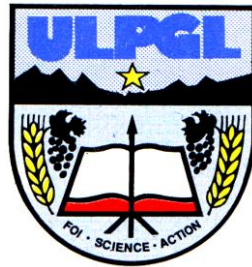


UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS

FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



BP. 368 GOMA

www.ulpgl.net

**CARACTERISATION DES MATERIAUX
RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA
VALORISATION DANS LA
CONSTRUCTION ROUTIERE : Cas des
déchets du béton**

Par **IRAGI MUSHAMALIRWA Gédéon**

Travail présenté et défendu en vue de l'obtention du

Diplôme de Licence en Sciences de l'Ingénieur

Directeur : **C.T MASIKA MUHIWA Grace**

ANNEE ACADEMIQUE 2023 - 2024

Epigraphe

« La gestion durable des ressources passe par la capacité à transformer les déchets en matériaux à haute valeur ajoutée. »

Bertrand Barré

Dédicace

A ma très grande famille.

IRAGI MUSHAMALIRWA Gédéon

Remerciements

Avant toute chose, nous rendons grâce à Dieu, source de toute sagesse et de toute force, qui nous a accordé la santé, la persévérance et la clarté d'esprit nécessaires pour mener à bien ce travail.

Le présent travail n'est pas le fruit de nos seuls efforts, mais plutôt de ceux de plusieurs. Ce serait de l'ingratitude de notre part de ne pas reconnaître leurs interventions.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à tout le personnel académique de l'Université Libre des Pays de Grands Lacs en général et la faculté des sciences et technologies en particulier, au C.T MASIKA MUHIWA Grace, notre directeur pour son encadrement dans la réalisation de ce travail et pour les remarques constructives.

Nous remercions également nos parents Jean-Paul Basedeke MUSHAMALIRWA et Esther Mushaka NTAKWINJA, notre tante Francine Nyalukala NAMWANA, notre oncle Mputu ALAIN ainsi notre cousin Esasi PRUDENT pour leur accompagnement et de n'avoir ménagé aucun effort afin de s'assurer de notre formation.

Enfin, nous adressons nos vifs remerciements à tous les membres de notre famille, à nos proches, ainsi qu'à toutes personnes qui ont contribué, de près ou de loin à notre formation. Nous exprimons particulièrement notre gratitude à Koliama ASSUMANI, Baraka SAGE, Jael KAHUKULA, Ephraïm BUHENDWA, Sunda MANGALIAS et Pascal MWANGAZA pour leurs encouragements constants et leur soutien moral indéfectible.

Nous ne pouvons terminer ce propos sans remercier tous nos amis et condisciples de promotion, dont l'entraide, les échanges et le soutien ont enrichi cette expérience académique.

IRAGI MUSHAMALIRWA Gédéon

Résumé

Dans un contexte de risque de diminution des ressources naturelles et d'enjeux environnementaux croissants, cette recherche vise à caractériser les granulats issus du béton déconstruit pour leur utilisation en construction routière. La problématique s'articule autour du manque de données fiables sur les propriétés physiques et mécaniques de ces matériaux recyclés, entravant leur adoption à grande échelle. Notre objectif principal est d'évaluer la conformité de ces granulats aux normes techniques requises pour des applications routières, afin de pallier au problème de gestion des débris. Pour ce faire, nous avons appliqué une méthodologie rigoureuse incluant des essais granulométriques, de la masse volumique, de résistance à la fragmentation (Los Angeles), de compactage (Proctor), de portance CBR et de gonflement (CBR) sur des prélèvements locaux, en suivant les normes européennes. Les résultats sont prometteurs, notamment une masse volumique absolue comprise entre 2.5 à 2.62 Mg/m³, un Los Angeles compris entre 31 et 37. Les teneurs en eau optimal de 14.6 %, 15.7 %, 16.6 % et comme densités sèches respectivement 1.972 Mg/m³, 1.898 Mg/m³ et 1.859 Mg/m³. Les indices CBR élevés à 49.1 %, 53.5 % et 51,3 % à 95 % OPM, soit un CBR moyen de 51.3%. Un gonflement de 0% au CBR après immersion, et une classification des indésirables inférieure à 1%. Ces résultats démontrent une conformité aux différentes spécifications des matériaux et aux exigences les plus strictes selon le GTR 2023 et CEBTP REVISEE 2018. Ainsi nous avons confirmé l'hypothèse considérant que les granulats recyclés de béton peuvent-être réutilisés efficacement dans les projets routiers notamment comme remblai, dans la couche de forme et dans la couche de fondation.

Mots clés : Granulats, recyclées, valorisation, construction routière

Abstract

In a context of declining natural resources and growing environmental concerns, this research aims to characterize aggregates derived from deconstructed concrete for their use in road construction. The issue revolves around the lack of reliable data on the physical and mechanical properties of these recycled materials, which hinders their widespread adoption. Our main objective is to assess the compliance of these aggregates with the technical standards required for road applications, in order to address the problem of debris management. To this end, we applied a rigorous methodology including grain size analysis, bulk density tests, fragmentation resistance (Los Angeles), compaction (Proctor), California Bearing Ratio (CBR), and swelling tests (CBR) on local samples, following European standards. The results are promising, particularly with an absolute density ranging between 2.5 and 2.62 Mg/m³, and a Los Angeles value between 31 and 37. The optimum water contents were 14.6%, 15.7% and 16.6%, with corresponding dry densities of 1.972 Mg/m³, 1.898 Mg/m³, and 1.859 Mg/m³, respectively. The high CBR indices of 49.1%, 53.5%, and 51.3% at 95% of the Optimum Proctor Moisture (OPM) indicate an average CBR of 51.3%. No swelling was observed in the CBR after immersion, and the undesirable material classification was below 1%.

These results demonstrate compliance with various material specifications and the most stringent requirements according to GTR 2023 and CEBTP REVISED 2018. Thus, we confirmed the hypothesis that recycled concrete aggregates can be effectively reused in road projects, particularly as backfill, in the subgrade layer, and in the foundation layer.

Keywords: Aggregates, recycled, reuse, road construction

Sommaire

Epigraphe	i
Dédicace.....	ii
Remerciements.....	iii
Résumé.....	iv
Abstract	v
Sommaire	vi
Liste des abréviations.....	ix
Liste des notations	x
Liste des tableaux.....	xi
Liste des figures	xiii
0. Introduction générale	1
0.1. Contexte	1
0.2. Identification et formulation du problème	2
0.3. Questions de recherche	2
0.4. Formulation des hypothèses.....	3
0.5. Justification du choix du sujet et motivations.....	3
0.6. Énoncé des objectifs de recherche	3
0.6.1. L'objectif général.....	3
0.6.2. Les objectifs spécifiques	3
0.7. Méthodologie et délimitation du travail.....	4
0.8. Structure du mémoire/ Subdivision du travail	4
Chapitre 1 Généralités	5

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

1.1	Introduction.....	5
1.2	Généralités sur les matériaux recyclés.....	5
1.2.1	Les déchets du BTP	5
1.2.2	Répartition des déchets du BTP.....	6
1.2.3	Aspect environnemental.....	10
1.3	Généralités sur les routes	13
1.3.1	Classification de routes	13
1.4	Généralités sur les chaussées	15
1.4.1	Rôle de la chaussée	15
1.5	Généralités sur les matériaux routiers.....	16
1.5.1	Classification selon le GTR 2023	16
1.5.2	Classification selon le CEBTP.....	19
1.6	Conclusion partielle	26
Chapitre 2 Méthodologie		27
2.1	Introduction.....	27
2.2	Origine des matériaux recyclés.....	27
2.3	Caractérisation des matériaux recyclés.....	29
2.3.1	Analyse granulométrique.....	30
2.3.2	Masse volumique absolue.....	34
2.3.3	Teneur en eau	36
2.3.4	Essai Los Angeles	37
2.3.5	Essai Proctor	39
2.3.6	Essai CBR.....	44
2.4	Conclusion partielle	47
Chapitre 3 Présentation et interprétation de résultats		48
3.1	Introduction.....	48
3.2	Caractéristiques des matériaux	48
3.2.1	La composition granulométrique.....	48
3.2.2	Les teneurs en eau.....	53

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

3.2.3	Les masses volumiques absolues	54
3.2.4	Los Angeles	54
3.2.5	Les résultats de l'essai Proctor.....	56
3.2.6	CBR (California Bearing Ratio)	60
3.2.7	Synthèse des résultats et observations	66
3.3	Conclusion partielle	67
	Conclusion générale.....	68
	Bibliographie.....	70
	ANNEXES.....	73
	Annexe A Analyse granulométrique	74
A.1	Analyse granulométrique échantillon 1	74
A.2	Analyse granulométrique échantillon 2	75
A.3	Analyse granulométrique échantillon 3	76
	Annexe B Teneur en eau.....	77
B.1	Teneur en eau échantillon 1	77
B.2	Teneur en eau échantillon 2	78
B.3	Teneur en eau échantillon 3	79
	Annexe C Proctor modifié	80
C.1	Proctor échantillon 1	80
C.2	Proctor échantillon 2	81
C.3	Proctor échantillon 3	82
	Annexe D Table de correspondance	83
	Annexe E Poinçonnement CBR.....	84
E.1	Poinçonnement échantillon 1	84
E.2	Poinçonnement échantillon 2	85
E.3	Poinçonnement échantillon 3	86

Liste des abréviations

ACV	: Analyse de Cycle de Vie
ACV	: Aggregate Crushing Value
BTP	: Bâtiment Travaux Publics
CBR	: California Bearing Ratio
CEBTP	: Centre Expérimental de recherche et d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics
CGDD	: Commissariat Général au Développement Durable
DEEE	: Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques
EN	: Norme Européenne
FDES	: Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire
GTR	: Guide des Terrassements Routiers
I.CBR	: Indice CBR
IPI	: Indice de Portance Immédiat
ISDI	: Installation de Stockage de Déchets Inertes
ISDND	: Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux
ISO	: International Organization for Standardization
LA	: Los Angeles
LL	: Limite de Liquidité
MDE	: Module de Déformation Elastique
NF	: Norme Française
OPM	: Optimum Proctor Modifié
PVC	: Polychlorure de Vinyle
SDES	: Service des Données et Etudes statistiques
SOES	: Service de l'Observation et des Statiques
UE	: Union Européenne
ULPGL	: Université Libre des Pays de Grands Lacs
VBS	: Valeur au Bleu de Méthylène

Liste des notations

C_U	: Coefficient d'uniformité granulométrique
C_C	: Coefficient de courbure granulométrique
d/D	: Fraction granulaire
D_{max}	: Dimension du plus gros granulat
D_{10}	: Diamètre des particules correspondants à 10 % de tamisât
D_{30}	: Diamètre des particules correspondants à 30 % de tamisât
D_{60}	: Diamètre des particules correspondants à 60 % de tamisât
f	: Pourcentage de fines passant au tamis 0,063 mm
FL5	: Classe de gravillons recyclés contenant une portion de flottant inférieure à 5 %
I_P	: Indice de plasticité
W	: Teneur en eau
W_n	: Teneur en eau naturelle
W_{OPM}	: Teneur en eau à l'Optimum Proctor Modifié
ρ_a	: Masse volumique absolue
ρ_s	: Masse volumique du sol sec
ρ_w	: Masse volumique de l'eau
γ^d	: Masse volumique sèche
γ^d_{OPM}	: Masse volumique sèche maximale à l'Optimum Proctor Modifié
X1	: Classe de gravillons recyclés contenant une portion de matériaux cohérents inférieure à 1 %

Liste des tableaux

Tableau 1.1 - La production de déchets du BTP de certains pays	7
Tableau 1.2 - Critères de choix d'une technique de déconstruction ou démolition	8
Tableau 1.3 - Classification de matériaux de démolition et de déconstruction	18
Tableau 1.4 - La portance du sol en fonction de l'indice CBR pour les pays tropicaux	19
Tableau 1.5 - Classification du trafic journalier toutes catégories de véhicules confondues ..	20
Tableau 1.6 - Classification du trafic cumulé de poids lourds.....	20
Tableau 1.7 - Caractéristiques géotechniques d'un sol de plate-forme à traiter.....	21
Tableau 1.8 - La nouvelle classe de plate-forme améliorée.....	21
Tableau 1.9 - Indice CBR en fonction du trafic dans la couche de fondation	22
Tableau 1.10 - Fuseau granulométrique de graves naturelles de la couche de fondation.....	23
Tableau 1.11 - Spécifications sur les graves naturelles de la couche de fondation	23
Tableau 1.12 - Les différentes valeurs de la résistance à la fragmentation de trafic	24
Tableau 1.13 - Fuseau granulométrique de graves naturelles de la couche de base	25
Tableau 1.14 - Spécifications sur les graves naturelles de la couche de base	25
Tableau 2.1 - Taille minimale des portions d'essai	31
Tableau 2.2 - Forme de la courbe granulométrique	33
Tableau 2.3 - Masse minimale des prises d'essai	34
Tableau 2.4 - Caractéristique des moules Proctor	40
Tableau 2.5 - Exemple des points expérimentaux	43
Tableau 3.1 - Résultats du pourcentage de fines.....	52
Tableau 3.2 - Résultats du coefficient d'uniformité et de courbure	53
Tableau 3.3 - Résultats de la teneur en eau.....	53
Tableau 3.4 - Résultats masse volumique absolue.....	54
Tableau 3.5 - Résultats de Los Angeles.....	54
Tableau 3.6 - Résultats de l'essai Proctor - échantillon 1	56
Tableau 3.7 - Résultats de l'essai Proctor - échantillon 2.....	57
Tableau 3.8 - Résultats Proctor échantillon 3	58

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

Tableau 3.9 - Résultats aux enfoncements 2,5 et 5 mm de l'échantillon 1.....	60
Tableau 3.10 - Résultats de l'indice CBR pour l'échantillon 1	60
Tableau 3.11 - Masse volumique sèche en fonction de l'énergie de compactage échantillon 1	60
Tableau 3.12 - Résultats aux enfoncements 2,5 et 5 mm de l'échantillon 2.....	61
Tableau 3.13 - Résultats de l'indice CBR de l'échantillon 2.....	62
Tableau 3.14 - Masse volumique sèche en fonction de l'énergie de compactage échantillon 2	62
Tableau 3.15 - Résultats aux enfoncements 2,5 et 5 mm de l'échantillon 3.....	63
Tableau 3.16 - Résultats de l'indice CBR de l'échantillon 3.....	64
Tableau 3.17 - Masse volumique sèche en fonction de l'énergie de compactage échantillon 3	64
Tableau 3.18 - Synthèse des résultats obtenus.....	66

Liste des figures

Figure 1.1 - Une maison en démolition quartier Kyeshero - Goma.....	6
Figure 1.2 - Illustration d'une démolition	8
Figure 1.3 - Illustration d'une déconstruction	9
Figure 1.4 - La démarche générale du réemploi et de la réutilisation	9
Figure 1.5 - Comparaison multicritères des impacts environnementaux associés au cycle de vie de différents graves avec comparatif des FDES	12
Figure 1.6 - Les couches composant une chaussée	15
Figure 1.7 - Spécification de la méthode et du produit fini	17
Figure 2.1 - Maison en déconstruction / Concassage de l'échantillon 1	28
Figure 2.2 - Eprouvettes de béton / Concassage de l'échantillon 2	28
Figure 2.3 - Chantier abandonné / Concassage de l'échantillon 3.....	29
Figure 2.4 - Tamis.....	30
Figure 2.5 - Appareil de Los Angeles.....	37
Figure 2.6 - Schéma de principe de la répartition des coups de la dame sur une couche	41
Figure 2.7 - Moule Proctor.....	41
Figure 2.8 - Moule Proctor remplie du matériau compacté.....	42
Figure 2.9 - Exemple de traçage des courbes de l'essai	43
Figure 2.10 - Moule CBR remplie du matériau compacté.....	45
Figure 2.11 - Moules CBR immergées	46
Figure 3.1 - Courbe granulométrique échantillon 1	49
Figure 3.2 - Courbe granulométrique échantillon 2.....	49
Figure 3.3 - Courbe granulométrique échantillon 3.....	50
Figure 3.4 - Courbe granulométrique corrigée échantillon 1.....	51
Figure 3.5 - Courbe granulométrique corrigée échantillon 2.....	51
Figure 3.6 - Comparaison entre différents pourcentages de fines	52
Figure 3.7 - Comparaison entre différents indices de Los Angeles.....	55
Figure 3.8 - Courbe Proctor échantillon 1	56

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

Figure 3.9 - Courbe Proctor échantillon 2	57
Figure 3.10 - Courbe Proctor échantillon 3	58
Figure 3.11 - Courbes Proctor.....	59
Figure 3.12 - Courbes efforts-pénétration échantillon 1	61
Figure 3.13 - Courbes efforts-pénétration échantillon 2	63
Figure 3.14 - Courbes efforts-pénétration échantillon 3	65

0. Introduction générale

0.1. Contexte

L'humanité a toujours cherché à répondre à ses besoins tout en s'adaptant aux défis qu'elle rencontre. Avec l'urbanisation croissante et l'augmentation des activités humaines, les constructions génèrent de plus en plus de déchets, notamment les débris issus de la démolition. Parallèlement, les besoins en infrastructures, notamment routières, ne cessent de croître. Le développement des infrastructures routières à travers le monde et particulièrement en République Démocratique du Congo, a créé le besoin immense en matériaux de chaussées. Face à cette situation, le secteur de la construction est appelé à adopter des approches plus durables et innovantes. L'utilisation des matériaux issus des débris de démolition pour la construction routière constitue une solution prometteuse, permettant à la fois de réduire les déchets et de minimiser l'extraction des granulats naturels.

Chaque année les activités du Bâtiment et des Travaux Publics produisent plus de 100 millions de tonnes de matériaux de démolition et de déblais, qui dans le cas général sont des déchets inertes [1]. Comme dans de nombreuses régions en développement, le secteur de la construction est en pleine expansion. Cependant, cette croissance s'accompagne de défis environnementaux et économiques, notamment la gestion des débris de démolition qui s'accumulent dans les zones urbaines.

Les déchets issus du secteur du BTP représentent environ 25 à 30 % de l'ensemble des déchets produits dans le monde, et le béton constitue la majeure partie de ces volumes. Ce constat appelle à leur valorisation à travers des démarches d'économie circulaire dans le secteur des infrastructures [2]. En parallèle, les besoins en infrastructures routières augmentent, mais les matériaux de construction traditionnels deviennent de plus en plus coûteux et rares. La valorisation des débris de démolition apparaît comme une opportunité pour résoudre ces problèmes. Cette pratique, bien que déjà adoptée dans certaines régions du monde, reste peu

développée à Goma. L'Université de Belgrade révèle qu'un béton produit à partir de 100 % de granulats recyclés permet non seulement de détourner plus de 1000 kg de déchets du circuit de mise en décharge par mètre cube de béton, mais aussi de préserver une même masse de granulats naturels [3]. Les déchets inertes peuvent facilement être recyclés sous forme de matériaux, alternatifs aux granulats de carrières, pour une utilisation en technique routière [4]. Dans ce contexte, il est nécessaire de mener des études locales pour comprendre les caractéristiques des matériaux disponibles et évaluer leur aptitude à être utilisés dans la construction routière.

0.2. Identification et formulation du problème

La gestion des débris de démolition est peu structurée, ce qui engendre des problèmes environnementaux et d'aménagement urbain. D'autre part, les projets routiers sont souvent limités par des coûts élevés et un accès difficile aux matériaux de qualité. Ces deux problématiques, bien que distinctes, pourraient être abordées conjointement par une valorisation efficace des débris de démolition.

0.3. Questions de recherche

Les questions suivantes guideront notre recherche :

- Comment la caractérisation des granulats issus de débris de béton, à travers la détermination de leur granulométrie, de leur masse volumique, de leur teneur en eau, de leur résistance à la fragmentation (Los Angeles) de leurs propriétés de compactage (essai Proctor) et de leur indice portant californien (essai CBR), permet-elle d'évaluer leur conformité aux normes techniques ?
- Les granulats issus de la déconstruction peuvent-ils être valorisés comme matériaux de base ou de la fondation dans la construction routière afin de réduire l'impact environnemental lié à l'extraction de granulats naturels dans le contexte de Goma ?

0.4. Formulation des hypothèses

Eu égard à ce qui précède, nous pouvons avancer les hypothèses suivantes :

- Les granulats de débris de béton disponibles à Goma, une fois caractérisés présenteront des propriétés satisfaisantes et conformes aux normes techniques en vigueur.
- Les granulats issus de la déconstruction à Goma peuvent-être valorisés comme matériaux de base ou de fondation dans la construction routière, offrant ainsi une alternative viable aux granulats naturels extraits et contribuant significativement à la réduction de l'impact environnemental lié à l'extraction.

0.5. Justification du choix du sujet et motivations

Ce sujet est motivé par le double objectif de répondre à des enjeux environnementaux et économiques. D'une part, la gestion des débris de démolition est un défi majeur qui nécessite des solutions pratiques et durables. D'autre part, l'amélioration des infrastructures routières est essentielle pour soutenir le développement socio-économique de la région.

Ce mémoire vise à explorer une solution innovante qui pourrait contribuer à une gestion durable des ressources en préservant le gisement naturel exploité, tout en soutenant les efforts de développement local.

0.6. Énoncé des objectifs de recherche

0.6.1. L'objectif général

L'objectif principal de cette recherche est de valoriser les matériaux issus des débris de déconstruction afin d'évaluer leur potentiel pour la construction routière.

0.6.2. Les objectifs spécifiques

- Caractériser les débris (granulats).
- Proposer des recommandations pour leur valorisation dans la construction routière.

0.7. Méthodologie et délimitation du travail

Pour la réalisation du présent travail, il sera nécessaire de procéder par la méthode documentaire en vue de réunir et de présenter une documentation nécessaire qui va permettre une analyse des études existantes sur le recyclage des granulats et sur les essais réalisés sur les matériaux neufs destinés aux applications routières.

Faire une analyse de caractéristiques des granulats qui sont intrinsèquement liées à la construction routière afin de réaliser une caractérisation en laboratoire à ULPGL/Goma.

Et enfin faire une évaluation des performances des débris (granulats recyclés) par rapport aux matériaux conventionnels.

0.8. Structure du mémoire/ Subdivision du travail

Pour bien réaliser cette étude, nous avons subdivisé ce travail en trois chapitres. Hormis l'introduction générale et la conclusion générale, les différents chapitres sont repartis de la manière suivante : Les généralités ; Méthodologie ; Présentation et interprétation des résultats.

Chapitre 1

Généralités

1.1 Introduction

Dans cette partie, nous allons présenter les généralités sur les matériaux recyclés issus de la déconstruction, l'impact de l'extraction de matériaux des carrières sur l'environnement, les généralités sur les routes, les généralités sur chaussées, et enfin les matériaux routiers.

1.2 Généralités sur les matériaux recyclés

1.2.1 Les déchets du BTP

Sur toutes les phases de son cycle de vie, que ce soit lors de sa phase de construction, de maintenance ou encore de démolition, un bâtiment ou une infrastructure est susceptible de subir des actions productrices de déchets.

Nous avons deux types de déchets qui sont :

a) Les déchets dangereux

Ce type de déchets présente des risques pour la santé humaine ainsi que pour l'environnement. Ils nécessitent des installations de traitement spécifiques. Dans le secteur du BTP, on retrouve encore aujourd'hui de l'amiante sous différentes formes (flocage, amiante ciment, enrobé amianté) ou du plomb.

b) Les déchets non dangereux

Nous avons les déchets inertes et les déchets non dangereux et non inertes.

- Les déchets inertes, également appelés déchets minéraux qui correspondent à « tout déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante, qui ne se décompose pas, ne brûle pas, ne produit aucune réaction physique ou chimique, n'est pas biodégradable et ne détériore pas les matières avec lesquelles il

CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION ROUTIERE : Cas des déchets du béton

entre en contact d'une manière susceptible d'entraîner des atteintes à l'environnement ou à la santé humaine ». Dans le secteur du BTP, on trouve principalement dans cette catégorie le béton, la brique, la céramique, la pierre, le verre, la terre et les enrobés (ni amiantés ni goudronnés car ce sont alors des déchets dangereux).

- Les déchets non dangereux et non inertes qui correspondent aux autres déchets non dangereux non inclus dans les déchets inertes. Ils sont également appelés déchets banals. Dans cette catégorie, on peut mentionner les métaux (dont l'acier de ferrailage), le plâtre, le bois, le PVC et une partie des DEEE (déchets d'équipement électriques et électroniques, certains de ces DEEE pouvant faire partie des déchets dangereux) [5].

La Figure 1.1 représente une maison en démolition dans la ville de Goma au quartier Kyeshero.



Figure 1.1 - Une maison en démolition quartier Kyeshero - Goma

1.2.2 Répartition des déchets du BTP

Les déchets de construction et de démolition sont générés lors de la construction, de la rénovation ou de la démolition de bâtiments, de routes, de ponts, de métros, etc. Ces activités génèrent généralement de grandes quantités de déchets, bien que les données sur les déchets de

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

construction et démolition ne soient pas souvent collectées de manière systématiques ou cohérente. La plupart des chiffres publiés sont donc des estimations. [6]

Le Tableau 1.1 présente la répartition de certaines estimations de déchets produits dans l'intervalle de 2010 à 2012 dans certains pays.

Tableau 1.1 - La production de déchets du BTP de certains pays [6]

Pays	Inde	Japan	China	Dubaï	UE
Quantité de déchets du BTP (millions de tonnes)	17	77	33	7	821
Années	2010	2010	2010	2011	2012
Sources	Guah (2013), répertorié à l'annexe A, chapitre 3	Guah (2013), répertorié à l'annexe A, chapitre 3	Guah (2013), répertorié à l'annexe A, chapitre 3	Centre environnemental des villes arabes (2013). Gestion des déchets à Dubaï.	http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/2011_CDW_Report.pdf

La déconstruction est le terme employé pour une démolition où un tri (total ou partiel) effectué sur les matériaux présents dans le bâtiment en déconstruction tandis que la démolition d'un bâtiment consiste à détruire de manière indissociée. Aucun (ou à la marge) tri préalable n'est effectué. Le résultat de cette démolition est un amas de matériaux mélangés [7].

Plus la précision et le contrôle de opérations est importante, meilleure est la gestion des produits. Pour le Tableau 1.2, en prenant en compte le traitement des déchets, nous notons que + : Faible ; ++ : Moyen ; +++ Important.

CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION ROUTIERE : Cas des déchets du béton

Les critères de choix d'une technique de déconstruction ou démolition sont présentés dans le Tableau 1.2.

Tableau 1.2 - Critères de choix d'une technique de déconstruction ou démolition [8]

Technique	Type d'ouvrage							Précision et contrôle des opérations	Sécurité pour les travailleurs	Nuisances sur chantier	Qualification de la main d'œuvre	Durée	Coût	Coût global estimé
	Ossature acier	Ossature béton armé	Ossature bois	Dalles ou parois forte épaisseur	Dalles ou parois forte épaisseur	Ouvrages masses en béton armé	Immeubles en grande hauteur							
Déconstruction Manuel	++	+	+++	+	+	+	+	+++	++	+	++	+++	++	++
Mécanique : découpage (outils diamantés)	+	+++	+	+++	+++	+++	+	+++	+++	++	+++	++	++	++
Autres mécaniques	+	+	+++	++	+++	+	+	+	++	+++	+	+	+	+++
Explosifs et détente de gaz	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+	+	+++	+++	+	++	+++
Thermique	++	+++	+	++	+++	+	++	+++	+++	++	+++	++	++	++
Chimique	+	+	+	+++	+++	+	+	++	++	+	+	+++	+++	++

La Figure 1.2 et Figure 1.3, illustrent la différence entre la démolition et une déconstruction.



Figure 1.2 - Illustration d'une démolition [9]

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**



Figure 1.3 - Illustration d'une déconstruction [10]

La démarche générale du réemploi et de la réutilisation est présentée à la Figure 1.4.

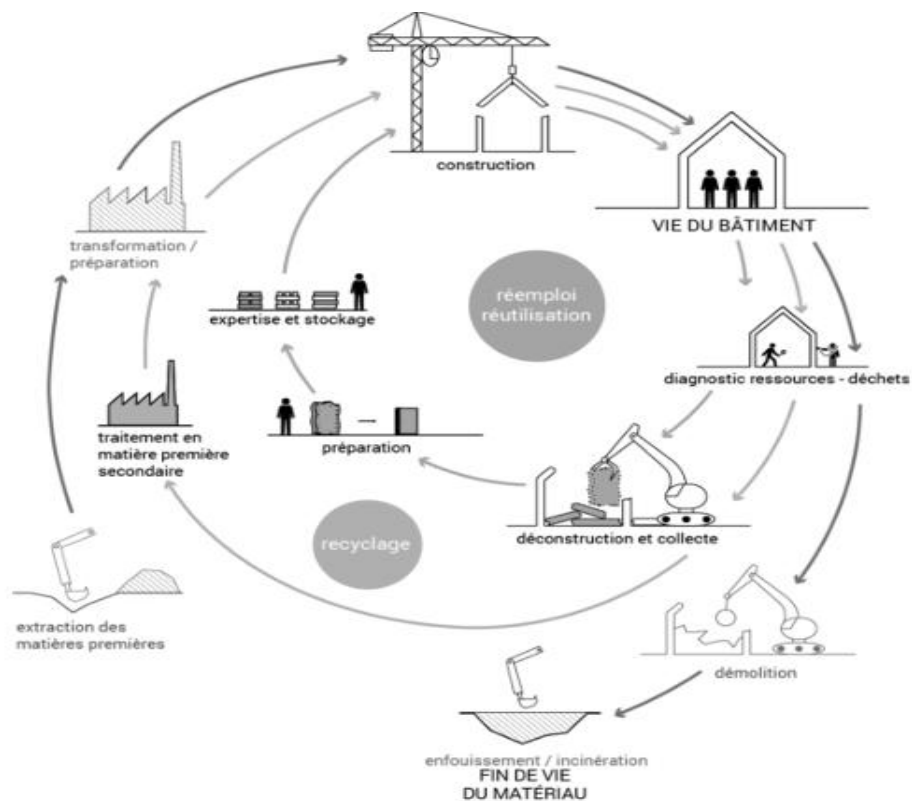


Figure 1.4 - La démarche générale du réemploi et de la réutilisation [11]

Il existe deux lieux où effectuer le tri :

- Directement sur le chantier, appelé tri à la source : des conteneurs spécifiques présents sur le chantier permettent de trier directement les matériaux recyclables ;
- En centre de tri : les déchets sont collectés en mélange et ensuite triés dans un centre de tri.

En pratique, les deux méthodes peuvent être employées sur un même chantier. Le choix de la méthode est lié aux contraintes propres au chantier.

Il existe plusieurs méthodes de tri qui peuvent être, en fonction des équipements, soient réalisables sur chantier soient en centre de tri

Le tri peut être manuel, mécanique, aéraulique, hydraulique, magnétique, et par courant Foucault [12].

1.2.3 Aspect environnemental

Le réemploi des matériaux de construction permet de réduire les impacts environnementaux du secteur de la construction, notamment en matière de changement climatique, de surconsommation des ressources et d'atteinte aux écosystèmes. Il s'agit également d'une stratégie efficace et pleine de bon sens pour prévenir la production de déchets. Pourtant, malgré ses nombreux bénéfices, cette pratique est encore trop peu mise en œuvre. La quantité de matériaux de construction récupérés pour un nouvel usage reste marginale par rapport aux flux totaux de matériaux et de déchets générés par l'industrie de la construction. Le réemploi des matériaux soulève encore de nombreuses questions, qui compliquent son adoption plus systématique dans les projets de construction [13].

1.2.3.1 Principaux impacts d'un projet d'extraction de matériaux [14]

Un projet d'extraction peut impacter différent milieu dont :

a) Milieu physique

- Impacts sur la qualité des sols (risques de dégradation de la qualité physique et chimique des sols) ;

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

- Impacts sur la qualité des eaux de surface et souterraines (influence sur la piézométrie locale, risque de gêner le sens d'écoulement des eaux, modification des caractéristiques physico chimiques des ressources en eau, etc) ;
- Impacts sur la qualité de l'air (dégagement de poussières lié au déversement/chargement des produits extraits et des produits finis et au traitement par le concasseur des produits extraits) ;
- Etc.

b) Milieu biologique

- Impacts sur la végétation, la faune et ses habitats ;
- Impacts sur la biodiversité, notamment par la perturbation de l'équilibre de l'écosystème ;
- Etc.

c) Milieu humain

- Retombées économiques associées à l'aménagement et à l'exploitation du projet (création de nouvelles opportunités d'emplois directs ou indirects) ;
- Impacts sur la qualité de vie et la santé de la population (par la présence de nuisances sonores, la dégradation de la qualité de l'air, la perte d'espaces naturels ou récréatifs, etc) ;
- Impacts sur les infrastructures de service public (les voies d'accès, les routes, les prises d'eau, les parcs, etc) ;
- Impacts sur l'environnement visuel (intrusion de nouveaux éléments dans le champ visuel et changement de la qualité esthétique du paysage) ;
- Risques d'accident de travail.

1.2.3.2 Impacts environnementaux globaux suivant les études ACV (Analyse de Cycle de Vie)

Les impacts évités par le recyclage sont liés à l'évitement de l'élimination des déchets en ISDI/ISDND ou l'évitement de la production de granulats vierges ne sont pas toujours considérés. Ces impacts évités peuvent être des arguments supplémentaires pour l'intérêt

CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION ROUTIERE : Cas des déchets du béton

environnemental de l'utilisation des granulats recyclés. L'Université de Belgrade et Novi Sad estime par exemple que l'utilisation de 100% de granulats recyclés dans 1 m³ de béton permet d'éviter la mise en décharge de 1 071 kg de déchets mais aussi l'extraction associée à 1 071 kg de granulats vierges.

L'étape la plus impactante dans les processus de gestion des déchets et d'usage des granulats reste le **transport**. On considère une distance moyenne de **30 km**, et une distance supérieure pourrait considérablement alourdir le bilan environnemental des granulats (recyclés ou neufs) [15]. La Figure 1.5 présente la comparaison multicritère des impacts environnementaux associés au cycle de vie de différents graves notamment les graves issues de roches meubles, graves issues de roches massives et les graves recyclées.

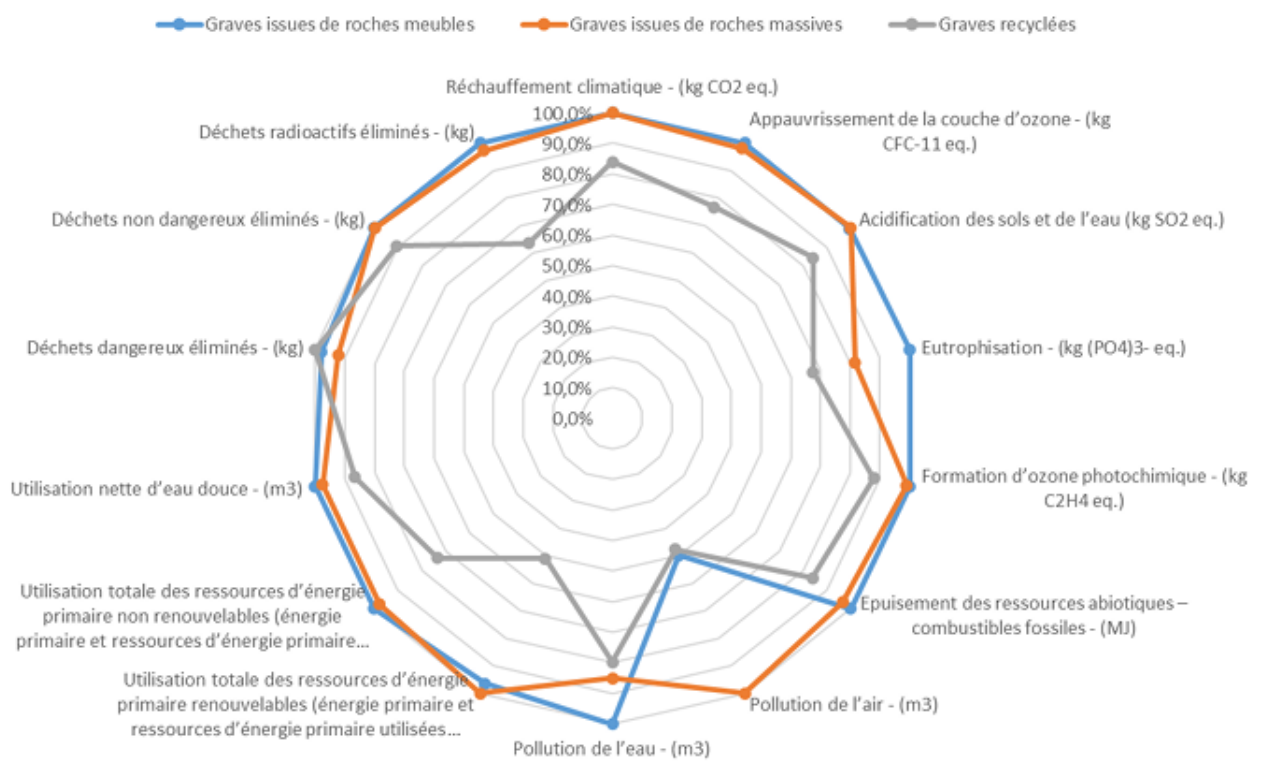


Figure 1.5 - Comparaison multicritères des impacts environnementaux associés au cycle de vie de différents graves avec comparatif des FDES [15]

1.3 Généralités sur les routes

La route est une infrastructure de communication terrestre qui permet le déplacement des biens et des personnes par des véhicules automoteurs. L'infrastructure routière est un ouvrage important et stratégique dans le développement économique d'un pays [16].

1.3.1 Classification de routes

Les besoins de tout système de classification des routes varient, et ils sont examinés dans les sections suivantes.

La classification peut être basée sur :

- L'état des routes ;
- La numérotation des routes comme guide pour le financement ;
- La numérotation des routes comme aide à la navigation et au tourisme ;
- La fonction.

La dernière mentionnée étant celle généralement appliquée à la conception géométrique.

1.3.1.1 La numérotation des routes comme guide pour le financement

Dans de nombreux pays, la numérotation définit l'allocation des fonds, que ce soit au niveau national, étatique, provincial ou local.

1.3.1.2 La numérotation des routes comme aide à la navigation et au tourisme

Une autre forme de classification consiste à numéroter les itinéraires de bout en bout, que les différents segments de l'itinéraire aient ou non un autre numéro dérivé d'un système de classification administrative. Cette numérotation des itinéraires est destinée à répondre aux besoins des touristes.

1.3.1.3 La classification administrative

La classification administrative traite la hiérarchie typique des organismes gouvernementaux, de l'administration centrale jusqu'au niveau le plus bas de l'administration locale. En général, cette hiérarchie comprend trois niveaux : le niveau national, le niveau

provincial ou étatique et le niveau local, qui, à son tour, peut comprendre divers sous-niveaux tels que le comté, la ville, le village ou la zone rurale

1.3.1.4 La classification fonctionnelle

La classification des routes reconnaît implicitement que le réseau routier comporte une hiérarchie intégrée de routes en fonction de leurs fonctions et de leurs capacités. La hiérarchie de base comprend les artères, les routes collectrices et les routes locales. Les autoroutes sont essentiellement des artères, mais leur fonctionnement est différent de celui de toutes les autres routes [17].

Pour la classification administrative, nous pouvons citer :

- Chemins communaux

Les chemins communaux constituent un maillon important dans le réseau routier, elles permettent la liaison des villages au réseau principale de routes. Elles peuvent s'étendre sur une ou plusieurs communes, entretenues par les collectivités locales.

- Chemins de wilaya

Les chemins de Wilaya ou chemins départementaux relient le réseau de routes communales au réseau national. Ces routes peuvent desservir uniquement la wilaya (le département) et sont à la charge de celle-ci comme ils peuvent desservir deux Wilayas (départements) avoisinantes.

- Routes nationales

Les routes nationales sont d'un intérêt commun pour plusieurs Wilayas (départements) ou pour le pays entier. Elles constituent des itinéraires inter-wilaya qui supportent un grand trafic. La construction, l'aménagement, l'entretien et la gestion de ces routes est faite par le budget de l'état.

- Autoroutes

Les autoroutes sont des routes nationales d'une catégorie spéciale, elles sont constituées de deux chaussées unidirectionnelles séparées par terre-plein central, ne comportant aucun

passage ou carrefour à niveau. Les autoroutes sont réalisées, aménagées, entretenues et gérées le plus souvent sur des capitaux privés ou groupes d'investissement [16].

1.4 Généralités sur les chaussées

La chaussée est une partie de la route présentée comme des structures multicouches destinée à la circulation des véhicules et des piétons. Elle est mise en œuvre sur un ensemble appelé plateforme support de chaussée constituée du sol terrassé (dit sol support) surmonté généralement d'une couche de forme [18].

1.4.1 Rôle de la chaussée

Le rôle d'une chaussée est de reporter sur le sol support, en les répartissant convenablement, les efforts dus au trafic. La structure de chaussée doit être telle que la pression verticale transmise au sol support soit en tous points suffisamment faible pour que celui-ci puisse la supporter sans dégradation.

Les structures de chaussées se composent des couches d'assise et de surface. Elles apportent à la chaussée la résistance mécanique [18].

La Figure 1.6 présente les différentes couches d'une chaussée.

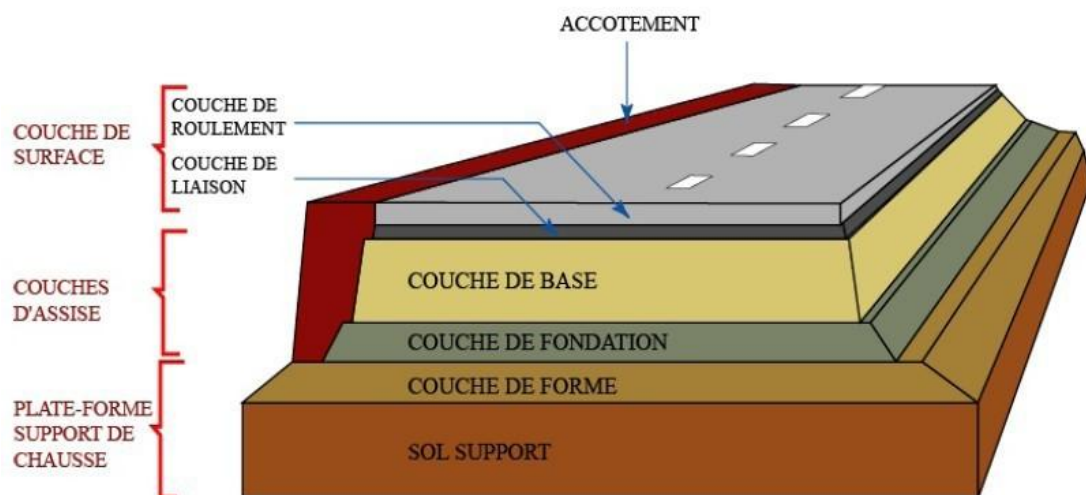


Figure 1.6 - Les couches composant une chaussée [19]

Il est noté que la couche de forme est une couche mise en œuvre au-dessus de l'arasement de terrassement permettant d'adapter les caractéristiques des matériaux de remblai ou du terrain en place, aux caractéristiques géométriques, mécaniques, hydrauliques et thermiques, prises comme hypothèses dans la conception et le calcul de dimensionnement de la chaussée.

La couche de roulement est la couche de surface de la chaussée en contact avec les pneumatiques du véhicule.

Et que la couche de liaison est la couche de surface, interposée éventuellement entre la couche de roulement et l'assise [20].

1.5 Généralités sur les matériaux routiers

Pour qu'un matériau puisse être utilisé en construction routière, il doit être caractérisé de manière à répondre aux exigences spécifiques, en tenant compte de la couche concernée. Les classifications suivantes en sont des exemples.

1.5.1 Classification selon le GTR 2023

Le GTR propose une démarche de conception, d'exécution et de contrôle des terrassements conforme aux règles des normes NF EN 16907 dans la réalisation des remblais et des couches de forme.

Ce processus inclut la caractérisation des sols, roches ou matériaux alternatifs susceptibles d'être utilisés, et le choix de règles et d'équipements adaptés permettant d'organiser l'excavation, le transport, la mise en œuvre, le compactage et le contrôle des matériaux. Ainsi, la démarche développée dans le GTR propose les étapes suivantes :

- L'établissement d'une classification spécifique des matériaux présentant un comportement suffisamment proche pour qu'il soit justifié de leur appliquer les mêmes modalités de mise en œuvre ;

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

- L'énoncé de modalité de mise en œuvre propre à chaque classe de matériau, suivant l'utilisation envisagée et les conditions du chantier (météorologie, état hydrique des matériaux, etc.) ;
- La définition des modalités pratiques d'exécution du compactage applicables aux remblais et aux couches de forme [21].

La Figure 1.7 présente les spécifications de la méthode d'approche fini et du produit fini.



Figure 1.7 - Spécification de la méthode et du produit fini [21]

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

Le Tableau 1.3 présente la classification de matériaux de démolition et de déconstruction selon le GTR 2023 Fascicule 2.

Tableau 1.3 - Classification de matériaux de démolition et de déconstruction [22]

Selon la nature			Selon l'état hydrique	
Famille de Matériaux	Caractères principaux	Paramètres retenus	Valeurs de seuils retenus	Sous- classe
AR-A5 Mélange de matériaux de démolition et de déconstruction	Ces matériaux sont issus de la déconstruction ou de la démolition d'ouvrages existants. Ils ont des compositions extrêmement variables du fait de la disparité de leurs origines et du type de collecte (sélective ou non) appliquée pour les rassembler. Leur emploi nécessite d'évaluer le risque d'évolution par dégradation de matières putrescibles (notamment le bois) ou par gonflement du fait de la présence de sulfates dans certains indésirables (notamment le plâtre).	Sulfates solubles dans l'eau NF EN 1744-1	< 0,7 %	AR-A51 Graves de recyclage : Matériaux de démolition, sans plâtre, épurgés des éléments putrescibles, concassés, criblés, déferrailés, homogénéisés
		Flottants • selon NF EN 933-11 pour $D_{max} \leq 80$ mm • appréciation visuelle pour $D_{max} > 80$ mm	FL5 < 5 % (volume)	
		Indésirables • selon NF EN 933-11 pour $D_{max} \leq 80$ mm • appréciation visuelle pour $D_{max} > 80$ mm	X1 < 1 % (masse)	
		Sulfates solubles dans l'eau NF EN 1744-1	< 1,3 %	AR-A52 Matériaux de démolition en mélange, non concassés, contenant une faible proportion d'indésirables
		Flottants • selon NF EN 933-11 pour $D_{max} \leq 80$ mm • appréciation visuelle pour $D_{max} > 80$ mm	FL5 < 5 % (volume)	
		Indésirables Appréciation visuelle	> 5 % (volume) d'indésirables (plâtres, bois, plastiques)	
				AR-A53 Matériaux de démolition en mélange, non concassés, une forte proportion d'indésirables

Leur emploi en couche de forme non traitée nécessite, par ailleurs, la mesure de leur résistance mécanique (LA et MDE) avec $LA \leq 45$ ou $MDE \leq 45$.

Il est annoté que AR-A53 et AR-A52 sont de matériaux inutilisables en couche de forme [22].

1.5.2 Classification selon le CEBTP [23]

Cinq classes de sols ont été retenues, qui correspondent à une répartition assez constante des divers types de sols rencontrés en pays tropicaux.

Le Tableau 1.4 présente la classification de différents sols des pays tropicaux en fonction de l'indice CBR.

Tableau 1.4 - La portance du sol en fonction de l'indice CBR pour les pays tropicaux

S_1	$CBR < 5$
S_2	$5 < CBR < 10$
S_3	$10 < CBR < 15$
S_4	$15 < CBR < 30$
S_5	$30 < CBR$

1.5.2.1 Les classes de trafic

Les classes de trafic retenues sont définies de plusieurs façons en fonction du degré de précision des données disponibles :

- Trafic journalier toutes catégories de véhicules confondues : Il est défini par son intensité journalière moyenne sur une durée de vie de l'ordre de quinze ans, toutes classes de véhicules incluses. Le pourcentage moyen de poids lourds est supposé de l'ordre de 30 % du trafic total.

Le Tableau 1.5 présente la classification du trafic journalier de toutes catégories.

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

Tableau 1.5 - Classification du trafic journalier toutes catégories de véhicules confondues

$T_1 < 300$
T_2 de 300 à 1000
T_3 de 1000 à 3000
T_4 de 3000 à 6000
T_5 de 6000 à 12000

- Trafic cumulé de poids lourds (véhicules définis comme ayant un poids total en charge supérieur à 3 tonnes) : Il fait référence au nombre total de véhicules de type poids lourds qui circulent sur une voie spécifique au cours d'une durée de vie prévue pour 15 ans.

Le Tableau 1.6 présente la classification du trafic cumulé de poids lourds essieu équivalent de 13 tonnes.

Tableau 1.6 - Classification du trafic cumulé de poids lourds

$T_1 < 5.10^5$
$5.10^5 < T_2 < 1,5.10^6$
$1,5.10^6 < T_3 < 4.10^6$
$4.10^6 < T_4 < 10^7$
$10^7 < T_5 < 2.10^7$

1.5.2.2 La plate-forme

Il est indispensable de disposer d'une bonne assise pour que le corps de chaussée soit mis en place dans des conditions satisfaisantes et pour qu'il conserve, dans le temps, une indéformabilité suffisante.

Les sols à éliminer ou à traiter ont, outre un CBR très faible, les caractéristiques géotechniques suivantes qui figure dans le Tableau 1.7.

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

Tableau 1.7 - Caractéristiques géotechniques d'un sol de plate-forme à traiter

Indice de plasticité (I_p)	> 40
Gonflement linéaire dans le moule CBR	> 2
Teneur en matières organiques	> 3

1.5.2.3 La couche de forme

Le matériau de substitution ou d'apport à mettre en couche de forme pour pallier l'insuffisance du sol naturel et, éventuellement, permettre la circulation de chantier devra être sélectionné en tout état de cause, avoir un **CBR > 5**. Un **CBR ≥ 10** pourra être exigé pour les chantiers importants sur lesquels circulent de très gros engins.

La couche de forme est indispensable sur les sols pour lesquels il est impossible d'atteindre les 95 % de la densité OPM.

La nouvelle classe de plate-forme améliorée à prendre en compte pour le dimensionnement de la chaussée sera déterminée d'après la qualité et l'épaisseur du matériau de substitution placé en couche de forme. Le Tableau 1.8 présente les différentes nouvelles classes de plate-forme à prendre en compte en cas d'apport de matériau pour améliorer la plate-forme existante.

Tableau 1.8 - La nouvelle classe de plate-forme améliorée

Matériau d'apport		Nouvelle classe de plate-forme à prendre en compte
CBR	Epaisseur minimal en cm	
5-10 (S_2)	45	S_2
10-15 (S_3)	35	S_2
10-15 (S_3)	45	S_3
15-30 (S_4)	30	S_2
15-30 (S_4)	35	S_3
15-30 (S_4)	50	S_4

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

De nombreux sols peuvent être utilisés, on évitera cependant ceux dont :

- La granulométrie maximale est supérieure à **150 mm** ;
- Le pourcentage de **fines** est supérieur à **35 ou 45 %** et I_p supérieur à **20 ou 30**.

1.5.2.4 La couche de fondation

Quelle que soit la structure dans laquelle ils sont inclus, les matériaux pour couche de fondation doivent avoir **un CBR ≥ 30** obtenu pour une densité sèche correspondant à 95% de l'OPM.

Le Tableau 1.9 présente les valeurs recommandées de l'indice CBR pour la couche de fondation en fonction du niveau de trafic.

Tableau 1.9 - Indice CBR en fonction du trafic dans la couche de fondation

Trafic	CBR
T ₁	≥ 25
T ₂ et T ₃	≥ 30
T ₄ et T ₅	≥ 35

Ici avec $D_{max} \leq 60 \text{ mm}$, il est recommandé d'utiliser des matériaux de moindre granulométrie maximale pour éviter la ségrégation.

a) Graves naturelles 0/D

La granulométrie maximale ne devra pas excéder 60 mm et dans le cas de matériaux possédant des éléments de cette taille, il sera souhaitable d'envisager leur mise en œuvre d'au moins 20 cm d'épaisseur, cette exigence granulométrique concerne aussi les tout-venants de concassage.

Le Tableau 1.10 présente le fuseau granulométrique de graves naturelles intervenant dans la couche de fondation.

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

Tableau 1.10 - Fuseau granulométrique de graves naturelles de la couche de fondation

Mailles	% passant
60 mm	100
40 mm	80* - 100
20 mm	65 - 90
10 mm	40 - 75
5 mm	30* - 60
2 mm	20 - 45
1 mm	15 - 37
0,4 mm	10 - 20
80 µm	2 (4) **15

* Respectivement 85 et 28 pour les graves roulées ;

** 2 pour matériaux légèrement plastiques ; et 4 pour matériaux non plastiques.

Le Tableau 1.11 présente les spécifications de graves naturelles intervenants dans la couche de fondation.

Tableau 1.11 - Spécifications sur les graves naturelles de la couche de fondation

Spécifications	C. Fondation
LA	< 50
MDE	< 30
C _U	> 10
% de fines (0/31,5)	$f < 10$
I _p	< 12

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

1.5.2.5 La couche de base

La couche de base étant soumise à des sollicitations importantes, les matériaux qui la constituent doivent avoir des qualités suffisantes. Plusieurs critères conditionnent leur choix :

- Leur indice portant ;
- Leur stabilité ;
- La dureté de leur squelette ;
- La résistance à la traction des couches liées ou rigidifiées.

L'indice de portant CBR sera au moins égal à 80 pour une densité sèche correspondant à 95% de l'OPM. Si le matériau naturel n'atteint pas cette portance, il devra être amélioré ou traité. Un indice CBR de 60 peut être admis pour le trafic T₁.

Les matériaux de la couche de base peuvent subir une forte attribution sous le trafic, spécialement lorsque celle-ci n'a pas été rigidifiée, car la résistance au cisaillement est alors entièrement reprise par le frottement des grains entre eux.

Les valeurs de seuils retenus à divers essais sont présentes au Tableau 1.12 ci- après.

Tableau 1.12 - Les différentes valeurs de la résistance à la fragmentation de trafic

Trafics T ₁ -T ₃ admettant l'essieu simple de 8 à 10 tonnes			Trafics T ₄ -T ₅ admettant l'essieu de 13 tonnes		
Essai	Concassés	Matériaux liés	Essai	Concassés	Matériaux liés
LA	≤ 45	< 50	LA	≤ 30	< 40
MDE	≤ 15	< 20	MDE	≤ 12	< 18
ACV	< 32	< 35	ACV	< 25	< 30

a) Graves naturels (Concassé 0/40)

Les concassés o/d, appelés aussi tout-venants de concassage. Ils proviennent de l'extraction en carrière de roches dures ou du concassage, après criblage, de la fraction d/D de graves alluvionnaires à gros éléments. Les produits de carrières rocheuses sont

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

entièrement concassés ; les matériaux obtenus à partir de graves grossières contiennent fréquemment une fraction non concassée. Il faut limiter la granulométrie à la dimension maximale de 40 mm.

Le Tableau 1.13 présente le fuseau granulométrique de graves naturelles intervenant dans la couche de base.

Tableau 1.13 - Fuseau granulométrique de graves naturelles de la couche de base

Mailles	% passant	
	0/31,5	0/40
50 mm		100
40 mm	100	95 – 100
31,5 mm	95 – 100	85 - 97
20 mm	64 – 90	65 - 90
10 mm	40 – 70	40 – 75
6,3 mm	30 - 60	30 - 60
2 mm	20 - 42	20 - 42
0,5 mm	10 – 26	10 – 30
80 µm	2 (4) - 10	4 - 12

L'indice de plasticité de ces matériaux est souvent nul. Il est à noter que si I_p est nul, le pourcentage des fines devra être supérieur à 4 %. Si l'indice de plasticité est compris entre 0 et 6, la teneur en fines devra rester comprise entre 2 et 5 %. Quelques spécifications liées aux graves sont présentes au Tableau 1.14.

Tableau 1.14 - Spécifications sur les graves naturelles de la couche de base

Spécifications	C. Base
% de fines (0/31,5)	$f < 10$
% de fines (0/40)	$f < 12$
I_p (Pour les trafics plus élevés)	0

Dans la mise en œuvre, on devra obtenir au moins 95 % de la densité OPM. La teneur en eau sera comprise entre $W_{OPM} \pm 1$. Le pourcentage de vides total devra rester inférieur à 15%.

1.6 Conclusion partielle

Dans ce chapitre nous avons mis en évidence l'intérêt croissant pour les granulats recyclés issus de la déconstruction, en réponse aux impacts environnementaux liés à l'extraction en carrière, nous avons fait une présentation sur les routes, les chaussées et sur certains matériaux intervenants dans différentes couches des chaussées. Cela à montrer qu'il y a certains paramètres qui doivent être remplir pour qu'un matériau soit utiliser en construction routière.

Chapitre 2

Méthodologie

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, il est question d'établir une base méthodologique rigoureuse en vue de détailler les méthodes et techniques utilisées pour évaluer le potentiel des matériaux recyclés dans les infrastructures routières.

Nous abordons l'objectif principale qui est d'évaluer les caractéristiques physiques et mécaniques de déchets recyclés issues de la démolitions (bétons) afin de déterminer leur aptitude à remplacer les matériaux conventionnels dans les couches d'une chaussée.

2.2 Origine des matériaux recyclés

Trois échantillons ont été analysés dans le cadre de cette étude. Deux proviennent de différents chantiers situés dans le quartier Kyeshero, tandis que le troisième a été prélevé sur des éprouvettes de béton confectionnées à l'ULPGL. Tous les échantillons ont été obtenus par concassage.

- Le premier échantillon provient d'une maison construite entre 2003 et 2004, puis démolie en 2024, après 20 ans d'existence.
- Le deuxième échantillon est issu d'éprouvettes de béton fabriquées depuis 2 à 3 ans, récemment démolies.
- Le troisième provient d'un chantier inachevé, entamé en 2015 et exposé aux intempéries depuis près de 10 ans.

Pour l'échantillon 1 et 3, nous avons cibler les bétons des éléments porteurs poteaux.

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

Les figures ci-après présentent les différents types d'échantillons utilisés pour notre étude.



Figure 2.1 - Maison en déconstruction / Concassage de l'échantillon 1



Figure 2.2 - Eprouvettes de béton / Concassage de l'échantillon 2



Figure 2.3 - Chantier abandonné / Concassage de l'échantillon 3

2.3 Caractérisation des matériaux recyclés

Pour cette caractérisation, nous ferons recours aux essais ci-après :

- L'analyse granulométrique par tamisage par voie sèche ;
- La masse volumique absolue ;
- La teneur en eau ;
- Essai de Los Angeles (résistance à l'usure) ;
- Essai Proctor ;
- Essai CBR.

2.3.1 Analyse granulométrique

L'essai d'analyse granulométrique est réalisé conformément à la norme NF EN 933-1.

a) Principe

Le test consiste à diviser et à séparer un matériau en plusieurs classifications granulométriques de tailles décroissantes au moyen d'une série de tamis. La taille des ouvertures et le nombre de tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision requise.

b) Appareil :

- Tamis de contrôle dont les ouvertures sont spécifiées dans la norme EN 933-2 et conformes aux exigences des normes ISO 3310-1 et ISO 3310-2 ;
- Cuvette et couvercle hermétiques pour tamis ;
- Balances ;
- Plateaux ;
- Brosses ;
- Tamiseuse.

La Figure 2.4 présente l'image des différents tamis.



Figure 2.4 - Tamis

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

c) Préparation des portions de test :

Les échantillons doivent être réduits conformément à la norme EN 932-2 afin de produire le nombre requis de portions d'essai.

Le Tableau 2.1 donne les portions minimales à prendre en fonction de la taille maximale d'agrégats.

Tableau 2.1 - Taille minimale des portions d'essai [24]

Taille d'agrégats D (maximum) mm	Masse des agrégats kg	Volume d'agrégats légers (litres)
90	80	—
32	10	2,1
16	2,6	1,7
8	0,6	0,8
≤ 4	0,2	0,3

Pour les granulats d'autres dimensions inférieures mm, la masse minimale de la prise d'essai peut être interpolés en utilisant la formule suivante :

$$M = \left(\frac{D}{10}\right)^2$$

Où :

M est la masse minimale de l'élément d'essai en kg ;

D est la taille des agrégats en mm.

Pour les granulats légers, la colonne de volume est utilisée pour choisir la taille minimale appropriée des éprouvettes.

d) Procédure

Verser le matériau séché dans la colonne de tamisage ayant comme masse M_1 . La colonne est constituée d'un certain nombre de tamis assemblés et disposés, de haut en bas, par ordre d'ouverture décroissante avec la cuvette et le couvercle.

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

Agiter la colonne, manuellement ou mécaniquement. Retirer ensuite les tamis un par un, en commençant par l'ouverture la plus grande. Agiter chaque tamis manuellement en veillant à ce qu'aucune matière ne se perde, par exemple en utilisant une casserole et un couvercle.

Le processus de tamisage est considéré comme terminé lorsqu'un tamisage supplémentaire n'entraîne pas une modification de la masse de la matière retenue sur l'un des tamis de plus de 1,0 % en masse pendant une minute.

e) Le pesage :

Peser matière retenue pour le tamis dont l'ouverture est la plus grande et noter sa masse R_1 . Effectuer la même opération pour le tamis immédiatement inférieur et noter sa masse retenue comme R_2 .

Poursuivre la même opération pour tous les tamis de la colonne, afin d'obtenir les masses des différents lots de matières retenues et enregistrer ces masses comme R_3, R_4, R_n .

Peser la matière tamisée qui reste éventuellement dans la casserole et enregistrer sa masse comme P .

d) Calcul et expression des résultats

Enregistrer les différentes masses sur une feuille de données d'essai. Calcul la masse retenue sur chaque tamis en pourcentage de la masse sèche initiale M_1 .

Calculer le pourcentage cumulé de la masse sèche d'origine passant chaque tamis jusqu'au tamis exclusif de 0,063 mm.

- Calculer le pourcentage de fines f passant au tamis de 0,063 mm selon l'équation (2.1).

$$f = \frac{100P}{M_1} \quad (2.1)$$

Où :

M_1 est la masse séchée de la prise d'essai, en kilogrammes ;

P est la masse du matériau tamisé restant dans le bac, en kilogrammes [24].

- Calcul du coefficient de courbure granulométrique C_C

Le coefficient de courbure est obtenu par la relation (2.2).

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10}) \times (D_{60})} \quad (2.2)$$

Où :

D_{10} est le diamètre des particules correspondants à 10 % de tamisât ;

D_{30} est le diamètre des particules correspondants à 30 % de tamisât ;

D_{60} est le diamètre des particules correspondants à 60 % de tamisât.

- Calcul du coefficient d'uniformité granulométrique C_U

Le coefficient de courbure est obtenu par la relation (2.3).

$$C_U = \frac{(D_{60})}{(D_{10})} \quad (2.3)$$

Où :

D_{10} est le diamètre des particules correspondants à 10 % de tamisât ;

D_{60} est le diamètre des particules correspondants à 60 % de tamisât [25].

e) Interprétation et forme de la courbe granulométrique

Le Tableau 2.2 donne l'interprétation de la forme de la courbe granulométrique en fonction du coefficient d'uniformité et de courbure.

Tableau 2.2 - Forme de la courbe granulométrique [25]

Terme	C_U	C_c
Uniformément graduée	< 3	< 1
Mal graduée	3 à 6	< 1
Moyennement graduée	6 à 15	< 1
Bien graduée	> 15	1 à 3
Discontinue	> 15	< 0,5

2.3.2 Masse volumique absolue [26]

L'essai de la détermination de la masse volumique est réalisé conformément à la norme NF EN 1097-6.

La masse volumique absolue et le taux d'absorption d'eau sont déterminés après pré-séchage puis immersion dans l'eau pendant 24 h.

a) Principe :

La masse volumique réelle est calculée à partir du rapport masse/volume. La masse est déterminée en pesant la prise d'essai saturée surface sèche et de nouveau après séchage à l'étuve. Le volume est calculé à partir de la masse du volume d'eau déplacé.

b) Appareillage

- Étuve ventilée ;
- Balance ;
- Plateaux ;
- Pycnomètre, constitué d'un flacon en verre, ou tout autre récipient approprié, d'une capacité comprise entre 1 000 ml et 5 000 ml ;
- Entonnoir.

c) Préparation de la prise d'essai

Tableau 2.3 - Masse minimale des prises d'essai [22]

Dimension supérieure des granulats (D) (mm)	Masse minimale des prises d'essai (kg)
31,5	5
16	2
8	1
Pour les autres valeurs de D, la masse initiale de la prise d'essai peut être déterminée par l'interpolation à partir des masses spécifiées.	

d) Mode opératoire d'essai :

- Peser le récipient remplie d'eau et noter la masse M_3 .
- Immerger la prise d'essai préparée d_0 / D_0 dans le récipient contenant de l'eau, le récipient n'étant pas rempli. Faire déborder le récipient en rajoutant de l'eau et placer le couvercle en évitant de piéger de l'air dans le récipient. Puis sécher l'extérieur du récipient et le peser, M_2 .
- Après 24h, Retirer les granulats de l'eau et les laisser s'égoutter quelques minutes, transférer la prise d'essai égouttée sur l'un des chiffons absorbants. Sécher doucement en surface les granulats, puis les transférer sur un deuxième chiffon une fois que le premier n'absorbe plus d'eau. Bien étaler les granulats sur ce chiffon en une seule couche et les laisser exposés à l'air libre mais à l'abri des rayons du soleil ou de toute autre source de chaleur jusqu'à ce que les films d'eau visibles aient disparu, les granulats gardant toutefois un aspect humide.
- Transférer la prise d'essai saturée et séchée en surface sur un plateau et peser les granulats M_1 . Sécher les granulats dans une étuve ventilée à une température de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante. Laisser refroidir à température ambiante et peser, M_4 .
- Si l'essai est réalisé uniquement pour déterminer la masse volumique absolue, on ne mesure que M_2 , M_3 et M_4 .

e) Calcul et expression des résultats

Calcul de la masse volumique absolue (ρ_a en Mg/m^3) à l'aide de la formule (2.4).

Masse volumique absolue :

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (2.4)$$

Où :

ρ_w est la masse volumique de l'eau à la température d'essai, en Mg/m^3 ;

M_1 est la masse la prise d'essai saturée et séchée en surface, en grammes (g) ;

M_2 est la masse du récipient contenant l'échantillon de granulats saturés et l'eau, en gramme (g) ;

M_3 est la masse du récipient rempli d'eau uniquement, en grammes (g) ;

M_4 est la masse de la prise d'essai séchée à l'étuve dans l'air, en grammes ; (g).

Arrondir les valeurs de la masse volumique à 0,01 Mg/m³ près.

2.3.3 Teneur en eau [27]

L'essai de la teneur en eau est réalisé conformément à la norme NF EN ISO 17892-1. La teneur en eau est requise comme guide lors de la classification d'un sol naturel et comme critère de contrôle des sols compactés, elle est mesurée sur des échantillons utilisés pour la plupart des essais de sols aussi bien en place qu'en laboratoire. La méthode de séchage à l'étuve est la méthode de référence utilisée dans la pratique courante des laboratoires.

a) Appareillage :

- L'étuve ;
- Balance ;
- Récipients pour éprouvettes.

b) Mode opératoire :

- Placer l'éprouvette dans un récipient sec et propre, de masse connue (m_c) et déterminer la masse totale. Consigner cette valeur (m_1).
- Après séchage de l'éprouvette jusqu'à masse constante ou pendant la durée minimale requise, retirer le récipient la contenant de l'étuve.
- Déterminer la masse du récipient et de l'éprouvette séchée. Consigner cette valeur (m_2).

c) Calcul et expression des résultats :

La teneur en eau du sol doit être calculée selon l'équation (2.5).

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_c} \times 100 = \frac{m_w}{m_d} \times 100 \quad (2.5)$$

Où :

W est la teneur en eau (%) ;

m_1 est la masse du récipient et de l'éprouvette de sol humide (g) ;

m_2 est la masse du récipient et de l'éprouvette de sol sec (g) ;

m_c est la masse du récipient (g) ;

m_w est la masse de l'eau (g) ;

m_d est la masse de l'éprouvette de sol sec (g).

2.3.4 Essai Los Angeles [28]

L'essai de Los Angeles est réalisé conformément à la norme SIST EN 1097-2. Cet essai s'applique aux granulats naturels, manufacturés ou recyclés utilisés dans le bâtiment et le génie civil.

a) Appareillage

- Tamis de contrôle : 1.6 mm, 10 mm, 11.2mm, 14mm, 16 mm, 22.4 mm et 31.5 mm ;
- Balance ;
- Four ventilé ;
- Brosse et bols ;
- Machine d'essai Los Angeles.

La Figure 2.5 présente l'image de la machine Los Angeles.



Figure 2.5 - Appareil de Los Angeles

b) Principe

Un échantillon d'agrégat est roulé avec des billes d'acier dans un tambour rotatif. Une fois le laminage terminé, la quantité de matériau retenue sur le tamis de 1,6 mm est déterminée.

c) Préparation du test

L'essai est effectué sur des granulats passants au tamis 14 mm et retenus au tamis 10 mm. En outre, la granulométrie de la partie testée doit être conforme à au moins l'une des exigences suivantes :

- Entre 60% et 70% passant au tamis de 12,5 mm ;
- Entre 30% et 40% passant au tamis de 11,2 mm ;

Tamiser l'échantillon de laboratoire à l'aide de tamis de 10 mm, 11,2 mm (ou 12,5 mm) et 14 mm afin d'obtenir des fractions séparées dans les plages de 10 mm à 11,2 mm (ou 12,5 mm) à 14 mm. La prise d'essai doit avoir une masse de (5000 ± 5) g.

Pour les granulats recyclés, une procédure d'essai pour la fraction de taille 16/31,5 mm, avec comme tamis intermédiaire de 22,4 mm.

L'essai est effectué sur des granulats passants au tamis 31,5 mm et retenus au tamis 16 mm. En outre, la granulométrie de la partie testée doit être conforme au pourcentage de passant au tamis intermédiaire 22,4 mm de 45% à 55%.

d) Calcul et expression des résultats

Calculer le coefficient de Los Angeles à partir de formule (2.6).

$$LA = \frac{5000 - m}{50} \quad (2.6)$$

Où :

m est la masse retenue sur le tamis 1,6 mm, en grammes, masse laver sur tamis 1,6 mm et sécher jusqu'à atteindre la masse constante.

2.3.5 Essai Proctor [29]

Ces caractéristiques sont la teneur en eau optimale et la densité sèche optimale. La norme NF P 94-093 s'applique aux matériaux définis dans la classification NF P 11-300, ($D_{\max} < 50$ mm), qu'ils soient naturels ou traités avec de la chaux et/ou des liants hydrauliques.

$$\text{« Énergie » de compactage (exprimée en KNm/m}^3\text{)} = \frac{N \times H \times m \times g}{V} \quad (2.7)$$

Où :

N est le nombre total de coups ;

H est la hauteur de chute de la dame ;

m est la masse de la dame ;

g est l'accélération de la pesanteur ;

V est le volume du matériau compacté dans le moule.

a) Principe de l'essai

Les caractéristiques de compactage Proctor d'un matériau sont déterminées à partir des essais dits : Essai Proctor normal ou Essai Proctor modifié.

Les deux essais sont identiques dans leur principe, seules diffèrent les valeurs des paramètres qui définissent l'énergie de compactage appliquée, ces différents paramètres sont la masse de la dame utilisée, la hauteur de chute et le nombre de couche.

Le principe de ces essais consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnelle. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.

D'une manière générale cette courbe, appelée courbe Proctor, présente une valeur maximale de la masse volumique du matériau sec qui est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau. Ce sont ces deux valeurs qui sont appelées caractéristiques de compactage Proctor normal ou modifié suivant l'essai réalisé.

b) Appareillage :

- Un socle de compactage ;
- Une moule Proctor ;

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

- Une dame de compactage manuelle ;
- Une règle à araser ;
- Tamis d'ouverture de mailles 20 mm ;
- Balances ;
- Des récipients.

c) Préparation des éprouvettes

Le compactage de l'échantillon de matériau doit être effectué dans un moule cylindrique dont les dimensions sont fonction de la classe granulaire de l'échantillon de matériau.

Le Tableau 2.4 présente les caractéristiques des moules Proctor.

Tableau 2.4 - Caractéristique des moules Proctor [29]

Type d'essai	Caractéristique de l'essai	Symbole	Dimension	Moule Proctor	
				A	B
Essai Proctor normal	Masse de la dame A	M	Kg	2,5	2,5
	Diamètre de la dame	D	Mm	50	50
	Hauteur de chute	H	Mm	305	305
	Nombre de couche	–	–	3	3
	Nombre de coups par couche	–	–	25	56
Essai Proctor modifié	Masse de la dame A	M	Kg	4,5	4,5
	Diamètre de la dame	D	Mm	50	50
	Hauteur de chute	H	Mm	457	457
	Nombre de couche	–	–	5	5
	Nombre de coups par couche	–	–	25	56

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

La Figure 2.6 illustre la répartition des coups de la dame sur une couche pour différents moules.

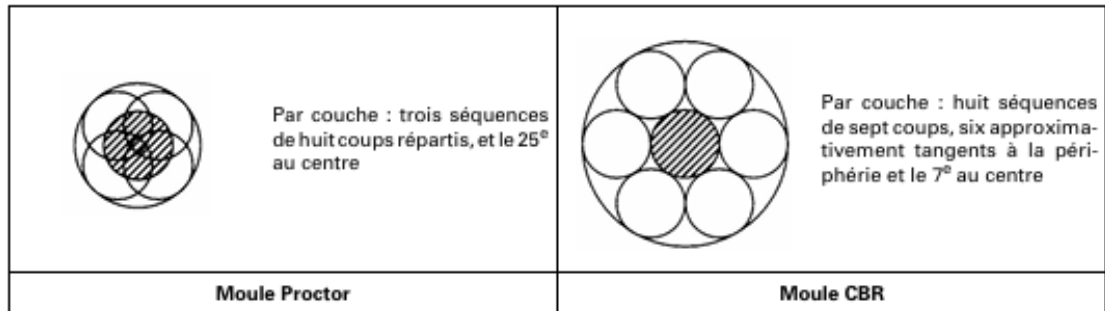


Figure 2.6 - Schéma de principe de la répartition des coups de la dame sur une couche

La Figure 2.7 présente la moule Proctor, la dame et la règle à araser



Figure 2.7 - Moule Proctor

d) Préparation des éprouvettes

La masse totale de matériau nécessaire à l'exécution d'un essai doit permettre de faire un prélèvement différent pour chaque point de la courbe Proctor.

L'essai présenté est réalisé sur une fraction 0/20 mm du matériau.

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

- Lorsque le matériau comporte une proportion inférieure ou égale à 30 % d'éléments excédant 20 mm, il est encore possible de déterminer leurs caractéristiques de compactage moyennant l'application d'une correction apportée aux caractéristiques mesurées sur la fraction 0/20.
- Lorsque la proportion des éléments supérieurs à 20 mm dépasse 30 %, l'essai peut être réalisé sur la fraction 0/20, mais son interprétation est alors limitée à l'évaluation de son état hydrique.
- Ensuite, le matériau est écrêté à 20 mm et seul le tamisât est conservé pour l'exécution de l'essai. Le matériau est homogénéisé et divisé par appréciation visuelle en au moins cinq parts égales.

e) Expression des résultats

Pour chaque éprouvette compactée il convient de calculer :

- La teneur en eau en pourcentage ;
- La masse volumique du matériau sec tenant compte du volume réel du moule (Mg/m^3).

La Figure 2.8 illustre une moule Proctor remplie d'un matériau compacté.



Figure 2.8 - Moule Proctor remplie du matériau compacté

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

f) Traçage

Sur un repère normé, représenter les masses volumiques sèches sur l'axe des ordonnées, les teneurs en eau correspondantes étant représentées sur l'axe des abscisses. Tracer la courbe d'ajustement des points du diagramme et repérer sur cette courbe la position correspondante à la valeur maximale. Relever les valeurs de la masse volumique sèche et de la teneur en eau correspondant à ce point.

Le Tableau 2.5 et la Figure 2.9 présentent un exemple des résultats de l'essai Proctor.

Tableau 2.5 - Exemple des points expérimentaux [29]

ρ_s		Points expérimentaux (facultatif)						
<input type="checkbox"/> Estimée		W (%)	15,20%	17,30%	19,10%	21,00%	22,80%	
<input checked="" type="checkbox"/> Mesurée	2,69 Mg/m ³	ρ_d (Mg/m ³)	1,62	1,69	1,72	1,68	1,62	

Résultat			
W_{OPN}	19,10%	W_{OPM}	
P_{dOPN}	1,72%	P_{dOPM}	

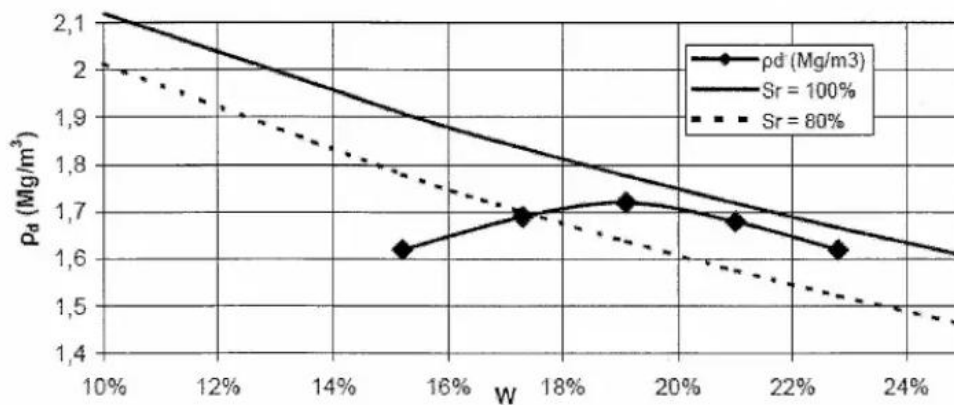


Figure 2.9 - Exemple de traçage des courbes de l'essai [29]

2.3.6 Essai CBR [30]

L'essai CBR est réalisé conformément à la norme NF P 94-078.

a) But

Cet essai permet de déterminer les différents indices CBR d'un sol ou d'un matériau granulaire utilisé dans la construction des ouvrages en terre ou des assises de chaussées. Les différents indices sont : Indice CBR après immersion ; Indice CBR immédiat : Grandeurs utilisées pour caractériser un sol ou un matériau élaboré, en tant que support ou constituant d'une structure de chaussée. L'Indice Portant Immédiat : Grandeur utilisée pour évaluer l'aptitude d'un sol ou d'un matériau élaboré à supporter la circulation des engins de chantiers.

b) Principe

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

c) Appareillage :

❖ Matériel de confection des éprouvettes :

Il comprend :

- Le moule CBR ;
- La dame de compactage ;
- L'ensemble des accessoires (plaque de base, rehausse, disque d'espacement, règle à araser, ...)
- Le matériel d'usage courant (balances, étuve, bacs).
- ❖ Matériel de poinçonnement
- Il comprend une presse d'une capacité efficace d'au moins 50 KN et possédant une course d'au moins 10 mm.

d) Confection des éprouvettes et exécution de l'essai

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

Si le sol contient des éléments supérieurs à 20 mm dans une proportion inférieure à 30%, ils sont éliminés par tamisage. L'essai est alors réalisé sur la fraction restante.

On procède ensuite à la préparation du sol et au compactage dans les moules suivant les modalités décrites dans la norme NF 94-093.

La Figure 2.10 illustre une moule CBR remplie d'un matériau compacté, et La Figure 2.11 illustres l'essai CBR par immersion.



Figure 2.10 - Moule CBR remplie du matériau compacté



Figure 2.11 - Moules CBR immergées

e) Expression des résultats

On calcule les valeurs des indices CBR à l'aide des relations (2.8) et (2.9).

$$\frac{\text{Effort de pénétration à 2,5 mm d'enfoncement (en kn)}}{13,35} \times 100 \quad (2.8)$$

$$\frac{\text{Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (en kn)}}{19,93} \times 100 \quad (2.9)$$

Les valeurs de 13,35 KN et 19,93 KN sont respectivement les forces provoquant l'enfoncement du piston de 2,5mm et 5mm sur le matériau conventionnel de référence.

L'indice recherché est par convention la plus grande de ces deux valeurs.

2.4 Conclusion partielle

Le présent chapitre a détaillé les différentes étapes méthodologiques mises en œuvre pour atteindre les objectifs de cette recherche, visant la caractérisation des déchets issus de la démolition en vue de leur réutilisation dans la construction routière. À travers une approche rigoureuse, nous avons défini le cadre de l'étude, en précisant les essais qui ont consisté à l'identification et caractérisation des déchets.

Chaque essai est exécuté selon une norme, l'analyse granulométrique a été déterminé par voie sèche suivant la norme NF EN 933-1 afin de connaître la distribution granulométrique, la masse volumique a été déterminé suivant la norme NF EN 1097-2, La teneur en eau a été déterminée suivant la norme NF EN ISO 17892-1, l'essai Proctor nous a permis de déterminer la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale des matériaux après compactage selon la norme NF EN 94-093 et l'essai CBR selon la norme NF P 94-078 nous a permis de déterminer la portance des matériaux, c'est-à-dire l'aptitude des matériaux à supporter les charges dans les conditions les plus défavorables.

Chapitre 3

Présentation et interprétation de résultats

3.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats et l'interprétation des différents essais normalisés réalisés sur nos trois échantillons, ayant permis leur valorisation. Il couvre la caractérisation physique et les propriétés mécaniques des matériaux.

3.2 Caractéristiques des matériaux

Dans cette section nous présentons la composition granulométrique, la teneur en eau et les résultats de la masse volumique absolue.

3.2.1 La composition granulométrique

Cette analyse a été réalisée en fonction des différents fuseaux granulométriques des graves naturelles concassées utilisées dans les deux couches. Les figures suivantes présentent les différents types de courbes obtenues, ainsi que les limites maximale et minimale de chaque fuseau granulométrique.

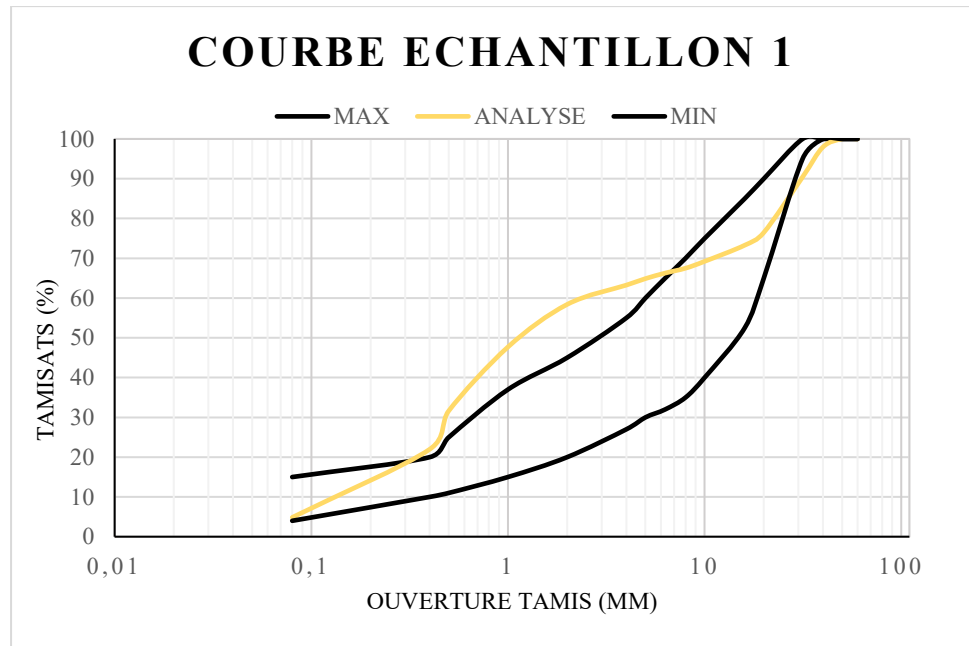


Figure 3.1 - Courbe granulométrique échantillon 1

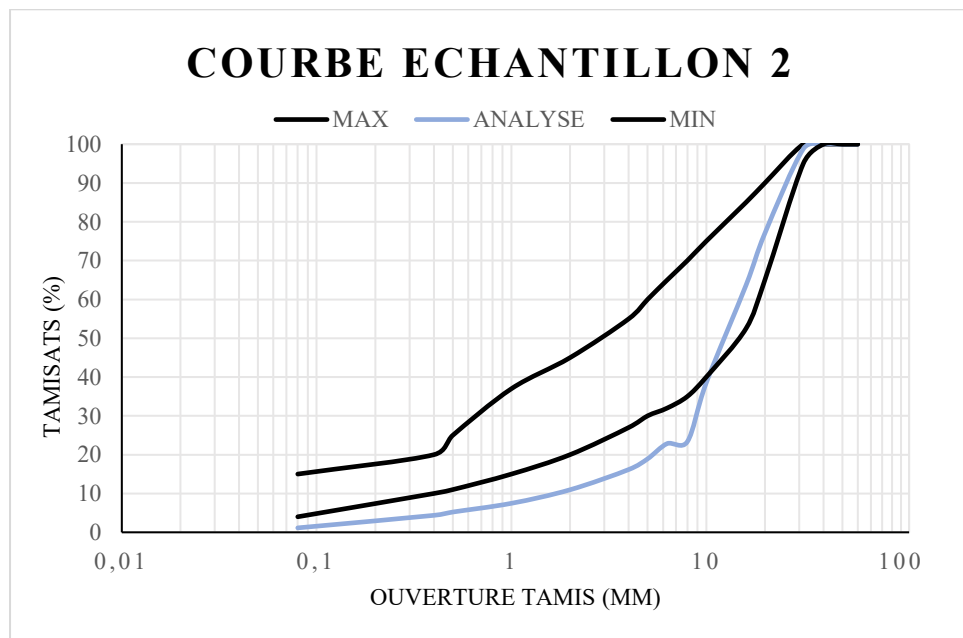


Figure 3.2 - Courbe granulométrique échantillon 2

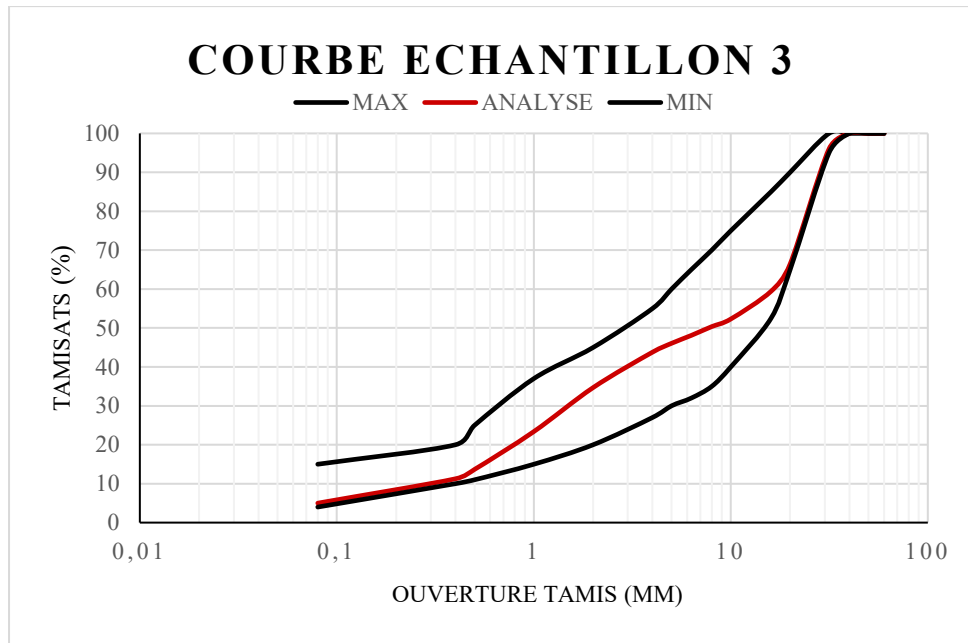


Figure 3.3 - Courbe granulométrique échantillon 3

Il est constaté que la granulométrie des deux premiers échantillons ne correspond pas aux fuseaux granulométriques définis dans le Tableau 1.10 et Tableau 1.13.

En effet, les courbes obtenues sont loin d'être parallèles aux limites maximale et minimale proposées par le fuseau granulométrique du CEBTP.

Plus spécifiquement :

- L'échantillon 1 contient un pourcentage élevé de granulats moyens, ce qui implique une proportion trop importante de sable et de fines par rapport aux recommandations.
- L'échantillon 2, quant à lui, présente moins de particules sableuses et moins de particules fines par rapport aux recommandations.

Une correction faite par concassage a été apportée, permettant ainsi l'obtention des courbes présentées dans les figures suivantes.

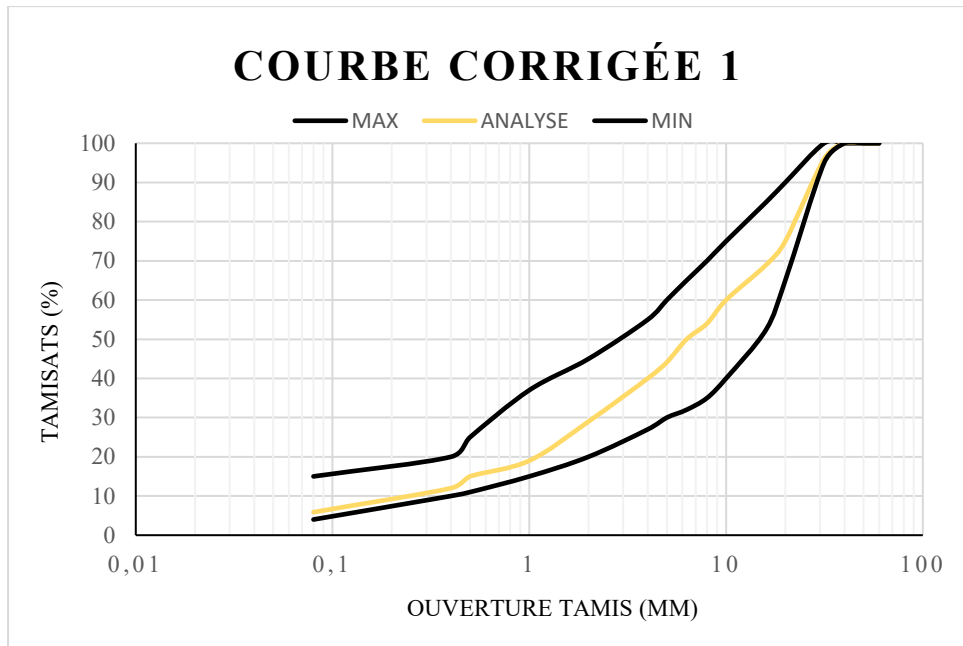


Figure 3.4 - Courbe granulométrique corrigée échantillon 1

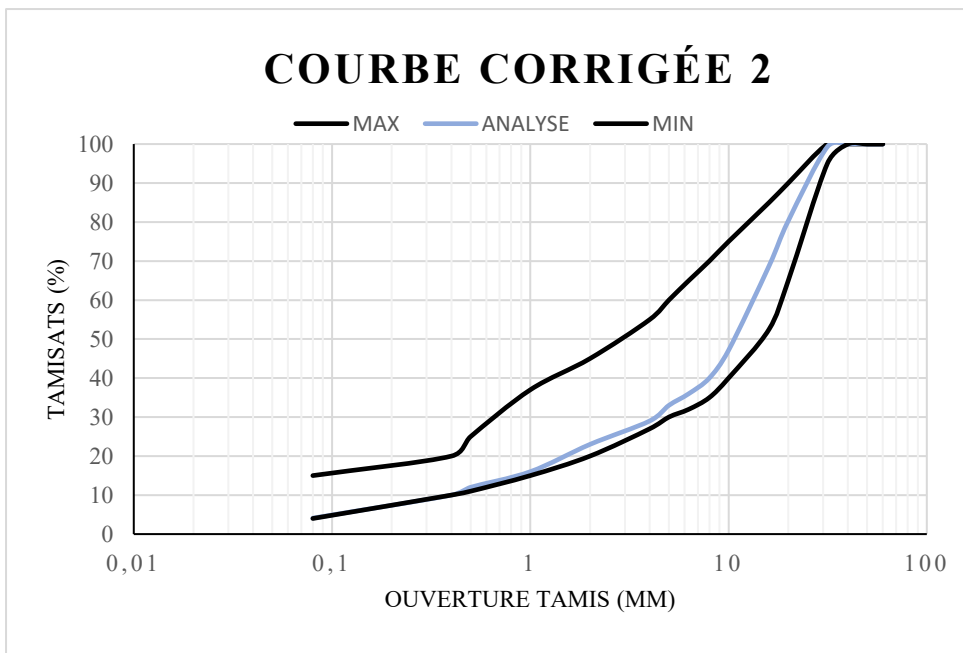


Figure 3.5 - Courbe granulométrique corrigée échantillon 2

Les différents tableaux relatifs à ces analyses sont présentés en annexe A.

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

Les valeurs correspondant au pourcentage de fines pour chacun des trois échantillons sont présentées dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 - Résultats du pourcentage de fines

	M_1 (Kg)	P (Kg)	f (%)
Echantillon 1	28,96	1,2	4,14
Echantillon 2	29,7	0,212	0,71
Echantillon 3	29,8	0,7	2,32

Il ressort du Tableau 3.1 que l'échantillon 1 présente le pourcentage le plus élevé, il pourrait indiquer que le béton initialement utilisé, il y a 20 contenait des agrégats avec une proportion de fines plus importante, le pourcentage de l'échantillon 2 suggère que les agrégats étaient de très bonne qualité en termes de propreté et de granulométrie, l'échantillon 3 se situe entre les deux.

La comparaison du pourcentage de fines de trois échantillons est illustrée à la Figure 3.6.

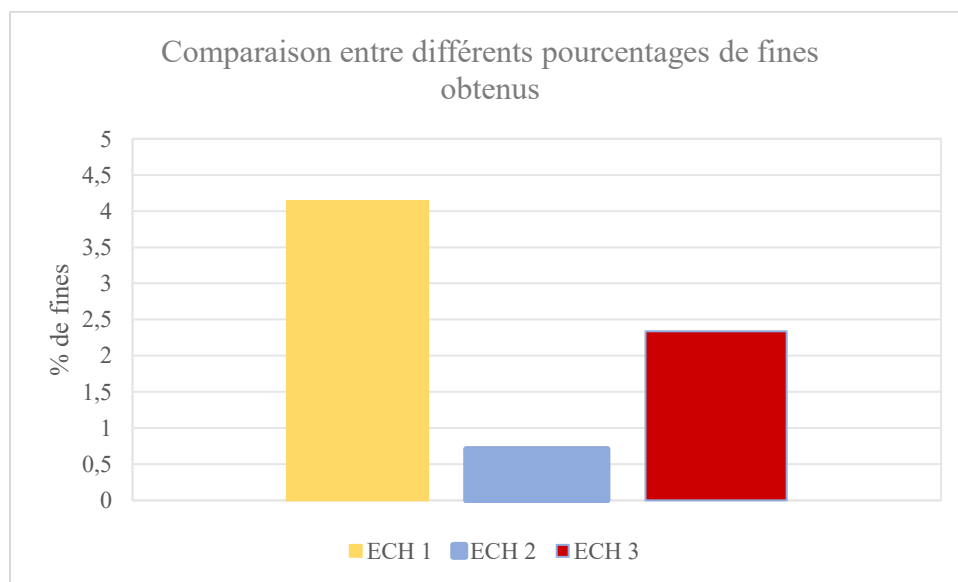


Figure 3.6 - Comparaison entre différents pourcentages de fines

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

Les valeurs des coefficients d'uniformité et de courbure des trois échantillons sont présentées dans le Tableau 3.2

Tableau 3.2 - Résultats du coefficient d'uniformité et de courbure

	D ₆₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₁₀ (mm)	C _U	C _C
Echantillon 1	10	2,2	0,23	43,47	2,1
Echantillon 2	14	4,3	0,4	35	3,3
Echantillon 3	17	1,6	0,29	58,62	0,52

Il ressort du Tableau 3.2 les coefficients d'uniformité et les coefficients de courbure, en tenant compte des deux coefficients précédemment présentés et du Tableau 2.2, nous pouvons conclure que la courbe granulométrique de l'échantillon 1 montre une courbe bien graduée. L'échantillon 2 quant à lui, se rapproche d'une bonne graduation, bien qu'elle présente une gradation discontinue, tandis que l'échantillon 3 présente une courbe irrégulière avec également une gradation discontinue.

3.2.2 Les teneurs en eau

Le Tableau 3.3 présente les valeurs de la teneur en eau initiale déterminées pour chacun des trois échantillons. Cette teneur en eau constitue un paramètre de départ essentiel dans le cadre de l'essai Proctor, puisqu'elle permet d'évaluer l'état hydrique du matériau avant compactage. Les tableaux relatifs à la détermination des différentes masses sont regroupés en annexe B.

Tableau 3.3 - Résultats de la teneur en eau

	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m _C (g)	W (%)
Echantillon 1	35,74	35,27	14,42	2,23
Echantillon 2	32,41	31,80	14,87	3,6
Echantillon 3	32,32	32,14	14,94	1,04

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

Il ressort du Tableau 3.3, trois teneurs en eau différentes qui peuvent varier en fonction de l'ancienneté, de l'origine des matériaux et de leurs conditions environnementales.

3.2.3 Les masses volumiques absolues

Le Tableau 3.4 présente les valeurs des différentes masses volumiques absolues déterminées pour chacun des trois échantillons.

Tableau 3.4 - Résultats masse volumique absolue

	M ₂ (g)	M ₃ (g)	M ₄ (g)	ρ _a (Mg/m ³)
Echantillon 1	1350	1045	494	2,6
Echantillon 2	1338	1045	488	2,5
Echantillon 3	1350	1045	493	2,62

Les valeurs de masse volumique absolue obtenues pour les trois échantillons, comprises entre 2,50 et 2,62 Mg/m³. Il est à noter que l'âge et l'exposition de ces bétons n'ont pas significativement affectées la masse volumique absolue car la masse volumique est une propriété intrinsèque des matériaux solides, c'est pourquoi nous observons des valeurs très similaires malgré les différences d'âge. Ils s'inscrivent dans la plage usuelle des matériaux utilisés en construction routière.

3.2.4 Los Angeles

Le Tableau 3.5 présente les valeurs du coefficient Los Angeles déterminées pour chacun des trois échantillons, permettant d'évaluer leur résistance à l'usure par abrasion.

Tableau 3.5 - Résultats de Los Angeles

	m (g)	LA
Echantillon 1	3474	31
Echantillon 2	3140	37
Echantillon 3	3355	33

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

La Figure 3.7 illustre la comparaison des indices Los Angeles obtenus pour les trois échantillons.

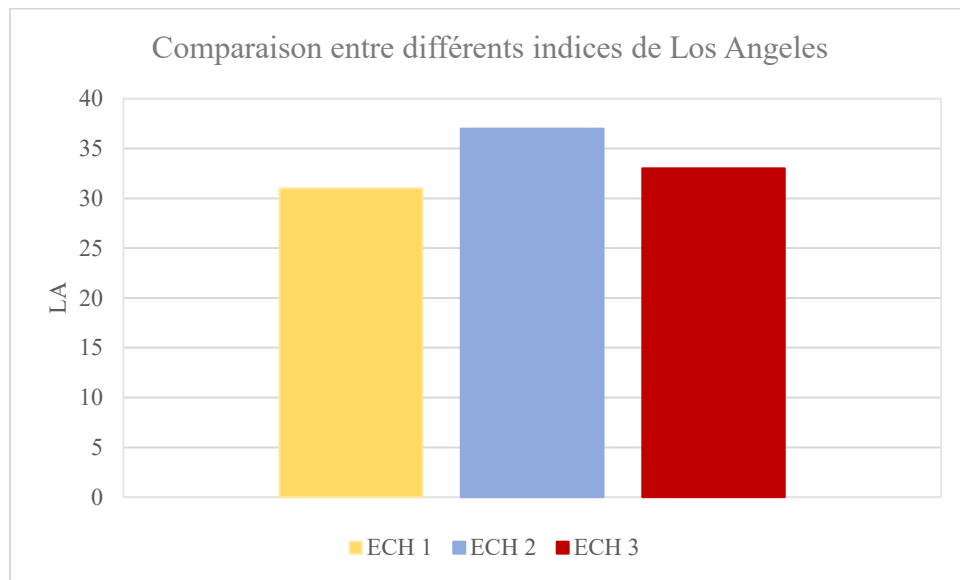


Figure 3.7 - Comparaison entre différents indices de Los Angeles

Il ressort du Tableau 3.5 que l'échantillon 1 présente une résistance meilleure à la fragmentation et à l'usure, suivi de l'échantillon 3 qui présente une résistance intermédiaire et enfin l'échantillon 2 qui présente le coefficient le plus élevé ce qui traduit une faible résistance. Les variations observées (de 31 à 37) reflètent plutôt des différences dans la nature géologique ou la qualité des roches mères dont sont issus les granulats de chaque béton.

Les indices de Los Angeles obtenus sont conformes aux exigences fixées pour les matériaux destinés aux couches de fondation et de couche de base, conformément aux spécifications définies dans le Tableau 1.11 et le Tableau 1.12. Les trois échantillons sont également conformes aux exigences du GTR 2023 pour les matériaux issus de la démolition et de la déconstruction, pouvant être utilisés comme remblai ou en couche de forme.

3.2.5 Les résultats de l'essai Proctor

Pour cet essai, le choix s'est porté sur le Proctor modifié, réalisé à l'aide d'une dame de 4,481 Kg, d'un diamètre de 4,5 cm, avec une hauteur de chute de 46 cm et appliquant 55 coups par couche.

Cet essai a permis de déterminer la teneur en eau optimale, correspondant au point où le matériau atteint sa compacité maximale.

La Figure 3.8 illustre la courbe Proctor obtenue de l'échantillon 1.

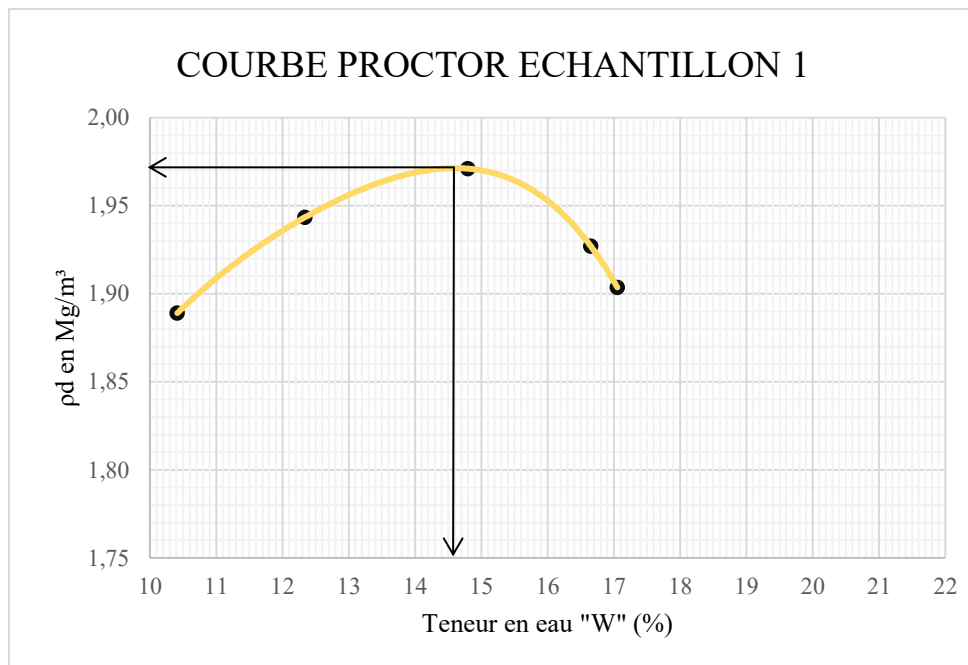


Figure 3.8 - Courbe Proctor échantillon 1

Le Tableau 3.6 présente les résultats de l'essai Proctor modifié sur l'échantillon 1.

Tableau 3.6 - Résultats de l'essai Proctor - échantillon 1

W (%)	10,41	12,34	14,8	16,65	17,05
pd (Mg/m³)	1,889	1,944	1,971	1,927	1,904
pdmax (Mg/m³)	1,972				
Wopt. (%)	14,6				

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

La Figure 3.9 illustre la courbe Proctor obtenue de l'échantillon 2.

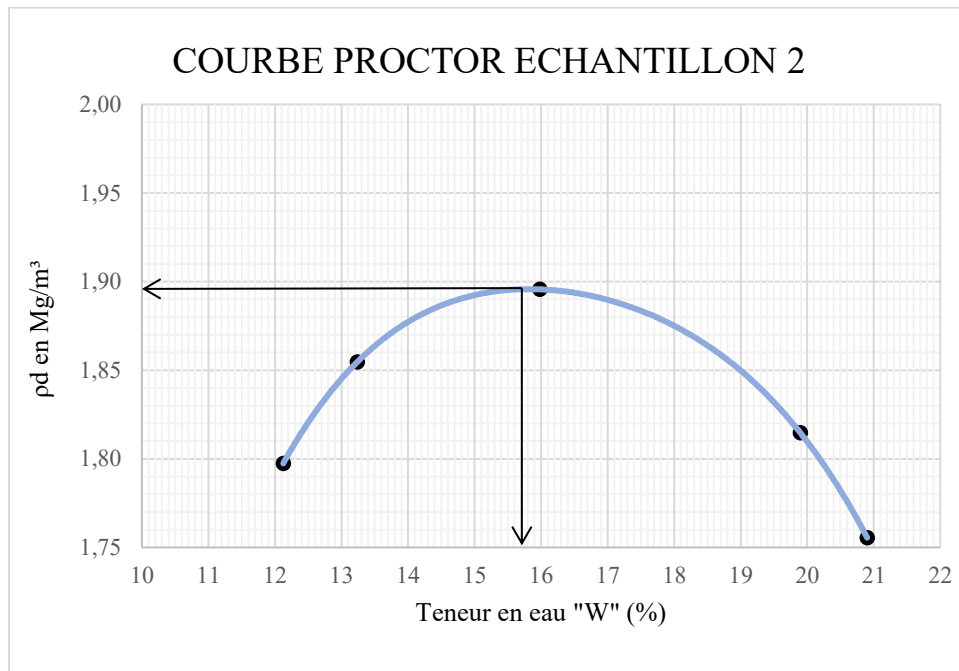


Figure 3.9 - Courbe Proctor échantillon 2

Le Tableau 3.7 présente les résultats de l'essai Proctor modifié sur l'échantillon 2.

Tableau 3.7 - Résultats de l'essai Proctor - échantillon 2

W (%)	12,12	13,24	15,98	19,9	20,9
ρd (Mg/m³)	1,797	1,855	1,896	1,815	1,756
ρdmax (Mg/m³)	1,898				
Wopt. (%)	15,7				

La Figure 3.10 illustre la courbe Proctor obtenue de l'échantillon 3.

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

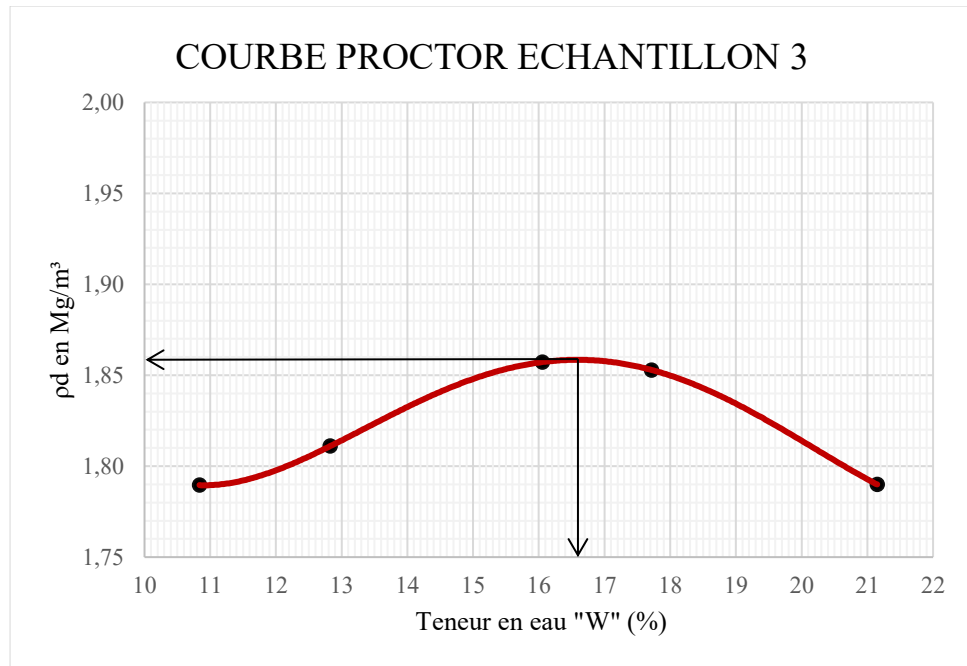


Figure 3.10 - Courbe Proctor échantillon 3

Le Tableau 3.8 présente les résultats de l'essai Proctor modifié - échantillon 3.

Tableau 3.8 - Résultats Proctor échantillon 3

W (%)	10,84	12,83	16,05	17,72	21,15
ρd (Mg/m ³)	1,79	1,811	1,857	1,853	1,79
ρdmax (Mg/m ³)	1,859				
Wopt. (%)	16,6				

La Figure 3.11 illustre les différentes courbes obtenues pour les trois échantillons.

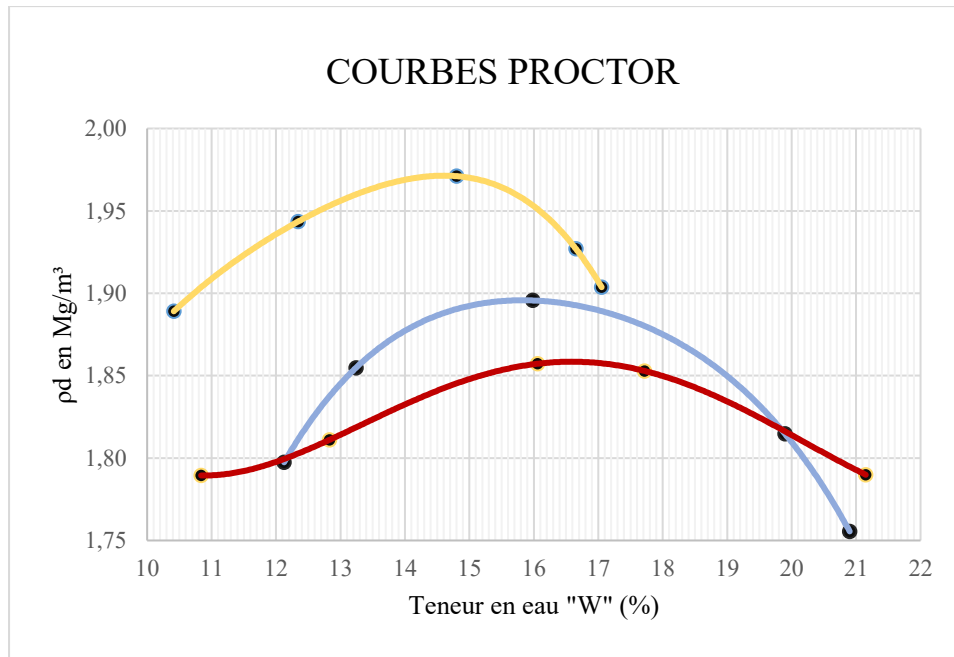


Figure 3.11 - Courbes Proctor

Les tableaux relatifs à la détermination des différentes masses volumiques sèches et différentes teneurs en eau sont regroupés en annexe C.

L'analyse des résultats de l'essai Proctor modifié révèle que l'échantillon 1 présente la masse volumique sèche maximale la plus élevée (1,972 Mg/m³) et la teneur en eau optimale la plus faible (14,6 %). Il est suivi de l'échantillon 2, qui présente des valeurs intermédiaires avec une masse volumique sèche 1,898 Mg/m³ et une teneur en eau optimale 15,7 %, enfin l'échantillon 3 qui a la masse volumique sèche la plus faible (1,895 Mg/m³) et la teneur en eau la plus élevée (16,6%). L'échantillon présente la masse volumique sèche la plus élevée des trois, cela implique qu'il est le plus dense et le plus compactable, il peut atteindre une meilleure compacité avec moins d'eau. Ce qui est généralement souhaitable pour la stabilité des remblais, des fondations etc. Les échantillons 2 et 3, bien que compactables, atteignent une densité maximale légèrement inférieure par rapport à l'échantillon 1. Cela pourrait être dû à des différences dans la granulométrie, la forme de particules ou la nature minéralogique du sol.

3.2.6 CBR (California Bearing Ratio)

Pour cet essai, nous avons opté pour la méthode d'évaluation des indices par immersion après quatre jours.

Le Tableau 3.9 présente les résultats obtenus aux enfoncements 2,5 et 5 mm, mesurés sous différentes énergies de compactage appliquées à l'échantillon 1.

Tableau 3.9 - Résultats aux enfoncements 2,5 et 5 mm de l'échantillon 1

Echantillon 1			
Enfoncement (mm)	56 coups Force (KN)	25 coups Force (KN)	10 coups Force (KN)
2,5	5	4,13	2,17
5	11,78	9,78	4,78

Le Tableau 3.10 présente les résultats de l'indice CBR ainsi que les choix que nous avons retenus.

Tableau 3.10 - Résultats de l'indice CBR pour l'échantillon 1

Indice CBR	2,5 mm	37,5	2,5 mm	30,9	2,5 mm	16,3
	5 mm	59,1	5 mm	49,1	5 mm	24
	Choix	59,1		49,1		24

Le Tableau 3.11 présente les valeurs des masses volumiques sèches correspondantes aux différentes énergies de compactage, les indices CBR retenus pour chaque condition de compactage, ainsi que le taux de gonflement observé dans chaque moule.

Tableau 3.11 - Masse volumique sèche en fonction de l'énergie de compactage échantillon 1

E. Compactage	W (%)	ρ_d (Mg/m ³)	CBR (%)	Gonflement (%)
5 × 56	14,6	1,972	59,1	0,04
5 × 25	14,6	1,873	49,1	0,01
5 × 10	14,6	1,775	24	0,04

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

La Figure 3.12 présente les courbes efforts-pénétration aux différentes énergies de compactage pour l'échantillon 1.

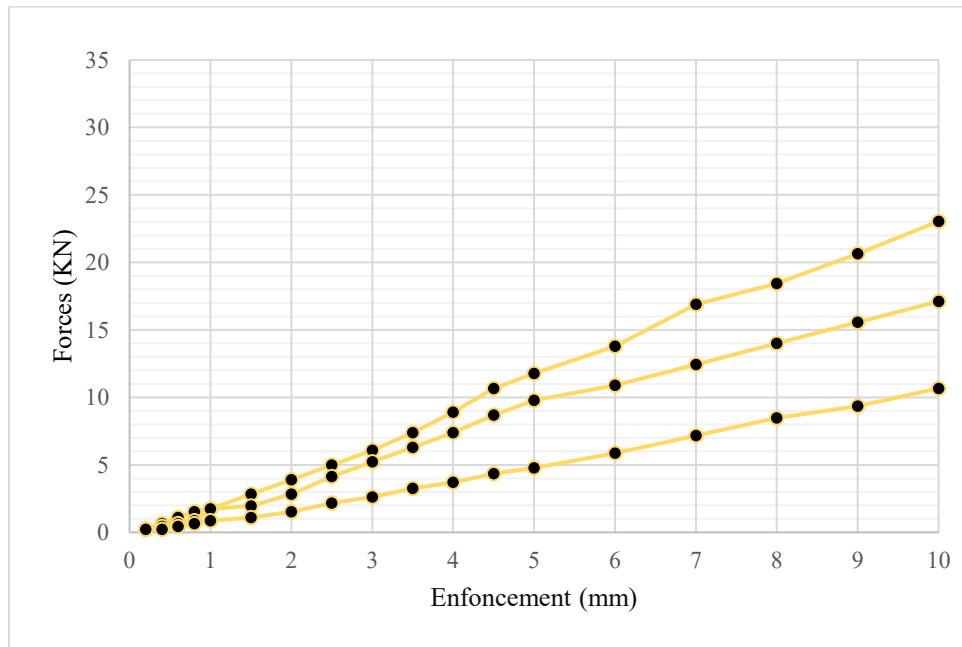


Figure 3.12 - Courbes efforts-pénétration échantillon 1

Le Tableau 3.12 présente les résultats obtenus aux enfoncements 2,5 et 5 mm, mesurés sous différentes énergies de compactage appliquées à l'échantillon 2.

Tableau 3.12 - Résultats aux enfoncements 2,5 et 5 mm de l'échantillon 2

Echantillon 2			
Enfoncement (mm)	56 coups Force (KN)	25 coups Force (KN)	10 coups Force (KN)
2,5	6,96	4,78	2,39
5	16,89	10,67	6,74

Le Tableau 3.13 présente les résultats de l'indice CBR ainsi que les choix que nous avons retenus.

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

Tableau 3.13 - Résultats de l'indice CBR de l'échantillon 2

Indice CBR	2,5 mm	52,1	2,5 mm	35,8	2,5 mm	17,9
	5 mm	84,7	5 mm	53,5	5 mm	33,8
	Choix	84,7		53,5		33,8

Le Tableau 3.14 présente les valeurs des masses volumiques sèches correspondantes aux différentes énergies de compactage, les indices CBR retenus pour chaque condition de compactage, ainsi que le taux de gonflement observé dans chaque moule.

Tableau 3.14 - Masse volumique sèche en fonction de l'énergie de compactage échantillon 2

E. Compactage	W (%)	ρ_d (Mg/m ³)	CBR (%)	Gonflement (%)
5 × 56	15,7	1,898	84,7	0,02
5 × 25	15,7	1,803	53,5	0
5 × 10	15,7	1,74	33,8	0

La Figure 3.13 présente les courbes efforts-pénétration aux différentes énergies de compactage pour l'échantillon 1.

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

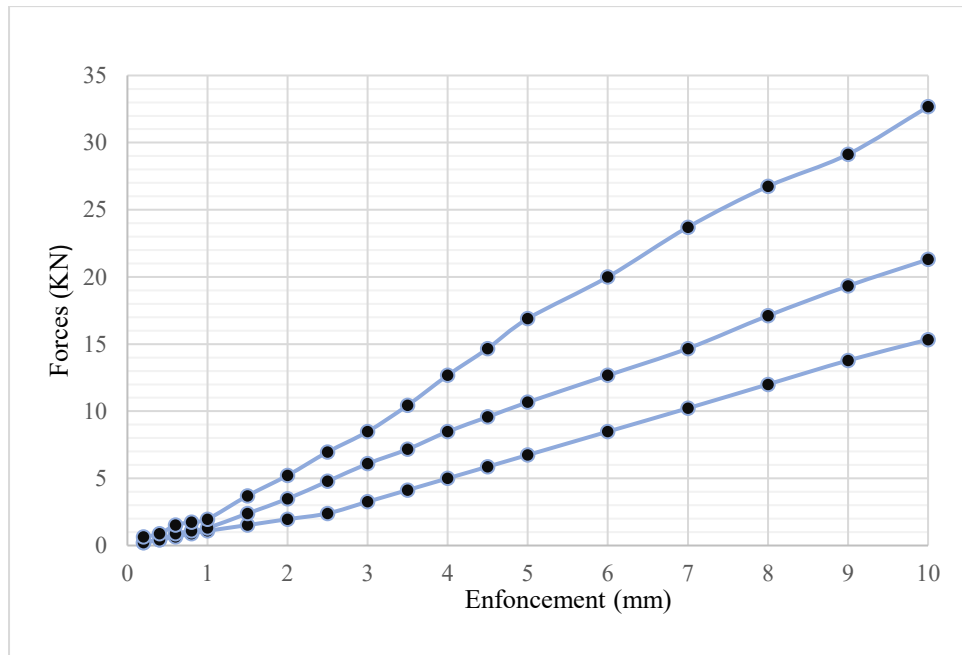


Figure 3.13 - Courbes efforts-pénétration échantillon 2

Le Tableau 3.15 présente les résultats obtenus aux enfoncements 2,5 et 5 mm, mesurés sous différentes énergies de compactage appliquées à l'échantillon 3.

Tableau 3.15 - Résultats aux enfoncements 2,5 et 5 mm de l'échantillon 3

Echantillon 3			
Enfoncement (mm)	56 coups Force (KN)	25 coups Force (KN)	10 coups Force (KN)
2,5	6,52	5	4,13
5	16,22	10,22	9,78

Le Tableau 3.16 présente les résultats de l'indice CBR ainsi que les choix que nous avons retenus.

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

Tableau 3.16 - Résultats de l'indice CBR de l'échantillon 3

Indice CBR	2,5 mm	48,8	2,5 mm	37,5	2,5 mm	30,9
	5 mm	81,4	5 mm	51,3	5 mm	49,1
	Choix	81,4		51,3		49,1

Le Tableau 3.17 présente les valeurs des masses volumiques sèches correspondantes aux différentes énergies de compactage, les indices CBR retenus pour chaque condition de compactage, ainsi que le taux de gonflement observé dans chaque moule.

Tableau 3.17 - Masse volumique sèche en fonction de l'énergie de compactage échantillon 3

E. Compactage	W (%)	ρ_d (Mg/m ³)	CBR (%)	Gonflement (%)
5 × 56	16,8	1,859	81,4	0,1
5 × 25	16,8	1,767	51,3	0
5 × 10	16,8	1,674	49,1	0

La Figure 3.14 présente les courbes efforts-pénétration aux différentes énergies de compactage pour l'échantillon 1.

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

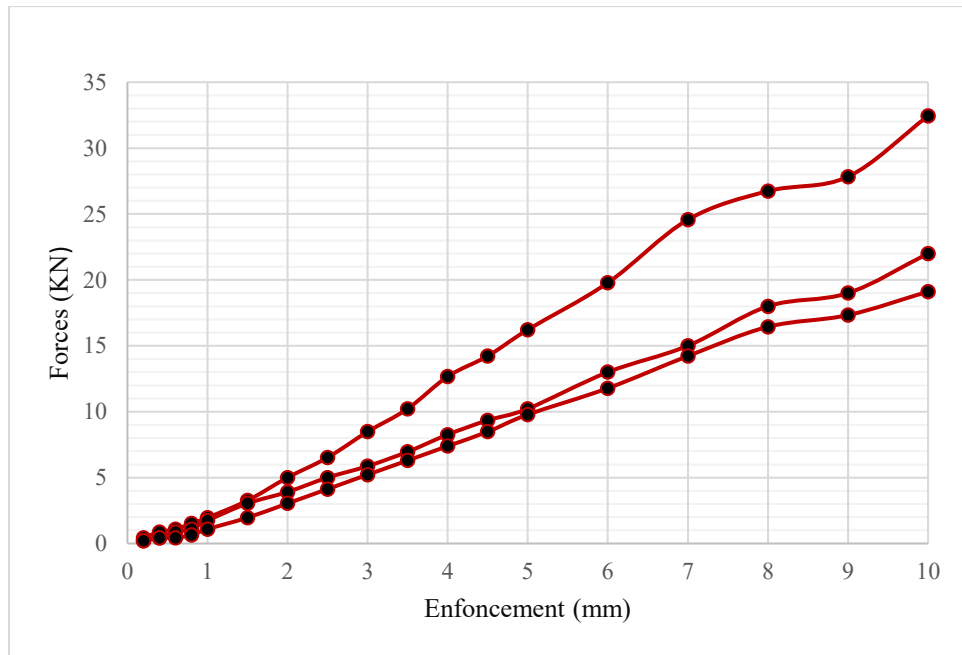


Figure 3.14 - Courbes efforts-pénétration échantillon 3

Les tableaux relatifs à la détermination des indices CBR sont regroupés en annexe D et E.

a) Interprétation des résultats

L'analyse des résultats obtenus pour les trois échantillons testés révèle des indices CBR très satisfaisants, avec des valeurs respectives de 49,1 %, 53,5 % et 51,3 % mesurées à 95 % de l'Optimum Proctor Modifié (OPM).

Les trois échantillons présentent des performances mécaniques globalement très bonne, avec un CBR supérieur à 49%, soit un CBR moyen de 51,3%. Ce qui le rend adaptés à une utilisation en infrastructure routière.

Pour les différentes couches :

- Pour les couches de forme de chantiers soumis à de fortes sollicitations mécaniques, un $CBR \geq 10$ est recommandé (page 21),
- Pour les couches de fondation, un $CBR \geq 30$ est exigé à 95 % de l'OPM (page 22),

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

- Pour les couches de base, un CBR ≥ 80 est souhaitable (page 24).

3.2.7 Synthèse des résultats et observations

Le Tableau 3.18 présente la synthèse de résultats obtenus pour chaque essai.

Tableau 3.18 - Synthèse des résultats obtenus

N°	Essais	Résultats 1	Résultats 2	Résultats 3	Observations et seuil
1	Analyse granulométrique Pourcentage de fines f coefficient d'uniformité C_U Coefficient de courbure C_C	4,14 % 43,47 2,1	0,71 % 35 3,3	2,32 % 58,62 0,52	$f < 10\%$ $C_U > 10\%$ Selon le CEBTP
2	Teneur en eau W	2,23%	3,60%	1,04%	1,04 <W> 3,60
3	Masse volumique absolue ρ_a	2,6 Mg/m ³	2,5 Mg/m ³	2,62 Mg/m ³	2,5 < ρ_a > 2,62
4	Los Angeles LA	 31	 37	 33	LA < 45, bonne résistance. GTR et CEBTP
5	Proctor modifié ρ_d Wopt	1,972 Mg/m ³ 14,6 %	1,898 Mg/m ³ 15,7 %	1,859 Mg/m ³ 16,6 %	$\rho_d > 1,8$ Mg/m ³ Peu de vide, bon compactage. Selon le GTR
6	CBR Indice CBR à 95 % de OPM Gonflement	 49,1 % 0 %	 53,5 % 0 %	 51,3 % 0 %	CBR > 30 Largement su- ffisant pour la couche de fon- dation et la cou- che de forme.
7	Classification des constituants de gravillons recyclés Flottants (FL) Indésirables (X1) Sulfate soluble dans l'eau	 < 5 % < 1 % < 0,7 %	 < 5 % < 1 % < 0,7 %	 < 5 % < 1 % < 0,7 %	Classe AR-A51 Selon le GTR, Utilisable en couche de for- me et comme remblai.

3.3 Conclusion partielle

Les différents échantillons analysés malgré leurs diverses provenances et différences d'âge, ont présenté des valeurs du coefficient de Los Angeles indiquant un bon comportement face à l'usure. Pour l'essai Proctor, une masse volumique sèche maximale proche témoignant d'une bonne compacité globale des matériaux et enfin l'essai CBR qui confirme une bonne performance, avec des taux de portance dépassant largement les seuils exigés pour les matériaux destinés aux couches de fondation et aux couches de forme. Les pourcentages de fines obtenus sont conformes aux exigences relatives aux matériaux utilisés dans l'assise, telles que définies respectivement dans le Tableau 1.11 et le Tableau 1.14.

Les échantillons analysés, composés uniquement de granulats issus de béton déconstruit, par hypothèse ils présentent une absence quasi totale d'éléments flottants (bois, plastiques, matières organiques), ce qui les classe en catégorie **FL5 (< 5 %)**. Les éléments indésirables non flottants (plâtre, bitume, matières organiques) sont également très peu présents (< 1 %), permettant leur classement en **classe X1**. Aucun gonflement n'a été observé après 4 jours d'immersion, indiquant une teneur en sulfates solubles négligeable (< 0,7 %). En conclusion, les trois échantillons répondent aux critères de la **catégorie AR-A51** définie dans le Tableau 1.3.

Conclusion générale

Notre travail de recherche a exploré le potentiel des granulats issus du béton déconstruit en tant que matériaux alternatifs pour la construction routière, répondant ainsi aux besoins croissants de matériaux et la gestion des ressources.

Ce travail a permis de démontrer qu'une valorisation efficace des matériaux recyclés issus de la déconstruction, notamment les bétons déconstruits, est possible dans le contexte de Goma. En réponse à une problématique locale marquée par l'encombrement des déchets de chantier, nous avons mené une étude expérimentale visant à caractériser les propriétés physiques et mécaniques de ces matériaux. Les échantillons analysés, issus de trois sites différents, ont révélé des performances encourageantes. Les essais granulométriques ont mis en évidence une bonne répartition des particules avec des pourcentages de fines très inférieurs aux limites réglementaires, un pourcentage de fines compris en **0,71 % à 4,14 %**, tandis que les masses volumiques sèches maximales obtenues au Proctor modifié varient de **1,859 à 1,972 Mg/m³**, avec des teneurs en eau optimales entre **14,6 % et 16,6 %**, montrant une bonne compacité des matériaux. L'indice de portance CBR a atteint en moyenne plus de **50 %** pour les trois échantillons à 95 % de l'OPM, ce qui dépasse largement les seuils requis pour les couches de fondation ($\geq 30 \%$) et de forme ($\geq 10 \%$) dans les ouvrages routiers selon **CEBTP REVISEE 2018**. En parallèle, les indices Los Angeles compris entre **31 et 37** témoignent d'une résistance mécanique satisfaisante à l'usure et à la fragmentation. Sur le plan réglementaire, les matériaux peuvent être classés **AR-A51**, selon le **GTR 2023**, ce qui les rend aptes à être utilisés dans la couche de forme, la couche de fondation et comme matériaux de remblai, selon les configurations de trafic T_1 à T_5 . Cette étude a donc permis de répondre favorablement à la question principale de recherche, en démontrant que les bétons issus de démolition à Goma peuvent être caractérisés, valorisés et intégrés dans la construction routière. Elle apporte ainsi une contribution concrète à la gestion durable des ressources, tout en offrant une solution économiquement avantageuse et écologiquement responsable aux enjeux d'aménagement urbain local.

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

Cependant, il est important d'apporter une critique constructive à notre travail. Bien que l'étude ait été menée avec rigueur sur trois échantillons, la variabilité des bétons de déconstruit peut être significative d'une source à l'autre. Une campagne d'échantillonnage plus vaste, couvrant différentes origines de béton déconstruit, aurait pu renforcer nos conclusions. De plus, l'étude ne s'est pas étendue aux performances à long terme sous contraintes de trafic réelles, ni à l'impact environnemental complet du cycle de vie comparé aux matériaux naturels.

Ces limitations ouvrent la voie à de nombreuses perspectives et travaux futurs. Les chercheurs pourraient étendre cette étude par :

- La réalisation d'essais à plus grande échelle, incluant des sections d'essais routiers pour évaluer le comportement sous trafic.
- L'étude de l'incorporation de ces granulats dans d'autres couches de chaussée (couche de base, couche de roulement) après traitement spécifique.
- Une étude technico-économique comparant les coûts de mise en œuvre des matériaux recyclés aux granulats traditionnels, en tenant compte des coûts de démolition, de concassage et de transport.
- Il serait aussi pertinent d'étendre les expérimentations à d'autres types de matériaux issus de la démolition, comme les briques, les enrobés ou les matériaux mixtes, afin de constituer une base de données plus représentative et d'élargir le champ d'application des matériaux recyclés.

Bibliographie

- [1] IDRRIM, *Classification et aide au choix des matériaux granulaires recyclés pour leurs usages routiers hors agrégats d'enrobés.*, 2011.
- [2] European Commission, *Construction and demolition waste (CDW)*, 2020.
- [3] Kovačević, *Recycled Aggregate Concrete – Environmental Impact and Potential Reuse*, University of Belgrade, 2018.
- [4] ADEME, *Déchets du bâtiment - Fiche technique*, Septembre 2017.
- [5] A. Lachat, *Le réemploi appliqué au domaine de la construction : principe, impact environnemental et mesure dans le cadre d'une économie circulaire*, Paris: Ecole de ponts, 2023.
- [6] United Nations Environment Programme, «Global waste management outlook,» 2015.
- [7] Philip, J.C. Bouyahba et F. Muzeau, *Guide pratique de la démolition des bâtiments, Collection Blanche BTP*, Paris: Eyrolles, 2006.
- [8] Michel, P.Vaxelair, S. Villeneuve, J. Jayr et E. Vernus, *Projet ANR ASURET -Revue de l'existant*, Agence Nationale de la Recherche, 2010.
- [9] «<https://www.leprogres.fr/societe/2021/06/26/minguettes-8-immeubles-encore-a-demolir>».
- [10] «<https://www.alamyimages.fr/les-voisins-musicaux-de-travailleurs-beton-arme-avec-marteau-piqueur-sur-un-site-de-construction-image67635846.html>».
- [11] *Facilitating the circulation of reclaimed building elements in Norhwestern Europe*, 2021.
- [12] Récyllum, B. GTM et Arès associations, *Les clés de la démolition durable - rapport d'étude*, Ademe, 2016.

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

- [13] Centre Scientifique et Technique de la Construction et Centre Scientifique et Technique du du Bâtiment pour interreg, North-West Europe, *Les impacts environnementaux du réemploi dans le secteur de la construction*, 2021.
- [14] Ministère de l'Energie, Mines, de l'Eau et de l'Environnement, *Directives pour la réalisation d'une étude d'impact sur l'environnement d'un projet d'extraction de matériaux de construction*, Maroc, 2015.
- [15] NOBATEK/INEF4, *Granulats recyclés : ENJEUX ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX*, 2021.
- [16] M. Grace, *Cours de route I*, Goma: ULPGL, 2023-2024.
- [17] K. M. Wolhuter, *Geometric Design of Roads Handbook*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2015.
- [18] J. Barillot, H. cabanes et P. Carillo, *La route et ses chaussées, Manuel de travaux publics*, Paris: Eyrolles, 2015.
- [19] «<https://www.facebook.com/PlanABCfirmeConstruction/posts/1-la-route-se-regenereles-mat%C3%A9riaux-routiers-de-d%C3%A9construction-peuvent-%C3%AAtre-m%C3%A9la/1616808068448620/>».
- [20] Comité européen de normalisation, *NF P 98-086, Dimensionnement structurel des chaussées routières — Application aux chaussées neuves*, AFNOR, 2019.
- [21] IDRRIM, *Guide des terrassements des remblais et des couches de forme. Fascicule 1 - Principes généraux*, Bron: Cerema, 2023.
- [22] IDRRIM, *Guide des terrassements des remblais et des couches de forme - Fascicule 2 - Annexes techniques.*, Bron: Cerema, 2023.
- [23] Centre Experimental de Recherche du Batiment et des Travaux Publics, *Guide de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux*, République française, 1984.
- [24] Comité européen de normalisation, *NF EN 933-1 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats*, Afnor, 2012.

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

- [25] Organisation internationale de normalisation, *ISO 14688-2 : Reconnaissance et essais géotechniques- Identification et classification des sols - Principes pour une classification*, Suisse, 2017.
- [26] Comité européen de normalisation, *NF EN 1097-6 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - partie 6 : détermination de la masse volumique et du coefficient d'absorption*, Afnor, 2022.
- [27] Norme internationale, *NF EN ISO 17892-1 : Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - partie 1 : détermination de la teneur en eau*, 2014.
- [28] Comité européen de normalisation, *SIST EN 1097-2 : Essais relatifs aux propriétés mécaniques et physiques des granulats - Partie 2 : Méthodes de détermination de la résistance à la fragmentation*, 2020.
- [29] N. française, *NF P 94-093 : Sols - reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - essai Proctor Normal - Essai Proctor modifié*, Paris: Afnor, 2014 .
- [30] Comité européen de normalisation, *NF P 94-078, Sols : reconnaissance et essais - Indice CBR après immersion. Indice CBR immédiat. Indice Portant Immédiat - Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR.*, France: AFNOR, 1997.

ANNEXES

Annexe A

Analyse granulométrique

A.1 Analyse granulométrique échantillon 1

OUVERTURE (mm)	REFUS CUMULES		TAMISAT
	NF EN 933-1 Kg	%	%
63	0	0	100
50	0	0	100
40	0	0	100
31.5	1,158	4	96
20	7,240	25	75
16	8,978	31	69
10	11,584	40	60
8	13,322	46	54
6.3	14,480	50	50
5	16,183	55,88	44,12
4	17,376	60	40
2	20,562	71	29
1	23,458	81	19
0,5	24,616	85	15
0,4	25,485	88	12
0,08	27,260	94,13	5,87
0,63	27,761	95,86	4,14

A.2 Analyse granulométrique échantillon 2

OUVERTURE (mm)	REFUS CUMULES		TAMISAT
	NF EN 933-1 Kg	%	%
63	0	0	100
50	0	0	100
40	0	0	100
31.5	0,203	0,7	99,3
20	5,851	19,7	80,3
16	9,284	31,26	68,74
10	15,705	52,88	47,12
8	17,820	60	40
6.3	19,008	64	36
5	19,899	67	33
4	21,087	71	29
2	22,869	77	23
1	24,948	84	16
0,5	26,136	88	12
0,4	26,730	90	10
0,08	28,482	95,9	4,1
0,63	29,489	99,29	0,71

A.3 Analyse granulométrique échantillon 3

OUVERTURE (mm)	REFUS CUMULES		TAMISAT
	NF EN 933-1 Kg	%	%
63	0	0	100
50	0	0	100
40	0	0	100
31.5	0,894	3	97
20	7,450	25	75
16	12,090	40,57	59,43
10	14,212	47,69	52,31
8	14,793	49,64	50,36
6.3	15,466	51,9	48,1
5	16,074	53,94	46,06
4	16,754	56,22	43,78
2	19,462	65,31	34,69
1	22,830	76,61	23,39
0,5	25,726	86,33	13,67
0,4	26,445	88,74	11,26
0,08	28,310	95	5
0,63	29,103	97,66	2,34

Annexe B

Teneur en eau

B.1 Teneur en eau échantillon 1

Echantillon 1/ Prise 1			
Tare	m_1	m_2	m_c
1	35,31	35,06	13,45
2	40,54	40,23	14,69
3	41,3	41,01	14,94
Somme	117,15	116,3	43,08
Echantillon 1/ Prise 2			
Tare	m_1	m_2	m_c
1	30,83	29,69	14,13
2	32,43	31,56	14,9
3	35,75	35	13,76
Somme	99,71	96,25	42,79
Echantillon 1/ Prise 3			
Tare	m_1	m_2	m_c
1	31,53	31,37	14,6
2	35,92	35,75	15,44
3	38,05	37,8	13,83
Somme	105,5	104,92	43,87
Moyenne	35,74	35,27	14,42

B.2 Teneur en eau échantillon 2

Echantillon 2/ Prise 1			
Tare	m_1	m_2	m_c
1	35,6	35	14,63
2	34,74	34,10	16,88
3	27,05	26,6	14,63
Somme	97,39	95,7	46,14
Echantillon 2/ Prise 2			
Tare	m_1	m_2	m_c
1	29,57	29,05	14,53
2	33,46	32,82	14,51
3	35,17	34,39	14,51
Somme	98,2	96	43,55
Echantillon 2/ Prise 3			
Tare	m_1	m_2	m_c
1	31,57	31,25	14,33
2	30,46	29,82	14,24
3	34,04	33,2	15,56
Somme	96,07	94	44,13
Moyenne	32,41	31,80	14,87

B.3 Teneur en eau échantillon 3

Echantillon 3/ Prise 1			
Tare	m_1	m_2	m_c
1	28,09	27,95	14,64
2	30,65	30,58	14,13
3	36,26	36,07	16,91
Somme	95	94,6	45,68
Echantillon 3/ Prise 2			
Tare	m_1	m_2	m_c
1	30,57	30,32	14,79
2	33,26	33	14,45
3	33,17	32,99	15,51
Somme	97	96	44,75
Echantillon 3/ Prise 3			
Tare	m_1	m_2	m_c
1	32,97	32,75	14,23
2	31,06	30,96	14,44
3	34,84	34,64	15,36
Somme	98,87	98	44,03
Moyenne	32,32	32,14	14,94

Annexe C

Proctor modifié

C.1 Proctor échantillon 1

Masse du moule (g)	6590		6590		6590		6590	
Volume du moule (cm ³)	2756,769		2756,769		2756,769		2756,769	
M.éch.humide + M. moule (g)	12340		12609		12828		12787	
M. volumique humide (g/cm ³)	2,086		2,183		2,263		2,248	
Tare sup et inf (g)	1	2	3	4	5	6	7	
Poids tare (g)	13,45	14,63	14,63	16,91	14,15	19,18	14,52	1
Poids tare + éch.humide (g)	26,84	27,15	26,53	29,51	28,57	29,16	29,54	2
Poids tare + éch.sec (g)	25,41	26,13	25,09	28,27	26,31	28,17	27,14	
Poids de l'eau (g)	1,43	1,02	1,44	1,24	2,26	0,99	2,4	
W (%)	11,96	8,87	13,77	10,92	18,59	11,01	19,02	1
Wm (%)	10,41		12,34		14,80		16,65	
ρd (g/cm ³)	1,889		1,944		1,971		1,927	

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

C.2 Proctor échantillon 2

Masse du moule (g)	6590		6590		6590		6590	
Volume du moule (cm ³)	2756,769		2756,769		2756,769		2756,769	
M.éch.humide + M. moule (g)	12146		12380		12651		12588	
M. volumique humide (g/cm ³)	2,015		2,100		2,199		2,176	
Tare sup et inf (g)	1	2	3	4	5	6	7	
Poids tare (g)	19,2	14,69	14,56	14,66	14,19	14,94	13,56	1
Poids tare + éch.humide (g)	29,17	28,4	26,32	27,7	26,41	26,91	25,19	2
Poids tare + éch.sec (g)	28,09	26,92	24,87	26,26	24,81	25,18	23,37	2
Poids de l'eau (g)	1,08	1,48	1,45	1,44	1,6	1,73	1,82	
W (%)	12,15	12,10	14,06	12,41	15,07	16,89	18,55	2
Wm (%)	12,12		13,24		15,98		19,90	
ρd (g/cm ³)	1,797		1,855		1,896		1,815	

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

C.3 Proctor échantillon 3

Masse du moule (g)	6590		6590		6590		6590	
Volume du moule (cm ³)	2756,769		2756,769		2756,769		2756,769	
M.éch.humide + M. moule (g)	12058		12223		12532		12603	
M. volumique humide (g/cm ³)	1,983		2,043		2,155		2,181	
Tare sup et inf (g)	1	2	3	4	5	6	7	
Poids tare (g)	14,89	14,71	14,53	13,22	13,28	14,58	14,56	
Poids tare + éch.humide (g)	22,26	27,25	27,62	26,6	27,65	26,41	25,82	
Poids tare + éch.sec (g)	21,53	26,04	26,2	25,01	25,63	24,8	24,1	
Poids de l'eau (g)	0,73	1,21	1,42	1,59	2,02	1,61	1,72	
W (%)	10,99	10,68	12,17	13,49	16,36	15,75	18,03	
Wm (%)	10,84		12,83		16,05		17,72	
ρ_d (g/cm ³)	1,790		1,811		1,857		1,853	

CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION

ROUTIERE : Cas des déchets du béton

Annexe D Table de correspondance

(mm)	Force (Ns)	(mm)	Force (Ns)	lecture (mm)	Force (Ns)	(mm)	Force (Ns)
0.01	0.22	0.57	12.44	1.14	25	1.71	37.56
0.02	0.43	0.58	12.67	1.15	25.22	1.72	37.78
0.03	0.65	0.59	12.89	1.16	25.43	1.73	38
0.04	0.87	0.6	13.11	1.17	25.65	1.74	38.22
0.05	1.09	0.61	13.33	1.18	25.87	1.75	38.44
0.06	1.3	0.62	13.56	1.19	26.09	1.76	38.67
0.07	1.52	0.63	13.78	1.2	26.3	1.77	38.89
0.08	1.74	0.64	14	1.21	26.52	1.78	39.11
0.09	1.96	0.65	14.22	1.22	26.74	1.79	39.33
0.1	2.17	0.66	14.44	1.23	26.96	1.8	39.56
0.11	2.39	0.67	14.67	1.24	27.17	1.81	39.78
0.12	2.61	0.68	14.89	1.25	27.39	1.82	40
0.13	2.83	0.69	15.11	1.26	27.61	1.83	40.22
0.14	3.04	0.7	15.33	1.27	27.83	1.84	40.43
0.15	3.26	0.71	15.56	1.28	28.04	1.85	40.65
0.16	3.48	0.72	15.78	1.29	28.26	1.86	40.87
0.17	3.7	0.73	16	1.3	28.48	1.87	41.09
0.18	3.91	0.74	16.22	1.31	28.7	1.88	41.3
0.19	4.13	0.75	16.44	1.32	28.91	1.89	41.52
0.2	4.35	0.76	16.67	1.33	29.13	1.9	41.74
0.21	4.57	0.77	16.89	1.34	29.35	1.91	41.96
0.22	4.78	0.78	17.11	1.35	29.57	1.92	42.17
0.23	5	0.79	17.33	1.36	29.78	1.93	42.39
0.24	5.22	0.8	17.56	1.37	30	1.94	42.61
0.25	5.43	0.81	17.78	1.38	30.22	1.95	42.83
0.26	5.65	0.82	18	1.39	30.44	1.96	43.04
0.27	5.87	0.83	18.22	1.4	30.67	1.97	43.26
0.28	6.09	0.84	18.44	1.41	30.87	1.98	43.48
0.29	6.3	0.85	18.67	1.42	31.11	1.99	43.7
0.3	6.52	0.86	18.89	1.43	31.33	2	43.91
0.31	6.74	0.87	19.11	1.44	31.56	2.01	44.13
0.32	6.96	0.88	19.33	1.45	31.78	2.02	44.35
0.33	7.17	0.89	19.56	1.46	32	2.03	44.57
0.34	7.39	0.9	19.78	1.47	32.22	2.04	44.78
0.35	7.61	0.91	20	1.48	32.44	2.05	45
0.36	7.83	0.92	20.22	1.49	32.67	2.06	45.22
0.37	8.04	0.93	20.43	1.5	32.89	2.07	45.43
0.38	8.26	0.94	20.65	1.51	33.11	2.08	45.65
0.39	8.48	0.95	20.87	1.52	33.33	2.09	45.87
0.4	8.7	0.96	21.09	1.53	33.56	2.1	46.09
0.41	8.91	0.97	21.3	1.54	33.78	2.11	46.3
0.42	9.13	0.98	21.52	1.55	34	2.12	46.52
0.43	9.35	0.99	21.74	1.56	34.22	2.13	46.74
0.44	9.57	1	21.96	1.57	34.44	2.14	46.96
0.45	9.78	1.01	22.17	1.58	34.67	2.15	47.17
0.46	1	1.02	22.39	1.59	33.89	2.16	47.39
0.47	1.22	1.03	22.61	1.6	35.11	2.17	47.61
0.48	1.44	1.04	22.88	1.61	35.33	2.18	47.83
0.49	1.67	1.05	23.04	1.62	35.56	2.19	48.04
0.5	1.89	1.06	23.26	1.63	35.78	2.2	48.26
0.51	2.11	1.07	23.48	1.64	36	2.21	48.48
0.52	2.33	1.08	23.7	1.65	36.22	2.22	48.7
0.53	2.55	1.09	23.91	1.66	36.44	2.23	48.91
0.54	2.78	1.1	24.13	1.67	36.67	2.24	49.13
0.55	3	1.11	24.35	1.68	36.89	2.25	49.35
0.56	3.22	1.12	24.57	1.69	37.11	2.26	49.57
		1.13	24.78	1.7	37.33	2.27	49.78

Annexe E

Poinçonnement CBR

E.1 Poinçonnement échantillon 1

Coups	56		25		10	
Enfoncement	Lecture deforma- tion 1/100 mm	Force appliquée (kN)	Lecture deforma- tion 1/100 mm	Force appliquée (kN)	Lecture deforma- tion 1/100 mm	Force appliquée (kN)
0,2	0,01	0,22	0,01	0,22	0,01	0,22
0,4	0,03	0,65	0,02	0,43	0,01	0,22
0,6	0,05	1,09	0,03	0,65	0,02	0,43
0,8	0,07	1,52	0,04	0,87	0,03	0,65
1	0,08	1,74	0,08	1,74	0,04	0,87
1,5	0,13	2,83	0,09	1,96	0,05	1,09
2	0,18	3,91	0,13	2,83	0,07	1,52
2,5	0,23	5	0,19	4,13	0,10	2,17
3	0,28	6,09	0,24	5,22	0,11	2,61
3,5	0,34	7,39	0,29	6,3	0,15	3,26
4	0,41	8,91	0,34	7,39	0,17	3,7
4,5	0,49	10,67	0,40	8,7	0,20	4,35
5	0,54	11,78	0,45	9,78	0,22	4,78
6	0,63	13,78	0,50	10,89	0,27	5,87
7	0,77	16,89	0,57	12,44	0,33	7,17
8	0,84	18,44	0,64	14	0,39	8,48
9	0,94	20,65	0,71	15,56	0,43	9,35
10	1,05	23,04	0,78	17,11	0,49	10,67

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

E.2 Poinçonnement échantillon 2

Coups	56		25		10	
Enfoncement	Lecture de la déformation 1/100 mm	Force appliquée (kN)	Lecture de déformation 1/100 mm	Force appliquée (kN)	Lecture de déformation 1/100 mm	Force appliquée (kN)
0,2	0,03	0,65	0,01	0,22	0,01	0,22
0,4	0,04	0,87	0,02	0,43	0,02	0,43
0,6	0,07	1,52	0,04	0,87	0,03	0,65
0,8	0,08	1,74	0,05	1,09	0,04	0,87
1	0,09	1,96	0,06	1,3	0,05	1,09
1,5	0,17	3,7	0,11	2,39	0,07	1,52
2	0,24	5,22	0,16	3,48	0,09	1,96
2,5	0,32	6,96	0,22	4,78	0,11	2,39
3	0,39	8,48	0,28	6,09	0,15	3,26
3,5	0,48	10,44	0,33	7,17	0,19	4,13
4	0,58	12,67	0,39	8,48	0,23	5
4,5	0,67	14,67	0,44	9,57	0,27	5,87
5	0,77	16,89	0,49	10,67	0,31	6,74
6	0,91	20	0,58	12,67	0,39	8,48
7	1,08	23,7	0,67	14,67	0,47	10,22
8	1,22	26,74	0,78	17,11	0,55	12
9	1,33	29,13	0,88	19,33	0,63	13,78
10	1,49	32,67	0,97	21,3	0,70	15,33

**CARACTERISATION DES MATERIAUX RECYCLES ISSUS DE LA
DECONSTRUCTION EN VU DE LA VALORISATION DANS LA CONSTRUCTION
ROUTIERE : Cas des déchets du béton**

E.3 Poinçonnement échantillon 3

Coups	56		25		10	
Enfoncement	Lecture deforma- tion 1/100 mm	Force appliquée (kN)	Lecture deforma- tion 1/100 mm	Force appliquée (kN)	Lecture deforma- tion 1/100 mm	Force appliquée (kN)
0,2	0,02	0,43	0,01	0,22	0,01	0,22
0,4	0,04	0,87	0,02	0,43	0,02	0,43
0,6	0,05	1,09	0,04	0,87	0,02	0,43
0,8	0,07	1,52	0,05	1,09	0,03	0,65
1	0,09	1,96	0,08	1,74	0,05	1,09
1,5	0,15	3,26	0,14	3,04	0,09	1,96
2	0,23	5	0,18	3,91	0,14	3,04
2,5	0,3	6,52	0,23	5	0,19	4,13
3	0,39	8,48	0,27	5,87	0,24	5,22
3,5	0,47	10,22	0,32	6,96	0,29	6,3
4	0,58	12,67	0,38	8,26	0,34	7,39
4,5	0,65	14,22	0,43	9,35	0,39	8,48
5	0,74	16,22	0,47	10,22	0,45	9,78
6	0,90	19,78	0,55	13	0,54	11,78
7	1,12	24,57	0,64	15	0,65	14,22
8	1,22	26,74	0,71	18	0,75	16,44
9	1,27	27,83	0,80	19	0,79	17,33
10	1,48	32,44	0,88	22	0,87	19,11