



Figure V.2. Mode opératoire de l'essai Micro-Deval.

V.2.3. Matériaux utilisées

Nous avons réalisé des essais Micro-Deval sur la même classe granulaire 6.3-10 mm pour les débris de béton seuls et les débris de brique seuls.

En ce qui concerne le laitier, par manque de temps et de matériaux, les résultats présentés dans ce chapitre sont tirés des travaux de Cherfa et ait Mokhtar (2009) qui ont travaillé sur le même type de laitier que celui utilisé dans cette étude.

V.2.4. Résultats de l'essai

Calcul du coefficient Micro Deval

- Éléments de laitier seuls : $MDE = 16 \%$ (Cherfa et ait Mokhtar, 2009)
- Débris de béton seuls : $MDE = \frac{500-300}{500} \times 100 = 40 \%$
- Débris de brique seuls : $MDE = \frac{500-270}{500} \times 100 = 46 \%$

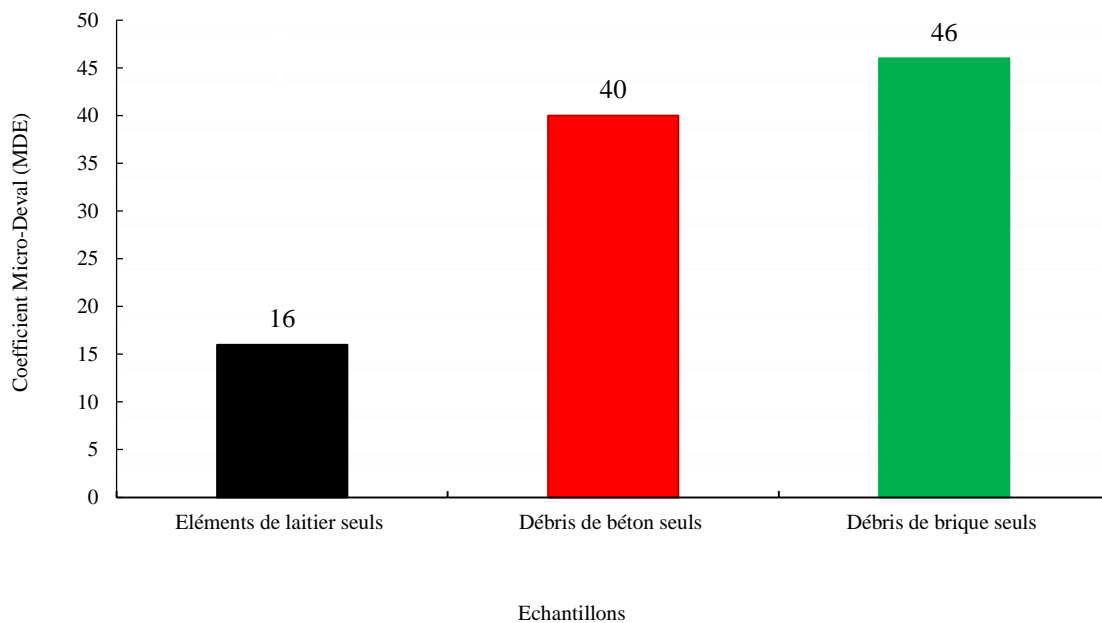


Figure V.3. Résultats des essais micro Deval.

Les résultats obtenus sont récapitulés sur la figure (V.3), montrent que les éléments de laitier seuls présentent la plus faible valeur de MDE (16), ce qui traduit une excellente résistance à l'usure par abrasion. Par contre, les débris de brique seuls présentent la valeur la plus élevée (46), indiquant une faible tenue mécanique. Les débris de béton seuls occupent une position intermédiaire avec un MDE de (40). Ainsi, les éléments de laitier se démarquent nettement comme matériau le plus performant pour des applications nécessitant une bonne durabilité.

V.3. Essai Los Angeles (NF P 18-573)

V.3.1. Définition et but de l'essai

Selon la norme NF P18-573, l'essai Los Angeles est un essai en laboratoire destiné à évaluer la résistance à la fragmentation par choc et abrasion des granulats. Il consiste à placer une quantité déterminée de granulats dans un tambour en acier, avec des billes en acier, puis à faire tourner l'ensemble pendant un nombre défini de révolutions. Sous l'effet des chocs et frottements, les granulats se désagrègent partiellement. À la fin de l'essai, la quantité de fines produites est mesurée pour déterminer un coefficient Los Angeles (L_A). Ce coefficient reflète la tenue mécanique des granulats face aux sollicitations mécaniques ; plus la valeur est faible, plus le matériau est résistant. Cet essai est utilisé pour juger de la qualité des granulats destinés aux couches de chaussées.



Figure V.4. Machine d'essai Los Angeles.

V.3.2. Principe de l'essai

L'essai Los Angeles a pour objectif de mesurer la quantité de particules inférieures à 1,6 mm générées après avoir soumis un matériau à des chocs répétés de boulets normalisés et à des frottements entre granulats, à l'intérieur de la machine Los Angeles. Avant l'essai, l'échantillon doit être soigneusement lavé, puis séché à l'étuve à une température de 105 °C jusqu'à stabilisation du poids, pendant au minimum 5 heures. Le matériau est ensuite soumis à l'essai selon une granularité choisie parmi six classes standards : 4/6,3 mm, 6,3/10 mm, 10/14 mm, 10/25 mm, 16/31,5 mm et 25/50 mm, en fonction de celle qui se rapproche le plus de sa taille réelle à la mise en œuvre. La masse des boulets utilisés varie en fonction de la classe granulaire sélectionnée, conformément aux indications fournies dans le tableau correspondant :

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

| Classes granulaires (mm) | fractions | Nombre de boulets | Poids total de la charge (g) | Poids des fractions (g) |
|--------------------------|-----------|-------------------|------------------------------|-------------------------|
| 4 -6.3 | | 7 | 3080 ± 20 | 5000 ± 2 |
| 6.3 – 10 | | 9 | 3960 ± 25 | 5000 ± 2 |
| 10 – 14 | | 11 | 4840 ± 25 | 5000 ± 2 |
| 10 – 25 | 10 - 16 | 11 | 4840 ± 25 | 3000 |
| | 16 - 25 | 11 | 4840 ± 25 | 2000 |
| 16 – 31.5 | 16 - 25 | 12 | 5280 ± 25 | 2000 |
| | 25 – 31.5 | 12 | 5280 ± 25 | 3000 |
| 25 – 50 | 25 - 40 | 12 | 5280 ± 25 | 3000 |
| | 40 - 50 | 12 | 5280 ± 25 | 2000 |

On procède au lavage de l'échantillon en récupérant le refus au tamis de 1.6 mm. Ce dernier est séché, puis pesé, ce qui nous permettra de calculer le coefficient Los Angeles (L_A) en utilisant la relation suivante :

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

Avec :

M : masse de l'échantillon avant essai.

M' : masse du refus du tamis 1.6mm.



Figure V.5. Mode opératoire de l'essai Los Angeles.

V.3.3. Matériaux utilisés

Les essais Los Angeles sont réalisés sur la même classe granulaire 6.3-10 mm pour les débris de béton seuls et pour les débris de brique seuls.

En ce qui concerne le laitier, par manque de temps et de matériaux, les résultats présentés dans ce chapitre sont tirés des recherches menées par Cherfa et ait Mokhtar (2009) sur le même type de laitier que celui utilisé dans cette étude.

V.3.4. Résultats des essais

Calcul du coefficient Los Angeles

- Eléments de laitier seuls : $L_A = 26 \%$ (Cherfa et ait Mokhtar, 2009)
- Débris de béton seuls : $L_A = \frac{5000-3359}{5000} \times 100 = 32,3 \%$
- Débris de brique seuls : $L_A = \frac{5000-2929,4}{5000} \times 100 = 41,41 \%$

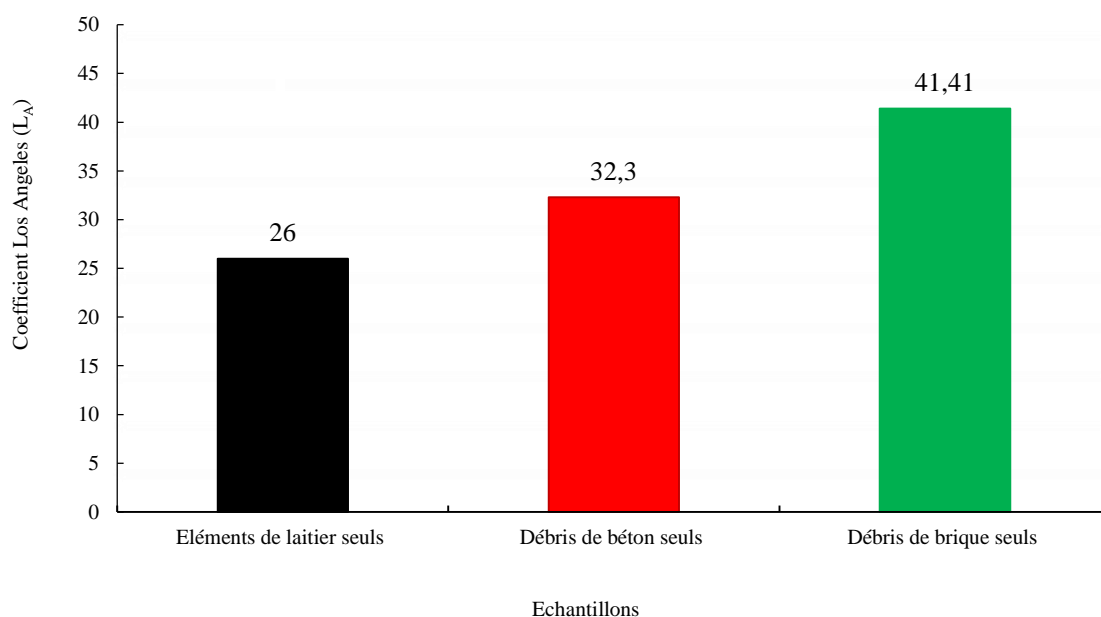


Figure V.6. Résultats des essais Los Angeles.

Les résultats obtenus sont récapitulés sur la figure (V.6), montrent que la différence entre les coefficients L_A déterminés pour les trois matériaux étudiés est relativement importante. En effet, les éléments de laitier seuls se résistent mieux aux chocs. Par contre, les débris de béton et de brique seuls présentent des résistances plus faibles respectivement sous ce type d'essai. Leur utilisation en couche de chaussées peut nécessiter un traitement éventuel en fonction de l'intensité du trafic et de la nature du climat.

Tableau V.3. 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. |

Tableau V.4. Coefficients LA et MDE pour les différents échantillons.

| Echantillon | LA | MDE | LA+MDE | Catégories |
|---------------------------|-------|-----|--------|------------|
| Éléments de laitier seuls | 26 | 16 | 42 | C |
| Débris de béton seuls | 32,3 | 40 | 72,3 | E |
| Débris de brique seuls | 41,41 | 46 | 87,41 | F |

En se référant au tableau des catégories des granulats selon la résistance aux chocs et à l'usure tableau (V.4), nous pouvons constater que les matériaux étudiés, à savoir, les débris de briques, les débris de béton et les éléments de laitier peuvent être insérés dans les catégories C, E et F respectivement.

En effet, les débris de briques présentent des performances relativement faibles (catégorie F). C'est des matériaux utilisables pour couches de chaussées avec un traitement éventuel en fonction de l'intensité du trafic.

Les débris de béton présentent un comportement relativement meilleur que les débris de brique (catégorie E). Il fait partie des matériaux utilisables pour couches de chaussées, avec ou sans traitement, à définir selon le trafic.

Les éléments de laitier présentent cependant un comportement nettement meilleur (catégorie C). Ce type de matériau peut être utilisable pour couches de fondations, et couche de base sous tout trafic.

V.4. Essai de dégradabilité des matériaux rocheux (NF P 94-067)

V.4.1. Principe de l'essai

Il nous permet d'étudier la sensibilité du matériau rocheux aux sollicitations hydriques (risque d'évolution à long terme). Il nous facilite d'évaluer la résistance d'un matériau rocheux à l'altération par l'eau, c'est à dire sa tendance à se décomposer ou se désagréger sous l'effet de cycles d'humidification et de dessiccation (séchage).

V.4.2. Exécution de l'essai

L'essai consiste à déterminer la réduction du D_{10} d'un échantillon de granularité 10/20 mm donnée, soumis à quatre cycles d'imbibition-séchage conventionnels selon la norme NF P 94-067.

Cette réduction s'exprime par le rapport :

$$DG = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant essai}}{D_{10} \text{ du matériau apres essai}}$$

Avec :

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

La prise d'essai doit être de 2 kg, la préparation de la fraction 10/20mm s'effectue avec les deux tamis 10 et 20mm, puis on refait l'analyse granulométrique avec la série de tamis 10, 12.5, 16 et 20 mm. A la fin des cycles imbibition-séchage nous procédons au tamisage de l'échantillon au travers la colonne de tamis suivante : 10, 5, 2, 1, 0.5, 0.08 mm.



Figure V.7. Mode opératoire de l'essai de dégradabilité.

V.4.3. 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.4.4. Résultats obtenus

1. Débris de béton seuls

Les résultats obtenus sur les débris de béton à l'issue de l'essai de dégradabilité sont présentés sur la figure suivante :

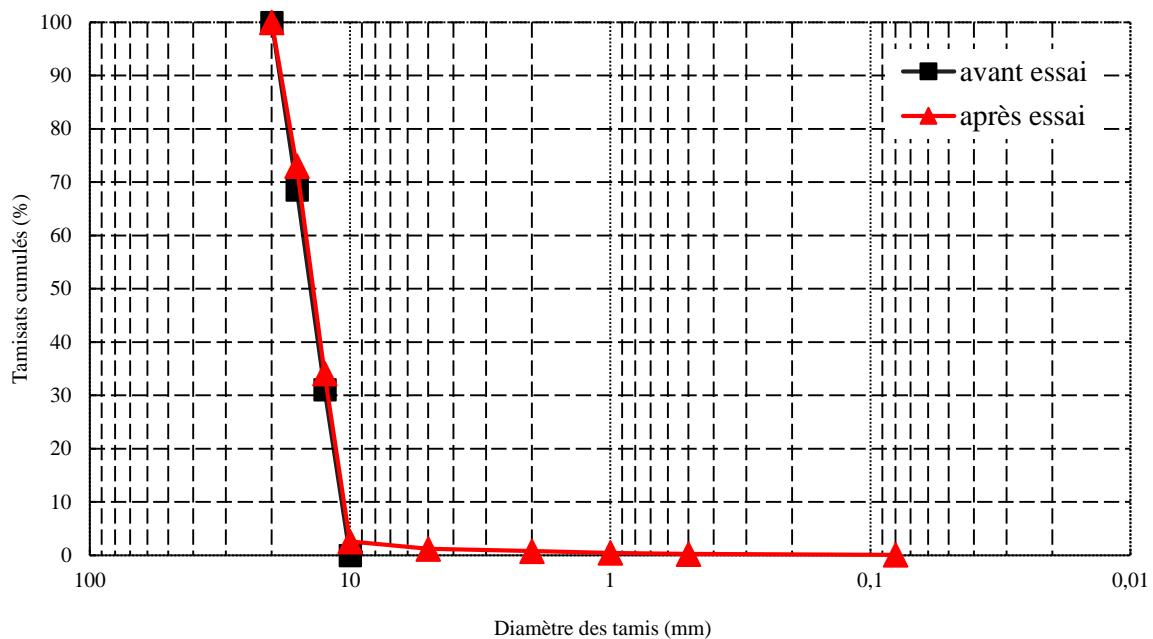


Figure V. 8. Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité (béton seul)

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

$$DG = \frac{D_{10 \text{ avant essai}}}{D_{10 \text{ après essai}}} = \frac{11,6}{11,5} = 1,008$$

Tableau V.5. Classification des matériaux rocheux (NF P 94-067).

| 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.5), nous constatons que les débris de béton étudiés font partie des matériaux rocheux peu dégradables (DG = 1,008 < 5).

2. Débris de brique seuls

Les résultats obtenus sur les débris de béton à l'issue de l'essai de dégradabilité sont présentés sur la figure suivantes :

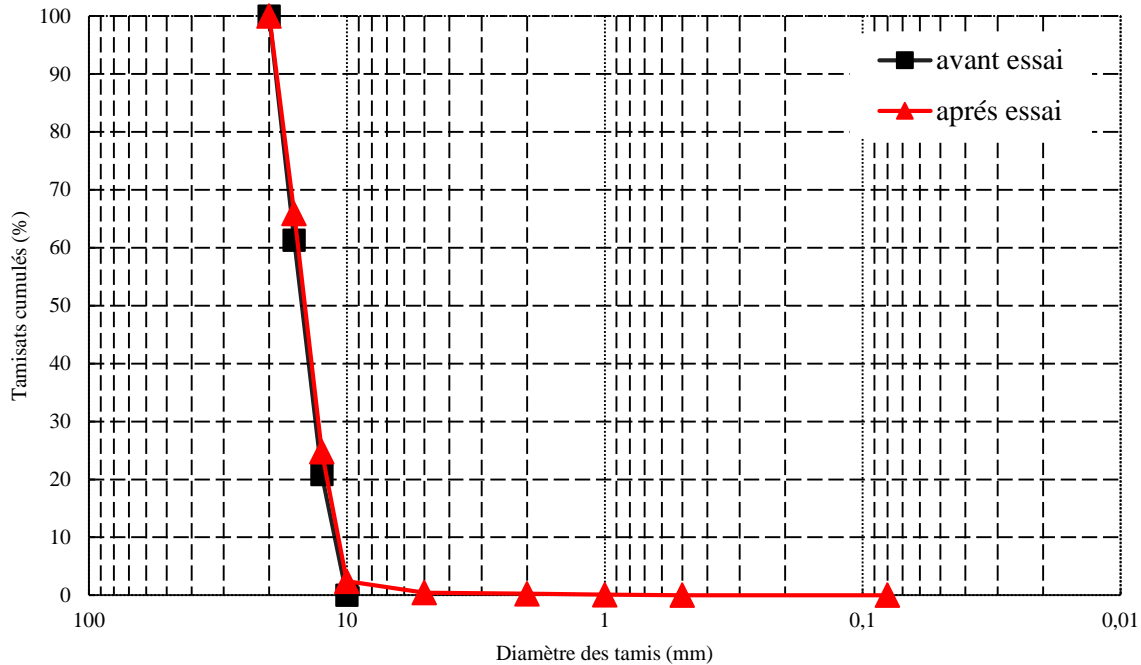


Figure V.9. Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité (brique seul)

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

$$DG = \frac{D_{10 \text{ avant essai}}}{D_{10 \text{ après essai}}} = \frac{11,5}{11,5} = 1$$

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

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 fragmentabilité des matériaux rocheux (NF P 94-066)

V.5.1. 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.5.2. Exécution de l'essai

L'essai consiste à déterminer la réduction du D10 d'un échantillon de granularité 10/20mm donnée soumis à un pilonnage conventionnel selon la norme NF P 94-066.

Cette réduction s'exprime par le rapport :

$$FR = \frac{D10 \text{ du matériau avant essai}}{D10 \text{ du matériau après essai}}$$

La prise d'essai doit être de 2 kg, la préparation de la fraction 10/20 mm s'effectue avec les deux tamis 10 et 20mm puis on refait l'analyse granulométrique avec la série de tamis 10, 12.5, 16 et 20 mm.

A la fin du pilonnage nous procédons au tamisage à sec de l'échantillon au travers de la colonne de tamis suivante : 0.08, 0.5, 1, 2, 5 et 10 mm.

Pour le pilonnage on introduit le matériau dans un moule CBR.

Le pilonnage s'effectue en appliquant à la surface du matériau 100 coups de dame Proctor normal distribués conformément au mode de compactage décrit pour le compactage d'une couche dans un essai Proctor (voir NF P 94-093).



Figure V.10. Pesée et mise du matériau dans le moule CBR.

V.5.3. 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.

V.5.4. Résultats des essais

1. Débris de béton seuls

Les résultats obtenus sur les débris de béton à l'issue de l'essai de fragmentabilité sont présentés sur la figure suivante :

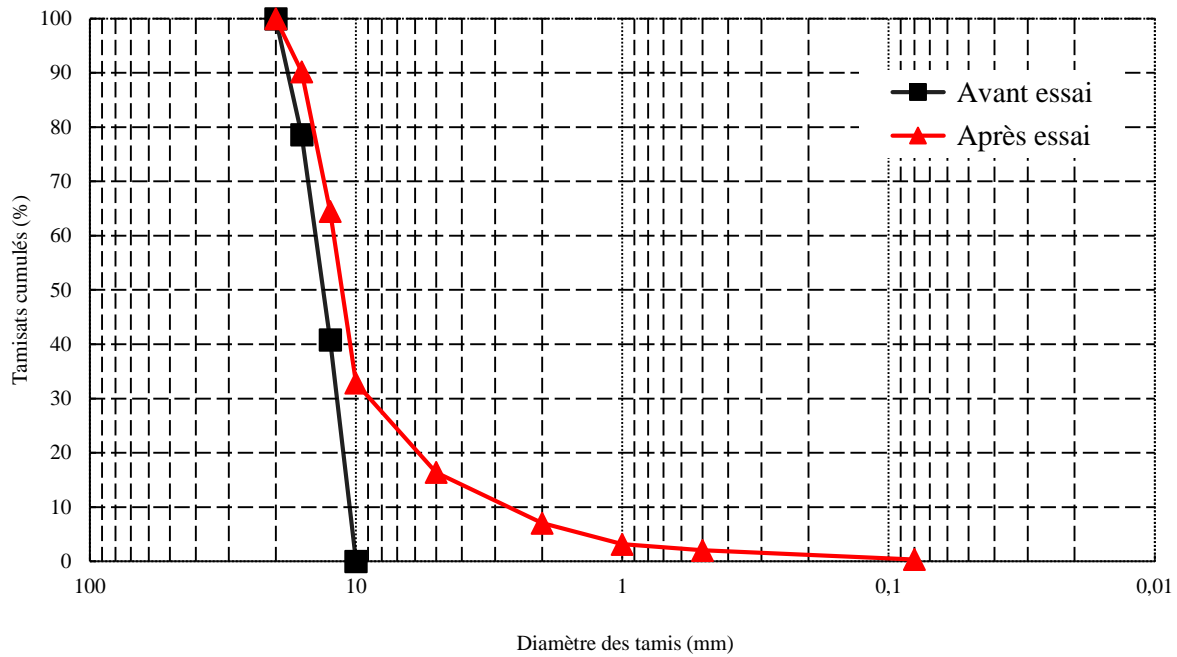


Figure V.11. Courbes granulométriques avant et après essais (béton seul)

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

$$FR = \frac{D_{10} \text{ avant pilonnage}}{D_{10} \text{ après pilonnage}} = \frac{11}{2,7} = 4,07$$

Tableau V.6. Classification des matériaux rocheux selon le coefficient FR (NF P 94-066).

| Coefficient de fragmentabilité (FR) | Nature du matériau |
|-------------------------------------|------------------------|
| FR < 7 | Roche peu fragmentable |
| FR > 7 | Roche fragmentable |

En se référant au tableau (V.6), nous déduisons que les débris de béton étudiés peuvent être insérés dans la catégorie des roches peu fragmentables (FR = 4,07 < 7).

2. Débris de brique seuls

Les résultats obtenus sur les débris de béton à l'issue de l'essai de fragmentabilité sont présentés sur la figure suivante :

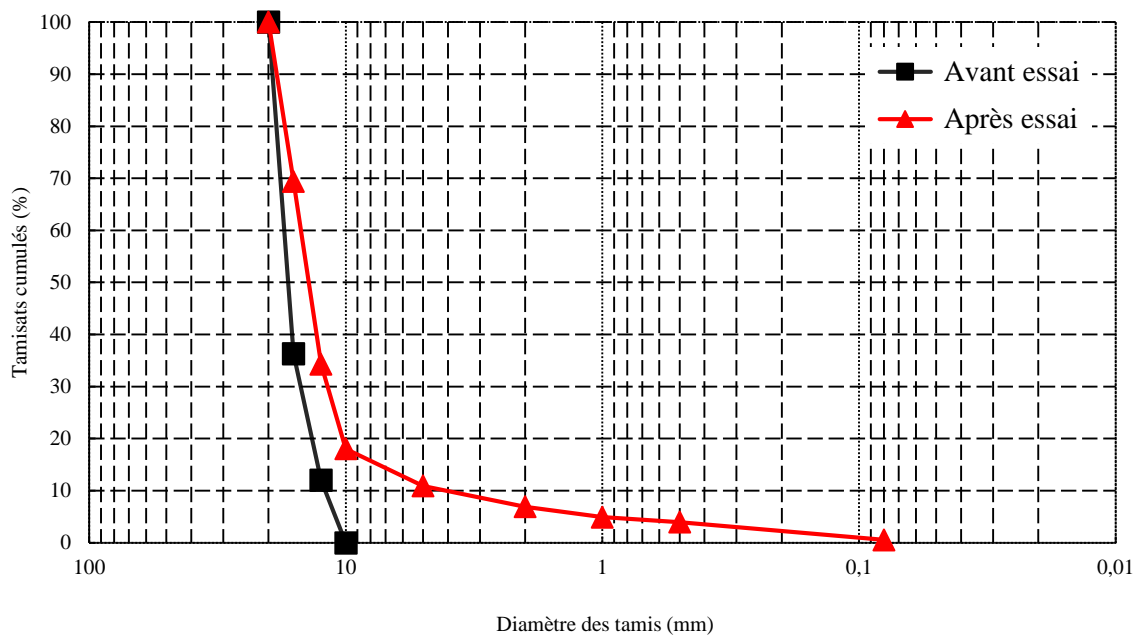


Figure V.12. Courbes granulométriques avant et après essais (brique seul)

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

$$FR = \frac{D10 \text{ avant pilonnage}}{D10 \text{ après pilonnage}} = \frac{13}{4,5} = 2,88$$

En se référant au tableau (V.6), nous déduisons que les débris de brique étudiés peuvent être insérés dans la catégorie des roches peu fragmentables ($FR = 2,88 < 7$).

En résumé, 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 pour les débris de brique, donc leurs utilisations en couches de chaussées, particulièrement en couches inférieures (couches de forme, couches de fondations et éventuellement en couches de base) peut être recommandée.

V.6. Conclusion

Dans ce chapitre, une série d'essais routiers (Los Angeles, Micro-Deval, essais de fragmentabilité et de dégradabilité) a été réalisée en laboratoire. Ils ont permis d'évaluer la résistance des matériaux étudiés lorsqu'ils sont soumis à des sollicitations similaires à celles rencontrées en conditions routières. Les résultats obtenus sont à la fois pertinents et prometteurs. Ils offrent une meilleure compréhension du comportement et de l'évolution de ces matériaux dans le temps. Ces informations peuvent contribuer à prévenir et à éviter, à court et à long terme, certains désordres qui peuvent nuire à la durabilité et à la qualité des projets routiers à entreprendre avec les matériaux présentés.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La valorisation des matériaux issus de la démolition, tels que les débris de béton et de brique, ainsi que des sous-produits industriels comme le laitier, constitue aujourd'hui une voie innovante et stratégique pour répondre aux enjeux environnementaux, économiques et techniques auxquels fait face le secteur de la construction routière.

Cette étude a mis en évidence le potentiel de ces matériaux alternatifs lorsqu'ils sont judicieusement combinés et traités, notamment en vue de leur utilisation dans les couches de des chaussées. Les différentes analyses physiques, mécaniques et géotechniques réalisées ont montré que ces matériaux présentent des propriétés satisfaisantes, conformes aux normes techniques en vigueur, voire compétitives à celles des matériaux naturels classiques.

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

- L'ensemble des échantillons ont présenté des densités sèches intéressantes et amplement satisfaisantes au regard des exigences normatives applicables aux matériaux destinés à la construction routière. Particulièrement, les mélanges contenant du laitier ont présenté des densités sèches plus intéressantes que celles des débris de béton seuls.

Les teneurs en eau optimales sont par contre, légèrement supérieures relativement aux teneurs en eau nécessaires au compactage des matériaux naturels.

- Les matériaux étudiés ont présenté également des performances mécaniques très intéressantes au poinçonnement avant et après immersion dépassant largement les seuils exigés par les normes relatives aux matériaux routiers. Toutefois, les variations significatives de portance entre l'état sec et l'état saturé doivent être prises en compte pour anticiper les risques potentiels d'instabilité liés aux cycles hydriques et aux contraintes climatiques.

Il est à signaler, que les résistances développées après immersion sont plus importantes que celles développées avant immersion, ce qui n'est pas le cas pour la plupart des matériaux naturels dont la résistance diminue sensiblement en présence d'eau. Ce comportement est généralement lié au phénomène de cimentation de la fraction fine des matériaux étudiés en présence d'eau, ce qui leur confère une meilleure portance à l'état humide.

- En se basant sur les résultats des essais LA et MDE, les débris de béton, les débris de brique et les débris de laitier peuvent être insérés dans les catégories C, E et F respectivement. En outre, les essais de fragmentabilité et de dégradabilité révèlent que les matériaux étudiés sont peu fragmentables et peu dégradables.

Les mélanges reconstitués (béton + brique ; béton + laitier) révèlent un comportement très favorables sous les différents essais réalisés, notamment, pour des teneurs modérées en débris de brique et en éléments de laitier. Ces caractéristiques justifient leur recommandation en tant que matériaux de construction des corps de chaussées tout en tenant compte de la nature et de l'intensité du trafic.

Cependant, leur utilisation à grande échelle nécessite encore un certain nombre de validations supplémentaires, notamment en ce qui concerne leur comportement à long terme sous les effets des charges cycliques du trafic routier, de l'humidité, du gel et des autres contraintes climatiques.

La valorisation de ces matériaux contribue non seulement à la réduction significative des volumes de déchets inertes mis en décharge, mais également à la préservation des ressources naturelles non renouvelables, ainsi qu'à la promotion d'une économie circulaire plus résiliente et durable, notamment, dans les régions où les matériaux nobles deviennent de plus en plus rares et coûteux.

Il est donc recommandé de poursuivre les recherches en laboratoire et sur chantier afin de mieux comprendre l'évolution des performances de ces matériaux recyclés dans le temps, d'établir des modèles prédictifs fiables et de renforcer leur acceptabilité auprès des pouvoirs publics et professionnels du secteur. De plus, la mise en place de cadres normatifs spécifiques et la sensibilisation des différents acteurs (maîtres d'ouvrage, entreprises de travaux publics, bureaux d'études, ...) seront des leviers déterminants pour favoriser une adoption plus large et structurée de ces matériaux innovants dans les futurs projets routiers.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agence de protection de l'environnement des États-Unis (EPA), (2016). Gestion durable des matériaux de construction et de démolition. Washington, DC : EPA.
- Ajayi, S. O., Oyedele, L. O., Bilal, M., Akinade, O. O., Alaka, H. A., Owolabi, H. A. & Kadiri, K. O. (2015). Waste effectiveness of the construction industry : Understanding the impediments and requisites for improvements. *Resources, Conservation and Recycling*, 102, 101-112.
- Alexandre, R. (2024). « Le traitement des déchets ». Les Joyeux Recycleurs.
- Alias. T. N., (2022). La durée de vie de nos déchets dans la nature. Esprit-Recycle. Toulouse. [En ligne]. Disponible sur : <https://esprit-recycle.fr/blog/la-duree-de-vie-de-nos-dechets-n27> [Consulté le : 15 avril 2025].
- American Concrete Institute (ACI), (2017). ACI 233R-17 : Slag Cement in Concrete and Mortar. Disponible sur : <https://www.concrete.org/> [Consulté le : 15 avril 2025].
- Argile confort, « la brique pleine », 2025. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.argileconfort.com/briqueterie/briques-et-briquettes/340-brique-pleine.html> [Consulté le 29 avril 2025].
- Baaj, H. (2012). "Modes de dégradation et d'usures des revêtements routiers". Dégradation et usure des revêtements routiers souples. *Technique de l'ingénieur* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/materiaux-et-tribologie-42467210/degredation-et-usure-des-revetements-routiers-souples-tri4620/modes-de-degradation-et-d-usures-des-revetements-routiers-tri4620niv10003.html> [consulté le 3 avril 2025].
- Bedjou, S (2003). Etude du recyclage de débris de briques. Thèse de Magister, ENP, Algérie.
- Blengini, G. A., & Garbarino, E. (2010). Resources and waste management in Turin (Italy): the role of recycled aggregates in the sustainable supply mix. *Journal of Cleaner Production*, 18(10-11), 1021-1030.
- Brunot, A et Coquand, R. (1982), Le corps des ponts et chaussées. Éditions du centre national de la recherche scientifique, France.
- Budhu, M. (2010). Soil mechanics and foundations. 3rd edition. John Wiley and Sons.

- Carillo, P & Cabanes, H & Barillot, J. (2024). La route et ses chaussées : Manuel de travaux publics. Éditions Eyrolles.
- Cherfa, H et Ait Mokhtar, K. « Valorisation des déchets industriels pour la stabilisation des couches de chaussées : cas des laitiers des hauts fourneaux » Séminaire International « Innovation et Valorisation dans le Génie Civil ». Les 5 – 7 février 2009 à Hammamet, Tunisie. Communication pages 79 -89.
- Clegg, M, 2014. « Faïençage dans l’île du Cap-Breton ». Alamy. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.alamyimages.fr/photo-image-libre-de-la-fissuration-d-un-chemin-dans-l-ile-du-cap-breton-104260717.html?imageid=C26C85A4-0744-451A-8067-92FDEACDAACA&p=196315&pn=1&searchId=967d9c1e9366c2bdc3429011d1747373&searchtype=0> [consulté le 2 avril 2025]
- Coelho, A. & De Brito, J. 2013. Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal–part I : location, materials, technology and economic analysis. Journal of Cleaner Production, 39, 338-352.
- Commission européenne, 2018. Gestion des déchets de construction et de démolition dans l’UE (titre original : Management of Construction and Demolition Waste in the EU). Publications Office of the EU.
- Convention de Bâle, (2023). Lignes directrices techniques pour la gestion écologiquement rationnelle des déchets d’amiante. Disponible sur : [Convention de Bâle] (<https://www.basel.int>).
- Dal Pos, F, 2020. « Les pathologies de la voirie ». TP demain. [En ligne]. Disponible sur : <https://tpdemain.com/module/les-pathologies-de-voirie/> [consulté le 2 avril 2025]
- Das, B. M. (2016). Principles of foundation engineering, Cengage learning, 2016 : Principles of Foundation Engineering (Vol. 1). Bukupedia.
- Data bridge. (2022). « Marché mondial des granulats de construction – tendances et prévisions du secteur jusqu’en 2029 ». [En ligne]. Disponible sur : <https://www.databridgemarketresearch.com/fr/reports/global-construction-aggregates-market?srsId=AfmBOor214L2TOFUqAh2DtaGQNSIX85j pz4d1QmcRWNUE04VilESp z1B> [consulté le 10 avril 2025]

- EPA (Agence de protection de l'environnement des États-Unis), 2020. Gestion durable des matériaux de construction et de démolition (titre original : Sustainable Management of Construction and Demolition Materials). EPA.gov.
- Eska (Le Recycle de la vie). (2020). « L'importance du recyclage et comment le faire correctement ». [En ligne]. Disponible sur : <https://eaueska.ca/limportance-du-recyclage-et-comment-le-faire-correctement/#:~:text=R%C3%A9duction%20de%20la%20quantit%C3%A9%20de,eau%20et%20de%20l'air>. [Consulté le : 28 avril 2025].
- European Slag Association (EUROSLAG). (2018). Properties and Uses of Iron and Steel Slags. Disponible sur : <https://www.euroslag.com/products/publications/> [Consulté le : 15 avril 2025].
- Fang, H. Y., & Daniels, J. L. (2006). Introductory Geotechnical Engineering : An Environmental Perspective. CRC Press.
- FAO, (2021). Gestion des déchets agricoles : enjeux et solutions. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.fao.org> [Consulté le : 15 avril 2025].
- Faure, M. (1997). Cours de routes –Tome 1. Aléas, France.
- Futura sciences, 2009. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.futura-sciences.com/maison/dossiers/isolation-maison-energie-positive-874/page/5/>. [Consulté le 29 avril 2025].
- Hadj Sadok, A., Kenai, S., Hassane, M., & Touil, D. (2016). Résistance et durabilité des bétons au laitier de haut fourneau pour les ouvrages hydrauliques. Strength and durability of blast furnace slag concrete for hydraulic structures. *Le Journal de l'Eau et de l'Environnement*, 16(28), 29-37.
- 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 20 mai 2025].
- Head, K.H., 1992. Manual of Soil Laboratory Testing. Volume 1 : Soil Classification and Compaction Tests. 2nd edition. London : Pentech Press.
- Horonjeff, R., & Jones, J. H. (1953). The Design of Flexible and Rigid Pavements (No. 319). University of California Press.

- Hubency, 2023. « Déchets de chantier ». Comment recycler le béton ? [En ligne]. Disponible sur : <https://www.hubency.com/dechets-valorises/dechets-inertes/beton/> [Consulté le : 24 avril 2025].
- Jourdain, A. (1966). La technologie des produits céramiques réfractaires. Gauthier-Villars, Paris.
- Kornmann, M. (2007). Clay bricks and rooftiles, manufacturing and properties. Paris : Lasim.
- Lambe, T., & Whitman, R. (1969). Soil Mechanics New York : Wiley.
- LCPC, (1994). Conception et dimensionnement des structures de chaussée, Guide technique, Paris.
- LCPC. (1992). Guide technique sur le compactage des sols. Paris : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Lemoigne, R, (2014). L'Économie circulaire, Dunod, Fonction de l'entreprise, Paris, Dunod, p.10.
- Matériaux archi, 2024. [En ligne]. Disponible sur : https://www.materiaux.archi/produits/la-rochere/briques-et-paves-de-verre-pave-de-verre-ondes-parralleles_10753 [Consulté le 29 avril 2025].
- Ministère de la Transition écologique. (2021). Rapport sur les déchets du BTP. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.ecologie.gouv.fr> [Consulté le : 15 avril 2025].
- NF EN 13-285 (2010). Norme française, Graves non traitées, Spécifications.
- 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 – 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 – 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.
- NF P 94-053 (1991). Norme Française, Sols, reconnaissance et essais. Détermination de la masse volumique des sols fins au laboratoire. Méthode de la trousse coupante, du moule et de l'immersion dans l'eau.
- NF P 94-066 (1992). Norme française, Sols, reconnaissance et essais. Coefficient de fragmentabilité des matériaux rocheux.
- NF P 94-067 (1992). Norme française, Sols, reconnaissance et essais. Coefficient de dégradabilité des matériaux rocheux.
- Nguyen T, (2008). « Valorisation des sédiments de dragage traités par le procédé NOVOSOL® dans des matériaux d'assises de chaussée – Comportement mécanique et environnemental », Thèse Doctorat. Délivrer par Université Paul Sabatier. L'université de Toulouse. PP 67-68.
- Ordener, L, "La structure de la chaussée routière", concrete dispatch, 2023. [En ligne]. <https://www.concretedispatch.eu/blog/structure-chaussee-routiere/> [consulté le 21 mars 2025].
- Organisation de coopération et de développement économique. (2022). Perspectives mondiales des plastiques 2022. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.oecd.org> [Consulté le : 15 avril 2025].
- Organisations des Nations Unies (ONU). Global E-Waste Monitor. (2020). [En ligne]. Disponible sur : <https://globalewaste.org/news/surge-global-waste/> [Consulté le : 15 avril 2025].
- Oualit, M., Irekti, A. et Sarri, A., 2022. Influence des conditions de durcissement et le taux d'alcalins sur les performances mécaniques des matériaux alcali-activés à base du laitier de haut fourneau. *Matériaux & Techniques*, 110(2), Article 202.
- Pimienta, P et Remond, S. (1997). "Bétons de déchets : prévenir les risques", CSTB

- Raujolles, " Plaquette de parement rouge ", Terre cuite de Raujolles, 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.terres-cuites-raujolles.fr/fr/20-parement-deco> [Consulté le 29 avril 2025].
- République Française. (2024). Code de l'environnement – Article L541-1-1. Légifrance. Disponible sur : https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000042176087 [Consulté le 9 avr. 2025]
- Rouabah, K., & Guetteche, M. (2008). Utilisation des laitiers de hauts fourneaux dans la construction des routes. Sciences & Technologie. B, Sciences de l'ingénieur, 17-24.
- Sienicki, T. (2011). « Orniérage d'une route ». [En ligne]. Disponible sur : https://commons.m.wikimedia.org/wiki/File:Koleiny_078_ubt.JPG#mw-jump-to-license [consulté le 2 avril 2025]
- Simonnot, T. Bouyahbar, F. (2021). "Les processus de dégradation des chaussées". La pathologie des chaussées – Processus de dégradation, causes et diagnostic. Technique de l'ingénieur [en ligne]. Disponible sur : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/pathologie-generale-pathologie-du-beton-42240210/la-pathologie-des-chaussees-c7300/les-processus-de-degradation-des-chaussees-c7300niv10003.html> [consulté le 2 avril 2025]
- Techno-Science.net, " laitier métallurgie ", 2025. [En ligne]. Disponible sur : https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Laitier-metallurgie.html#ref_3 [Consulté le 2 Mai 2025].
- TP demain. (2020). "les différents matériaux" [en ligne]. Disponible sur : <https://tpdemain.com/module/les-differents-materiaux/> [consulté le 2 avril 2025]
- Tremblay, M, 2007, « Nid de poule ». [En ligne]. Disponible sur : <https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Nid-de-poule> [consulté le 2 avril 2025]
- U.S. Geological Survey (USGS), (2022). Iron and Steel Slag Statistics and Information. Disponible sur : <https://www.usgs.gov/centers/nmic/iron-and-steel-slag-statistics-and-information> [Consulté le : 15 Mai 2025].
- Unicat, « Brique réfractaire haute densité, 60% AI2O3, 212x105x55mm », 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://unicat.msf.org/fr/cat/product/71594?page=3&category=20506> [Consulté le 29 avril 2025].

- Union européenne. (2008). Directive 2008/98/CE relative aux déchets. [En ligne]. Disponible sur : <https://eur-lex.europa.eu> [Consulté le : 15 avril 2025].
- Varlet, (1966). Barrages en terre et en enrochements, Volume 3. Usines Hydrauliques. Edition, Eyrolles.
- Wang, Y., Zhang, L. and Li, H. (2020). « Utilization of Pelletized Blast Furnace Slag in Cementitious Materials. *Journal of Cleaner Production* », 256, 120123. Disponible sur ; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120123> [Consulté le : 15 Mai 2025].
- Xiao, J., Li, W. et Sun, Z. (2018). « Recycled aggregate concrete : Mechanical properties and durability ». [Béton granulat recyclé : Propriétés mécaniques et durabilité], *Journal of Cleaner Production*, 172, p. 2726–2739. DOI : 10.1016/j.jclepro.2017.11.171.
- Zemouli, S., & Chelghoum, N. (2018). Utilisation du laitier granulé broyé des hauts fourneaux dans la stabilisation des sols. *Synthèse : Revue des Sciences et de la Technologie*, 36, 103-114.
- Zhang, C., Li, X., Wang, Y. et Liu, J., 2020. « Recyclage des déchets de brique pour une construction durable : une revue ». (Titre original : Recycling brick waste for sustainable construction : A review). *Construction and Building Materials*, 258, 119549.
- Zhang, Q., Liu, X. and Chen, M. (2021). « Crystallization Behavior and Applications of Modified Blast Furnace Slag. *Materials Today Communications* », 26, 101894.

ANNEXES

Tableau .1. 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 | 09,90 | 1,86 |
| Echantillon N°2 | 10,87 | 1,91 |
| Echantillon N°3 | 11,57 | 1,92 |
| Echantillon N°4 | 12,02 | 1,88 |

Tableau .2. Résultats de l'essai Proctor modifié pour les débris de béton + brique fine.

| Essais | Teneur en eau w (%) | Densité sèche (γ_d/γ_w) |
|-----------------|---------------------|---------------------------------------|
| Echantillon N°1 | 11,62 | 1,83 |
| Echantillon N°2 | 12,16 | 1,87 |
| Echantillon N°3 | 12,83 | 1,9 |
| Echantillon N°4 | 13,49 | 1,89 |
| Echantillon N°5 | 14,5 | 1,84 |

Tableau .3. Résultats de l'essai Proctor modifié pour les débris de béton + brique fine et moyenne.

| Essais | Teneur en eau w (%) | Densité sèche (γ_d/γ_w) |
|-----------------|---------------------|---------------------------------------|
| Echantillon N°1 | 08,62 | 1,8 |
| Echantillon N°2 | 10,19 | 1,84 |
| Echantillon N°3 | 12,33 | 1,91 |
| Echantillon N°4 | 13,70 | 1,88 |
| Echantillon N°5 | 14,41 | 1,82 |

Tableau .4. Résultats de l'essai Proctor modifié pour les débris de béton + brique fine, moyenne et grossière.

| Essais | Teneur en eau w (%) | Densité sèche (γ_d/γ_w) |
|-----------------|---------------------|---------------------------------------|
| Echantillon N°1 | 07,92 | 1,79 |
| Echantillon N°2 | 10,43 | 1,85 |
| Echantillon N°3 | 11,91 | 1,88 |
| Echantillon N°4 | 13,98 | 1,86 |
| Echantillon N°5 | 15,6 | 1,81 |

Tableau .5. Résultats de l'essai Proctor modifié pour les débris de béton + laitier fin.

| Essais | Teneur en eau w (%) | Densité sèche (γ_d/γ_w) |
|------------------------|----------------------------|---|
| Echantillon N°1 | 9,04 | 1,91 |
| Echantillon N°2 | 10,69 | 1,96 |
| Echantillon N°3 | 11,77 | 1,98 |
| Echantillon N°4 | 13,87 | 1,96 |
| Echantillon N°5 | 15,5 | 1,93 |

Tableau .6. Résultats de l'essai Proctor modifié pour les débris de béton + laitier fin et moyen

| Essais | Teneur en eau w (%) | Densité sèche (γ_d/γ_w) |
|------------------------|----------------------------|---|
| Echantillon N°1 | 8,41 | 2 |
| Echantillon N°2 | 9,86 | 2,05 |
| Echantillon N°3 | 11,96 | 2,08 |
| Echantillon N°4 | 13,3 | 2 |

Tableau .7. Résultats de l'essai Proctor modifié pour les débris de béton + laitier fin et moyen et grossier.

| Essais | Teneur en eau w (%) | Densité sèche (γ_d/γ_w) |
|------------------------|----------------------------|---|
| Echantillon N°1 | 8,42 | 1,99 |
| Echantillon N°2 | 9,7 | 2,04 |
| Echantillon N°3 | 11,4 | 2,1 |
| Echantillon N°4 | 12,24 | 2,04 |
| Echantillon N°5 | 12,7 | 2 |