HAL open science

Valorisation des coques de noix de palmiste dans la construction des routes à faible trafic

Joël Koti

To cite this version:

Joël Koti. Valorisation des coques de noix de palmiste dans la construction des routes à faible trafic. Génie civil. Université de Limoges; Université d'Abomey-Calavi (Bénin), 2022. Français. NNT : 2022LIMO0062 . tel-03789638

HAL Id: tel-03789638

https://theses.hal.science/tel-03789638v1

Submitted on 27 Sep 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse de doctorat

N° d'ordre :

Université de Limoges
ED 609 - SIMME
GC2D

N° d'ordre :

Université d'Abomey-Calavi
ED - Sciences de l'Ingénieur
LEMA

Thèse pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université de Limoges et de l'Université d'Abomey-Calavi

Discipline: Sciences de l'Ingénieur Spécialité : Génie Civil - Mécanique

Présentée par
Joël KOTI

Le 09 juin 2022

VALORISATION DES COQUES DE NOIX DE PALMISTE DANS LA CONSTRUCTION DES ROUTES A FAIBLE TRAFIC

Thèse dirigée par M. **Christophe PETIT** et M. **Mohamed GIBIGAYE**
Co-encadrée par Mme **Anne MILLIEN**

JURY :

Président du jury
M. **Sofiane AMZIANE**, Professeur des Universités, Université Clermont Auvergne, France

Rapporteurs
M. **Sofiane AMZIANE**, Professeur des Universités, Université Clermont Auvergne, France
Mme. **Yvette TANKPINOU KIKI**, Maître de Conférences, Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques, Abomey, Bénin

Examinateurs
M. **Aristide HOUNGAN**, Professeur Titulaire, Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques, Abomey, Bénin
M. **Mohamed GIBIGAYE**, Professeur Titulaire, Université d'Abomey-Calavi, Bénin
Mme **Anne MILLIEN**, Maître de Conférences, Université de Limoges, France
M. **Christophe PETIT**, Professeur des Universités, Université de Limoges, France

Dédicace

‘’A ma famille’’

Joël KOTI | Thèse de doctorat | Université de Limoges et Université d’Abomey-Calavi |
Licence CC BY-NC-ND 3.0

Le développement durable est « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs »,

Mme Gro Harlem Brundtland*,* Premier Ministre norvégien (1987)

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Remerciements

Cette thèse est le fruit de la collaboration entre le Laboratoire de Génie Civil, Diagnostic et Durabilité (GC2D) de l'Université de Limoges (Unilim) et le Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Appliquée (LEMA) de l'Université d'Abomey-Calavi (UAC). Elle est financée par le Ministre des Affaires Étrangères de la France à travers le Service de Coopération et d'Action Culturelle (SCAC) de l'Ambassade de France au Bénin. Cette thèse a également bénéficié de l'aide régionale de cotutelle (Université de Limoges) pour le transport des matériaux du Bénin en France.

Je remercie particulièrement mon équipe d'encadrement Christophe PETIT, Mohamed GIBIGAYE et Anne MILLIEN pour l'encadrement sans faille. Votre disponibilité, vos conseils, vos soutiens surtout pendant le confinement et vos sens d'écoute ont positivement impacté ma personnalité et ma vision du monde scientifique.

Je veux ici exprimer toute ma gratitude aux rapporteurs de cette thèse Sofiane AMZIANE et Yvette TANKPINOU KIKI ainsi qu'au membre de jury Aristide HOUNGAN pour le temps consacré à cette évaluation et l'intérêt que vous avez porté à ce travail.

Je remercie profondément Crespin YABI pour sa disponibilité et sa participation à ce travail.

J'adresse mes remerciements aux membres de mon comité de suivi de thèse Victor GBAGUIDI, Valéry DOKO et Gérard GBAGUIDI AISSE pour avoir suivi ce travail à travers les points de thèse annuels.

Je remercie également :

- Antoine VIANOU, ex-directeur de l'ED-SDI ; Marcaire AGBOMAHENAN, Natalie AHOMANDIKPOHOU et TCHETANGNI Patrice pour le travail acharné et le rayonnement de l'Ecole Doctorale SDI ;
- Alexandre MAITRE, directeur de l'ED-SIMME et toute l'équipe adiministrative pour leur accompagnement dans les diverses demarches administratives ;
- Jérôme DOPEUX, Mickael et tout le personnel du GC2D pour leurs soutiens quotidiens et surtout lors de mes campagnes experimentales à Egletons ;
- Frédéric DUBOIS, directeur du GC2D et Emmanuel OLODO, directeur de LEMA pour avoir favorisé ces travaux au sein des laboratoires ;
- Le personnel du LERGC-SA pour leur assistance lors de mes essais géotechniques à Abomey-Calavi ;
- Le personnel de DIC-BTP pour le cadre qu'ils nous ont offert pendant la thèse.
- Marie-Cecile Adissin et Isabelle Mekdoud pour avoir préparé mes diffrents séjours.
- Les personnes qui m'ont conseillé et encouragé pendant mes differents séjours : Mokhfi Takarli, Fatima Allou, Octavian Pop, Nicolas Angellier, Sylvie Yotte, Tchehouali Adolphe, Houanou Agapi et Feu Houinnou Gossou.

Je remercie Christian Adadja, Clément Labintan, Gildas Godonou, Raoul Sekloka, Mariette A., Angelo K., Damien A., Reine K., Eloïse Z. et Joël A. avec qui nous avons passé de bons moments pendant ma thèse au sein de l'unité de recherche.

Je tiens à remercier les amis doctorants et docteurs du GC2D, Christian, Jérôme, Soufyane, Wael, Ahmed, Xi, Minh, Elio, Yamina, Christina, Charlotte, pour les précieux échanges et moments passés ensemble.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Je remercie sincèrement mon épouse Elisabeth. Tes soutiens et ton courage m'ont toujours fortifié. Merci d'avoir pris soin de Justin et de Jennifer.

A vous qui m'avez toujours soutenu, Gildas, Elise, Quentin, Fernand, Henri Segle, Jules Kottin, Abel, Maxime, Esther, Emmanuelle, recevez mes chaleureux remerciements. Que Dieu vous bénisse !

Je remercie vivement ma mère Nontien Noudehouin Zinsou, mes frères et sœurs François, Edmond, Ambel, Delphine, Angèle et Marguerite qui ont été toujours là pour moi. Les mots ne pourront pas exprimer ma reconnaissance. Je ne saurais oublier mes cousins et cousines, mes neveux et nièces et mes oncles et tantes surtout le docteur Mathieu Hounsou qui, par son profil m'a motivé à aller en thèse.

Une pensée émue à ceux qui ne sont plus de ce mon monde ; à toi Papa !!!

Joël

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Droits d’auteurs

Cette création est mise à disposition selon le Contrat :
« **Attribution-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de modification 3.0 France** »
disponible en ligne : *http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/*

Licence CC BY-NC-ND 3.0

SOMMAIRE

Joël KOTI | Thèse de doctorat | Université de Limoges et Université d'Abomey-Calavi |
Licence CC BY-NC-ND 3.0

Sommaire

Introduction 25

Chapitre I. Revue de la littérature 29
I.1. Généralités sur les CNP.....29
I.2. Des recherches sur la valorisation des CNP en Génie Civil 42
I.3. Généralités sur les sols latéritiques.....44
I.4. Conditions d'utilisation des sols latéritiques (sols fins) en technique routière (structure de chaussée) 46
I.5. Généralités sur les enrobés bitumineux : formulation 49

1ère Partie : Elaboration de matériaux composites à base de coques de noix de palmiste à matrice argileuse utilisables en couche de fondation des routes à faible trafic 57

Chapitre II. Milieu d'étude, matériaux, matériel et méthodes des mélanges CNP/Terre de barre.....59
II.1. Caractérisation des CNP.....59
II.2. Caractérisation géotechnique de la terre de barre.....64
II.3. Description de l'étude de formulation des composites CNP/TB: Loi Parabolique de Fuller- Thompson.....70
II.4. Synthèse.....75

Chapitre III. Valorisation des mélanges CNP/Terre de barre en couche de fondation.....77
III.1. Caractérisation géotechnique du sol naturel 77
III.2. Performance géotechniques des composites CNP/TB 82
III.3. Performances géotechniques des composites CNP/Terre de barre/ Sable. 89
III.4. Synthèse.....92

2ème Partie : Elaboration de matériaux composites à base de coque de noix de palmiste à matrice hydrocarbonée utilisable en couche de roulement des routes à faible trafic.....95

Chapitre IV. Optimisation des formulations d'enrobés 97
IV.1. Optimisation du squelette granulaire.....97
IV.2. Focus sur le MEC 104
IV.3. Le liant.....112

Chapitre V. Caractéristiques des enrobés à base de CNP 116
V.1. Description des enrobés confectionnés 116
V.2. Caractéristiques physiques des granulats.....116
V.3. Caractéristiques des granulats 118
V.4. Résultats d'optimisation des mélanges.....122
V.5. Analyse des mélanges granulaires 124
V.6. Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses.....126
V.7. Caractéristiques des enrobés 131
V.8. Caractéristiques mécaniques : Résistance en compression 133

Licence CC BY-NC-ND 3.0

V.9. Durabilité des enrobés à base de CNP : tenue à l'eau 134
V.10. Détermination du module de tangent et du module sécant des enrobés 134
V.11. Module tangent et module sécant 135
V.12. Conclusion partielle 140

Conclusion et perspectives 142

Références bibliographiques 145

Tables des matières 156

Annexes 160
Annexe 1. Classification des sols 161
Annexe 2. Références Proctor des mélanges (TB/CNP) 170
Annexe 3. Fiche produit EB10 172

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Résumé

La production de l'huile de palme génère plusieurs déchets dont les coques de noix de palmistes (CNP). Face à l'épuisement des ressources naturelles, utilisables en technique routière, la valorisation des déchets agricoles comme les coques de noix de palmiste constitue une solution alternative d'avenir pour les pays producteurs du palmier à huile. Cette thèse étudie l'utilisation des coques de noix de palmiste comme agrégat grossier dans la formulation des composites, proposables comme matériaux de couches d'assises des chaussées à faible trafic. La première partie du manuscrit traite de l'élaboration des mélanges des coques de noix de palmiste et de la terre de barre (terre latéritique abondante dans le sud du Bénin) pour une utilisation en couche de fondation. Les proportions volumiques de chaque composite sont déterminées par la loi parabolique de Fuller-Thompson. Au laboratoire, les essais géotechniques sur le sol latéritique et sur les composites ont montré que l'ajout de 61% des CNP à la terre de barre augmente l'indice CBR de 76% à 95% de l'optimum Proctor Modifié. L'ajout de 15% de sable lagunaire dans la formulation a permis de réduire la plasticité de 29%. Ainsi, le composite (39 % de sol latéritique + 61 % de CNP) avec un indice CBR égal à 30 et le composite (45 % de sol latéritique, 40 % de CNP et 15 % de sable de lagune) avec un indice CBR égal à 41 sont utilisables en couche de fondation des routes à faible trafic. La deuxième partie est consacrée au remplacement dans un béton bitumineux semi grenu 0/10 utilisable en couche de roulement des gros granulats classiques par les coques de noix de palmiste. Les différentes compositions granulaires sont obtenues par le modèle d'empilement compressible de De Larrard. La tenue à l'eau, étudiée à travers l'essai de Duriez montre que les CNP peuvent remplacer les granulats grossiers dans les enrobés des chaussées à faible trafic. La valorisation des coques de noix de palmistes en technique routière, constitue une grosse solution technico-économique dans le désenclavement des milieux ruraux des pays tropicaux et surtout pour le transport des produits des zones de production vers celles de transformation et de consommation.

Mots clés : Coques de noix de palmiste, terre de barre, couche de fondation, loi parabolique de Fuller-Thompson, Modèle d'empilement compressible, couche de roulement.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Abstract

The production of palm oil generates several wastes including palm kernel shells (PKS). Facing the depletion of natural resources that can be used in pavement construction, the recovery of agricultural waste such as palm kernel shells is an alternative solution for the future for oil palm producing countries. This thesis studies the use of palm kernel shells as coarse aggregate in the formulation of composites materials. The latter can be used as subbase course materials for low-traffic pavements. The first part of the manuscript deals with the production of mixtures of palm kernel shells and lateritic soil (lateritic soil abundant in the south of Benin) for use as a foundation layer. Parabolic law of Fuller-Thompson is utilized to determine the volume proportions of each composite. In the laboratory, geotechnical experiments on lateritic soil and on composites have shown that the addition of 61% PKS increases the CBR index from 76% to 95% of the Modified Proctor optimum. The addition of 15% lagoon sand in the formulation decreases the plasticity by 29%. Thus, the composites with a CBR index of 30 (39% lateritic soil + 61% PKS) and 41 (45% lateritic soil, 40% PKS and 15% lagoon sand) can be used in the foundation layer for low traffic roads. The second part focuses on the substitution of the traditional coarse aggregates by palm kernel shells in a semi-grained bituminous concrete 0/10. This type of asphalt is usable in surface wearing course. The different granular compositions are obtained by the compressible stacking model of De Larrard. The moisture resistance, studied through the Duriez test, shows that PKS can be a good alternative of coarse aggregates in lightly trafficked pavement mixes. The valorization of palm kernel shells in transportation technology is a major technical and economical solution to provide a better access to the rural areas in tropical countries. Especially, it can be useful for the transport of products from production areas to those of processing and consumption.

Keys words: palm kernel shells, lateritic soil, sub base layer, parabolic law of Fuller-, compressible packing model, surface wearing course.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Liste des figures

Figure 1 : Le palmier a) le dura (espèce répandue en Afrique), b) le régime de noix de palme, c) noix de palme divisé en deux, d) différentes parties de noix de palme (Quoi dans mon assiette, 2016).....30

Figure 2 : Zones de production mondiale de palmier à huile (Jacquemard, 2011) 30

Figure 3 : Consommation mondiale d'huiles végétales de 1995/1996 à 2014/2015 (en millions de tonnes) (Godonou, 2019).....31

Figure 4 : Répartition de la production mondiale d'huile de palme (Rival, 2020).....32

Figure 5 : Consommation mondiale de l'huile de palme (Rival, 2020).....32

Figure 6 : Bénin : Zone de culture de palmier à huile (Fournier et al., 2001).....33

Figure 7 : Evolution de la production nationale sur 16 années (FAOSTAT, 2017) 34

Figure 8 : Processus de production (artisanale) de l'huile de palme et d'obtention des coques de noix de palmiste (GERES, 2013).....35

Figure 9 : Processus de production de l'huile de palme a) Egrappage, b) Cuisson, c) Pressage, d) Séparation huile brute/fibres/noix e) Clarification, f) Concassage de noix sèches (GERES, 2013) 36

Figure 10 : obtention artisanale des CNP : a) Noix de palmiste b) machine artisanale de concassage des noix c) mélange amande + coque + fibres, d) séparation dans l'eau coque et amande par le principe de différence de densité, e) tas de CNP, prêtes pour le prélèvement en vue des essais de laboratoire.....37

Figure 11 : Miro-pores sur la surface convexe des CNP (Alengaram et al., 2011).....38

Figure 12 : Répartition des plateaux de la terre de barre au sud du Bénin.....41

Figure 13 : Technique de stabilisation des sols par les CNP, utilisée par les populations des zones productrices de palmier à huile au Bénin.....41

Figure 14 : Bâtiment en BCNP à Missérété (Bénin) a) vue d'ensemble du bâtiment b) Poteaux et raidisseurs faisant apparaître le BCNP (Godonou, 2019) 42

Figure 15 : un échantillon de BCNP (Gibigaye et al., 2019).....43

Figure 16 : Grandes catégories de sols au Bénin (Azontonde, 1991) 45

Figure 17 : a) et b) : Coupe d'une chaussée type (LCPC-SETRA, 2000b) c) Coupe d'une chaussée à faible trafic.....47

Figure 18 : Niveaux d'épreuves de formulation des bétons bitumineux.....54

Figure 19 : Tas de prélèvement de CNP.....59

Figure 20 : Courbe granulométrique des CNP.....60

Figure 21 : Différentes formes de CNP.....61

Figure 22 : Localisation des sites de prélèvement : Carte géologique d'après (Carsky, 2003) 64

Figure 23 : Prélèvement de la terre de barre à Avrankou (6°32'24,5''N et 2°39'3,6''E) 65

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Figure 24 : Appareil de Casagrande 66

Figure 25 : Matériel d'essai au bleu de méthylène 67

Figure 26 : Quelques étapes pour les essais Proctor Modifié sur la terre de barre et les mélanges CNP /TB 68

Figure 27 : a) conservation des échantillons compactés à la teneur en eau optimale b) dispositif de poinçonnement pour l'essai CBR 69

Figure 28 : Organigramme de formulation par la technique « essai-erreur » 71

Figure 29 : Courbe granulométrique de la terre de barre étudiée 77

Figure 30 : Classification GTR de la terre de barre (d'après LCPC SETRA 2000) 79

Figure 31 : Courbe Proctor Modifié de la terre de barre 80

Figure 32 : Courbes granulométriques des différents mélanges (CNP/TB) 83

Figure 33 : Courbe Proctor Modifié du mélange 61 85

Figure 34 : Variation de la teneur en fines des mélanges en fonction des CNP 85

Figure 35 : Evolution de la teneur en eau en fonction du % de CNP 86

Figure 36 : Evolution de la densité sèche maximale des mélanges (CNP/TB) 87

Figure 37 : Variation de la compacité des mélanges 87

Figure 38 : Variation du CBR en fonction de la proportion de CNP 88

Figure 39 : Courbe de la granularité finie quasi-optimale de Caquot 98

Figure 40 : Coefficient d'effet de paroi b(x) en fonction du rapport des diamètres selon la théorie de Caquot (Caquot, 1937) 99

Figure 41 : Coefficient d'effet de desserrement a(x) en fonction du rapport des diamètres d'après la modification de Goltermann, Johansen, Palbol apportée à la théorie de Toufar, Klose et Born lorsque $\beta_1=\beta_2$ 102

Figure 42 : Compacité et porosité d'un mélange granulaire (de Larrard, 1999) 104

Figure 43 : a) Mélange binaire sans interaction : Gros grains dominants ; b) Mélange binaire sans interaction. Grains fins dominants (de Larrard, 1999) 105

Figure 44 : Calcul de la compacité dans le cas d'une interaction totale (de Larrard, 1999) .105

Figure 45 : Effet de desserrement exercé par un grain fin dans un empilement (de Larrard, 1999) 106

Figure 46 : Effet de paroi exercé par un gros grain dans un empilement des grains fins (de Larrard, 1999) 107

Figure 47 : Perturbations exercées sur la classe intermédiaire par les gros gains et les grains fins : cas d'un mélange ternaire (de Larrard, 1999). 108

Figure 48 : Mesure de compacité (Méthode LPC n°61) (de Larrard, 1999) 110

Figure 49 : Modèle de Ben-Aïm pour calculer la compacité moyenne dans un volume soumis à un effet de paroi (de Larrard, 1999) 110

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Figure 50 : Effet de paroi du récipient dans un mélange polydispersé (cas d'un mélange ternaire où la classe intermédiaire est dominante).....111
Figure 51 : Processus de détermination de la compacité expérimentale 112
Figure 52 : Courbes granulométriques des granulats 117
Figure 53 : Variation de la masse de CNP en fonction de la température et temps 118
Figure 54 : Variation de la compacité en fonction du temps de vibration 119
Figure 55 : Position des optima du mélange sur le graphique de Caquot 121
Figure 56 : Courbes granulométriques du mélange 6/10+4/6+2/4+0/2+filler (MEC et courbe de référence 125
Figure 57 : Variation de la compacité théorique du mélange granulaire en fonction de CNP 126
Figure 58 : Procédure de malaxage.....127
Figure 59 : Procédure de compactage a) Presse b) Quelques éprouvettes d'enrobés de CNP après démoulage.....128
Figure 60 : Système de mise sous vide 129
Figure 61 : Dispositif d'essai de compression.....130
Figure 62 : Evolution de la compacité des enrobés en fonction de % volumique des CNP .132
Figure 63 : Evolution des masses volumiques en fonction de % volumique des CNP 132
Figure 64 : Variation de la résistance en compression en fonction du % volumique de CNP 133
Figure 65 : Résultat de tenue à l'eau en fonction du % volumique des CNP.....134
Figure 66 : Courbe contrainte-déformation : détermination du module tangent et module sécant 135
Figure 67 : Variation de la résistance en fonction des déformations (Formule A).....136
Figure 68 : Variation de la résistance en fonction des déformations (Formule H) 136
Figure 69 : Variation de la résistance en fonction des déformations (Formule L) 137
Figure 70 : Variation de la résistance en fonction des déformations (Formule O) 137
Figure 71 : Variation de la résistance en fonction des déformations (Formule N) 138
Figure 72 : Variation du module tangent en fonction du % volumique des CNP.....139
Figure 73 : Variation du module sécant en fonction du % volumique des CNP 139
Figure 74 : Tableau synoptique de la classification de selon leur nature (Dmax ≤ 50 mm) (LCPC-SETRA, 2000a) 161
Figure 75 : – Classification des sols fins en laboratoire : Diagramme de plasticité.....166
Figure 76 : Classification des sols ; LCP modifiée (1974/1980) 167
Figure 77 : Courbe Proctor Modifié du mélange 37 170
Figure 78 : Courbe Proctor Modifié du mélange 46 170

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Figure 79 : Courbe Proctor Modifié du mélange 54 171
Figure 80 : Courbe Proctor Modifié du mélange 67 171
Figure 81 : Fiche produit EB10 172

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Liste des tableaux

Tableau 1 : Composition chimique des CNP (Mannan and Ganapathy, 2002; Teo et al., 2007) 38

Tableau 2 : Propriétés physiques des CNP comparées à celles d'un gravier concassé (Mannan and Ganapathy, 2002) 39

Tableau 3 : Résumé des caractéristiques mécaniques des CNP (Alengaram et al., 2013) ...40

Tableau 4 : Propriétés physique et mécaniques des béton de CNP du Bénin (Gibigaye et al., 2017) 43

Tableau 5 : Classes du trafic (CEBTP, 1984) 48

Tableau 6 : caractéristiques des sables argileux en couche de fondation (CEBTP, 1984) 49

Tableau 7 : Résultat de l'aplatissement 61

Tableau 8 : Résultat de masse volumique en vrac (CNP) 62

Tableau 9 : Résultat de masse volumique réelle 63

Tableau 10 : Résultat de la détermination du coefficient d'absorption des CNP 63

Tableau 11 : Proportions volumiques de la terre de barre et de CNP : n variant entre 0,1 et 1 (pas 0,1) 74

Tableau 12 : Proportions volumiques de terre de barre et de CNP ; n variant entre 0,2 et 0,4 (pas 0,05) 74

Tableau 13 : Paramètres d'identification de la terre de barre 78

Tableau 14 : Caractéristiques géotechniques de la terre de barre à l'état naturel 80

Tableau 15 : Critères d'utilisation de la terre de barre selon le CEBTP 81

Tableau 16 : Composition volumique des 5 mélanges (CNP/TB) 82

Tableau 17 : Caractéristiques géotechniques des différents mélanges (CNP/TB) 84

Tableau 18 : Récapitulatif des critères d'utilisation des mélanges (CNP/TB) 89

Tableau 19 : Caractéristiques du sable lagunaire 90

Tableau 20 : Synthèse des caractéristiques des mélanges TB + CNP + Sable 91

Tableau 21 : Récapitulatif des critères d'utilisation des mélanges (TB/CNP/sable) 92

Tableau 22 : Indice de compaction pour différents protocoles (de Larrard, 1999) 109

Tableau 23 : Surface spécifique estimés des granulats concassés (Bressi et al., 2016). 113

Tableau 24 : Surface spécifique des CNP 113

Tableau 25 : Résultats d'optimisation d'un mélange en fonction des différents diamètres ..120

Tableau 26 : Propriétés des granulats. 122

Tableau 27 : Composition optimale de chaque formule avec la teneur en liant correspondante. 123

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Tableau 28 : Résultats préliminaires du mélange 6/10+4/6+2/4+0/2+filler (MEC et courbe de référence 124

Tableau 29: Caractéristiques physiques des formules étudiées 131

Tableau 30 : Caractéristiques mécaniques des enrobés 133

Tableau 31 : Module tangent et module sécant (Lot sec) 138

Tableau 32 : Synthèse du module tangent et sécant d'enrobé de CNP et d'enrobé classique 140

Tableau 33 : Classification des sols fins : Classe A (LCPC-SETRA, 2000a).....163

Tableau 34 : Classification des sols sableux et graveleux avec fines : Classe B (LCPC-SETRA, 2000a) 165

Tableau 35 : Signification des symboles de classification LPC 167

Tableau 36 : Paramètres de classification HRB.....168

Tableau 37 : Valeurs de a, b, c et d en fonction de % des fines (classification HRB).....169

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Listes des sigles et abréviations

Abréviation

BCNP	Béton de Coques de noix de palmistes
CNP	Coque de noix de palmiste
MEC	Modèle d'empilement compressible
TB	Terre de barre (Sol latéritique)
SL	Sable lagunaire
SSS	Saturé sec en surface

Sigles d'organismes

AFNOR	Association Française de Normalisation
CEBTP	Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics
CIRAD	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
EN	European Norms
GC2D	Génie Civil, Diagnostic et Durabilité (Laboratoire d'Egletons, Université de Limoges-France)
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (actuellement IFSTTAR)
LEMA	Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Appliquée (Université d'Abomey-Calavi - Bénin)
LERGC	Laboratoire d'Essais et de Recherches en Génie Civil
MAEP/DPP	Ministère de l'Agriculture, de l'élevage et de la Pêche/ Direction de la Prospective et de la Programmation
NF	Norme Française
ISO	International Organization for Standardization
SETRA	Service d'Études sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements
RSPO	Roundtable on Sustainable Palm Oil
CKE	Centrifuge Kerosene Equivalent
CRR	Centre de Recherche Routière belge

Licence CC BY-NC-ND 3.0

USDA	United States Department of Agriculture
ISCC-EU	International Sustainability Carbon Certification- European Union
ISPO	International Society For Prosthetics And Orthotics- Indonesia
MSPO	Malaysian Sustainable Palm Oil
ACI	American Concrete Institute
CDT	Californian Department of Transportation
TP	Travaux Publics

Sigles : Géotechnique routière

AG	Analyse granulométrique
ES	Equivalent de sable
GTR	Guide technique des Terrassements Routiers, Réalisation des remblais et des couches de forme
GTS	Guide technique du Traitement des Sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques
ICBR	Indice Californian Bearing Ratio
IP	Indice de Plasticité
IPI	Indice Portant Immédiat
LHR	Liant Hydraulique Routier
M.O.	Matière Organique
OPM	Optimum Proctor Modifié
PST	Partie Supérieure de Terrassement
VB	Valeur de Bleu de méthylène
USCS	Unified Soil Classification System
HRB	Highway Research Board

Sigles : enrobé

PCG	Presse à cisaillement giratoire
GB	Grave bitume

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Calcul de la Teneur en liant

TL	Teneur en liant
∑	surface spécifique conventionnelle des granulats
G	éléments de diamètre supérieur à 6,3 mm
S	éléments de diamètre compris entre à 6,3 mm et 0,250 mm
s	éléments de diamètre compris entre à 0,250 mm et 0,063 mm
f	éléments de diamètre inferieurs à 0,063 mm
R^2	coefficient de corrélation
EME	Enrobé à module élevé
SMA	Stones Matrix Asphat

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Listes des notations/ Symboles

Loi parabolique (recherche de

P ; $P(d)$	pourcentage de la fraction granulaire de diamètre moyen d (fraction des solides de tailles inférieures à d)
D ; D_{max}	diamètre maximal des granulats (grosseur maximale dans un mélange poly-dispersé)
d	taille de particule considérée
n	exposant, paramètre de graduation qui contrôle la distribution granulaire
q	exposant intervenant dans la fonction de distribution de Andreasen et Andersen des tailles de particules
$P_{FT}(d)$	fonction de distribution de Fuller et Thompson des tailles de particules
$P_{AA}(d)$	Fonction de distribution de Andreasen et Andersen des tailles de particules

Symboles : Modèles d'empilement

η_r	Viscosité relative de la suspension
Φ	volume solide du mélange dans un volume total unité,
c_i	compacité atteinte par le mélange vidé de son liquide, si la classe i est dominante.
η_r^*	viscosité relative de référence
α_i	compacité propre réelle de la classe i
n	nombre de classes granulaires du mélange
d_i	diamètre moyen de la classe i
β_i	compacité propre virtuelle de la classe i; c'est la compacité virtuelle de la classe i prise individuellement
a_{ij}	paramètre décrivant l'effet de desserrement exercé par la classe j sur la classe i dominante dans le modèle d'empilement compressible (MEC) de de Larrard
b_{ij}	paramètre décrivant l'effet de paroi exercé par la classe j sur la classe i dominante dans le modèle d'empilement compressible (MEC) de de Larrard
β	compacité résiduelle dans un volume infini
$\bar{\beta}$	la compacité résiduelle moyenne (pénalisée par l'effet de paroi)

Licence CC BY-NC-ND 3.0

y_i	proportion volumique de la classe i dans le mélange
γ	compacité virtuelle d'un mélange poly-dispersé
γ_i	Compacité virtuelle d'un mélange poly-dispersé, lorsque la classe est dominante
γ	compacité virtuelle du mélange
C	compacité expérimentale du mélange
K_i	indice de compaction partiel dû à la classe i
K	indice de compaction pour le mélange

Licence CC BY-NC-ND 3.0

INTRODUCTION GENERALE

Introduction

1- Contexte et problématique

Le palmier à huile est la première source pour la production des matières grasses de la planète. Il est plus le couramment cultivé dans les zones tropicales à cause des contraintes agrobiologiques qui lui sont associées. En 2020, plus de 72 millions de tonnes d'huiles de palme et 19 millions de tonnes d'huiles de palmiste sont produites dans le monde (USDA, 2021). A l'échelle mondiale, environ 80% de ces huiles sont utilisées dans l'industrie agroalimentaire, 10% environ dans les produits cosmétiques et 10% environ dans les biocarburants. La France par exemple, importe annuellement entre 347 000 tonnes et 970 000 tonnes d'huile de palme pour le biocarburant (70%), l'agroalimentaire (17%) et l'oléo-chimie (13%). Face à une demande sans cesse croissante, la production mondiale ne cesse de s'accroitre (72 millions de tonnes d'huile de palme produites en 2020) (USDA, 2021). La production de ces huiles végétales génère plusieurs déchets parmi lesquels les coques de noix de palmiste (CNP). Elles sont des déchets non putrescibles qui représentent 7 à 8% du poids du régime de palmier et sont disponibles en quantité importante dans les zones de production constituant ainsi un encombrement de l'espace et une gêne nocive pour l'environnement, si elles sont rejetés sans traitement (Okpala, 1990; Basiron, 2007).

L'industrie de l'huile de palme produit plus de 21 359 000 tonnes de CNP dans le monde (Gérard et al., 1998), 270 000 tonnes au Cameroun (Ndapeu et al., 2020; Ribier and Rouzière, 1995), près de cinq millions de tonnes en Malaisie (Sabil et al., 2013), 1,5 millions au Nigéria (H. Mohammed et al., 2014; Olutaiwo and Owolabi, 2015) et plus de 300 000 tonnes au Bénin (Gibigaye et al., 2017; Godonou, 2019). Au Bénin, cette quantité est sans cesse croissante au vu des différentes actions menées par les gouvernants pour relancer cette filière qui actuellement ne contribue que pour 43% de la demande et des besoins en corps gras d'origine végétale locale (MAEP, 2017; Toffa, 2009). Face à l'épuisement des ressources naturelles nobles pour les travaux de génie civil dans certains pays du monde, il s'avère nécessaire voire indispensable de nos jours, de mettre au point des matériaux alternatifs qui respectent au mieux l'environnement à travers leur faible pouvoir d'émission de gaz à effet de serre au cours de leur production, leur transport et leur mise en œuvre. Plusieurs filières de valorisation ou de recyclage ont vu le jour en génie civil (bâtiments et chaussées) afin de mettre au point des granulats ou matériaux alternatifs (Achour, 2013; Allam et al., 2022; Dia, 2013; Dubois, 2006; Tenn et al., 2015; Tran, 2009). Dans le domaine de la construction des bâtiments en terre, des avancées notables ont été faites ces dernières années (Adadja, 2020; Adagbe, 2021; Labintan et al., 2019) ainsi que pour les éco bétons (Karaky, 2018; Niyigena, 2016; Nozahic, 2012; Thieblesson, 2018).

Traditionnellement au Bénin, les CNP sont utilisées en partie pour la combustion à des fins de ménage. Ainsi une grande proportion des CNP issues de l'extraction de l'huile de palmiste, demeure non utilisée. La valorisation des CNP à travers leur utilisation dans le béton ou dans des composites est devenue un concept largement partagé de nos jours. Dans cette perspective, les coques de noix de palmiste considérées jusqu'alors comme déchets sans valeur ajoutée, sont placées au cœur de certaines filières de valorisation à travers des travaux de recherche et des thèses. Pendant longtemps, la filière de valorisation la plus étudiée est celle qui concerne l'utilisation des CNP comme granulats dans le béton hydraulique (Basri et al., 1999; Gibigaye et al., 2017; Okafor, 1988; Okpala, 1990; Teo et al., 2006; Traore et al., 2018). Ces études ont conclu d'une part que les CNP possèdent des caractéristiques physico-

mécaniques adéquates et peuvent remplacer totalement les granulats minéraux grossiers dans la production du béton léger de structure. D'autre part, ces études ont conclu qu'il existe peu de méthodes structurées de formulation pour ces filières de valorisation et il est difficile d'utiliser celles des agrégats conventionnels (Shetty, 1993). C'est ce qui traduit l'usage de la méthode « essai-erreur » afin d'obtenir des résultats acceptables (Mannan and Ganapathy, 2001a). La méthode dite « essai-erreur » consiste à varier les fractions des constituants afin de retenir les mélanges qui offriraient des caractéristiques physico-mécaniques minimales recommandées et désirées pour les besoins des ouvrages de Génie Civil. Cette méthode est un grand consommateur de temps et de matériaux d'essais en laboratoire et ne donne pas toujours la possibilité de prédire certaines caractéristiques spécifiques des composites. Malgré ces avancées de valorisation des CNP dans le béton de structure (Ogundipe et al., 2021; Raheem et al., 2021) et comme combustible (Pawlak-Kruczek et al., 2020; Saadon et al., 2014; Sukiran et al., 2017), Njeugna et al. estiment que 70% des CNP restent non utilisées dans certaines régions du monde et sont jetées dans la nature, créant ainsi une pollution environnementale car leur dégradation naturelle est très lente (Njeugna et al., 2013).

Les sols des zones de production du palmier à huile sont pour la plupart du temps des sols latéritiques qui rendent presque impraticables les pistes et les routes par temps de pluie. De ce fait, l'évacuation de la production vers les unités de transformation du palmier à huile est hypothéquée. C'est le cas, par exemple, de la zone du Haut-Nkam (région de l'Ouest du Cameroun (Edmund et al., 2014; Njeugna et al., 2013) et du sud du Bénin. Le sud du Bénin, grande zone de production du palmier à huile est une région essentiellement sablo-argileuse où l'on rencontre une importante réserve de terre latéritique, encore couramment appelée localement, terre de barre (Gbaguidi et al., 2018). A cause de certaines de ses performances géotechniques (fort taux de particules fines, grande plasticité, …), l'utilisation de la terre de barre pour la construction routière ne saurait être envisagée. Toutefois, au sud du Bénin, pour lutter contre les effets de glissement des automobiles sur certaines pistes et routes en période pluvieuse, les populations versent en surface de ces ouvrages CNP, permettant d'obtenir un composite qui contribue à faciliter la circulation.

A ce jour, très peu d'études se sont intéressées à la problématique de valorisation des CNP dans le domaine routier. (Adeboje et al., 2017; Amu et al., 2008; Madjadoumbaye et al., 2013). Amu (Amu et al., 2008) a étudié l'effet des CNP dans la latérite stabilisée avec de l'asphalte pour réduire la plasticité, en faisant varier les proportions des différents composants. Il a remarqué que certaines caractéristiques telles que la résistance à la compression du mélange optimal (75% de latérite et 25% de CNP, en masse) se sont nettement améliorées comparées à celles de la latérite naturelle. Madjadoumbaye a conclu quant à lui que les CNP ont amélioré l'indice CBR de 26 % (95 % d'OPM) pour le composite (20 % de CNP et 80 % de grave latéritique) (Madjadoumbaye et al., 2013). Aucun auteur ne s'est encore intéressé au mélange des sols fins (terre de barre) avec des CNP pour une utilisation comme matériau routier. Ce travail étudie expérimentalement la mise au point de composites (matériaux alternatifs), à base de la terre de barre et des CNP (ressources naturelles disponibles localement), pour leur utilisation en couche de fondation des routes à faible trafic.

En 2006, Peter Ndoke s'est penché sur les performances des CNP en remplacement partiel des gros agrégats dans le béton bitumineux. Il a conclu que les CNP peuvent remplacer les gros agrégats jusqu'à 10% pour les trafics lourds et 50% pour les trafics légers. Il va jusqu'à dire que pour les faibles trafics en milieu rural, les CNP peuvent totalement être remplacées par les gros agrégats (Ndoke, 2006). En 2015 les travaux de Oyedepo (Oyedepo et al., 2015) et Olutaiwo (Olutaiwo and Owolabi, 2015) confirment ces résultats par rapport à la possibilité

Licence CC BY-NC-ND 3.0

de remplacement partiel des granulats par des CNP avec différents dosages en fonction du trafic.

Afin de protéger les couches d'assises et le confort de l'usager sur les routes, objet du présent document, le second axe de cette thèse est la formulation d'un enrobé à base de CNP utilisable en couche de roulement.

2- Objectifs

Dans cette thèse il est question d'élaborer des matériaux composites à base des CNP, utilisables en couches de chaussées de routes à faible trafic.

Les objectifs spécifiques se présentent comme suit :

- formuler un matériau composite à base de CNP, à matrice argileuse utilisable en couche de fondation ;
- formuler un matériau composite à base de CNP à matrice hydrocarbonée utilisable en couche de roulement.

3- Structure de la thèse

Ce manuscrit est subdivisé en cinq chapitres.

Le premier chapitre est dédié à une synthèse bibliographique. Dans un premier temps un point est fait sur l'origine, la nature et les caractéristiques des CNP. Dans un second temps, l'état de l'art porte sur la valorisation des CNP dans les bétons légers de structure et en technique routière. Ce chapitre aborde ensuite les sols fins en géotechnique routière et les différentes techniques de leur traitement.

Les deuxième et troisième chapitres (objets de la 1ère partie de la thèse) sont consacrés à la valorisation des CNP en couches d'assises. Le deuxième chapitre est consacré à la démarche expérimentale et les techniques de caractérisation, utilisées dans ce travail. Il présente aussi la méthode de formulation et les premiers essais de caractérisation de la matrice (terre de barre) et de l'inclusion (CNP). Le troisième chapitre quant à lui, est dédié à l'étude au laboratoire des différents mélanges. L'influence des CNP sur le sol argileux est mesuré grâce aux caractéristiques géotechniques (Limites d'Atterberg, Indice Proctor Modifié et indice CBR) des composites.

La deuxième partie de la thèse (chapitres quatre et cinq) porte sur les matériaux hydrocarbonés à base de CNP pour une utilisation en couche de roulement. Le quatrième chapitre a pour objectif d'appliquer un modèle structuré afin d'optimiser la formulation et la démarche expérimentale. Le cinquième chapitre quant à lui est focalisé sur les caractéristiques des enrobés à base des CNP, utilisables en couche de roulement.

Enfin une conclusion générale fait la synthèse des travaux de valorisation des CNP en technique routière. Cette conclusion sera accompagnée des perspectives.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Chapitre I. Revue de la littérature

Introduction

Ce chapitre fait une synthèse des connaissances sur l'utilisation des CNP en Génie Civil. Dans un premier temps, nous présentons les caractéristiques physiques, géométriques et mécaniques des CNP et dans un second temps, les traitements des CNP, les méthodes de formulation et les caractéristiques des bétons de CNP (BCNP). Comme une partie de cette thèse est consacrée à l'étude de l'influence des CNP sur les sols argileux, il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance de la matrice argileuse en étude. La dernière partie du chapitre présente les généralités sur les enrobés.

I.1. Généralités sur les CNP

I.1.1. Palmier à huile dans le monde

De la famille des Arecacées, le palmier à huile est une plante monocotylédone. Il en existe principalement deux espèces : Elaeis guineensis (la plus importante et la plus répandue) et Eleasis oleifera (espèce rencontrée en peuplements spontanés au nord de l'Amérique du sud). Les différentes variétés sont classifiées selon la couleur du fruit, la présence ou non de caroténoïdes dans la pulpe et l'épaisseur des coques (Jacquemard, 2011).

Selon le critère de l'épaisseur des coques de noix de palmiste, on distingue:

- Le dura (peu de puple, grosse amande avec une coque épaisse)
- Le pisifera (beaucoup de pulpe, petite amande, coque presque inexistante)
- Le tenera (beaucoup de pulpe, grosse amande, coque peu épaisse)

Dans cette thèse, ce sont les coques de la famille dura qui sont utilisées. La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre le processus d'extraction de noix de palme et de CNP de l'espèce dura.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

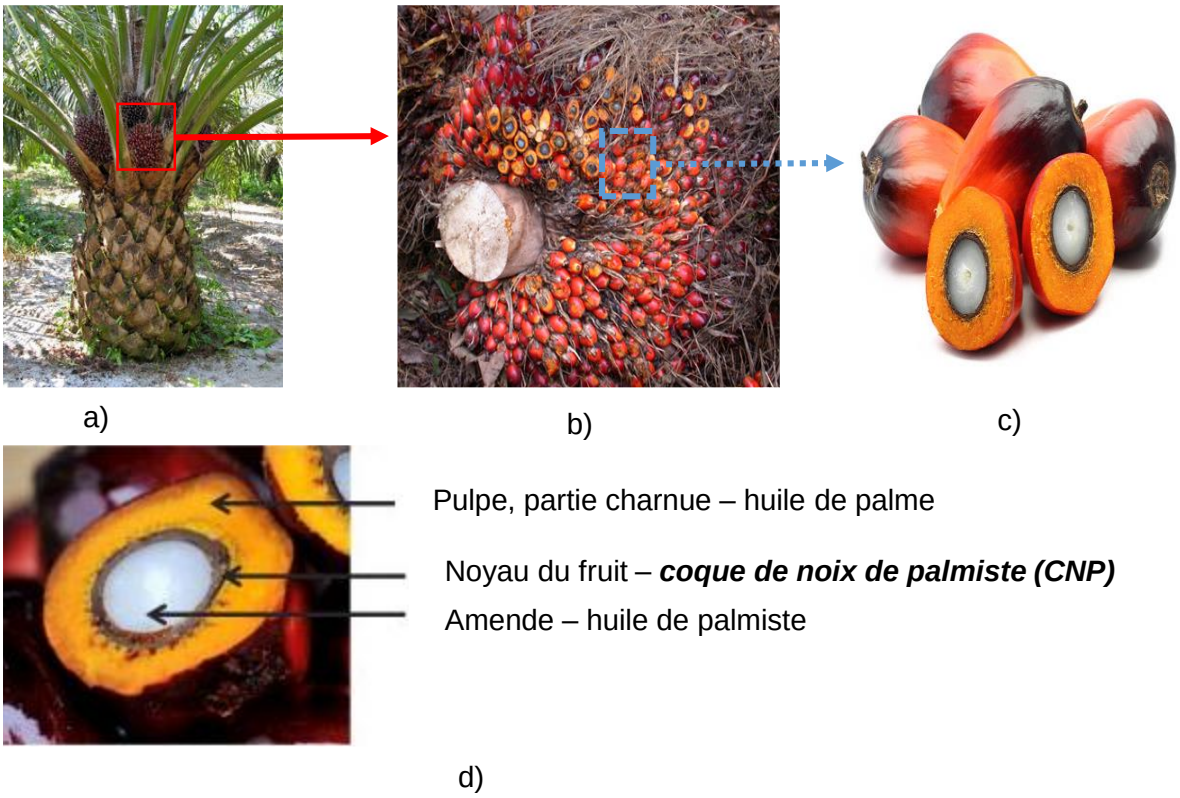


Figure 1 : Le palmier a) le dura (espèce répandue en Afrique), b) le régime de noix de palme, c) noix de palme divisé en deux, d) différentes parties de noix de palme (Quoi dans mon assiette, 2016)

Le palmier à huile est originaire du golfe de Guinée. Il est essentiellement cultivé dans les régions tropicales humides de l'Amérique, l'Afrique et l'Asie (Jacquemard, 2011), comme indiqué sur la Figure 2. Pour les pays producteurs, il constitue une énorme source de revenus pour les économies locales tant pour l'exportation vers les pays non producteurs que pour l'industrie locale (Rival, 2020).

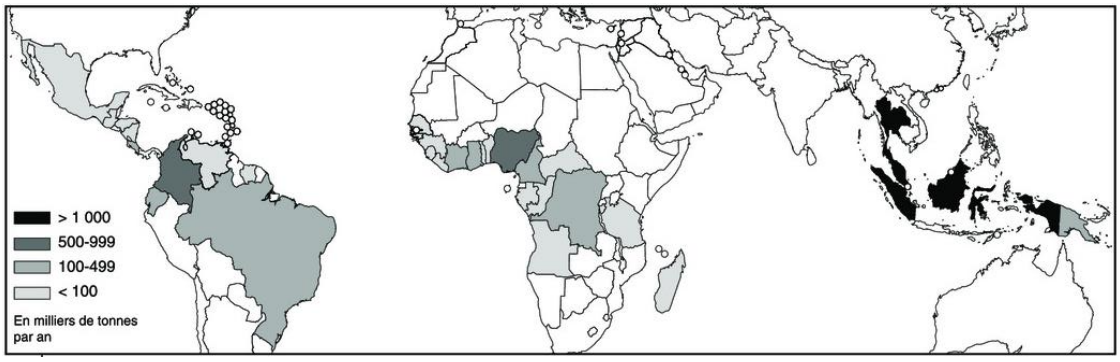


Figure 2 : Zones de production mondiale de palmier à huile (Jacquemard, 2011)

Devant le soja, le colza et le tournesol, le palmier à huile est la première plante oléagineuse au monde ; 35% de la production mondiale (62 millions de tonnes en 2015) (Rival, 2020). Selon la Figure 3, la consommation mondiale d'huiles végétales ne cesse d'augmenter au fil des années.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

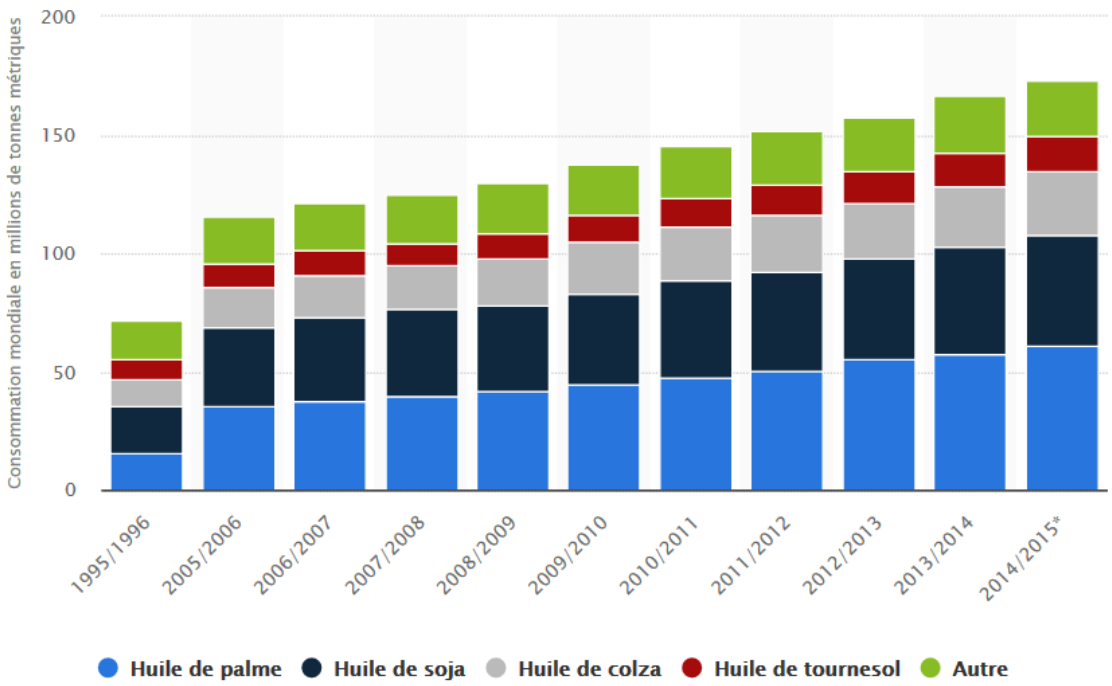


Figure 3 : Consommation mondiale d'huiles végétales de 1995/1996 à 2014/2015 (en millions de tonnes) (Godonou, 2019)

En cinq ans cette production a augmenté de plus de 17% soit plus de 72 millions de tonnes de l'huile de palme (2020) (USDA, 2021). Cette production ne cessera d'accroitre à cause de la demande toujours élevée de la population. L'huile de palme est utilisée dans la cosmétique et dans de nombreux produits industriels (plats, biscuits, gâteaux, céréales, pâtes…). En France, chaque habitant en consommerait entre 700 g et 4,5 kg par an (Quoi dans mon assiette, 2016)

Deux huiles comestibles sont extraites du palmier à huile:

1. **L'huile de palme** : elle est extraite de la pulpe du fruit et réprésente 18 à 26 % du poids du régime
2. **L'huile de palmiste** : elle est extraite de l'amande et réprésente 3 à 6 % du poids du régime et 50% du poids sec de l'amande.

Face à la déforestation mondiale liée directement au palmier à huile (d'environ 2,3% entre 1990 et 2008), la culture de palmier à huile est mise sous les feux des projecteurs de la décennie relatif surtout à l'environnement (Rival, 2020). Pour une culture responsable et durable, la certification internationale RSPO (Roundtable on Sustainable Palm Oil) a vu le jour depuis 2004 et regroupe les producteurs, les industries, les distributeurs, les investisseurs et les ONG (Ministère de la Transition Ecologique Français, 2018; Quoi dans mon assiette, 2016; Rival, 2020). Les huit (8) principes de la certification RSPO sont :

- engagement de transparences;
- respect des lois et reglements en vigueur ;
- engagement du maintien de la viabilité économique et financière à long terme ;
- engagement des planteurs et usiniers à suivre les bonnes pratiques ;
- responsabilité environnementale et conservation des ressources naturelles et de la biodiversité ;

Licence CC BY-NC-ND 3.0

- gestion responsable des employés, des individus et des communautés affectés par les plantations et les usines
- développement responsable de nouvelles plantations
- engagement à une amélioration continue dans les secteurs d'activités majeurs.

En dehors de la certification RSPO, il existe d'autres réglementations comme ISCC-EU, ISPO (Indonésie) et MSPO (Malaisie).

De nos jours, la production mondiale est majoritairement assurée par l'Indonésie et la Malaisie (Figure 4) qui totalisent près de 84% des volumes produits (Rival, 2020).

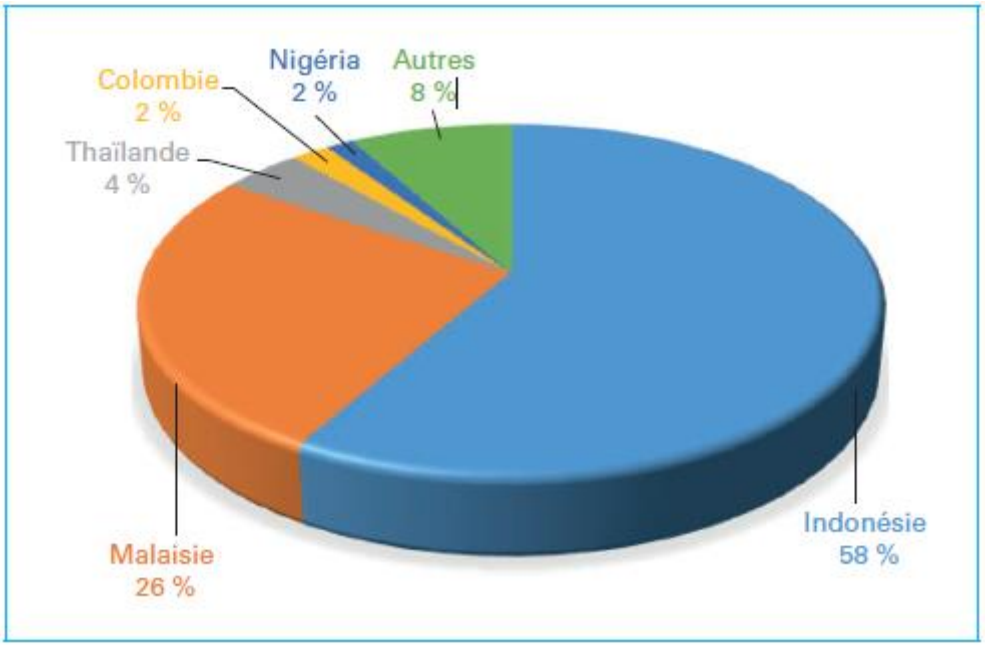


Figure 4 : Répartition de la production mondiale d'huile de palme (Rival, 2020)

Par contre, la consommation de l'huile de palme (Figure 5) est tirée par les pays du Sud, portée à la fois par la croissance démographique et l'élévation du niveau de vie dans les pays émergents (l'Inde, l'Indonésie, la Chine…)

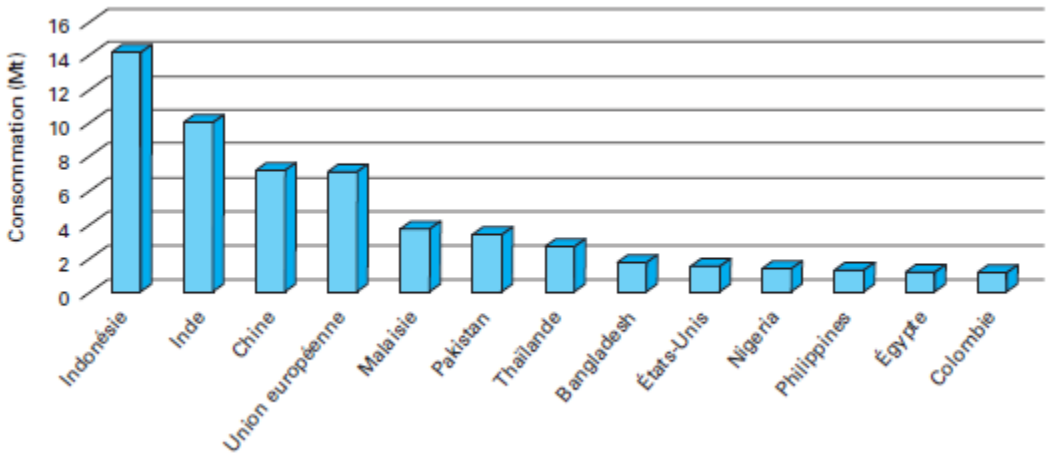


Figure 5 : Consommation mondiale de l'huile de palme (Rival, 2020)

Dans la balance mondiale de consommation, l'Union Européenne a pesé à elle seule 10% en 2019. De 1975 à 2010 la consommation globale en corps gras per capita a doublé passant de

Licence CC BY-NC-ND 3.0

11 à 24,7 kg/an. Selon les projections, cette consommation qui tend à se stabiliser passera à environ 27 kg/an et par habitant en 2050 (Rival, 2020).

I.1.2. Palmier à huile au Bénin

La production du palmier à huile au Bénin remonte au règne du Roi Ghézo (1818-1858) et continue d'occuper une place de choix parmi les cultures industrielles d'exportation. Dans les 1970 la filière du palmier à huile a été la première culture d'exportation du Bénin. La transformation sur place du palmier à huile au Bénin a commencé depuis les années 1930. Suivant la Figure 6, le palmier à huile est essentiellement cultivé au Sud du Bénin. Le palmier à huile naturel (le dura) reste prédominant, mais de plus en plus on assiste à l'introduction de cultures de palmiers sélectionnés avec des unités de transformation semi-artisanales, gérées par des opérateurs privés. Sur le plan économique et socioculturel le palmier à huile reste et demeure la plante oléagineuse la plus importante pour les populations du sud du Bénin. La Figure 7 montre l'évolution de la production nationale. Au regard de la forte demande du marché mondiale pour les produits issus du palmier à huile, le gouvernement du Bénin a mis en place un vaste programme de dynamisation de cette culture (MAEP, 2020).

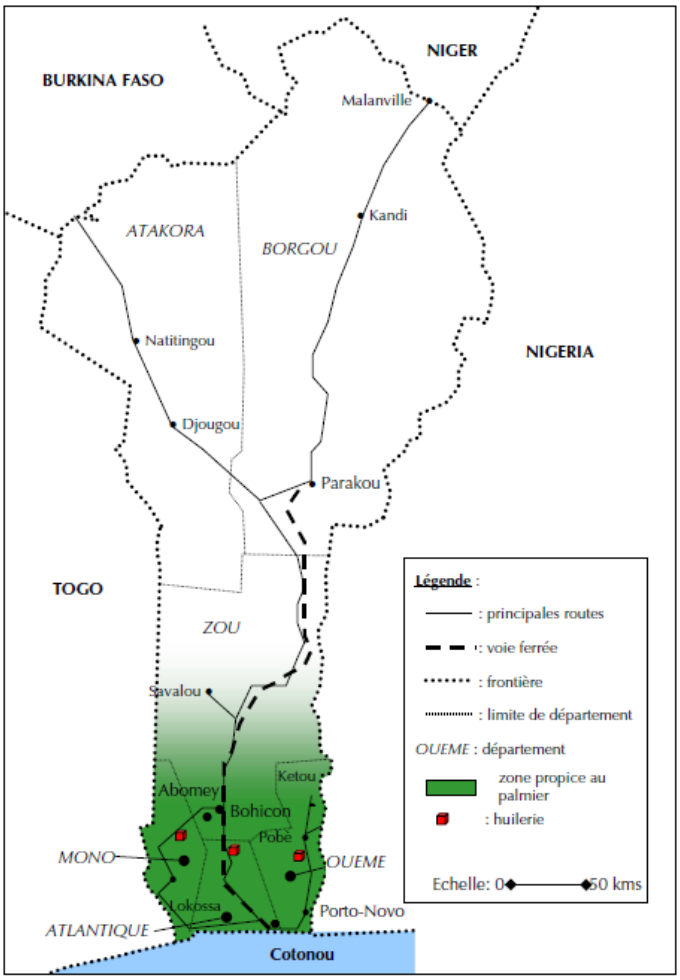


Figure 6 : Bénin : Zone de culture de palmier à huile (Fournier et al., 2001)

Licence CC BY-NC-ND 3.0

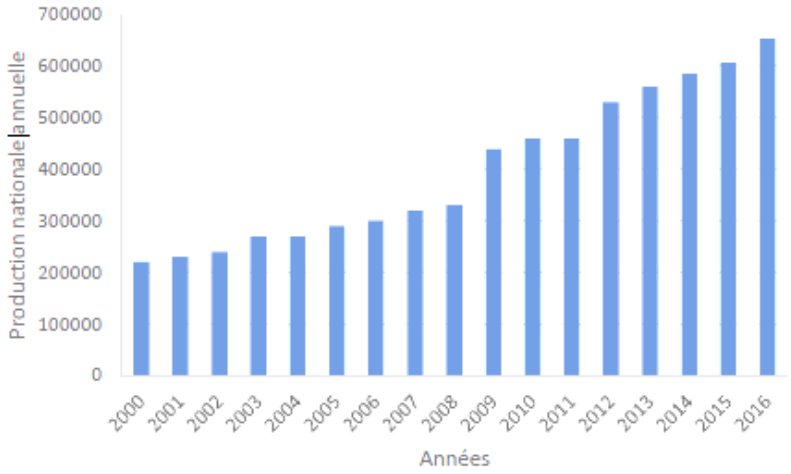


Figure 7 : Evolution de la production nationale sur 16 années (FAOSTAT, 2017)

I.1.3. Description du processus d'obtention artisanale des CNP

L'obtention des CNP dans les unités de production artisanale se fait après l'extraction de l'huile de palme. Les processus peuvent être totalement manuels ou avec des étapes mécanisées selon la taille de l'unité artisanale d'exploitation. L'ensemble de la procédure est résumé à la Figure 8 et à la Figure 9:

Licence CC BY-NC-ND 3.0

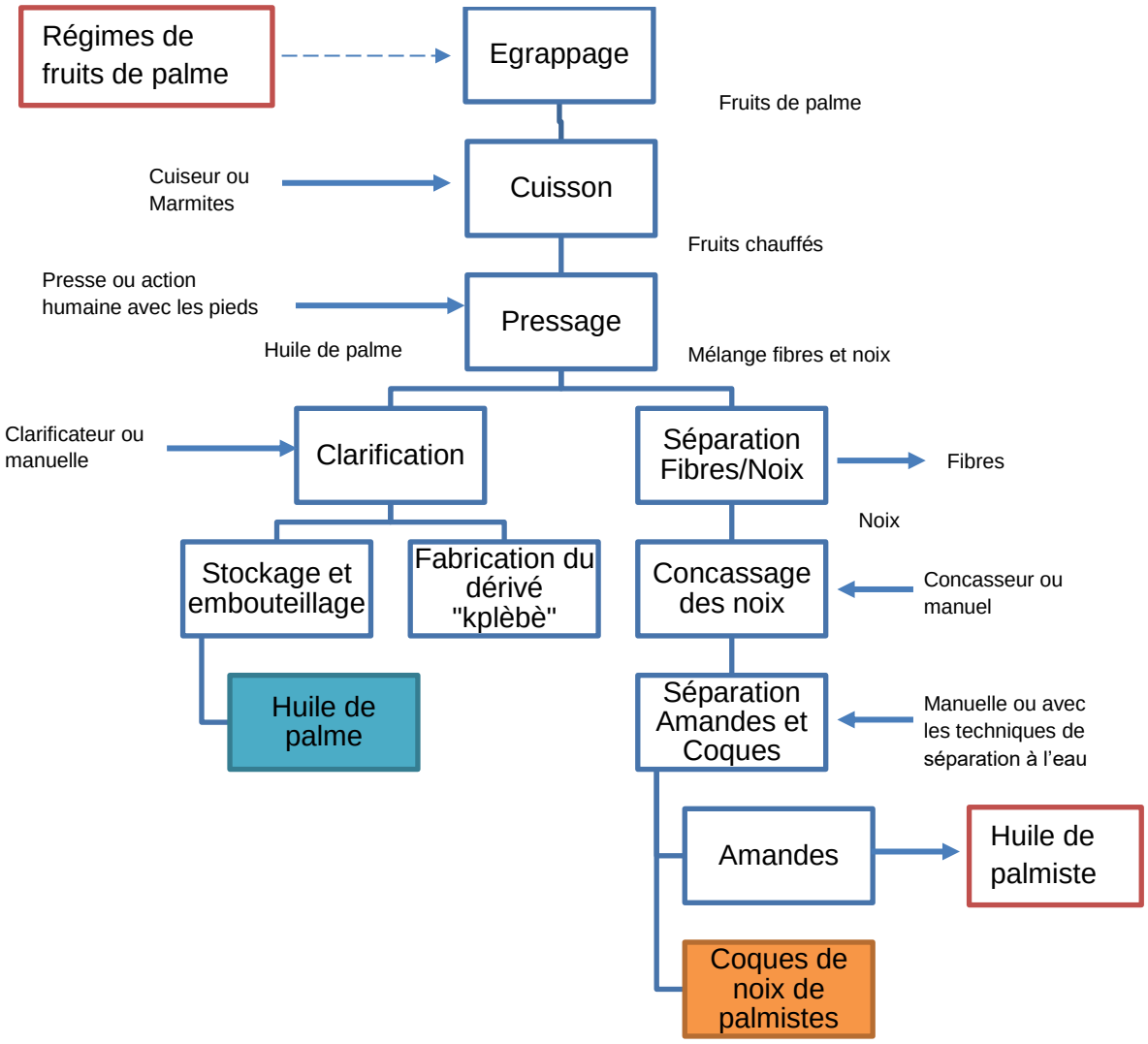


Figure 8 : Processus de production (artisanale) de l'huile de palme et d'obtention des coques de noix de palmiste (GERES, 2013)

L'égrappage consiste à séparer les fruits des rafles à l'aide d'une machette ou d'une hache, et récupérer les fruits de palme à la main (a).

La Cuisson : les fruits sont cuits à la vapeur d'eau pour les ramollir et faciliter le pressage (b)

Le pressage : après le pressage on obtient un mélange de l'huile brute (mélange huile, eau, boue et fibres) et fibres/noix (c).

La séparation consiste donc à séparer l'huile brute et le mélange fibres/noix (d)

La clarification : l'huile brute est chauffée ; l'huile de palme encore appelée huile rouge est séparée des autres éléments constitutifs de l'huile brute ; l'huile rouge obtenue est conservée dans des conteneurs appelés localement des bidons.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Figure 9 : Processus de production de l'huile de palme a) Egrappage, b) Cuisson, c) Pressage, d) Séparation huile brute/fibres/noix e) Clarification, f) Concassage de noix sèches (GERES, 2013)

Pour obtenir les CNP, il faut continuer le processus de transformation des noix de palmiste, issues de la clarification à travers, le concassage des noix et leur séparation en amandes et coques (Figure 10).

Le concassage : Les noix préalablement séchées au soleil sont concassées manuellement (avec des pierres) ou avec des machines de fabrication artisanale (Figure 10 a et b)

La séparation des amandes et des coques : La séparation peut être manuelle en triant directement les amandes. Aussi, après un premier tri au vent pour enlever les petites particules et le reste des fibres, traditionnellement les coques et amandes sont mélangées avec de l'eau et de la terre latéritique ou de la cendre de bois (Figure 10 c) . A la surface les amandes flottent et elles sont récupérés et séchées ; elles serviront à la production de l'huile de palmiste (ce processus n'est pas décrit dans le présent manuscrit).

De ce qui précède, il est loisible de dire que les caractéristiques physiques des CNP vont dépendre non seulement du type de palmier à huile mais aussi des modes de concassage des noix et de la technique de séparation.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

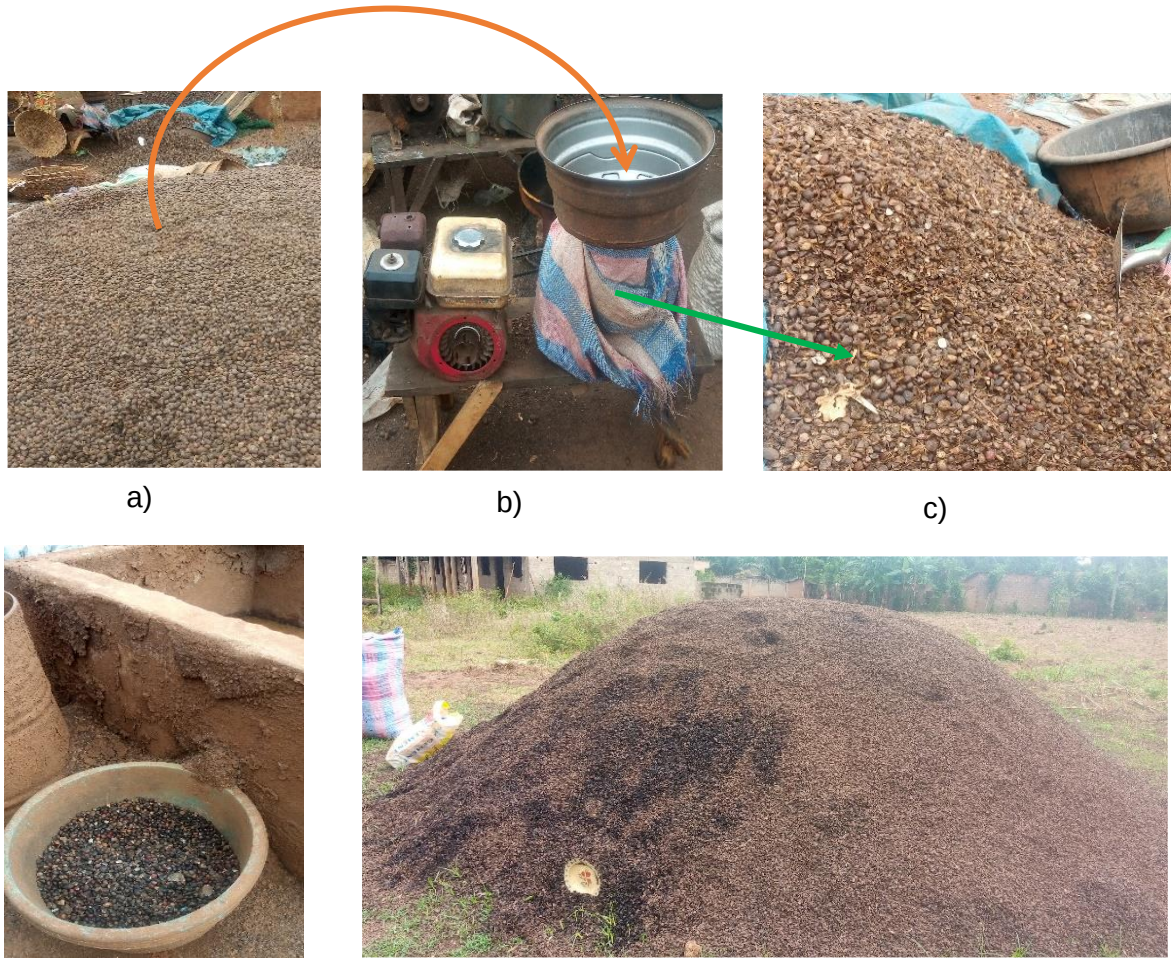


Figure 10 : obtention artisanale des CNP : a) Noix de palmiste b) machine artisanale de concassage des noix c) mélange amande + coque + fibres, d) séparation dans l'eau coque et amande par le principe de différence de densité, e) tas de CNP, prêtes pour le prélèvement en vue des essais de laboratoire.

I.1.4. Caractéristiques des CNP

I.1.4.1. Caractéristiques géométriques

La géométrie des CNP dépend de l'origine du palmier et du procédé d'obtention des coques décrit au paragraphe **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** (Basri et al., 1999; Okafor, 1988; Okpala, 1990). Elles ont des formes polygonales avec des bords anguleux, des surfaces intérieures assez lisses avec des faces concaves et convexes. Les bords cassés sont rugueux et épineux (Basri et al., 1999; Okafor, 1988). Leur épaisseur dépend aussi de l'origine ou du type de palmier et peut varier de 0,15 à 8 mm (Basri et al., 1999; Okpala, 1990). La distribution granulaire des CNP peut s'étendre de 3 à 14 mm (Alengaram et al., 2013).

I.1.4.2. Microstructure

L'observation des CNP dans les directions longitudinale et transversale au microscope électronique à balayage (MEB) montre la présence de pores de taille variant de 16 à 24 micromètres (Figure 11) sur la surface convexe (Alengaram et al., 2011). En présence de l'eau ce sont ces pores qui favorisent l'absorption.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

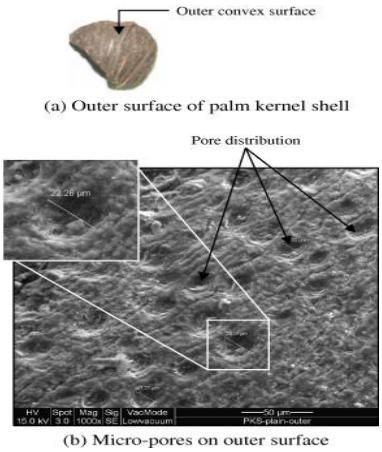


Figure 11 : Miro-pores sur la surface convexe des CNP (Alengaram et al., 2011).

I.1.4.3. Caractéristiques chimiques

L'étude de la composition chimique révèle que les CNP sont composées de 99% de partie organique et des minéraux actifs en faibles proportions (Mannan and Ganapathy, 2002; Teo et al., 2007). La composition chimiques est résumée dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Composition chimique des CNP (Mannan and Ganapathy, 2002; Teo et al., 2007)

Eléments	Résultats (%)
Cendre	1,53
Azote (N)	0,41
Soufre (S)	0,000783
Calcium (CaO)	0,0765
Magnésium (MgO)	0,0352
Sodium (Na_2O)	0,00156
Potassium (K_2O)	0,00042
Alumium (Al_2O_3)	0,130
Fer (Fe_2O_3)	0,0333
Silice (SiO_2)	0,0146
Chlorure (Cl^-)	0,00072
Perte au feu	98,5

Licence CC BY-NC-ND 3.0

I.1.4.4. Caractéristiques physiques des CNP (Masse volumique et absorption)

I.1.4.4.1. Masses volumiques absolue et relative

Pour des épaisseurs moyennes d'environ 4 mm, la masse volumique réelle varie entre 1 170 kg/m^3 et 1 370 kg/m^3. La masse volumique en vrac quant à elle varie de 500 à 620 kg/m^3. Ces valeurs prouvent que les CNP sont plus légères qu'un granulat minéral (entre 2 600 et 2 700 kg/m^3) (Okafor, 1988; Okpala, 1990).

I.1.4.4.2. Absorption WA_{24}

L'absorption d'eau en 24 heures des CNP est de l'ordre de 21 à 33% (Shafigh et al., 2011). Il en résulte que les CNP ont une forte absorption comparée à la capacité d'absorption des granulats minéraux qui est généralement inférieure à 2% (Neville, 2011). Comme annoncée au paragraphe I.1.4.2 cette absorption élevée s'explique par la présence et la spécificité des pores des CNP. Pour différentes tailles, l'absorption varie de 8 à 15% (pour une heure d'immersion) et de 21 à 24% (pour 24 heures d'immersion) (Alengaram et al., 2010). Les CNP ont une absorption comparable à celle des noix de coco qui vaut 24% en 24 heures d'immersion (Gunasekaran et al., 2014). Les méthodes de formulation et de mise en œuvre des bétons à base des CNP sont fortement influencées par cette forte capacité d'absorption d'eau. L'absorption d'eau par les CNP dépend à son tour du degré de propreté des surfaces des CNP, donc, du traitement préalable subi par les coques.

Plusieurs auteurs ont étudié les effets des traitements des CNP sur les caractéristiques des BCNP (Traore et al., 2018). Mannan (Mannan et al., 2006) a prétraité les CNP avec une solution à 20% d'alcool polyvinylique. Ce prétraitement a permis de réduire l'absorption des CNP de 23,3% à 4,2%. Le Tableau 2 montre les valeurs moyennes des propriétés physiques énumérées en comparaison avec celles des agrégats conventionnels de poids normal.

Tableau 2 : Propriétés physiques des CNP comparées à celles d'un gravier concassé (Mannan and Ganapathy, 2002)

Propriétés physiques	CNP	Gravier concassé
Masse volumique réelle (kg/m^3)	1 170	2 610
Absorption d'eau en 24h (%)	23,30	0,76
Masse volumique apparente (kg/m^3)	590	1 470
Indice d'aplatissement (%)	65	25

I.1.4.5. Caractéristiques mécaniques des CNP

Selon Alengaram, la valeur d'abrasion Los Angeles des CNP varie entre 3 et 8% alors que celle du gravier concassé varie entre 20 et 25% (Alengaram et al., 2013). Selon Basri, cette valeur est de 24% et 4,8% respectivement pour un gravier d'origine minérale et les CNP (Basri et al., 1999). Ceci prouve que les CNP comme d'autres granulats légers ont une bonne

Licence CC BY-NC-ND 3.0

résistance à l'usure et ne se détériorent pas facilement, comparées aux granulats conventionnels. De plus, les CNP ont des valeurs de broyage et d'impact plus faibles que celles des granulats conventionnels (Teo et al., 2007). Alengaram (Alengaram et al., 2013) résume dans le Tableau 3 suivant certaines caractéristiques mécaniques des CNP.

Tableau 3 : Résumé des caractéristiques mécaniques des CNP (Alengaram et al., 2013)

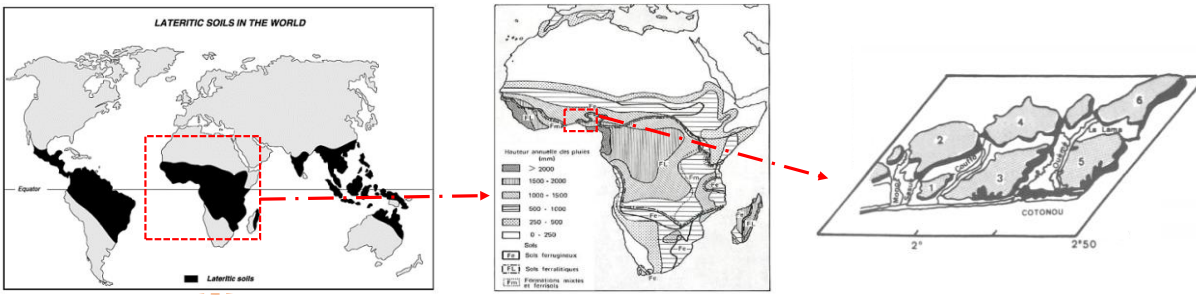
Auteurs et années	Valeur d'abrasion (Los Angeles) (%)	Valeur d'impact de l'agrégat (AIV) (%)	Valeur de broyage des agrégats (ACV) (%)
(Okafor, 1988)	-	6,00	10,00
(Okpala, 1990)	3	-	4,67
(Basri et al., 1999)	5	-	-
(Mannan and Ganapathy, 2002, 2001b)	5	7,86	-
(Olanipekun et al., 2006)	4	-	-
(Mannan et al., 2006)	-	1,04 – 7,86	-
(Ndoke, 2006)	-	4,50	-
(Teo et al., 2007, 2006)	5	7,51	8,00
(Jumaat et al., 2009)	8	3,91	-
(Mahmud et al., 2009)	-	3,91	-

I.1.5. Usage endogène des CNP

Traditionnellement les CNP sont utilisées comme du combustible dans le feu de cuisson des ménages, des forgerons et dans le four de certaines industries (Epesse Misse et al., 2013).

Le territoire du sud du Bénin est caractérisé par un sol globalement latéritique ainsi que le décrit Slansky (Slansky, 1962) à travers la Figure 12.

Licence CC BY-NC-ND 3.0



Légendes : **a)** Distribution des formations latéritiques sur la surface du globe (Lyon Associates, 1971)

b) Les différentes formations latéritiques en Afrique. Relation entre le type de pédogenèse et le climat (Lyon Associates, 1971)

c) Répartition des unités géographiques dans le Sud du Bénin 1. Plateau de Corné ; 2. Plateau d'Aplahoué ; 3. Plateau d'Allada ; 4. Plateau d'Abomey ; 5. Plateau de Sakété ; 6. Plateau de Kétou (Affaton et al., 1985; Houessou and Lang, 1978; Slansky, 1962)

Figure 12 : Répartition des plateaux de la terre de barre au sud du Bénin

En saison pluvieuse, le sol latéritique, la terre de barre rend impraticables à la circulation, les routes, les pistes, les cours des maisons et autres. C'est pourquoi, dans la vie courante, les populations des zones productrices du palmier à huile, recourent aux CNP pour stabiliser ces espaces (Edmund et al., 2014; Njeugna et al., 2013), ainsi qu'illustré à la Figure 13. C'est une pratique peu onéreuse mais très efficace surtout pour les infrastructures de transport.

La plupart des zones de production du palmier à huile sont pauvres en gisements de gravier et c'est pourquoi, face à la pénurie des granulats conventionnels pour les travaux de génie civil, la population utilise les CNP comme granulats dans le béton de ciment. Ce béton est utilisé dans les éléments de structure (fondations, poteaux, poutres, poutrelles et dalles de compression). L'idée est d'arriver à construire une maison en maçonnerie-béton à moindre coût. Selon la psychologie des régions rurales, les constructions en maçonnerie-béton seraient considérées comme les plus confortables du point de vue des populations (Gibigaye et al., 2017). Il est à noter que la formulation et la confection de ces BCNP par la population ne suivent aucune démarche technique rigoureuse. La Figure 14 montre un bâtiment de 85,2 m² construit à Missérété (6°35'43,4''N ; 2°35'26,9''E) depuis 2014, et dont tous les éléments porteurs sont en BCNP.

Malgré ces divers usages qui restent très limités, les quantités de CNP stockées dans les maisons en attente d'une quelconque valorisation sont énormes. Aussi face à la valorisation endogène expliquée à la Figure 13, il s'avère nécessaire d'étudier les comportements des mélanges sol latéritique/ CNP afin d'envisager leur utilisation dans le corps des chaussées des routes à faible trafic.

Figure 13 : Technique de stabilisation des sols par les CNP, utilisée par les populations des zones productrices de palmier à huile au Bénin

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Figure 14 : Bâtiment en BCNP à Missérété (Bénin) a) vue d'ensemble du bâtiment b) Poteaux et raidisseurs faisant apparaître le BCNP (Godonou, 2019)

I.2. Des recherches sur la valorisation des CNP en Génie Civil

Cette partie synthétise les recherches menées jusqu'alors sur la valorisation des CNP en Génie Civil.

I.2.1. Sous forme de granulats alternatifs dans le béton léger de structure

Pour mieux comprendre les différentes propriétés du béton de CNP (Figure 15), il est important d'approfondir les méthodes de formulation, les problèmes spécifiques aux interfaces pâte de ciment – CNP, ainsi que les différents modes de traitement, utilisés pour améliorer cette interface.

A cause de la porosité, de la forme et de la texture des CNP sans oublier les phénomènes à l'interface des CNP, les méthodes classiques de formulation du béton ordinaire (avec granulats classiques) sont toutes inadaptés et inappropriées pour la confection du béton léger à base de CNP (Alengaram et al., 2013; Gibigaye et al., 2017).

Malgré ces diverses recherches, la valorisation des CNP dans le béton peine à décoller. Cela pourrait s'expliquer soit par les problèmes de vulgarisation afin de rendre les résultats accessibles à tous ou soit à cause des contraintes liées à la formulation et à la mise en œuvre des BCNP. Ces contraintes sont liées aux traitements des CNP et aux méthodes de formulation. Les auteurs Mannan et Ganapathy ont essayé la norme ACI et ont obtenu une résistance à la compression de 14 MPa contre une résistance projetée de 28 MPa (Basri et al., 1999; Mannan and Ganapathy, 2001b). De ces différentes tentatives qui ont échoué, les auteurs recommandent la méthode empirique « essai erreur ». Ainsi la composition et les propriétés des bétons de CNP dépendent essentiellement de la nature du liant (ciment), du mode de mise en œuvre et les essais utilisés.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

En utilisant une méthode structurée tout en variant le dosage du ciment et du rapport CNP/sable Gibigaye (Gibigaye et al., 2017) a abouti aux résultats du Tableau 4:

Tableau 4 : Propriétés physique et mécaniques des béton de CNP du Bénin (Gibigaye et al., 2017)

Auteurs	**Normes**	**Proportion massique C :S :CNP**	**Slumps (mm)**	**Résistance moyenne caractéristique f_{c28} (MPa)**	**Résistance en flexion (MPa)**	**Module de Young (MPa)**
(Gibigaye et al., 2017)	ACI	1 :1,60 :0,96	27	15		
		1 :1,53 :0,99	22	19	0,96	5 619
E/C=0,45 ; dosage en ciment de 450 kg/m^3 ; CNP en SSS ;						

Figure 15 : un échantillon de BCNP (Gibigaye et al., 2019)

I.2.2. En technique routière

Contrairement à la valorisation des CNP dans le béton hydraulique, très peu d'études se sont penchées sur l'utilisation des CNP en technique routière.

Les premières études des CNP dans les enrobés bitumineux remontent à 2006 par Ndoke. En procédant par la méthode « essai-erreur » consistant au remplacement progressif des granulats classiques par les CNP, les premiers auteurs conclurent que les CNP peuvent remplacer les granulats classiques jusqu'à 20% (proportion massique) dans l'enrobé bitumineux pour les routes à faible trafic (Mohammed et al., 2014; Ndoke, 2006; Olugbenga Joseph Oyedepo, Lekan Makanju Olanitori, 2015). Dans ces différents mélanges il y a toujours la présence d'autres classes granulométriques pour les granulats d'origine minérale.

En couches d'assise, Amu a étudié l'effet des CNP sur un sol latéritique stabilisé à l'asphalte. Malgré l'amélioration de certaines caractéristiques, il conclut que son mélange optimal (75% sol latéritique + 25% CNP ; en proportion massique) stabilisé avec 4% d'asphalte n'est pas apte pour une utilisation en couche de fondation (Amu et al., 2008).

A ce jour, aucune étude structurée ne s'est intéressée au remplacement total des gros agrégats minéraux par les CNP dans les enrobés bitumeux et sur l'étude de l'influence des CNP sur les caractéristiques physico-mécaniques des sols latéritiques.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

I.3. Généralités sur les sols latéritiques

En général, les sols latéritiques se retrouvent dans les régions tropicales et subtropicales. Malgré les diverses études sur leur pédologie, leur minéralogie et leur utilisation comme matériaux de construction, il n'y a jamais eu d'unanimité sur leur définition. Ils sont beaucoup utilisés dans les milieux ruraux et en construction routière dans le monde, en Afrique et au Bénin en particulier. En Afrique de l'Ouest ce sont les recommandations du ''guide de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux'' du Centre Expérimental du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP) qui font état des critères de sélection des matériaux routiers. Ces recommandations sont essentiellement basées sur un fuseau granulaire, l'indice de plasticité, le pourcentage des fines (passants au tamis de 80 µm) et l'indice CBR. Certains laboratoires nationaux africains proposent parfois des adaptations en fonction de certaines particularités et des retours d'expériences locaux.

I.3.1. Définition et Origine

Le mot ''latérite'' vient du latin ''*later*'' et signifie brique. Ce terme a été utilisé pour la première fois en 1807 par Buchanan pour designer des dépôts ferrugineux qui recouvraient les surfaces dans les régions montagneuses de Malabar (Inde).

Autret (Autret, 1983) suggère de nuancer :

- Les sols fins latéritiques (ou latérites);
- Les graves latéritiques qui sont des matériaux routiers (0/D) largement utilisées en technique routière sous la forme de matériaux pour la couche de base, la couche de fondation et celle de forme ;
- La carapace latéritique ou horizon latéritique qui est une couche très dure qui ne peut être detruite qu'avec un materiel specifique (une pioche, un engin de terrassement, ..)
- La cuirasse latéritique qui est egalement une couche très dure mais agglomerée qui ressemble à des scories, difficilement destructible par des engins à lames.

Ces sols sont principalement de deux origines :

- la désintégration des roches mères par des actions physico-chimiques et mécaniques sous l'effet d'agents naturels qui sont :
  - la fissuration consécutive à la décompression
  - l'action mécanique dans un processus naturel
  - l'attaque chimique
- la décompostion d'organismes vivants.

Les dimensions des sols sont très variables et dépendent des classifications selon les pays ou les disciplines scientifiques ou techniques.

I.3.2. Sols latéritiques au Bénin : terre de barre

I.3.2.1. Contexte géologique des Sols au Bénin

Sur le plan pédologique il existe cinq (5) grandes catégories de sols dont la répartition est la suivante (Figure 16) du sud au nord (Azontonde, 1991):

- Sols minéraux bruts et très peu évolués le long du cordon sableux du littoral :
- Sols rouges ferralitiques formés sur le ''Continental Terminal'' dans le bassin sédimentaire

Licence CC BY-NC-ND 3.0

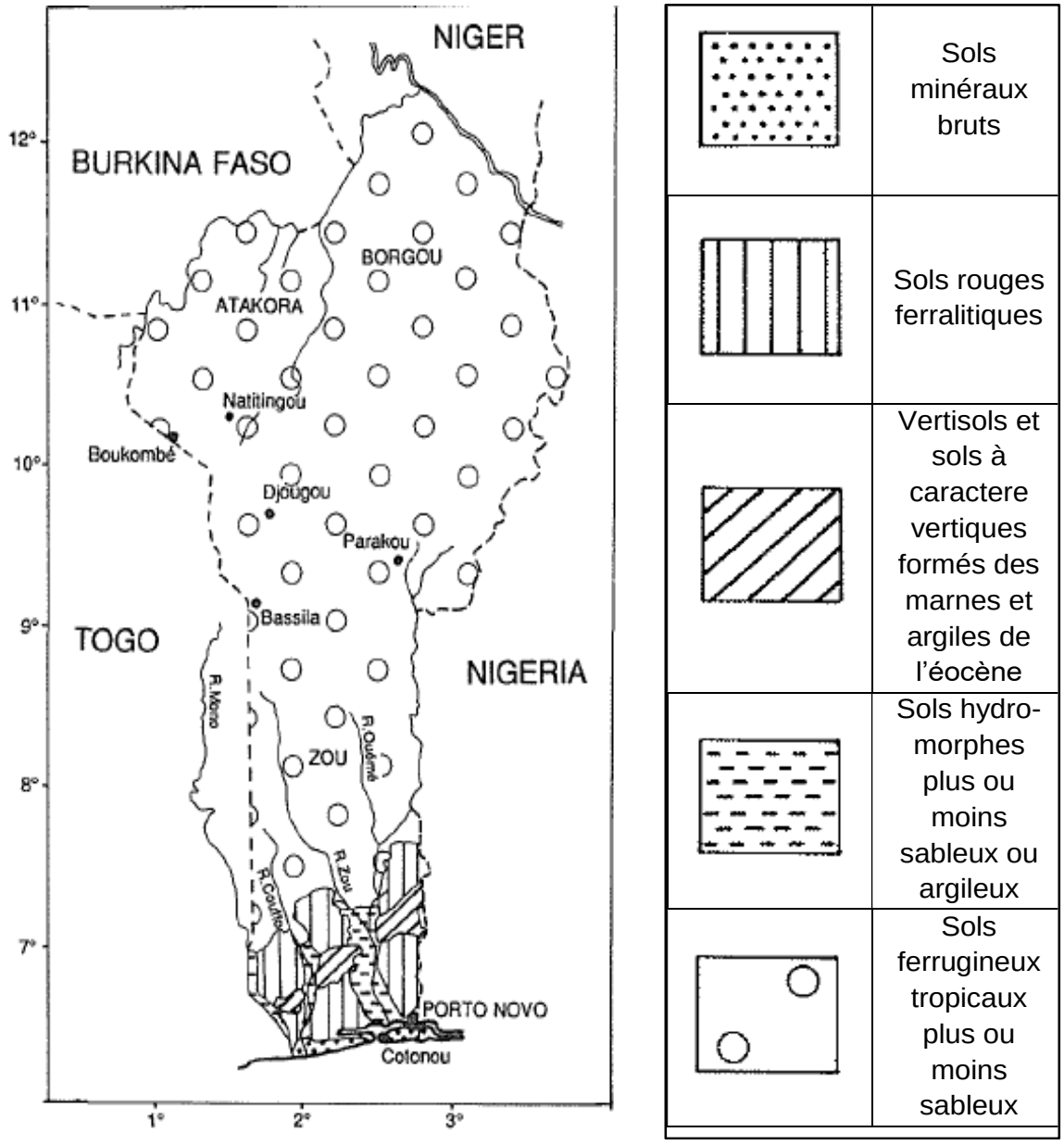


Figure 16 : Grandes catégories de sols au Bénin (Azontonde, 1991)

I.3.2.2. La terre de barre au Bénin

En 1931 Kilian a proposé d'appeler ''Continental Terminal'' l'ensemble des dépôts continentaux du Sahara qui appartiennent au Cénozoïque (Kilian, 1931).

Le Bénin (ex Dahomey) est un pays de l'Afrique de l'Ouest dont le relief est en général peu accidenté. Selon Azontonde les terres de barre sont des sols ferralitiques désaturés occupant presque la totalité des terrains, exondés au sud du Bénin et occupent environ 7% de la sperficie du pays. Le terme ''***barre***'' vient du portugais ''***barro***'' qui signifie argile sableuse à l'état humide (Azontonde, 1993).

Selon **Guilchers** (Guilcher, 1959), la terre de barre recouvre le plateau qui est en arrière du complexe côtier. C'est une formation meuble, rouge foncé ayant une texture argilo-sableuse.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Les études de caractérisation sur la terre de barre démontrent qu'elle est un matériau hétérométrique issu des conditions subaériennes tropicales avec des consolidations sporadiques et forme le couronnement de la série sédimentaire du bassin côtier du Bénin. C'est un matériau presque toujours de couleur rouge, meuble et argilo-sableux.

I.3.3. Traitement et leurs effets sur les propriétés géotechniques

Le traitement des sols a pour but l'amélioration de leurs caractéristiques physico-mécaniques.

En construction routière lorsque les sols latéritiques ne respectent pas les spécifications requises par les documents de référence en matière de dimensionnement, ils sont mélangés au sable ou des concassés 0/D. Cette technique connue sous le nom de la lithostatilisation a pour objectif soit de réduire le pourcentage des fines, soit de diminuer la plasticité et surtout d'améliorer la portance (indice CBR) (Ahouet et al., 2018; Babaliye et al., 2020; Ndiaye, 2013; Ndiaye et al., 2013). Pour les sols argileux, le traitement a pour but essentiel de réduire la sensibilité du sol due aux différentes variations de la teneur en eau, selon les conditions climatiques (Tankpinou Kiki, 2016). Les principaux traitements des sols sont faits avec les liants hydrauliques (chaux, ciment et liant hydraulique routier) (Conner and Hoeffner, 1998; LCPC-SETRA, 2000a; Malviya and Chaudhary, 2006; Sheffield et al., 1987).

I.4. Conditions d'utilisation des sols latéritiques (sols fins) en technique routière (structure de chaussée)

La conception d'une chaussée est un processus qui varie en fonction de plusieurs paramètres dont la topographie, la nature du sol en place et du trafic. Selon une coupe type de chaussée (Figure 17) du Guide technique des Terrassements Routiers, on distingue généralement :

- La Partie Supérieure des Terrassements et l'Arase de Terrassement :
- La couche de forme : elle recouvre la PST (partie superieure du terrassement) et pendant les travaux, elle assure la protection du sol en place et la circulation des engins tout en permettant l'amélioration de la qualité du nivellement. Une fois en service, la couche de forme permet d'ameliorer la portance à long terme tout en homogénéisant les parametres mecaniques du sol support ou du remblai

La chaussée proprement dite comprend l'assise de la chaussée et la couche de surface.

- Les couches d'assise sont en général en deux couches : couche de base et couche de fondation. Elles assurent à la chaussée l'essentiel de la rigidité et repartissent les charges du trafic sur la plate-forme afin de maintenir les déformations permanentes à un niveau admissible.

La couche de surface quant à elle se compose :

- d'une couche de roulement : elle est la couche supérieure de la chaussée et reçoit directement les charges du trafic et du climat.
- d'une couche de liaison entre l'assise et la couche de roulement (eventuellement)

Licence CC BY-NC-ND 3.0

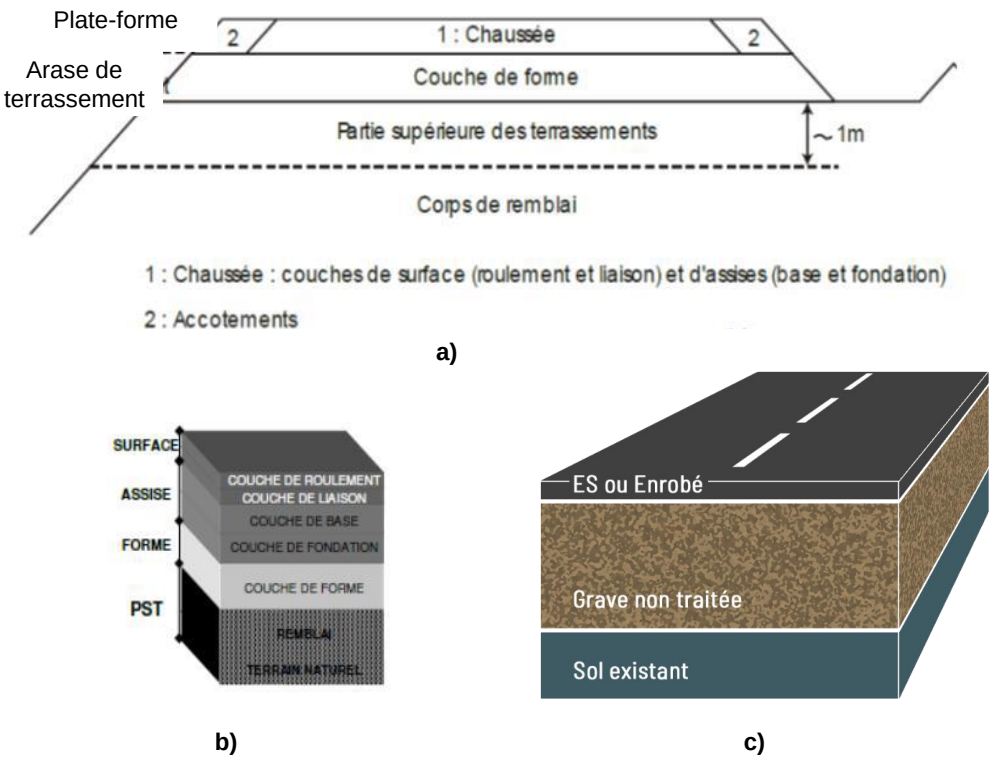


Figure 17 : a) et b) : Coupe d'une chaussée type (LCPC-SETRA, 2000b) c) Coupe d'une chaussée à faible trafic

En fonction des exigences de la couche, les sols argileux sont utilisés soit à l'état naturel ou soit traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques dans le corps de chaussées (Kiki, 2004). Ils peuvent comme matériaux du remblai, de la couche de forme, de la couche de fondation et parfois de la couche de base.

Les conditions d'utilisation d'un matériau routier varient en fonction des approches de chaque pays. En France c'est l'approche GTR-GTS qui précise les types des matériaux et spécifie les indispensables avant utilisation. Par contre au Bénin (comme dans bien d'autres pays africains), c'est l'approche CEBTP qui donne les exigences nécessaires des matériaux utilisables. Ces différentes approches sont basées sur les caractéristiques physiques et mécaniques issues des essais normalisés.

I.4.1. Selon le GTR-GTS

L'approche GTR-GTS, en dehors de la précision des types de matériaux, donne également des précisions sur la mise en œuvre et le traitement à mener qui est fonction de la destination du matériau. Le GTR-GTS fixe les paramètres physiques et mécaniques des matériaux traités aux liants hydrauliques pour une utilisation en PST (terrain naturel ou remblai éventuel), en couche de forme et en couche de fondation.

I.4.2. Selon le CEBTP

Au Bénin comme dans bien d'autres pays africains, les critères de choix des matériaux routiers reposent sur les recommandations du « guide de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux » du Centre Expérimental du Bâtiments et des Travaux Publics (CEBTP) de 1972, révisés en 1980 et mis à jour en 1984. Ce guide qui est le plus utilisé actuellement est

Licence CC BY-NC-ND 3.0

fondé sur l'indice CBR, l'indice de plasticité (IP) et de pourcentage de fines et est basé sur le trafic et la portance des sols de plate-forme. Un rappel de ce guide est présenté ci-après.

En considérant une durée de vie moyenne de la chaussée de quinze (15) ans, le CEBTP définit cinq (5) différentes classes du trafic énumérées dans le Tableau 5. Ces classes de trafic peuvent être exprimées en :

- trafic journalier qui prend en compte toutes les catégories de véhicules confondues. Sur la durée de vie de la chaussée, l'équivalent de poids lourds est alors supposé de 30% du trafic total.
- trafic cumulé de poids lourds : un poids lourd est un véhicule de poids total, en charge, supérieur à 3 t.

Tableau 5 : Classes du trafic (CEBTP, 1984)

Classe du trafic	**Trafic équivalent (véhicule/jour)**	**Nombre équivalent Poids lourds sur la durée de vie**
T_1	< 300	< 5.10^5
T_2	entre 300 et 1000	entre 5.10^5 et $1,5\ 10^6$
T_3	entre 1000 et 3000	entre $1,5\ 10^6$ et $4\ 10^6$
T_4	entre 3000 et 6000	entre 4.10^6 et 10^7
T_5	entre 6000 et 12000	entre 10^7 et 2.10^7

Les classes de trafic sont classées de la plus faible à la plus élevée. T_1 correspond aux routes à très faible trafic où le bitumage peut être décidé indépendamment du critère purement économique. Une route à faible trafic correspond aux chaussée moins circulées dont le trafic équivalent c'est-à-dire le nombre de véhicule par jour est inférieur à 300. T_5 correspond aux autoroutes 2x2 voies ou 2x3 voies.

I.4.2.1. Spécification en plateforme

La plateforme est la couche reposant sur terrassements. Elle est mise en œuvre dans de meilleures conditions afin de conserver à long terme une indéformabilité suffisante. Elle constitue une bonne assise pour tout le corps de chaussée. Malgré qu'il existe des propositions d'épaisseur pour des sols de CBR inférieur à 5, il serait souhaitable de substituer à ces sols des matériaux routiers de meilleure qualité ou d'effectuer un traitement en place de la plateforme. Les sols de caractéristiques suivantes sont à éliminer ou à traiter :

- Indice CBR très faible (<5)
- Indice de plasticitice Ip> 40
- Limite de Liquidité LL> 70
- Gonflement linéaire dans le moule CBR > 2%
- Teneur en matières organiques > 3%.

Après substitution, l'indice CBR à prendre en compte dépendra de la qualité du matériau substitué et de son épaisseur. Les solutions à préconiser dépendront des ressources locales

Licence CC BY-NC-ND 3.0

disponibles (ajout de sable par exemple) et l'incidence financière de l'action à réaliser (CEBTP, 1984, 1980).

I.4.2.2. Spécification en couche de forme

La couche de forme est utilisée lorsque le sol en place est de faible portance. Elle sert donc à pallier donc l'insuffisance du sol naturel et permettre la circulation des engins pendant l'exécution. Son CBR doit être >5 et être au moins égal à 10 pour les chantiers importants. Selon le chantier les sols suivants sont à éviter :

- D > 150 mm
- % des fines > 35 ou 45
- Indice de plasticitice Ip > 20 ou 30

Les sols fins ayant un IP<25 pourront être traités ainsi que les sols grenus à conditions que ceux-ci ne contiennent pas de gros éléments de dimensions > 80 mm.

I.4.2.3. Spécification en couche de fondation

Les matériaux destinés à la couche de fondation doivent avoir un indice CBR au moins égal à 30 pour une densité à 95% de l'Optimum Proctor Modifié. Un indice CBR de 25 sera acceptable pour le trafic T_1. Les autres recommandations dépendent du type de matériaux et de l'importance du trafic.

Les sables argileux sont des dépôts sédimentaires du type des sables du Continental Terminal d'Afrique, des arènes résultant de l'altération in situ de granitoïdes ayant localement subi un remaniement de type colluvial. Leurs caractéristiques nécessaires pour une utilisation en couche de fondation sont résumées dans le Tableau 6:

Tableau 6 : caractéristiques des sables argileux en couche de fondation (CEBTP, 1984)

Granulométrie	**0/2 à 0/10**
Passant à 80 µm (P_{80})	10 à 30%
IP	5 à 20
ρd_{OPM} (t/m^3)	1,9 à 2,1
W_{opt}	7 à 13%
Gonflement maximal	2,5%

I.5. Généralités sur les enrobés bitumineux : formulation

Les enrobés bitumineux sont des matériaux composites complexes, composés principalement des composants minéraux (gros granulats, granulats fins, filler, …) et le liant hydrocarboné qu'est est le bitume. Comme récapitulé au paragraphe I.2 où les CNP peuvent remplacer les gros granulats, et face à la pénurie des granulats conventionnels presque partout dans le monde, plusieurs études ont concerné l'utilisation de granulats dans les matériaux bitumineux. C'est le cas par exemple des agrégats d'enrobé qui peuvent être utilisés jusqu'à 50% à 100% des agrégats d'enrobé (Pedraza, 2018; Poirier and Leroy, 2013).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Dans cette partie de la littérature, il sera fait une synthèse sur les méthodes de formulation des enrobés bitumineux.

I.5.1. Composants granulaires des enrobés

Les composants granulaires (filler, sable, gravillons) constituent environ 95% de la masse d'un enrobé bitumineux ; ce qui correspond à 80 à 85% du volume. Cette proportion va affecter les caractéristiques physico-mécaniques de l'enrobé (Sohm, 2011).

Les composants minéraux sont concassés. Ils forment l'ensemble des sables et des gravillons. Ils forment le squelette granulaire du mélange bitumineux (Corté and Di Benedetto, 2004). Ce squelette, constitué de plusieurs classes granulaires, aura pour mission de transmettre et de distribuer les charges dans les couches inférieures de la chaussée. Pour jouer pleinement ce rôle, on considère la forme, l'angularité et l'état de surface du granulat et, également, l'état de la dureté de ses arêtes. Ces différents éléments contribuent à réduire les déplacements ou rotations des granulats dans l'enrobé et à augmenter l'angle de frottement interne du mélange.

Le filler quant à lui, est constitué de particules très fines dont le diamètre supérieur est conventionnellement admis inférieur à 63 micromètres. Il provient généralement soit du dépoussiérage de granulats soit d'une production industrielle par mouture de roche (calcaire par exemple). Ayant une surface spécifique très élevée par rapport aux granulats, il absorbe une quantité importante du bitume et forme avec ce dernier le mastic. Le mastic fournit au mélange sa stabilité et participe à la résistance à l'orniérage (Corté and Di Benedetto, 2004).

I.5.2. Le liant hydrocarboné

Pour les matériaux bitumineux, le liant est généralement un bitume de pétrole obtenu par raffinage du pétrole brut. Ce liant doit présenter une certaine cohésion pour résister aux sollicitations du trafic et du climat (Corté and Di Benedetto, 2004). Les caractéristiques mécaniques des bitumes sont fortement liées à la température et à la durée d'application des charges. Les différents changements d'états provoqués par les susceptibilités thermique et cinétique s'accompagnent généralement de risques de dégradations qui se manifestent dans l'enrobé sous diverses formes : des déformations permanentes aux températures élevées ou durées de sollicitations longues, de l'endommagement ou fatigue aux températures intermédiaires, et des fissurations aux températures faibles.

I.5.3. Méthode de formulation des enrobés bitumineux

Une méthode de formulation a pour but de déterminer la composition d'un mélange c'est-à-dire la composition granulométrique des différentes fractions et la teneur en liant. Une fois mis en place, le matériau ainsi formulé doit avoir un comportement satisfaisant du point de vue de ses caractéristiques physico-mécaniques. Elle est en réalité un processus structuré pour déterminer la composition et implique des essais au laboratoire. Ces essais permettent de lier les caractéristiques déterminées en laboratoire à celles recherchées sur la chaussée.

Selon Di Benedetto et Corté, l'étude de formulation comprend généralement deux grandes phases (Delorme et al., 2007; Di Benedetto and Corté, 2005; EN NF 13108-1, 2007):

- Détermination de la composition granulaire et de la teneur en liant. La quantité du bitume doit être nécessaire pour enrober correctement les granulats pour la durabilité du mélange et que l'enrobé puisse être compacté sur chantier au pourcentage des vides désiré.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

- Vérification mécanique par des essais au laboratoire. Ces essais servent à juger les performances du matériau, par exemple la tenue à l'eau et la résistance aux déformations permanentes (orniérage).

Pour les mélanges classiques à granularité continue, on fait souvent usage de la méthode de l'Asphalte Institute basée sur les courbes de Fuller à travers l'Équation 1 (Asphalte Institute, 1994; Fang et al., 2018).

$$P=100\cdot\left(\frac{d}{D}\right)^{n}$$ Équation 1

P : pourcentage de la fraction granulaire de diamètre moyen d ;

D : diamètre maximal des granulats ;

n : exposant, paramètre de graduation qui contrôle la distribution granulaire ; n=0,45 proposée par Nijboer (Nijboer, 1948) pour une compacité maximale.

La suite sera consacrée à une description d'autres méthodes couramment utilisées à travers le monde.

I.5.3.1. Méthode HVEEM

Dans les années 1930, les principaux concepts de cette méthode ont été énoncés par Francis N. Hveen, un ingénieur de Californian Department of Transportation (CDT). Subissant plusieurs améliorations cette méthode est devenue officielle pour le CDT et se résume en ces étapes (Asphalte Institute, 1997) :

- Choix des granulats : en fonction du cahier de charges de chaque projet, les matériaux doivent être choisis pour les propriétés physico-chimiques exigées.
- Choix de la courbe granulométrique : La combinaison des granulats est réalisée de sorte à obtenir une courbe granulométrique la plus proche possible de la courbe de référence exigée dans le cahier de charges.
- Détermination de la teneur en liant approximative : Les essais de Centrifuge Kerosene Equivalent (CKE) et de Surface Capacity sont d'abord réalisés. Avec les résultats de ces essais spécifiques à la méthode, et de la densité réelle des composants, la teneur en liant est lue à travers des abaques spécifiques.
- Préparation des échantillons : Quatre lots d'échantillons sont fabriqués avec une technique normalisée : procédure, moules et compactage. Il est préparé un échantillon avec la teneur en liant précédente. Deux échantillons sont réalisés avec des teneurs en liant inferieures (-0,5% et -1,0% de la teneur en liant précédente). Le dernier échantillon est fait avec une teneur en liant supérieure (+0,5%).
- Test de stabilité et de ressuage : les résultats des tests sur les échantillons sont comparés aux valeurs minimales fixées en fonction du trafic.
- Choix de la teneur en liant optimale : la teneur en liant optimale est la teneur maximale pour laquelle l'enrobé satisfait les conditions de stabilité minimale et ne présentant pas un ressuage important. Sa valeur minimale doit être au moins 4%. Lorsque la teneur

Licence CC BY-NC-ND 3.0

en liant sera celle maximale (estimation +0,5%), il faudra alors préparer un autre échantillon avec une teneur de plus de 0,5% et reprendre la procédure.

I.5.3.2. MARSHALL MIX DESIGN

Développée par Bruce Marshall vers la fin des années 1930, cette méthode a subi des améliorations et des révisions par la U. S. Army. Elle est recommandée par les normes VSS Suisses et consiste à choisir la teneur en liant correspondant à une densité du mélange afin de satisfaire une stabilité minimale et un fluage acceptable (Asphalte Institute, 1997).

Les différentes procédures de cette méthode se résument en six points :

- Le choix des agrégats : Les agrégats sont choisis suivant leurs propriétés physiques (forme, porosité, dureté…). Sur chaque granulat sont réalisés l'analyse granulométrique et la densité. La composition nécessaire des granulats est faite afin d'obtenir la courbe granulométrique de référence.
- Le liant : Aucune recommandation n'est faite à propos du choix et de l'évaluation du liant. Il revient à l'ingénieur de choisir et de faire les essais qu'il aura jugés nécessaires.
- Préparation des échantillons : au moins cinq (5) mélanges sont réalisés avec différentes teneurs en liants. Pour chaque mélange, il faut 3 échantillons compactés avec un marteau dans des conditions et moules normalisés.
- Détermination de la stabilité et du fluage : Après le compactage, les essais de stabilité (charge maximale que peut supporter l'échantillon) et de fluage (déformation plastique) sont effectués sur les échantillons.
- Calcul de la densité et des vides (vides du mélange, vides du squelette minéral, vide rempli par le bitume).
- Choix de la teneur optimale en liant : les 6 graphes représentant l'évolution du pourcentage des vides, de la densité, du fluage, de la stabilité, des vides du squelette minéral (VMA) et des vides remplis par le bitume (VFA) sont tracés en fonction de la teneur en liant. En fonction du pourcentage des vides désiré, la teneur en liant est graphiquement déterminée tout en vérifiant si ce choix satisfait les exigences des autres paramètres.

I.5.3.3. SUPERPAVE MIX DESIGN

La méthode SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement) est mise au point aux Etats-Unis au début des années 1990 pour remplacer la méthode Marshall. En 2000 elle a été largement utilisée pour la production des revêtement bitumineux (62%) (WesTrack Forensic Team Consensus Report, 2001). Elle prend en compte le critère de maniabilité lors de l'exécution et la performance de l'enrobé à long terme. Elle est décrite selon les 4 étapes suivantes (Asphalte Institute, 2001) :

- Choix des agrégats : les critères liés à la source (*source properties*) des granulats sont la dureté, le bruit et la propreté, et ceux liés à leurs spécifications (*consensus properties*) sont l'angularité, la forme et l'équivalent de sable. La courbe du mélange doit être comprise dans un fuseau et par des points fixes.
- Choix du liant : le choix du dépend des caractéristiques physiques du liant, des conditions climatiques et du trafic.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

- Choix de la teneur en liant : Quatre différents échantillons (variation +/-0,5% de teneur en liant) sont fabriqués et compactés à la PCG (presse à cisaillement giratoire). Pour chaque échantillon, l'opérateur trace le graphique densité théorique maximal en fonction du nombre de girations. Ensuite, il détermine graphiquement la teneur en liant qui correspond au pourcentage de vides voulu et le nombre de girations nécessaires pour l'obtenir.
- Essais de performances : des essais mécaniques en cours de développement pour la détermination des caractéristiques du mélange comme *le module dynamique*, le *flow time* et le *flow number*.

I.5.3.4. Méthode française de formulation

Cette méthode normalisée repose essentiellement sur deux phases : la détermination de la teneur minimale en fonction de la granulométrie et l'utilisation de la PCG pour évaluer le comportement lors du compactage (Delorme et al., 2007; Junod and Dumont, 2004).

- Teneur en liant (EN 12697-1)

Le module de richesse K est une grandeur proportionnelle à une épaisseur conventionnelle du film de liant enrobant les agrégats. Il est fonction de la teneur en liant TL et de la surface spécifique conventionnelle ∑ (Équation 2).

$$TL = K \cdot \alpha \cdot \sqrt[5]{\sum}$$ Équation 2

α est un coefficient correcteur relatif à la masse volumique des granulats (MVRg), déterminé d'après l'Équation 3

$$\alpha = \frac{2{,}65}{MVR_g}$$ Équation 3

La surface spécifique conventionnelle ∑ est déterminée à l'aide de l'expression suivante (Équation 4) :

$$100 \cdot \sum = 0{,}25 \cdot G + 2{,}3 \cdot S + 12 \cdot s + 150 \cdot f$$ Équation 4

Avec les proportions massiques :
G : éléments de diamètre supérieur à 6,3 mm
S : éléments de diamètre compris entre à 6,3 mm et 0,250 mm
s : éléments de diamètre compris entre à 0,250 mm et 0,063 mm
f : éléments de diamètre inférieur à 0,063 mm

- Essai à la PCG

La composition du mélange étant choisie, son comportement au compactage est alors étudié à l'aide de la PCG. Une quantité définie du mélange chaud est placé dans un moule cylindrique de diamètre 150 mm ou 160mm. Le compactage est alors fait par l'action concomitante d'une force de compression statique et d'une déformation de l'éprouvette.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

L'épreuve de formulation des enrobés appliquée en France est définie par les normes. Elle se caractérise par une approche fondée sur les performances du mélange. Cet essai est le pivot de la méthode car il est souvent utilisé pour tous les types d'enrobés à chaud (à l'exception des enrobés coulés routiers qui sont hors du domaine d'application de ce document). L'épreuve de formulation se déroule avec des matériaux préparés en laboratoire, représentatifs du chantier projeté. Elle porte sur des seuils de performance. Elle fait appel à l'essai de presse à cisaillement giratoire ou de l'essai de tenue à l'eau (Diriez) et à la résistance à l'orniérage pour la couche de surface. Pour les matériaux structuraux, s'ajoutent les essais du module de rigidité et de la résistance en fatigue.

La méthode de mise au point du mélange est complètement dissociée de l'épreuve de formulation. Elle n'est pas codifiée. La démarche fondée sur ce principe est en vigueur depuis une trentaine d'années, elle a été formalisée au début, dans des documents techniques SÉTRA-LCPC puis dans les normes françaises NF P. Les normes EN, qui remplacent les normes françaises NF P, ne remettent pas en cause ce principe. La Figure 18 montre les différents d'épreuves de formulation des bétons bitumineux selon la méthode française.

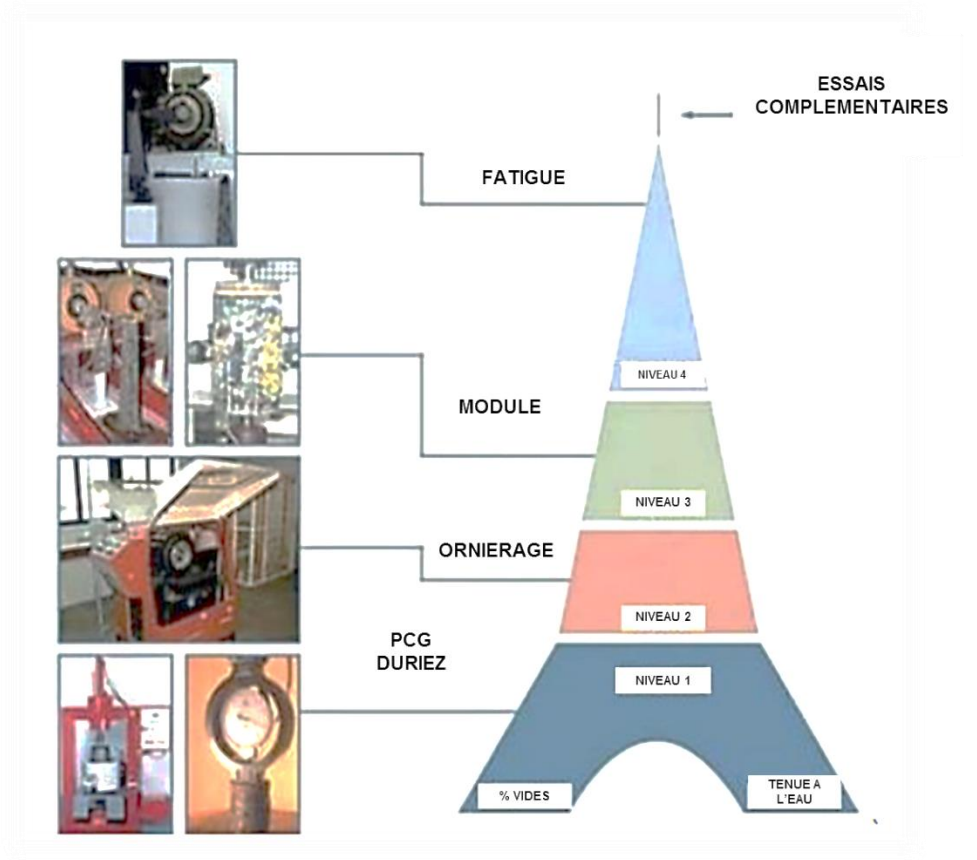


Figure 18 : Niveaux d'épreuves de formulation des bétons bitumineux

I.5.3.5. Formulation C.R.R.

Une méthode de formulation a été mise au point par le Centre de Recherche Routière belge (CRR). Cette méthode est analytique et les essais constituent un moyen de vérification des valeurs déterminées (CRR, 1997, 1987). Elle consiste en :

Licence CC BY-NC-ND 3.0

- Choix et caractérisation des matériaux : comme les méthodes précédentes les choix sont faits après les caractéristiques des granulats (granulométrie, dureté, propreté…) et du liant (pénétration…).
- La formulation : la composition est analytique et intégrée dans le logiciel spécifique PRADO. Elle est basée sur la méthode française.
- L'essai : au laboratoire, l'essai aura pour but de vérifier les résultats de la formule analytique et de procéder au besoin aux ajustements. Lorsque les essais sont concluants, il est alors procédé au passage de la formulation volumétrique à une formulation massique grâce aux différentes masses volumiques.

Toutes les méthodes énumérées fonctionnent presque sur les mêmes principes de la composition granulaire et de la teneur en liant. Les essais mécaniques sont des outils de décision et permettent d'ajuster ou non la composition finale. Malgré qu'elles aient fait leurs preuves dans le temps et d'énormes progrès, elles montrent parfois de limites face à certains types de granulats (Junod and Dumont, 2004). Cela demande beaucoup d'expériences de la part de l'ingénieur et est source de beaucoup d'essais au laboratoire afin d'aboutir à une formule qui pourrait ne pas être la plus optimale.

La partie suivante expose l'élaboration de matériaux composites à base de coques de noix de palmiste à matrice argileuse utilisables en couche de fondation des routes à faible trafic.

Conclusion

Licence CC BY-NC-ND 3.0

1ERE PARTIE : ELABORATION DE MATERIAUX COMPOSITES A BASE DE COQUES DE NOIX DE PALMISTE A MATRICE ARGILEUSE UTILISABLES EN COUCHE DE FONDATION DES ROUTES A FAIBLE TRAFIC

Licence CC BY-NC-ND 3.0

1ERE PARTIE : ELABORATION DE MATERIAUX COMPOSITES A BASE DE COQUES DE NOIX DE PALMISTE A MATRICE ARGILEUSE UTILISABLES EN COUCHE DE FONDATION DES ROUTES A FAIBLE TRAFIC

Cette partie du manuscrit s'intéresse aux mélanges entre les CNP et les sols latéritiques pour une utilisation en couche de fondation des routes à faible trafic. Elle est composée des chapitres 2 et 3. Le chapitre 2 présente la situation géographique du milieu d'étude, les procédures expérimentales de la caractérisation des matières premières et la méthodologie utilisée pour les mélanges. Le chapitre 3 quant à lui sert à présenter les résultats de valorisation des CNP en couche de fondation et les discussions y afférentes.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

CHAPITRE II : MILIEU D'ETUDE, MATERIAUX, MATERIEL ET METHODES DES MELANGES CNP/TERRE DE BARRE

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Chapitre II. Milieu d'étude, matériaux, matériel et méthodes des mélanges CNP/Terre de barre.

Les coques de noix de palmiste (CNP) sont des agrégats grossiers d'origine végétale issue, de la procédure de fabrication de l'huile de palme, telle que décrite au paragraphe I.1.3. Elles ont fait l'objet de valorisation dans le béton hydraulique appelé béton de CNP (BCNP) présenté dans le Chapitre I. L'élaboration d'un matériau routier avec ce déchet végétal est très spécifique en ce sens où elle implique le mélange de matériaux d'origines diverses : végétale et minérale. Dans cette optique la caractérisation de l'inclusion (CNP) et la matrice argileuse a nécessité l'utilisation des moyens et techniques adaptés. Cette campagne expérimentale s'est déroulée au laboratoire, LERGC-SA, un laboratoire partenaire du LEMA et concerne des propriétés géotechniques à court terme.

II.1. Caractérisation des CNP

II.1.1. Zone de provenance

A l'issue du processus décrit au paragraphe I.1.3, les CNP sont mises en tas sous les intempéries climatiques en attente d'une quelconque transaction. Dans le cadre de notre étude, elles ont été collectées chez un producteur à Gomè Sota dans la commune d'Akpro-Missérété (6°32'24,5''N ; 2°39'3,6''E). Gomè Sota est situé à environ 10 km de la capitale Porto-Novo. Les CNP prélevées sont alors transportées dans les sacs au laboratoire où elles sont stockées à la température ambiante sans aucun traitement préalable (Figure 19).

Figure 19 : Tas de prélèvement de CNP

II.1.2. Granulométrie

La granulométrie des CNP est la représentation de la distribution en taille en fonction du pourcentage des passants. Elle est étudiée conformément à la norme NF EN 933-1 (NF EN 933-1, 2012). Les CNP sont de la classe granulaire 2/10 avec une granulométrie continue et étalée (Figure 20).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

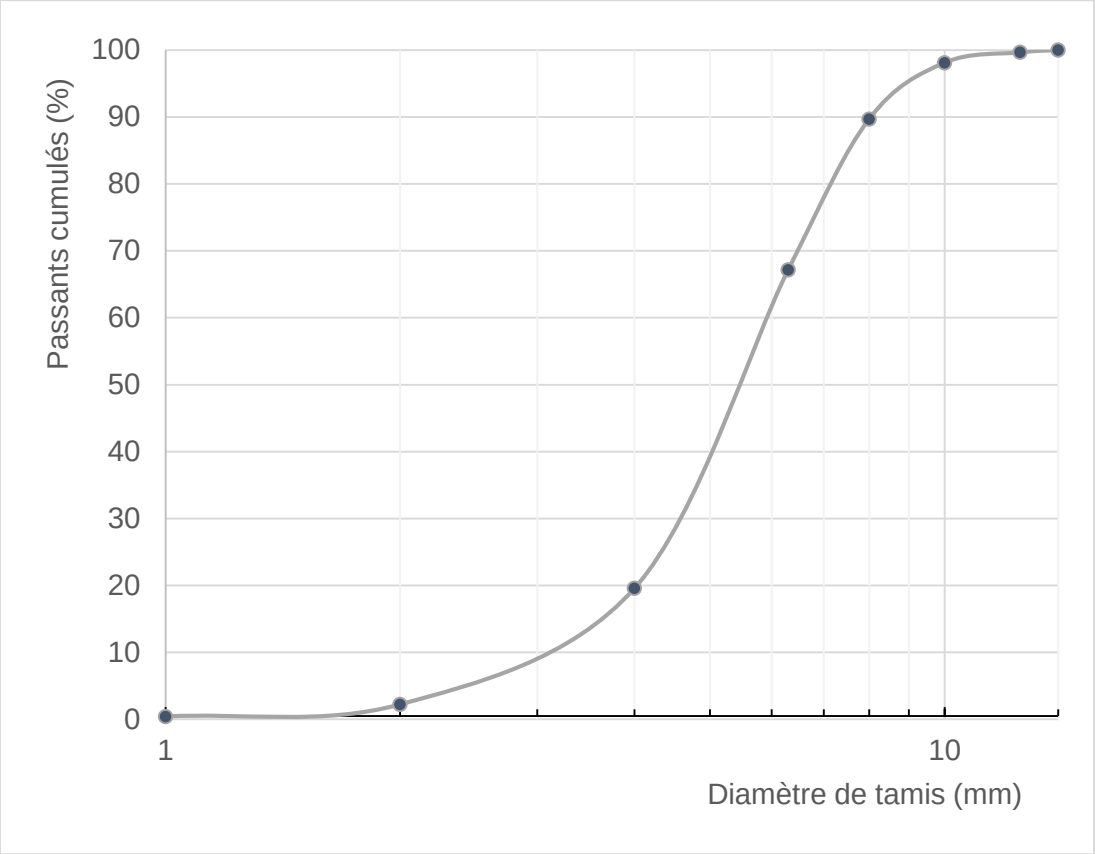


Figure 20 : Courbe granulométrique des CNP

II.1.3. Forme

En complément des informations du paragraphe I.1.4.1, il est loisible d'ajouter que les CNP ont des formes irrégulières, angulaires et polygonales, d'une épaisseur variable entre 1 et 5 mm. En fonction des diamètres, ils ont une surface lisse avec des faces concaves et convexes (Figure 21).

Le coefficient d'aplatissement (FI) (Équation 5) est déterminé conformément à la norme NF EN 933-3 (NF EN 933-3, 2012).

$$\mathrm{FI} = (\mathrm{M}_2/\mathrm{M}_1).100$$

Équation 5

M_1 : somme des masses des granulats élémentaires d_i/D_i, (en grammes)

M_2 : somme des masses des grains de chaque granulats élémentaires d_i/D_i passants à travers un tamis à barre correspondant, (en grammes)

Pour la présente étude, nous avons obtenu, FI = 59% (Tableau 7).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Tableau 7 : Résultat de l'aplatissement

Tamis (mm)	Refus (g)	Grille	Passant mesuré (g)	Passant calculé (g)	FI_{el}
10	29,1	6,3	14,6	14,6	50
8	107,2	5	61,7	61,6	58
6,3	206,8	4	131	131,1	63
5	274,9	3,15	163,9	163,8	60
4	158	2,5	85,3	85,3	54
M_1	776,0	M_2	456,5	FI	59

Figure 21 : Différentes formes de CNP

II.1.4. Caractéristiques physiques

II.1.4.1. Masses volumiques

Elles concernent la masse volumique en vrac et celle réelle.

La masse volumique en vrac est déterminée par l'Équation 6, conformément à la norme NF EN 1097-3 (NF EN 1097-3, 1998).

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} \qquad \text{Équation 6}$$

ρ_b = 533 kg/m^3 : masse volumique en vrac des CNP (Tableau 8) ;

m_1 : masse du conteneur vide ;

m_2 : masse du conteneur et de l'éprouvette

V : volume du conteneur

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Tableau 8 : Résultat de masse volumique en vrac (CNP)

masse du conteneur vide m_1 (kg)	4,386	4,386	4,386
masse du conteneur et de l'éprouvette m_2 (kg)	7,077	7,072	7,081
volume du conteneur V (m^3)	5,048.10^{-3}	5,048.10^{-3}	5,048.10^{-3}
$\frac{m_2 - m_1}{V}$	533,08	532,09	533,87
Masse volumique en vrac (kg/m^3)	533		

La masse volumique réelle pré séchée quant à elle, est obtenue par la méthode des pycnomètres (annexe A) conformément à la démarche décrite dans la norme NF EN 1097-6 (NF EN 1097-6, 2014). Elle est calculée d'après l'Équation 7 :

$$\rho_p = \frac{(M_2 - M_1)}{V - (M_3 - M_2)/\rho_w} \qquad \text{Équation 7}$$

$\boldsymbol{\rho_p}$**= 1 360 kg/m³** la masse volumique réelle pré séchée de CNP étudiées (Tableau 9).

M_1 : masse du pycnomètre et de l'entonnoir

M_2 : masse du pycnomètre, de l'entonnoir et de l'éprouvette

M_3 : masse du pycnomètre, de l'entonnoir, de l'éprouvette et de l'eau

V : volume du pycnomètre

ρ_w : masse volumique de l'eau à la température d'essai

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Tableau 9 : Résultat de masse volumique réelle

M_1	445,6	718,4
M_2	645,7	1299,8
V	693,2	2495,15
M_3	1190,8	3365,1
ρ_w	998,0	998,9
$\rho_p = \frac{(M_2 - M_1)}{V - (M_2 - M_1)/\rho_w}$	1360,04	1359,8
masse volumique réelle (kg/m^3)	1 360	

La masse volumique en vrac calculée (*530 kg/m^3*) s'insère bien dans la plage 500 à 620 kg/m^3. La masse volumique réelle calculée (*1 360 kg/m^3*) s'introduit également dans la plage de 1 170 kg/m^3 et 1 370 kg/m^3 ; des valeurs obtenues par les précédents auteurs tel qu'indiqué au paragraphe I.1.4.4. Ces différentes caractéristiques des CNP peuvent être déterminées suivant la recommandation Rilem TC 236 (Amziane et al., 2017).

II.1.4.2. Coefficient d'absorption des CNP

Le coefficient d'absorption des CNP est déterminée conformément à l'annexe C de la norme (NF EN 1097-6, 2014).

Le coefficient d'absorption d'eau des CNP après 24 heures est de 22%.

Tableau 10 : Résultat de la détermination du coefficient d'absorption des CNP

M_4 : masse des granulats secs	200	250
M_1: masse dans l'air des granulats saturés secs en surface après 24 heures	239,6	309,4
$WA = 100 \frac{M_1 - M_4}{M_4}$	20%	24%
Coefficient d'absorption	22%	

Licence CC BY-NC-ND 3.0

II.2. Caractérisation géotechnique de la terre de barre

Sur les sols latéritiques, il existe plusieurs types de caractérisation en fonction des objectifs visés : la caractérisation microscopique (observation au microscopique, analyse chimique, minéralogique et thermique) et la caractérisation macroscopique (description visuelle, géotechnique et mécanique). De notre objectif, il découle aisément le fait que c'est les études essentiellement géotechniques qui nous concernent afin de confirmer ou non l'utilisation d'un mélange dans une couche de chaussées aux vues des recommandations du CEBTP.

II.2.1. Site de prélèvement

Le sol de notre étude est prélevé dans le plateau de Porto-Novo/Sakété/Pobè à Avrankou (6°32'24,5''N et 2°39'3,6''E) comme le montre la Figure 22.

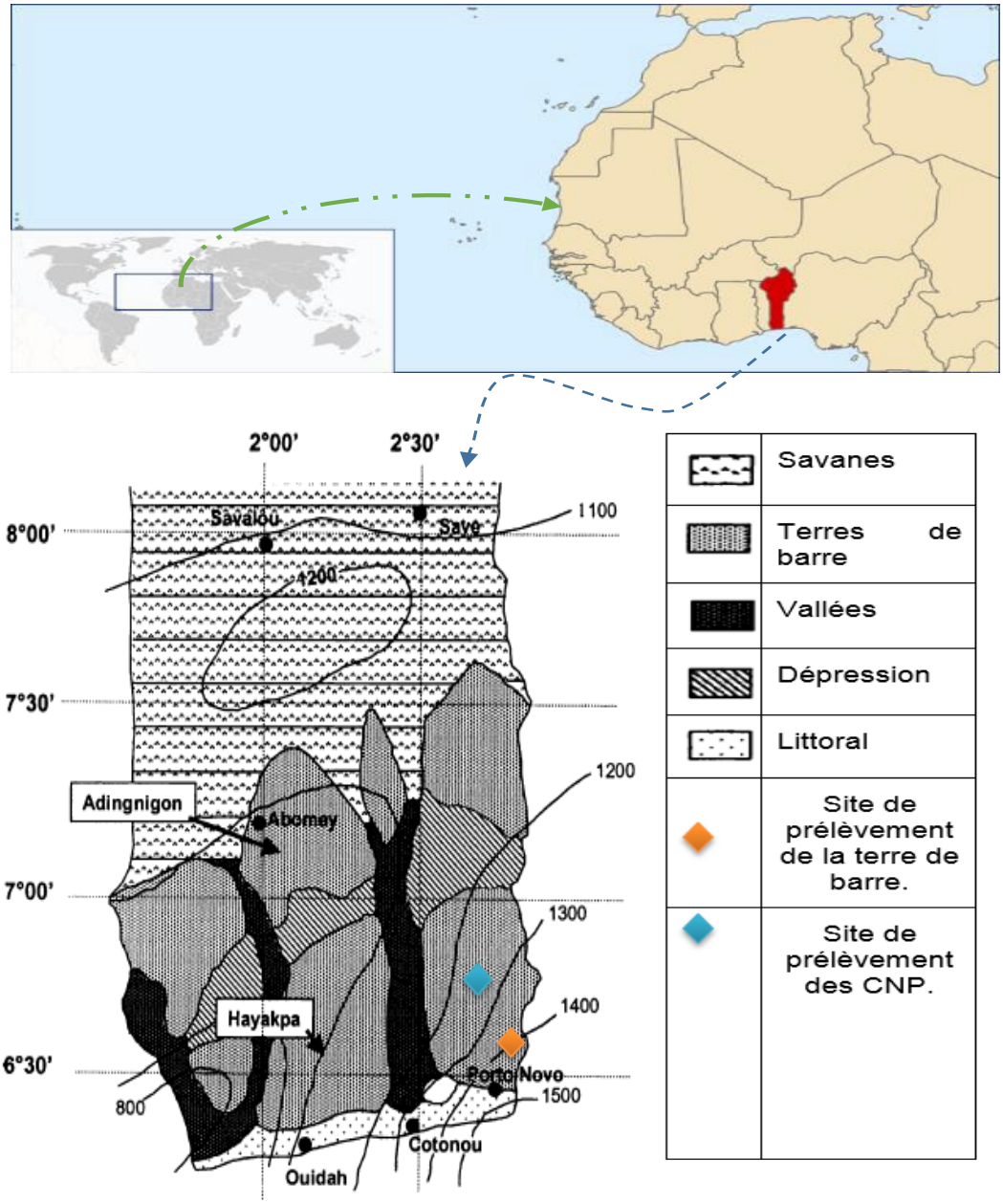


Figure 22 : Localisation des sites de prélèvement : Carte géologique d'après (Carsky, 2003)

Les sites de prélèvement sont représentés sur la Figure 22. Notre milieu d'étude est limité par les latitudes 6°30' et 7°00' Nord et les longitudes 2°30' et 2°40' Est.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

II.2.2. Prélèvement

Sur le site de prélèvement, la terre de barre est prise à plusieurs points et à différentes profondeurs après avoir enlevé la couche de quelques centimètres exposée aux intempéries climatiques. L'échantillon prélevé est un sol de couleur rougeâtre appelée ‘**’terre de barre**’’. Elle est très glissante en période pluvieuse (Figure 23). Elle est issue des dépôts sédimentaires du type des sables du Continental Terminal ou des arènes qui résultent de l'altération in situ des granitoïdes ayant subi un remaniement du type colluvial.

Figure 23 : Prélèvement de la terre de barre à Avrankou (6°32'24,5''N et 2°39'3,6''E)

Les échantillons remaniés ont été transportés au laboratoire et conservés dans les sacs. Les CNP quant à elles sont directement prélevées sur les tas en attente de transaction, et conservées dans les sacs au laboratoire sans aucun traitement préalable.

II.2.3. Essais d'identifications

Pour les matériaux argileux, les essais d'identification au laboratoire sont indispensables surtout lorsque l'on s'y intéresse comme matériaux routiers. Ils permettent une description complète et chiffrée car des matériaux d'apparence très voisine peuvent présenter des paramètres très différents. Dans ce paragraphe, les essais seront orientés dans l'optique de la caractérisation des sols argileux et leur utilisation en construction routière. Ce sont des essais d'identification qui traduisent les caractéristiques intrinsèques des particules et la force de leur liaison en présence de l'eau. Ils sont réalisés sur des échantillons remaniés (granulométrie, plasticité, essai au bleu de méthylène, ...).

Les essais d'identification simple, réalisés suivant la normalisation française sont énumérés comme ci-après :

II.2.3.1. Analyse granulométrique (AG)

Les essais ont été conduits selon la norme NF EN ISO 17892-4 (NF EN ISO 17892-4, 2018). Les analyses granulométriques, pour les éléments de dimensions supérieures ou égale à 80 µm, ont été effectuées par tamisage à sec après lavage en pesant le refus obtenu sur chaque tamis; pour les particules inférieures à 80 µm, les analyses ont été effectuées par sédimentation. L'essai permet de déterminer la proportion de particules sédimentées, pour une dimension donnée calculée suivant la loi de Stockes qui exprime la relation entre la vitesse

Licence CC BY-NC-ND 3.0

de décantation d'une particule solide sphérique dans un liquide et le diamètre de cette particule (NF EN ISO 17892-4, 2018).

II.2.3.2. Les limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg (limites de liquidité et de plasticité) exprimées en pourcentage (%) sont les teneurs en eau pondérales correspondantes à des états particuliers d'un sol. La teneur en eau, pour laquelle s'effectue le passage de l'état solide à l'état plastique, est appelée limite de plasticité $\mathbf{w_P}$ et celle pour laquelle s'effectue le passage de l'état plastique à l'état liquide est appelée limite de liquidité $\mathbf{w_L}$; elles sont déterminées selon la norme (NF P 94-051, annulée en janvier 2020) ou (NF EN ISO 17892-12) sur la fraction 0/400 µm, à l'aide de l'appareil de Casagrande pour la limite de liquidité et au rouleau pour la limite de plasticité (NF P94-051, 1993).

L'indice de plasticité est donc déduit des résultats de ces essais (Équation 8).

$$I_P = w_L - w_P \qquad \text{Équation 8}$$

La Figure 24 montre l'appareil de Casagrande utilisé pour la détermination de Ip.

Figure 24 : Appareil de Casagrande

II.2.3.3. Teneur en matières organiques (MO)

Les matières organiques ont des caractéristiques indésirables dont les principales sont leur structure spongieuse, meuble et le peu de résistance mécanique de leurs constituants. Elles subissent des changements de volume considérables sous l'effet des charges et des variations de teneur en humidité.

La détermination des matières organiques par la méthode de calcination consiste à déterminer la perte de masse d'un échantillon, préalablement séché à 50°C, après calcination dans un four jusqu'à masse constante à une température de 450°C. La teneur en matières organiques par calcination C_{MOC} est le rapport de la masse de matières organiques contenues dans un échantillon, détruites par calcination, sur la masse sèche des particules solides avant calcination de la fraction du matériau passant au tamis de 2 mm (XP P 94-047, 1998).

II.2.3.4. Essai au bleu de méthylène

L'essai au bleu de méthylène a été effectué selon la norme NF P 94-068. Cet essai consiste à mesurer, pour 100 g de matériau, la quantité de bleu de méthylène nécessaire pour recouvrir la surface externe et interne des particules présentant un déficit de charge (Figure 25). La

Licence CC BY-NC-ND 3.0

valeur au bleu (VBS) est le nombre de grammes de bleu de méthylène nécessaire pour saturer 100g de la fraction 0/5 mm du matériau (NF P94-068, 1998).

Figure 25 : Matériel d'essai au bleu de méthylène

II.2.3.5. Masse de volumique des particules solides

La masse volumique des particules solides des sols par la méthode du pycnomètre à eau peut être réalisée conformément aux normes NF EN ISO 17892-3 (NF EN ISO 17892-3, 2015).

II.2.3.6. Essai Proctor

Il existe deux types d'essais de Proctor : l'essai Proctor normal (constructions des remblais) et l'essai Proctor Modifié (réalisation des autres couches : couches d'assises, …). Leur principe est identique à la seule différence de l'énergie de compactage appliquée. L'essai Proctor Modifié est réalisé selon la norme NF P94-093 (NF P 94-093, 2014).

L'essai consiste à humidifier un matériau (la terre de barre ou les mélanges CNP/TB) à plusieurs teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnels. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe de variation 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 (courbe Proctor). Généralement la courbe Proctor dévoile une valeur maximale de la masse volumique du matériau (ρd_{max}) obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau (W_{OPM}) : Elles sont appelées caractéristiques optimales de compactage Proctor Modifié.

La montre Figure 26 quelques images pendant les essais Proctor Modifié.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

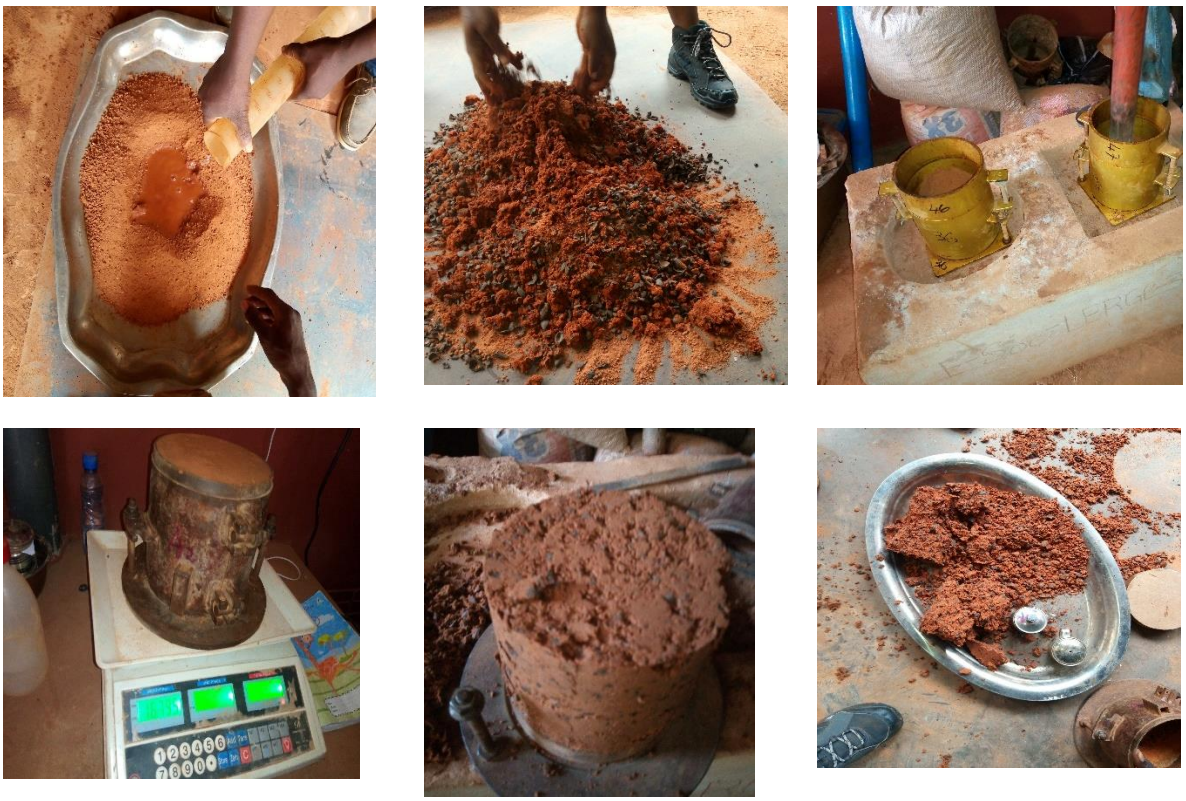


Figure 26 : Quelques étapes pour les essais Proctor Modifié sur la terre de barre et les mélanges CNP /TB

II.2.3.7. L'essai CBR (California Bearing Ratio)

Les essais sont réalisés selon la norme NF P94-078. Selon le cas, il peut être déterminé l'Indice Portant Immédiat (IPI), Indice CBR immédiat et l'indice CBR après immersion. Ce dernier sert à caractériser la portance du matériau (c'est à dire la charge qu'il peut supporter sans se rompre), mais également à mesurer l'aptitude d'une chaussée en cas de fortes pluies. Le CBR est un nombre sans dimension exprimant en pourcentage le rapport entre les forces produisant dans le même temps un enfoncement donné dans le matériau étudié d'une part et dans un matériau de référence d'autre part. Le matériau est compacté à la teneur en eau optimale suivant les procédures de l'essai Proctor modifié : 3 moules CBR qui seront compactés respectivement à raison de 55, 25, et 10 coups par couche (5 couches par moule). Après immersion des moules pendant 4 jours, on détermine le poids, le gonflement, la densité et la compacité.

L'essai consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique (49,6 mm de diamètre) pour le faire pénétrer à vitesse constante (1,27 mm/min) dans une éprouvette de matériau (Figure 27 .b). L'essai permet alors de déterminer la portance du sol, en estimant sa résistance au poinçonnement. Les valeurs particulières (Équation 9 et Équation 10) des deux forces (F1 et F2) ayant provoqué deux enfoncements conventionnels (2,5 mm et 5 mm) sont respectivement rapportées aux valeurs des forces observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements (NF P94-078, 1997). L'indice CBR est conventionnellement la plus grande valeur (Équation 11), exprimée en pourcentage, des deux rapports calculés (Équation 9 et Équation 10).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

$$ICBR_{2,5}=\frac{F_1}{13,35}.100$$ Équation 9

$$ICBR_5=\frac{F_2}{19,93}.100$$ Équation 10

$$CBR=\max(ICBR_{2,5};ICBR_5)$$ Équation 11

F_1 : Effort de pénétration à 2,5 mm d'enfoncement (en kN)

F_2 : Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (en kN)

Figure 27 : a) conservation des échantillons compactés à la teneur en eau optimale b) dispositif de poinçonnement pour l'essai CBR

II.2.4. Les systèmes de classification

Il existe plusieurs systèmes de classification des sols. Leur but est de les ranger en familles ou groupes qui présentent les mêmes ou très voisines caractéristiques géotechniques. Les résultats du test d'identification servent de base à divers systèmes de classification des sols et permettent également des corrélations pour estimer l'ordre de grandeur de certaines propriétés du sol.

- **Classification GTR** : Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières (NF P 11-300, 1992). Elle est basée sur les caractéristiques granulométriques : D_{max}, passant à 80µm ; la valeur au bleu de méthylène du sol et l'indice de plasticité I_P du sol. La résume les classifications établies pour les sols de D_{max} ≤ 50 mm en fonction de ces différents paramètres.
- **Classification LPC**/USCS (Unified Soil Classification System). La classification LPC/USCS présente l'avantage d'être relativement simple et utilisée dans de nombreux pays. Sa version de 1965 a été complétée et modifiée en 1974 et 1980 pour devenir la classification LPC modifiée. Les modifications apportées à la classification

Licence CC BY-NC-ND 3.0

LPC/USCS portent exclusivement sur la description des sols organiques (teneur en matières organiques supérieure à 3 %).

- **Classification américaine "Highway Research Board" (HRB).**

Ces différentes classifications sont détaillées en Annexe 1.

II.3. Description de l'étude de formulation des composites CNP/TB: Loi Parabolique de Fuller- Thompson

Lorsque les sols latéritiques ne respectent pas les spécifications requises pour une utilisation en construction routière, il existe à travers la littérature plusieurs techniques et matériaux pour en améliorer le comportement. L'amélioration du comportement consiste à corriger certains paramètres physico-mécaniques ; la portance CBR, la plasticité et la granularité. Ces améliorations sont généralement : la stabilisation chimique avec différents liants, la litho-stabilisation et la stabilisation mécanique par ajout de sables naturels, des roches concassées, de fibres végétales ou des coques de noix de palmiste (Adeboje et al., 2017; Ahouet et al., 2018; Attoh-Okine, 1995; Babaliye et al., 2020; Madjadoumbaye et al., 2013; Ndiaye et al., 2013; Tankpinou Kiki, 2016; Winterkorn and Chandrasekharan, 1951). Pour la formulation ou le mélange, toutes ces études ont utilisé la technique ***essai-erreur*** et une optimisation sans contexte théorique. Le principe de cette technique schématisé à la Figure 28.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

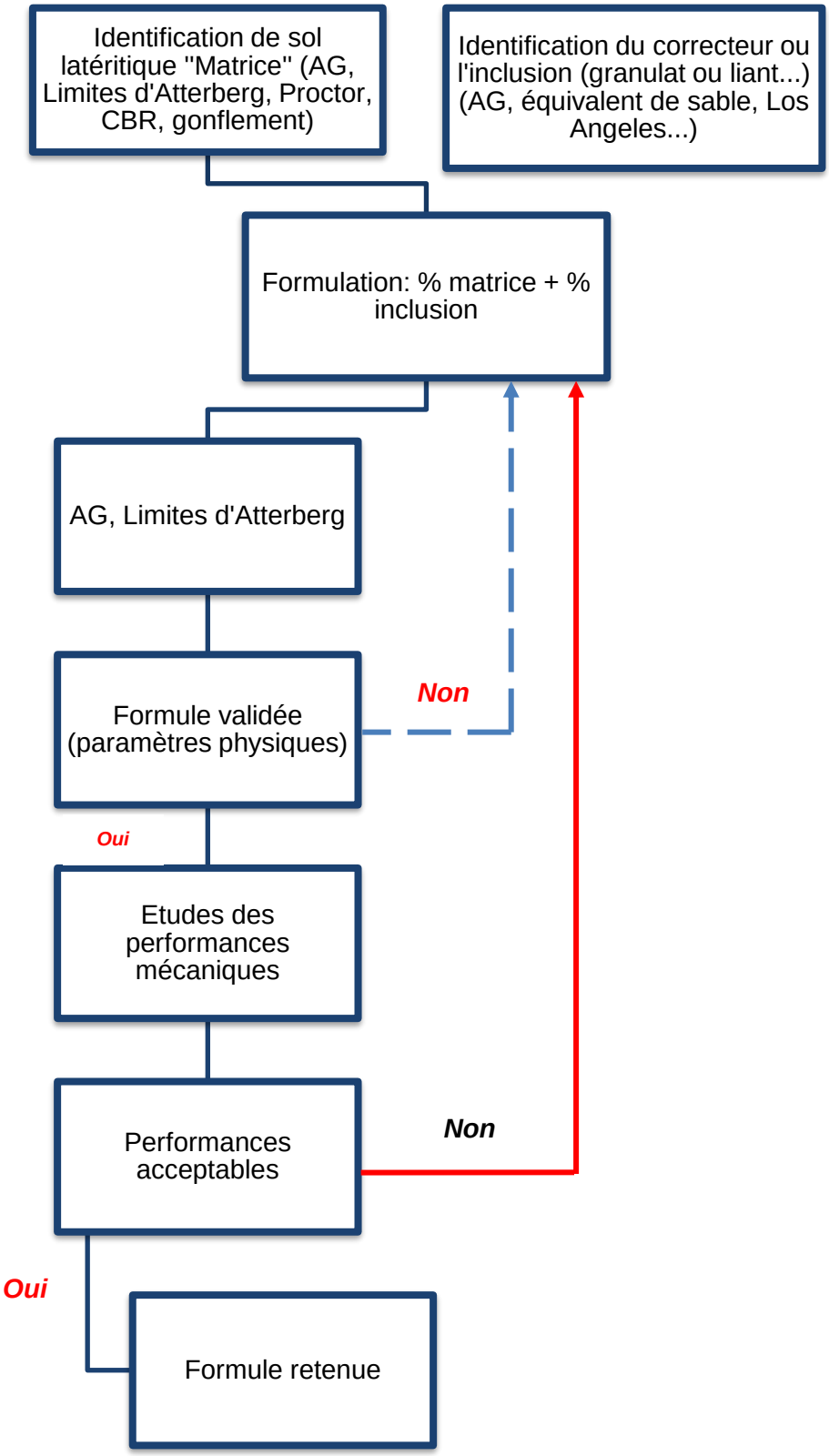


Figure 28 : Organigramme de formulation par la technique « essai-erreur »

II.3.1. Loi parabolique de Fuller- Thompson

Cette technique résumée à la Figure 28 consiste à varier les différentes proportions, à réaliser les essais physico-mécaniques sur les différents mélanges et à retenir les mélanges ayant les caractéristiques géotechniques satisfaisantes. Cette méthode empirique et à tâtons est

Licence CC BY-NC-ND 3.0

consommatrice de matériaux d'essais et de temps au laboratoire avant d'aboutir (peut-être) à une formulation supposée optimale. C'est dans cette optique que les méthodes liées à la recherche d'une courbe granulométrique idéale ont vu le jour. Dans le domaine du béton hydraulique classique, Féret a prouvé que les caractéristiques du produit sont influencées par le choix des granulats (Féret, 1892). De ce fait, plusieurs auteurs ont tenté de trouver la '***'courbe granulométrique idéale***'' pouvant aboutir au mélange dont les caractéristiques soient celles recherchées. Lier les paramètres du produit à la distribution des tailles des grains parait fondamental et crucial. Mais très tôt cette préoccupation majeure concerne non seulement l'industrie du béton mais aussi la mécanique des sols et l'industrie minière (Roquier, 2016a). L'influence de la distribution de la taille des particules sur la densité du matériau granulaire a été apprécié au tournant du siècle par Fuller et Thompson (Fuller and Thompson, 1907) et exprimée par Talbot (Talbot et al., 1923) suivant l'Équation 12.

$$P_{FT}(d)=100.\left(\frac{d}{D_{max}}\right)^{0,5} \qquad \text{Équation 12}$$

où D_{max} : la plus grosse taille de particule,

d : la taille de particule considérée et

$P_{FT}(d)$: fonction de distribution de Fuller et Thompson des tailles de particules tailles inférieures à d

En 1929, selon Andreasen et Anderson le modèle de Fuller et Thompson manque de polyvalence avec l'exposant fixé à 0,5 et proposent donc une variable q (Équation 13) (Andreasen and Andersen, 1930).

$$P_{AA}(d)=\left(\frac{d}{D_{max}}\right)^{q} \qquad \text{Équation 13}$$

$P_{AA}(d)$: fonction de distribution de Andreasen et Anderson des tailles de particules tailles inférieures à d.

L'Équation 13 est obtenue de la résolution de l'Équation 14 en tenant compte de la condition aux limites (Équation 15)

$$\frac{dP}{d(\ln d)}=q^{P} \qquad \text{Équation 14}$$

$$P(D_{max})=1 \qquad \text{Équation 15}$$

P : fraction des solides de tailles inférieures à d

L'Équation 14 est établie comme suit : soit d_1 la plus grande taille et d_n la plus fine. L'auteur estime que la classe ''i'' occupe un volume absolu égal à une fraction ''q'' du volume absolu de l'ensemble des classes ''n'' à ''i+1'' (n est la classe la plus fine). La taille des particules est telle qu'elles forment une série géométrique, de sorte que la différence logarithmique des deux tailles de particules appartenant à deux catégories de particules consécutives est constante. Ici q ne peut être qu'un nombre positif. La valeur de q constitue dans cette perspective un vrai débat. La tendance qui s'est dégagée des recherches menées au fil des ans semble être que

Licence CC BY-NC-ND 3.0

la diminution de q (à partir de 3) conduit à des mélanges de plus en plus compacts. Pour en comprendre les raisons, considérons les études de Peronius et Sweeting (1985), Aberg (1992) et Tsirel (1997).

L'objet de recherche de Peronius et Sweeting (1985), porte sur les minerais. Prenant référence sur la loi parabolique de Fuller, ils ont établi un modèle tenant compte de la forme des grains et du degré de compaction du mélange. Ils conclurent que, la porosité diminue lorsque q varie de 3 à 0,5 puis augmente quand q passe de 0,5 à 0,4 (Peronius and Sweeting, 1985).

Aberg a développé un modèle stochastique en 1992 pour prédire l'indice de vides des sols granulaires. Dans ce domaine, de nombreux chercheurs ont étudié la possibilité de définir la distribution cumulée du volume des vides à partir de la distribution granulométrique. Aberg a déduit l'indice de vide du mélange de ce processus plutôt fastidieux. Lorsque q varie entre 3 et 0,4, l'indice des vides diminue en même temps que q (Aberg, 1992).

Tsirel a concentré son étude sur l'empilement des produits miniers et ceux issus d'extraction. Il a donc montré qu'une diminution de q entraîne une diminution des vides (Tsirel, 1997).

En bref, Peronius et Sweeting, Aberg et Tsirel conviennent que la porosité diminue lorsque q passe de 3 à 0,5. En deçà de 0,5 les avis divergent.

D'après la littérature, le modèle de Andreasen et Ardersen appelé par certains la ''loi puissance'' est largement utilisé dans plusieurs domaines pour la recherche de mélange le plus dense possible. Malgré cette utilisation, les chercheurs ne se sont pas mis d'accord sur la valeur de la variable (q ou n) qui varie certainement en fonction des domaines et des matières à mélanger. Dans cette étude nous proposons d'utiliser le modèle dans sa forme (Équation 16) décrite au paragraphe I.5.3 et de varier le paramètre ''**n**''

$$P(d)=100.\left(\frac{d}{D}\right)^{n}$$ Équation 16

La méthode utilisée a consisté à trouver les proportions volumiques des constituants formant le mélange le plus dense possible. Le diamètre maximal D des granulats est fixe et connu. Pour une variable ''**n''** donnée, le pourcentage d'étude P est déterminé correspondant comme celui aux passants de la fraction granulaire de diamètre moyen d.

A partir des résultats élémentaires obtenus pour les CNP et la terre de barre utilisées dans cette étude (granulométrie et masses volumiques spécifiques), les proportions volumiques pour ''n'' variant de 0,1 à 1 sont présentés au Tableau 11.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Tableau 11 : Proportions volumiques de la terre de barre et de CNP : n variant entre 0,1 et 1 (pas 0,1)

Valeur de n	Proportion de terre de barre (%)	Proportion de CNP (%)
0,1	88	12
0,2	63	37
0,3	46	54
0,4	33	67
0,5	23	87
0,6	16	84
0,7	11	89
0,8	7	93
0,9	3	97
1	1	99

Du Tableau 11, on constate que pour n<0,2, la proportion de la terre de barre est élevée, les CNP n'auront pas assez d'impact sur les propretés des mélanges. De même pour n> 0,4, la proportion des CNP est élevée ; ce qui empêchera la réalisation des essais géotechniques (Proctor Modifié et CBR). De fait, la plage de n est limitée aux valeurs comprises entre 0,2 et 0,4.

Le Tableau 12 présente les cinq mélanges effectivement mis en œuvre pour la suite de ce travail. Chaque mélange est désigné par la proportion volumique de CNP qu'il contient.

Tableau 12 : Proportions volumiques de terre de barre et de CNP ; n variant entre 0,2 et 0,4 (pas 0,05)

Mélange	Valeur de n	Proportion de terre de barre (%)	Proportion de CNP (%)
Mélange 37	0,2	63	37
Mélange 46	0,25	54	46
Mélange 54	0,3	46	54
Mélange 61	0,35	39	61
Mélange 67	0,4	33	67

II.3.2. Mélange des composites

Comme le montre la

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Figure 26 (paragraphe II.2.3.6), les mélanges terre de barre et CNP ont été faits manuellement. Les matériaux de base (CNP et TB) sont portés à l'état sec avant le mélange de chaque formule. Les conditions des mélanges et de conservation des composites ont été identiques pour l'ensemble des éprouvettes d'une même série d'essais.

II.4. Synthèse

Le **chapitre II** fait le point sur les matériaux de base (CNP et TB), leur site de prélèvement et les méthodes de leur caractérisation. Pour les composites CNP/TB, la méthode de formulation, les différentes techniques de préparation d'échantillons ainsi que les méthodes de caractérisation géotechniques ont été également décrites.

Dans le chapitre suivant, les résultats des essais macroscopiques sur les échantillons naturels et l'étude des mélanges les mélanges CNP/TB est présentée. Ces résultats seront interprétés et discutés du point de vue géotechnique conformément aux recommandations du CEBTP pour une utilisation dans le corps de chaussées.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

CHAPITRE III : VALORISATION DES MELANGES CNP/TERRE DE BARRE EN COUCHE DE FONDATION

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Chapitre III. Valorisation des mélanges CNP/Terre de barre en couche de fondation

Ce chapitre présente la synthèse des essais effectués sur la terre de barre à l'état naturel ainsi que les résultats obtenus pour les différents mélanges (CNP/TB).

III.1. Caractérisation géotechnique du sol naturel

III.1.1. Granulométrie

La courbe de la Figure 29 représente l'analyse granulométrique (obtenue par tamisage puis par sédimentométrie) des particules du sol étudié.

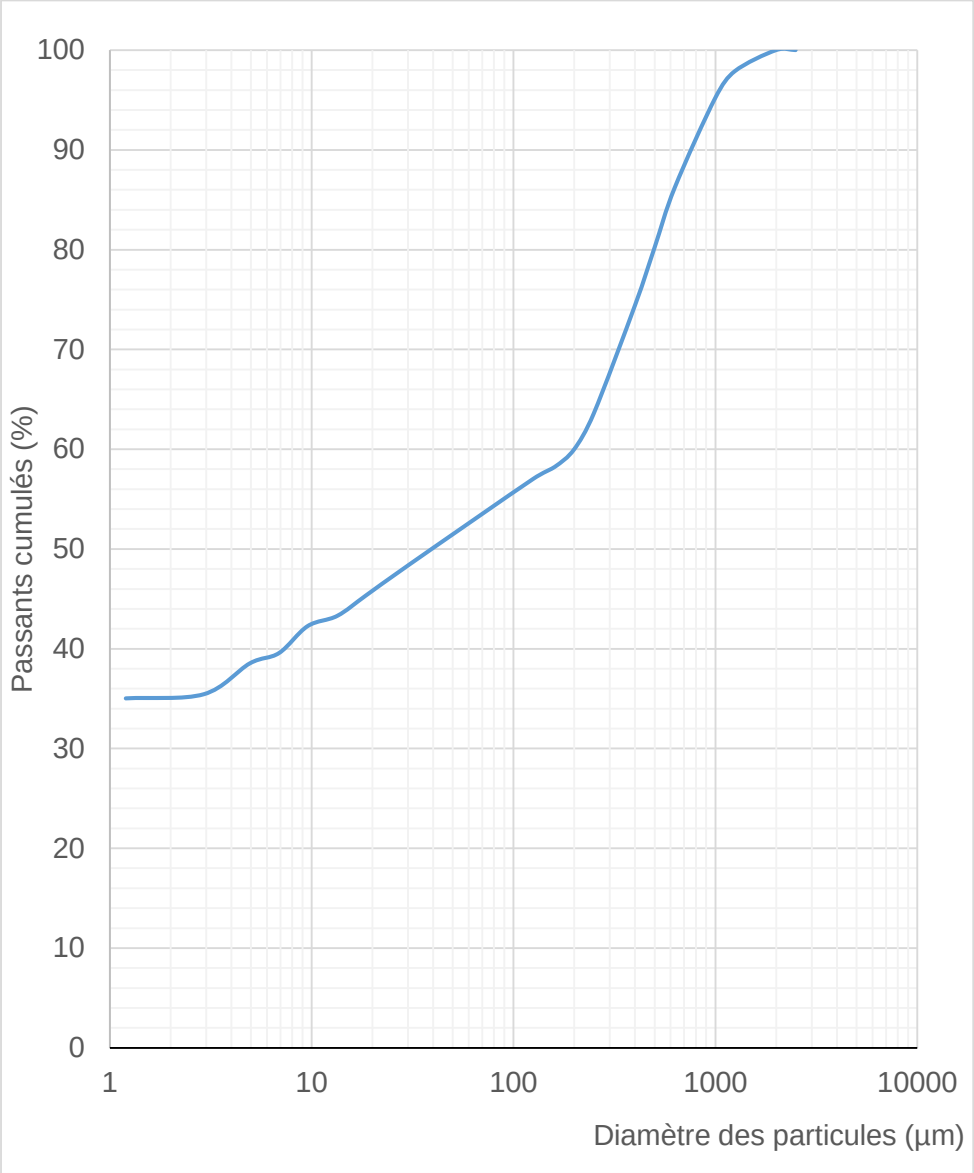


Figure 29 : Courbe granulométrique de la terre de barre étudiée

III.1.2. Identification géotechnique

Les résultats des paramètres d'identification simple sont présentés dans les paragraphes suivants.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

L'ensemble des résultats d'identification est résumé au Tableau 13.

Tableau 13 : Paramètres d'identification de la terre de barre

Caractéristiques physiques	Terre de barre (Avrankou)
D_{max} (mm)	2
P_{80} : Fraction fine (<80 µm)	56,6 %
Masse volumique des particules solides (kg/m^3)	2 650
Masse volumique en vrac (kg/m^3)	1 050
Limite de liquidité (w_L)	47
Limite de plasticité (w_P)	26
Indice de plasticité (I_P)	21
Valeur de bleu (Vb)	0,7
Matières Organiques (MO)	0,63
Classification GTR	A-2
Classification LPC	Ap
Classification HRB	A-7-6 (9)

Le pourcentage de particules fines de la terre de barre d'Avrankou issue de l'analyse granulométrique est de 56,6% ; on en déduit donc que cette terre de barre est un sol essentiellement fin conformément au GTR-GTS. Ce caractère confère au matériau, une très bonne cohésion facilitant ainsi son compactage. Toutefois, le pourcentage élevé de fines cette terre peut soulever quelques inquiétudes car les fines pourraient nécessiter un arrosage important et engendrer la formation de boue lors du compactage. Cette inquiétude est d'ailleurs confirmée par l'indice de plasticité du matériau qui est de 21, valeur considérée élevée pour la mise en œuvre dans les assises de chaussées conformément au CEBTP. En effet, l'indice de plasticité témoigne de la sensibilité à l'eau du matériau et est souvent recherché inférieur à 30 voire 15 selon la destination du matériau : la terre de barre est donc un sol trop plastique et ainsi sa mise en œuvre risque d'engendrer quelques difficultés.

III.1.2.1. Plasticité

Les limites d'Atterberg ont été déterminées sur la terre de barre à l'état naturel. L'abaque de plasticité de Casagrande fournit des renseignements sur l'argilosité des matériaux. Généralement les sols argileux se placent de façon structurée dans un diagramme « limite de liquidité w_L en abscisse et l'indice de plasticité I_P en ordonnée. Les dénominations des sols dépendent de leur position dans le diagramme par rapport à une droite appelée ligne A d'équation Ip = 0,73 (wL-20) pour w_L> 30 (voir Annexe 1.2). Au-dessus de cette ligne A (pour

Licence CC BY-NC-ND 3.0

w_L> 30) se trouvent des argiles (peu ou très plastiques). En dessous de la ligne A (pour w_L> 30) figurent les limons très plastiques et les sols organiques. Les sols fins sont peu plastiques lorsque w_L <50 et très plastiques pour w_L >50. La position d'un échantillon sur l'abaque permet de vérifier son caractère limoneux ou argileux. Pour 30 < wL<50 et Ip=21, la terre de barre est donc argileuse et peu plastique selon le diagramme de Casagrande

III.1.2.2. Classification

D'après la classification GTR expliquée en Annexe 1.1, cette terre de barre est classée A2 (sable fin argileux, limon, argile et marne peu plastique ou arène). La Figure 30 : Classification GTR de la terre de barre place la terre de barre dans le tableau synoptique de la classification selon le GTR.

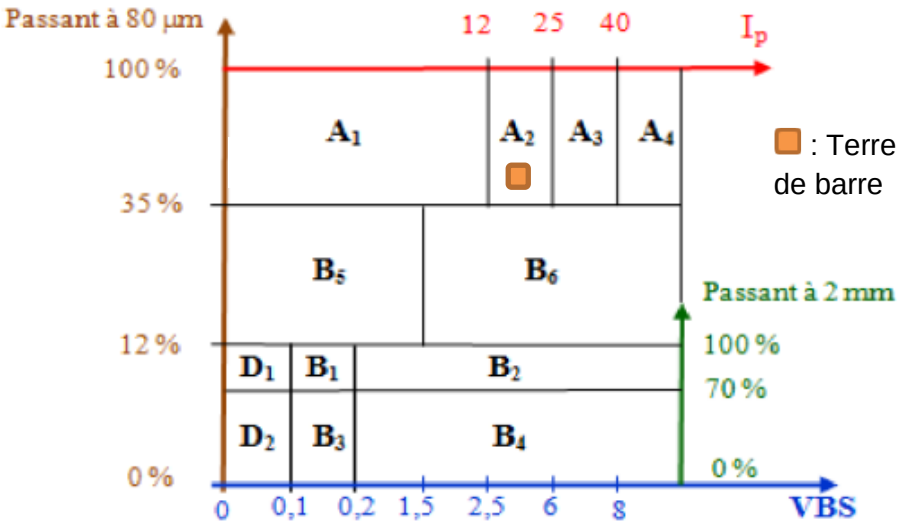


Figure 30 : Classification GTR de la terre de barre (d'après LCPC SETRA 2000)

La classification LPC (1980) rejoint la classification selon le diagramme de Casagrande pour la terre de barre qui est une argile peu plastique (**Ap**).

Quant à la classification HRB (High Research Board), l'échantillon du sol est classé **A-7-6 (9)**. Il s'agit de sols argileux mauvais comme matériau de sous-couche de chaussées.

III.1.3. Résultats de caractérisation mécanique sur le sol naturel

Les essais de caractérisation mécanique (essais Proctor - CBR**)** décrits au paragraphe II.2.3 ont été réalisés sur la terre de barre, destinée à être renforcée par des CNP.

La Figure 31 présente la courbe Proctor modifié. Le Tableau 14, quant à lui résume les Caractéristiques géotechniques de la terre de barre à l'état naturel.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

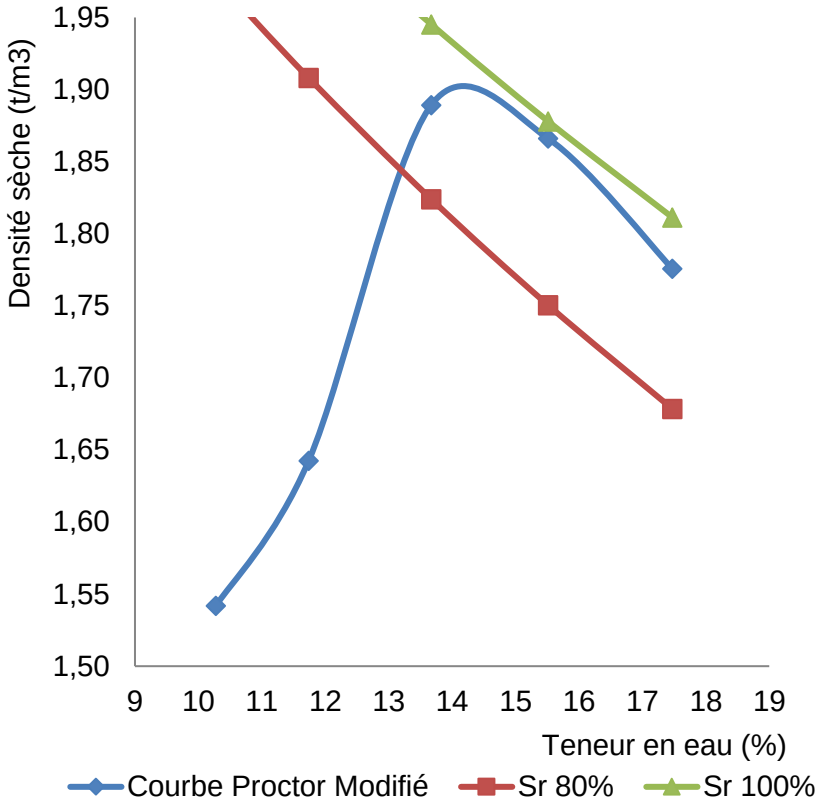


Figure 31 : Courbe Proctor Modifié de la terre de barre

Tableau 14 : Caractéristiques géotechniques de la terre de barre à l'état naturel

Essais	**Caractéristiques**	**Terre de barre (Avrankou)**
Essai Proctor Modifié	Densité sèche maximale OPM (ρd_{OPM} en t/m^3)	1,90
	Teneur en eau optimale (w_{OPM} en %)	14
Essai de CBR	Indice CBR à 95% OPM après 96h d'imbibition	17
	Gonflement linéaire GL (%)	0,07

Il est remarqué que la densité sèche augmente avec l'ajout de l'eau pour atteindre une valeur maximale de 1,90 t/m^3 : c'est la phase de densification. Elle est liée à la lubrification et à la réorganisation des grains qui optimisent la compacité. La teneur en eau optimale pour atteindre la densité sèche optimale est de 14%. Après cette teneur en eau, l'eau commence à empêcher les grains d'occuper certains espaces et la densité sèche diminue avec l'augmentation de la teneur en eau. Les caractéristiques optimales du Proctor modifié sont atteintes à des zones de saturation comprises entre 80 et 100%. Cela est habituellement

Licence CC BY-NC-ND 3.0

observé lors du compactage des matériaux. L'eau étant un fluide incompressible la courbe Proctor ne doit pas dépasser des valeurs de saturation supérieures à 100%. La courbe Proctor présente deux pentes assez raides de chaque côté de l'optimum et la densité sèche chute brutalement après la teneur en eau optimale. Ceci prouve que la terre de barre est très sensible aux différentes variations hydriques et qu'il faudrait prendre beaucoup de précaution pour sa mise en place sur le chantier. Concernant l'indice CBR, sa valeur à l'optimum est de 17.

III.1.4. Utilisation de la terre de barre en technologie routière

Pour une utilisation dans le corps de chaussée, les critères à satisfaire par les sols latéritiques selon l'approche CEBTP (1984) sont rappelées dans le Tableau 15.

Tableau 15 : Critères d'utilisation de la terre de barre selon le CEBTP

Critères		Terre de barre
Plateforme	IP<40	oui
	w_L<70	
	GL<2%	
	MO<3%	
Couche de forme (chantier de trafic faible)	CBR>5	non
	IP<30	
	P_{80}<45	
Couche de fondation (chantier de trafic faible : sable argileux)	1,9<ρ_{dmax}<2,10 (t/m^3) Correspondant à une compacité d'au moins 68%	non
	CBR (95% OPM) ≥ 30	
	P_{80}<30	
	IP entre 5 et 20	
	GL<2,5%	

Du Tableau 15, on déduit que la terre de barre d'Avrankou peut être utilisée à l'état naturel comme matériau de plateforme d'une chaussée à faible trafic. Par contre elle ne peut être utilisée ni en couche de forme (à cause de P_{80}) ni en couche de fondation (à cause de P_{80} et du CBR).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Selon la classification GTR (Tableau 13), la terre de barre est un sable fin argileux ou sol argileux peu plastique de classe A2. Elle pourrait se prêter à l'emploi comme matériau routier à condition que la teneur en eau ne soit trop élevée. A l'état naturel, elle peut être utilisée comme remblais; dans un état hydrique moyen et avec un compactage moyen.

III.2. Performance géotechniques des composites CNP/TB

Les différentes compositions étudiées au paragraphe II.2 sont rappelées au Tableau 16. Pour chaque type d'essai, la prise est faite en tenant compte des masses volumiques de chaque constituant.

Tableau 16 : Composition volumique des 5 mélanges (CNP/TB)

Nom du Mélange	Proportion de terre de barre (%)	Proportion de CNP (%)
Mélange 37	63	37
Mélange 46	54	46
Mélange 54	46	54
Mélange 61	39	61
Mélange 67	33	67

III.2.1. Caractéristiques géotechniques des composites (CNP/TB)

L'étude des performances géotechniques des composites (CNP/TP) a été menée conformément au protocole décrit au paragraphe II.2.3. Il s'agit habituellement de l'analyse de distribution granulaire, des limites d'Atterberg, de la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale (Proctor Modifié), de l'indice CBR après 4 jours d'immersion et du gonflement correspondant (Autret, 1983; Houben and Guillaud, 1989; Nzabakurikiza et al., 2017; Onana et al., 2017).

Les CNP étant des granulats légers, l'objectif de la méthode utilisée est de former des mélanges avec une meilleure compacité répondant aux recommandations géotechniques de CEBTP. Cette compacité est définie par l'Équation 17.

$$\text{Compacité} = \frac{\rho_d}{\rho_s}$$ Équation 17

ρ_d : masse volumique sèche

ρ_s : masse volumique absolue.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Le Tableau 17 récapitule tous les résultats géotechniques des différents mélanges et la Figure 32 présente la distribution granulaire des différents mélanges.

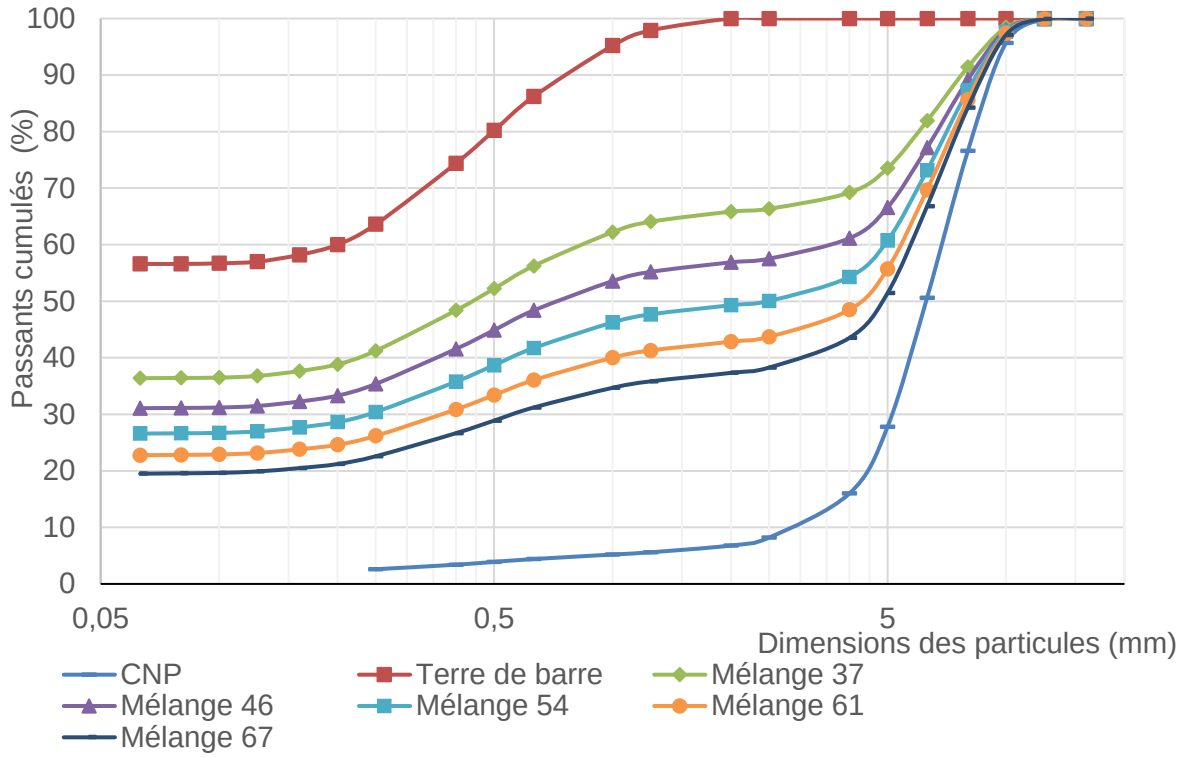


Figure 32 : Courbes granulométriques des différents mélanges (CNP/TB)

Les courbes des différents mélanges ont une forme ‘’S’’ moins accentuée. Les mélanges sont plus grossiers que la terre de barre et plus fins que les CNP.

L’essai de l’Ip est réalisé sur la coupure (0/400 µm) des différents composites. Ces Ip calculés sont légèrement variables autour de la valeur l’Ip de la matrice (terre de barre). Ceci prouve qu’il y a des éléments de diamètres inferieures à 400 µm dans les CNP issus du stockage; ce qui confirme les observations de Amu (Amu et al., 2008).

Le Tableau 17 présente les caractéristiques géotechniques des composites (CNP/TB). Les différentes discussions afférentes aux résultats du tableau sont menées au paragraphe suivant.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Tableau 17 : Caractéristiques géotechniques des différents mélanges (CNP/TB)

Caractéristiques géotechniques	**Terre de barre**	**Mélange 37**	**Mélange 46**	**Mélange 54**	**Mélange 61**	**Mélange 67**
% des particules fines (< 80 µm)	56.6	36	31	27	23	20
Teneur en eau optimale (W_{OPM} en %)	14	12,42	15,43	19,32	16,72	20,64
Masse volumique sèche γdmax (t/m^3)	1,90	1.67	1.65	1.60	1.53	1.38
Masse volumique des particules solides (t/m^3)	2,65	2,18	2,06	1,95	1,87	1,79
Compacité (%)	71,3	76,6	80,2	81,9	82,0	77,1
Limite de liquidité (W_L)	47	46	38	49	43	43
Limite de plasticité (W_P)	26	24	19	26	23	20
Indice de Plasticité	21	22	19	23	20	23
Valeur au bleu	0.7	1.57	1.29	1.28	1.41	1.42
CBR à 95% de l'OPM	17	31	20	18	30	20
Gonflement	0.013	0.07	0.41	0.22	0.16	0.35

La Figure 33 montre les références Proctor (teneur en eau optimale w_{opt} et densité sèche maximale) déterminées sur le mélange 61. Celles des autres mélanges (CNP/TB) sont présentées en Annexe 2.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

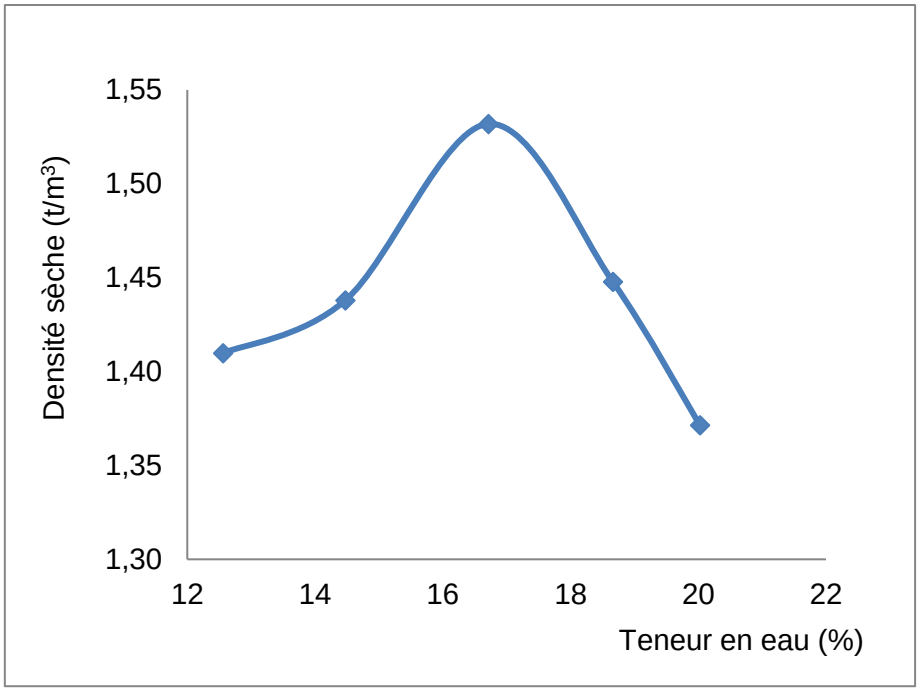


Figure 33 : Courbe Proctor Modifié du mélange 61

Les paragraphes suivants détaillent l'analyse des résultats obtenus.

III.2.1.1. Teneur en fines (P_{80})

L'évolution des proportions des particules fines (passant à 80 µm) est linéaire (Figure 34). La linéarité absolue est que les distributions des différents mélanges granulaires ont été reconstituées à partir des tailles des deux matériaux. Il est noté que le pourcentage des fines de la terre de barre diminue de 10 % pour 10 % de CNP ajoutées.

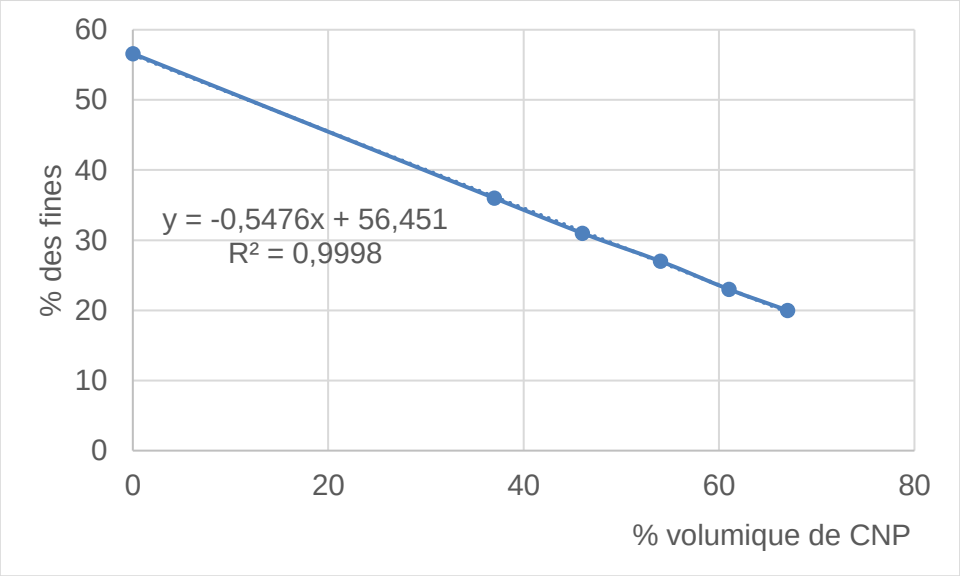


Figure 34 : Variation de la teneur en fines des mélanges en fonction des CNP

III.2.1.2. Teneur en eau W_{OPM}

La Figure 35 montre la variation de ta teneur optimale en fonction de la quantité de CNP.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

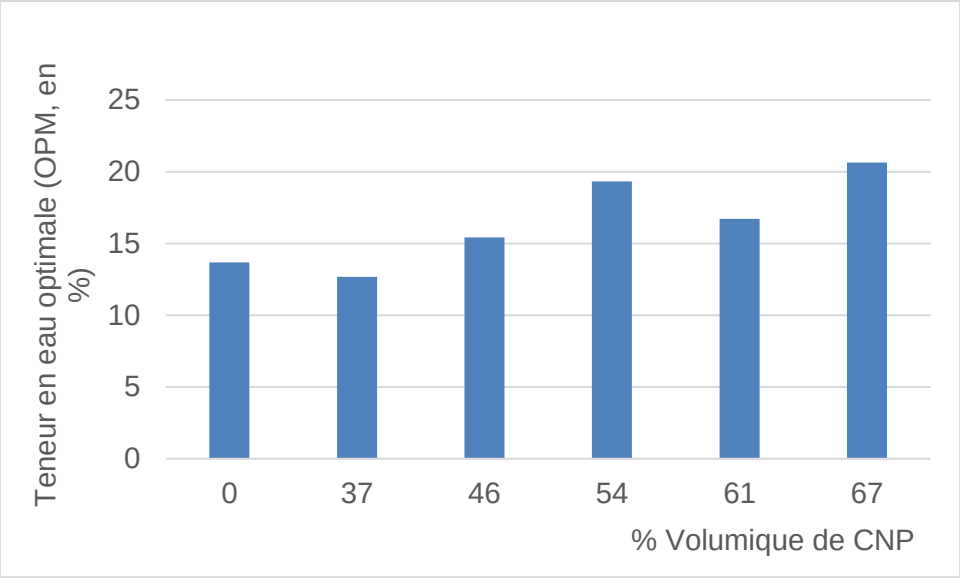


Figure 35 : Evolution de la teneur en eau en fonction du % de CNP

Hormis le mélange 37, il est remarqué que la teneur en eau a augmenté avec la quantité de CNP jusqu'à 20,64% ; cela s'explique sûrement par le fort taux d'absorption des CNP (22% d'absorption en 24 heures). Une partie de la quantité d'eau choisie pour permettre le mélange des deux constituants pendant les essais de Proctor Modifié et de CBR, est absorbée par les CNP; ce qui fait augmenter la teneur réelle en eau des différents mélanges. Ceci confirme la même remarque faite par Amu (Amu et al., 2008) et Madjadoumbaye (Madjadoumbaye et al., 2013). Pour tenter de pallier cette situation, certains auteurs qui ont valorisé les CNP dans le béton classique en remplacement du gros granulat ont proposé avant leur utilisation de les rendre saturés secs en surface (SSS) (Godonou, 2019).

III.2.1.3. Masse volumique sèche maximale (t/m^3) et compacité des mélanges

Contrairement à ce qui s'observe avec les mélanges des matériaux classiques (grave latéritique et grave alluvionnaire) (Ahouet et al., 2018), la densité sèche maximale diminue lorsque la proportion de CNP augmente. Son évolution est quasi linéaire. La courbe de tendance est d'équation y = -0,0067x + 1,9151 avec un coefficient de corrélation de 0,9111 (Figure 36). La diminution observée de la densité sèche maximale des composites est due au fait que les CNP sont deux fois plus légères que la terre de barre. Malgré la diminution des densités sèches maximales, la compacité des composites est supérieure à celle de la terre de barre à l'état naturel (Figure 37). Ce phénomène s'explique par l'agencement des grains fins dans les gros grains formant ainsi des mélanges denses. Tous les mélanges ont une compacité supérieure à 72%, ce qui leur permet d'être utilisable dans le corps de chaussée. La compacité semble se stabiliser pour les mélanges 46, 51 et 61, ce qui signifie que la proportion optimale de CNP se trouve entre 46 % et 61 % (soit entre 30 % et 45% en proportion massique).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

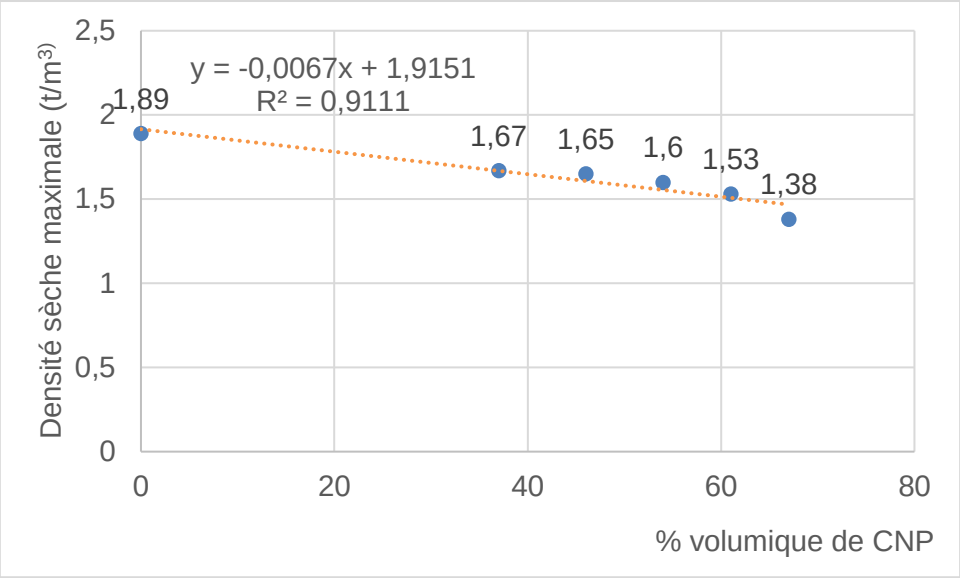


Figure 36 : Evolution de la densité sèche maximale des mélanges (CNP/TB)

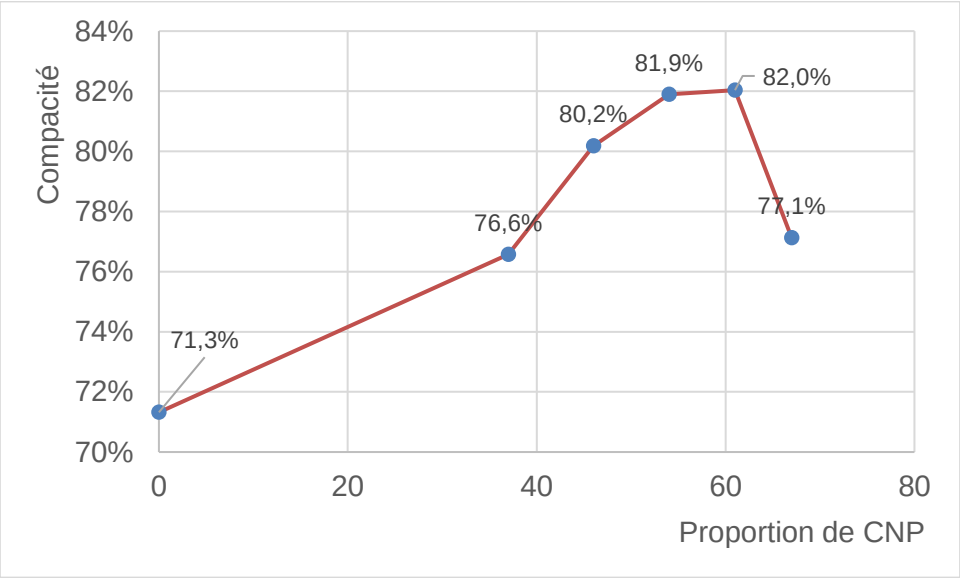


Figure 37 : Variation de la compacité des mélanges

III.2.1.4. CBR après 4 jours d'immersion et de gonflement

La densité sèche de tous les composites diminue avec l'ajout des coques de palmiste et elle reste inférieure à la densité sèche maximale de la terre de barre brute. Cependant tous les composites acquièrent un indice CBR supérieur à celui de la matrice (95% et 100% de l'OPM). Cela nous permet de dire que la portance des composites (mélanges de deux matériaux de textures et d'origines différentes) ne dépend pas de leurs densités sèches après compactage, mais aussi des nodules que les coques constituent dans le mélange.

Les courbes de la Figure 38 montrent la variation du CBR à (90%, 95% et 100% de l'OPM correspondant respectivement à 10, 25 et 56 coups) en fonction de la proportion de CNP. Les courbes ont la même allure. Au-delà de 90% de l'OPM, tous les composites ont un indice CBR supérieur à celui de la terre de barre l'état naturel. Le grand écart observé entre le CBR de 90

Licence CC BY-NC-ND 3.0

% et 95% de l'OPM des composites atteste que le compactage joue un rôle fort sur la portance de ces derniers. Tout se passe comme si le compactage accélère la cohésion et l'agencement entre la matrice et l'inclusion afin de rendre l'ensemble moins perméable et plus résistant à l'effet de l'eau. Contrairement à ce qu'on observe sur la courbe de compacité (Figure 37) il existe une plage (entre 46% et 54%) de pourcentage où l'indice CBR est relativement faible.

Cependant, le mélange 61 (avec la meilleure compacité) offre une amélioration considérable de l'indice CBR par rapport au sol latéritique brut (à l'état naturel) avec des gains de 100%, 76% et 14% pour respectivement 90%, 95% et 100% de l'OPM.

Les gonflements linéaires à 95% de l'OPM sont de 0,013% pour la terre de barre contre 0,16% pour le mélange 61. Ces gonflements sont inférieurs au maximum admissible pour l'utilisation du composite en couches de base et de fondation des routes à faibles trafics.

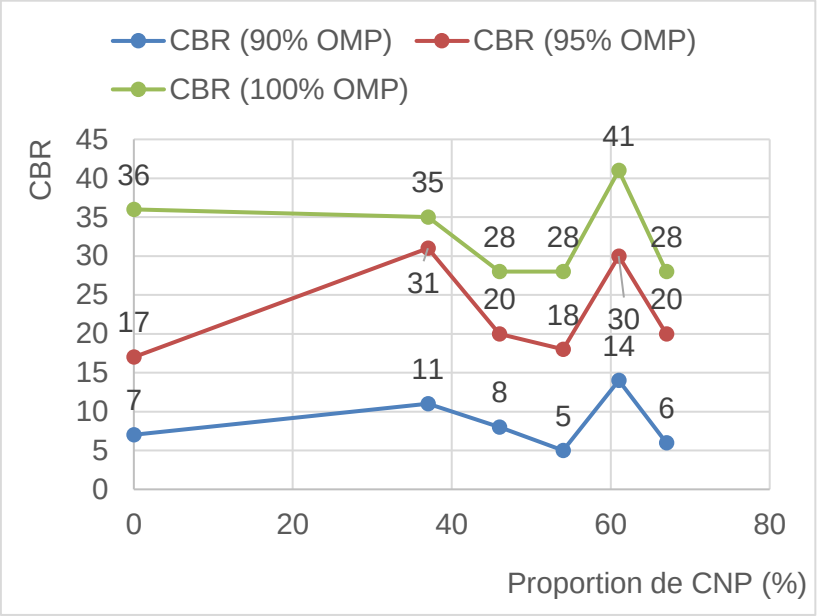


Figure 38 : Variation du CBR en fonction de la proportion de CNP

III.2.2. Utilisation des composites en construction routière

Selon les recommandations techniques du CEBTP, résumées dans le Tableau 18, les cinq mélanges peuvent être utilisés comme matériaux de la plateforme et de couche de forme pour les chantiers à faible et moyen trafic.

Quelle que soit la nature de la structure, les matériaux pour la couche de fondation doivent avoir un CBR au moins égal à 30 obtenu pour une densité sèche correspondant à 95% de l'OPM (25 pourra être admis pour les trafics faibles, T1). Le mélange 61 est le mélange le plus dense et compact avec une compacité de 82% avec l'indice CBR 30 (à 95% de l'OPM) et 41 (100% de l'OPM). Aux vues de ces différentes exigences techniques, seul le mélange 61 (39% TB + 61% CNP) présente toutes les caractéristiques comme matériau de couche de fondation des routes à faible trafic (T1 <300 véhicules par jour).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Tableau 18 : Récapitulatif des critères d'utilisation des mélanges (CNP/TB)

Critères selon le CEBTP		Terre de barre	Mélange 37	Mélange 46	Mélange 54	Mélange 61	Mélange 67
Plateforme	IP<40	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	LL<70						
	GL<2%						
	MO<3%						
Couche de forme (chantier de trafic faible)	CBR>5	non	ok	ok	ok	ok	ok
	IP<30						
	P_{80}<45						
Couche de fondation (chantier de trafic faible : graveleux latéritique)	$1.8<\rho_{dmax}<2$ Correspondant à une compacité d'au moins 68%	non	non	non	non	ok	non
	CBR(95% OPM) ≥ 30						
	P_{80}<35						
	IP<30						

Légende : ok= utilisable ; non= non utilisable

Le composite optimal 61% de CNP (45% en poids) est différent celui de Amu (25% de CNP et 75% de latérites), de celui de Madjadoumbaye (20% de CNP et 80% de graveleux latéritique) et de Ahouet (30% de grave alluvionnaire et 70% de grave latéritique (Ahouet et al., 2018; Amu et al., 2008; Madjadoumbaye et al., 2013). Ces différences démontrent que les optima des composites et leurs caractéristiques géotechniques dépendent fortement des caractéristiques intrinsèques de la matrice argileuse (type de latérites) et de l'inclusion (type de grave ou de CNP). **A cause des valeurs presque limites, il faudra par prudence considérer plus de 95% de l'OPM lors d'une éventuelle mise en œuvre du mélange 61**.

III.3. Performances géotechniques des composites CNP/Terre de barre/ Sable.

Afin d'envisager une utilisation en couche de fondation des chaussées à trafics moyens (T2 et T3), il faudra abaisser les indices de plasticité. L'une des améliorations les moins coûteuses recommandée par le CEBTP est l'ajout du sable à la matrice argileuse. Cette solution est retenue à cause de la disponibilité du sable de rivière dans le milieu d'études. Cette solution adoptée par Ndiaye (Ndiaye et al., 2013) dans le cadre de son étude de lithostatilisation conclut que le sable a permis non seulement d'abaisser l'indice de plasticité mais aussi de participer à augmenter la portance du composite. La proportion de sable a été fixée et maintenue constante (15%) dans le cadre de la présente étude. Le sable utilisé est prélevé à Agassa-Godomey dans la commune d'Abomey-Calavi dont ses caractéristiques sont résumées au Tableau 19.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Tableau 19 : Caractéristiques du sable lagunaire

Paramètres physiques et mécaniques	**Notation/ Unité/ Norme**	**Sable lagunaire de Agassa-Godomey**
% de particules fines	%	3
Poids spécifique	(kg/m^3) NF EN 1097-6	2 560
Masse volumique en vrac	(kg/m^3) NF EN 1097-3	1 420
Valeur de bleu	NF P94- 068	0.7
Equivalent de sable	ES (%)	72

En utilisant la même méthodologie développée au paragraphe II.2 , nous aboutissons en proportions volumiques aux cinq mélanges suivants :

- Mélange A : 68% TB + 15% SL+17% CNP
- Mélange B : 59% TB + 15% SL+26% CNP
- Mélange C : 51% TB + 15% SL+34% CNP
- Mélange D : 45% TB + 15% SL+40% CNP
- Mélange E : 38% TB + 15% SL+47% CNP

(TB : terre de barre ; SL : Sable lagunaire et CNP : coque de noix de palmiste)

Les résultats des essais Proctor Modifié et CBR réalisés sur les mélanges tri-phasiques de sol latéritique, de sable et de CNP sont présentés dans le Tableau 20. On observe que l'ajout de 15% de sable a amélioré la portance des mélanges (leur indice CBR est supérieur à 30). Leur indice de plasticité est inférieur à 20 et la compacité des différents mélanges est systématiquement stabilisée entre 75 et 78%.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Tableau 20 : Synthèse des caractéristiques des mélanges TB + CNP + Sable

Caractéristiques géotechniques	**Terre de barre**	**Mélange A**	**Mélange B**	**Mélange C**	**Mélange D**	**Mélange E**
% des particules fines (< 80 µm)	56.6	39	34	30	26	23
Teneur en eau optimale (W_{OPM} en %)	13.67	11.59	12.90	12.09	12.02	14.03
Masse volumique sèche γdmax (t/m^3)	1,90	1.83	1.75	1.73	1.64	1.58
Masse volumique des particules solides (t/m^3)	2.65	2.42	2.30	2.20	2.12	2.04
Compacité (%)	71.3	75.7	76.0	78.6	77.4	77.6
Limite de liquidité (W_L)	47	37	37	35	35	34
Limite de plasticité (W_P)	26	21	21	21	21	20
Indice de Plasticité	21	16	16	14	14	14
Valeur au bleu	0.7	0.63	0.65	0.65	0.60	0.68
CBR à 95% de l'OPM	17	32	34	31	41	34

Selon les critères d'utilisation énumérés au Tableau 21, le mélange D (45% TB + 15% SL+40% CNP) et le mélange E (38% TB + 15% SL+47% CNP) avec indice de plasticité inférieur à 20, le pourcentage des fines inférieur à 30 et un indice CBR supérieur à 30 sont utilisables en couche de fondation des routes de trafic moyen (T2 et T3). Le mélange D composé en poids de 26,1% de CNP, 55,8% de terre de barre et 18,1% de sable lagunaire est le composite présentant un meilleur indice CBR. Ceci rejoint les conclusions de Amu sur le composite optimal (25% de CNP+75% du sol naturel) mais stabilisé avec 4% de l'asphalte et celui de Madjadoumbaye (20% de CNP et 80% de grave latéritique).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Tableau 21 : Récapitulatif des critères d'utilisation des mélanges (TB/CNP/sable)

Critères		**Terre de barre**	**Mélange A**	**Mélange B**	**Mélange C**	**Mélange D**	**Mélange E**
Couche de fondation (chantier T3 : graveleux latéritique)	$1.8<\rho_{dmax}<2$ Correspondant à une compacité d'au moins 68%	non	non	non	ok	ok	ok
	CBR (95% OPM) ≥ 30						
	$P_{80} \leq 30$						
	IP ≤ 20						
Couche de fondation (sable argileux)	$1.9<\rho_{dmax}<2.1$ Correspondant à une compacité d'au moins 72%	non	non	non	non	ok	ok
	$7<W_{OPM}$ (%)<13						
	CBR(95% OPM) > 30						
	$10<P_{80}<30$						
	5<IP<20						
Couche de fondation (Matériaux coquilliers)	CBR (95% OPM) > 30	non	ok	ok	ok	ok	ok

Légende : ok= utilisable ; non= non utilisable

III.4. Synthèse

Au Bénin comme dans beaucoup de pays africains, les critères de sélection des matériaux en construction routière reposent sur les recommandations du « guide de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux » du Centre Expérimental du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP) de 1972 et de 1980 (révisées en 1984). Ce guide reste le plus utilisé

Licence CC BY-NC-ND 3.0

actuellement. Ces recommandations sont fondées sur l'indice de plasticité (Ip) et l'indice CBR. Ce travail a présenté une étude qui montre comment des caractéristiques géotechniques de la terre de barre (non utilisable à l'état naturel dans le corps de chaussée) ont été améliorées par l'injonction des coques de noix de palmiste. L'apport minimum de 37% de CNP (en volume) valorise le matériau argileux pour son utilisation en couche de forme et en plateforme des routes. L'ajout de CNP à la terre de barre a réduit le pourcentage des fines à moins de 35% et a augmenté l'indice CBR. Ainsi, le mélange composé en volume de 39% Terre de Barre et 61% de CNP avec un indice CBR égal à 30 et le mélange composé de 40% de CNP, 45% de terre de barre et 15% de sable lagunaire de CBR égal à 41 sont utilisables en couche de fondation des routes respectivement à faible et à moyen trafics dans les cas aussi bien des nouvelles constructions que des réhabilitations.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

2EME PARTIE : ELABORATION DE MATERIAUX COMPOSITES A BASE DE COQUE DE NOIX DE PALMISTE A MATRICE HYDROCARBONEE UTILISABLE EN COUCHE DE ROULEMENT DES ROUTES A FAIBLE TRAFIC

Licence CC BY-NC-ND 3.0

2EME PARTIE : ELABORATION DE MATERIAUX COMPOSITES A BASE DE COQUE DE NOIX DE PALMISTE A MATRICE HYDROCARBONEE UTILISABLE EN COUCHE DE ROULEMENT DES ROUTES A FAIBLE TRAFIC

En raison de leur abondance, les sols latéritiques sont les matériaux locaux les plus utilisées en construction en Afrique (Bohi, 2008; Issiakou Souley, 2016; Madjadoumbaye et al., 2013; Ndiaye, 2013; Ndiaye et al., 2013; Nwaiwu et al., 2006; Onana et al., 2017; Quadri et al., 2012; Zolfeghari Far et al., 2013). Leur utilisation directe, en pistes non revêtues nécessite plusieurs aménagements. Ces aménagements spéciaux (reprofilages réguliers, remblai et apports de terre, barrières de pluies) nécessitent un plan de financement et de maintenance. Ces aménagements sont nécessaires voire obligatoires à cause de la sensibilité à l'eau des matériaux utilisés, des pertes de certaines fractions dues au vent et aux ruissellements et des orniérages générés par le trafic (Ahouet et al., 2018). Afin de limiter ces travaux périodiques et par conséquent le coût global de construction au kilomètre, cette partie du manuscrit est consacrée à l'élaboration d'un matériau hydrocarboné à base de CNP utilisable en couche de roulement des chaussées à faible trafic.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

CHAPITRE IV : OPTIMISATION DES FORMULATIONS D'ENROBES

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Chapitre IV. Optimisation des formulations d'enrobés

Dans le but de répondre à notre programme de recherche, il sera présenté dans ce chapitre, les différents enrobés à confectionner en laboratoire afin d'obtenir des formulations optimales pour un enrobé de surface de type ''béton bitumineux semi grenu'' (BBSG), généralement utilisé sur des chaussées à faible trafic (Delorme et al., 2007; EN NF 13108-1, 2007).

IV.1. Optimisation du squelette granulaire

La formulation d'un béton hydraulique ou d'un enrobé bitumineux consiste à déterminer la composition granulaire des différentes fractions granulaires et la teneur en liant, de sorte que le composite obtenu satisfasse aux exigences réglementaires.

Historiquement, les premières études d'optimisation des mélanges granulaires ont porté sur des matériaux minéraux et des bétons hydrauliques. Les enrobés bitumineux ont souvent été formulés à partir de courbes ou de fuseaux de références, issues de retour d'expériences et/ou d'expertises d'entreprises (Delorme et al., 2007). Une optimisation, associée à des modèles théoriques récents issus des bétons hydrauliques (méthode d'empilement compressible ou MEC) (de Larrard, 1999) a été initiée par Eiffage TP avec la proposition de la GB5 (Eiffage, 2021; Olard, 2012; Pouget et al., 2016), et du SMA dans les travaux de Perraton (Perraton et al., 2007). Le paragraphe suivant resitue les différentes démarches proposées dans leur contexte historique afin de bien comprendre la motivation des chercheurs et la finalité des démarches entreprises.

IV.1.1. Méthodes liées à la recherche d'une courbe idéale

Dans le domaine de la formulation des matériaux granulaires, on se restreint généralement à la question de la détermination des granularités conduisant aux compacités les plus fortes. L'approche générale consiste à rechercher des distributions granulaires compactes et à tenter de s'en rapprocher en combinant les matériaux dont on dispose (Sedran et al., 1994a) .

Depuis 1982, Féret (Féret, 1892) a prouvé l'influence du choix des granulats sur les caractéristiques du béton. Par exemple, pour un béton hydraulique on peut citer notamment la maniabilité, la résistance à la compression et la durabilité. Ces deux dernières caractéristiques sont fortemnt liées à la **compacité** du mélange. De ce fait, plusieurs chercheurs ont tenté de trouver la **courbe granulométrique idéale** afin de réaliser un mélange dont les caractéristiques soient celles recherchées.

En 1907, Fuller et Thompson ont conclu à partir d'expériences qu'il existe certaines courbes idéales qui représentent la distribution optimale pour minimiser les vides dans le mélange (Fuller and Thompson, 1907). Leurs travaux ont été à l'origine de nombreuses recherches sur cet aspect. En 1929, **Andreasen et Andersen** (Andreasen and Andersen, 1930) ont proposé une équation plus générale que leurs prédécesseurs. En 1994, Dinger et Funk (Dinger and Funk, 1994) l'ont encore amélioré en ajoutant une taille de grains minimale à la fonction de distribution.

En France, **Caquot** (Caquot, 1937) a révélé pour la première fois en 1937 une théorie générale de la structure des particules de béton à porosité minimale, mettant l'accent sur la nécessité de renforcer le dosage de classes extrêmes lors du passage d'une distribution infinie à distribution bornée. Il vient de faire apparaitre l'influence de l'effet de paroi sans pour autant ressortir l'effet de desserrement. Cette théorie développée par **Caquot** a inspiré d'une manière

Licence CC BY-NC-ND 3.0

ou d'une autre les chercheurs **Faury** (1958) et **Dreux** (1970) (Dreux and Festa, 1998; Faury, 1958).

Caquot a proposé un modèle qui prédit la porosité minimale d'un mélange granulaire (Équation 18). Le spectre de ce mélange est limité par (d, D).

$$p_{min} \propto \sqrt[5]{\frac{d}{D}} \qquad \text{Équation 18}$$

p_{min} : porosité minimale

D'après son modèle (Équation 18), la porosité minimale de l'empilement optimisé tend vers 0 lorsque le spectre tend vers l'infini.

La théorie d'optimisation de Caquot comprend trois étapes : 1ère étape : il recherche de la granulométrie idéale d'un mélange qui comprend autant d'éléments fins et gros qu'on le souhaite ; il recherche des corrections à apporter aux proportions lorsque la dimension des particules est bornée supérieurement (2ème étape) et inférieurement (3ème étape).

Afin d'effectuer ses corrections, Caquot ne retient que la forme additive des deux types d'interaction mis en évidence, **l'effet de paroi**. Mais il n'applique la correction qu'à la proportion du plus gros granulat et à celle du plus fin. La classe la plus grosse occupe une position singulière dans la mesure où elle ne subit pas l'effet de paroi des autres classes. Sa proportion devrait donc augmenter car, la surface du plus gros granulat doit être identique à celle des autres granulats. Cette correction se traduit par un point de brisure **J** à l'abscisse D/2 sur la courbe représentative de la granularité finie quasi-optimale (Figure 39). La courbe optimale se compose alors de deux tronçons **IJ** et **JK**. La droite **IJ** a pour équation celle de la granularité indéfinie optimale. Par contre, la classe la plus fine occupe une position singulière dans la mesure où elle ne subit pas **l'effet de desserrement** des grosses classes. Caquot détermine donc la proportion optimale par une règle empirique.

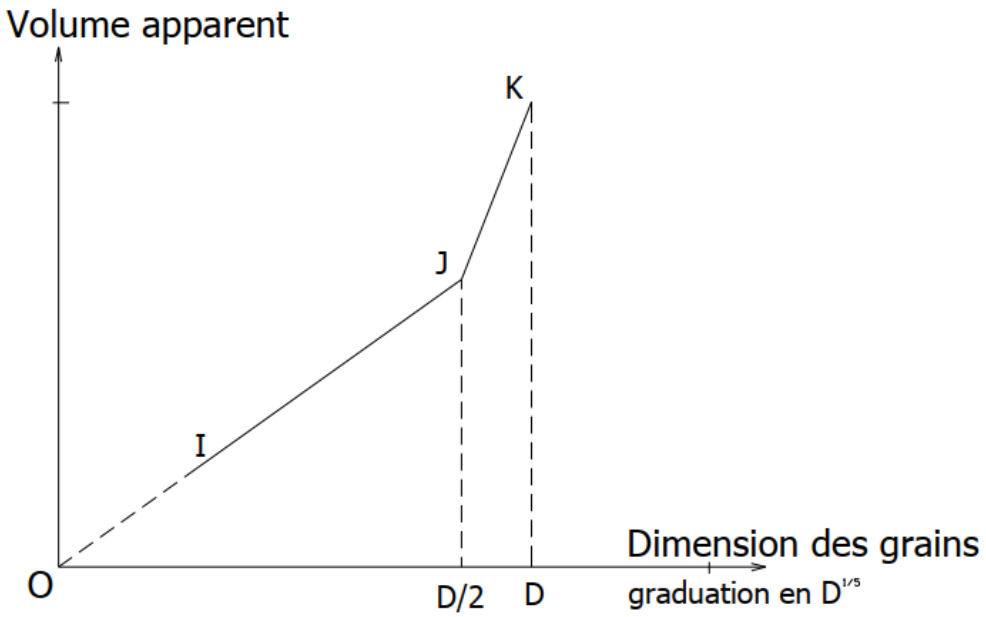


Figure 39 : Courbe de la granularité finie quasi-optimale de Caquot

Licence CC BY-NC-ND 3.0

La théorie établie par Caquot considère que la décompaction des grains fins autour des gros grains se traduit par une variation de volume proportionnelle à la surface d'interface totale. L'effet de paroi est alors déduit de la façon suivant

$$b_c(x) = \frac{d_2}{d_1} = x \qquad \text{Équation 19}$$

$b_c(x)$: représente le coefficient d'effet de paroi selon Caquot (Figure 40)

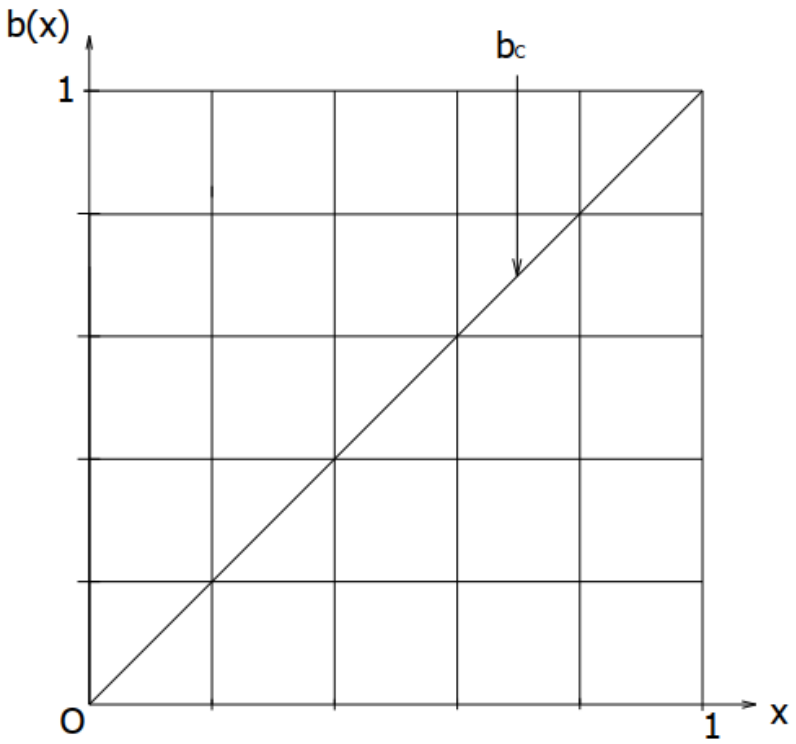


Figure 40 : Coefficient d'effet de paroi b(x) en fonction du rapport des diamètres selon la théorie de Caquot (Caquot, 1937)

La fonction b_c est monotone et croissante et satisfait aux conditions aux limites $b(0) = 0$ et $b(1) = 1$.

L'hypothèse de base de la théorie Caquot revêt un caractère approximatif, car implique que la paroi du gros granulat est rectiligne indéfinie, ce qu'en réalité n'est pas le cas. Les valeurs de b_c déterminées sont sous-estimées du fait qu'elles ne tiennent pas compte la courbure des gros grains. Ainsi, les compacités du mélange granulaire prédites sont trop fortes.

On retiendra pour la suite que :

- **l'effet de desserrement** traduit le fait que, lorsque le grain 2 n'est pas suffisamment fin pour s'introduire dans une caverne de l'empilement des grains 1, une déstructuration de ce dernier apparaît ;
- **l'effet de paroi** traduit le fait que l'empilement des petits grains 2 qui est relâché au voisinage de l'interface avec un grain 1.

Comme développé au paragraphe (I.5.3) et à travers ces auteurs, il est constaté que la recherche de la courbe granulométrique idéale est toujours synonyme de la recherche de la compacité du mélange granulaire et par ricochet du composite.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Pour les bétons, si les courbes granulométriques de référence permettent d'approcher les compositions idéales pour la recherche de la compacité maximale, elles présentent trois limites essentielles. Premièrement, les auteurs qui les développent le font en général avec plusieurs objectifs à la fois (par exemple obtenir en même temps une bonne ouvrabilité, sans risque de ségrégation et une qualité de parement irréprochable). Tout repose alors de la caractéristique que l'on souhaite privilégier. De ce fait, une large gamme de distributions (fuseau granulaire) est possible. Donc *il n'existe pas une courbe idéale qui conviendra dans toutes les circonstances.* Deuxièmement, ces modèles ne permettent pas de prédire avec précision la compacité du mélange obtenu. Enfin, leur mise au point nécessite souvent des expériences longues et coûteuses, avec des phases de correction possible grâce à un nombre limité de constituants. Dès l'apparition de plusieurs catégories d'agrégats (granulats recyclés, granulats légers, …), la plupart des données expérimentales recueillies se sont révélées presque inutilisables (Roquier, 2016a).

C'est pourquoi des chercheurs ont estimé qu'il était nécessaire de revenir aux fondamentaux de la physique des milieux granulaires, en commençant par les mélanges binaires ou ternaires, avant de généraliser aux mélanges de plusieurs composants (d'où les modèles de compacité).

IV.1.2. Modèles d'empilement granulaire

En 1928, **Furnas**, ingénieur dans une exploitation de charbon, élabora une des premières théories sur le remplissage des vides. Il a constaté que l'entassement des morceaux de minerai (charbon) dans les conteneurs aboutissait à des disparités importantes en terme de volume (Furnas, 1929).

En 1930, **Westman et Hugill** (Westman and Hugill, 1930) étudient les volumes apparents occupés par des mélanges binaires constitués par des classes granulaires de différents diamètres. En 1936, ils ont fait évoluer le modèle en le rendant plus réaliste par l'introduction d'un coefficient dans une simple équation conique faisant intervenir des volumes apparents. Un volume apparent $\mathrm{V_a}$ représente le volume nécessaire pour loger un volume absolu de grains égal à une unité. Il est égal à l'indice des vides *e* auquel on ajoute ***1*** ou l'inverse de la compacité (Équation 20)

$$\mathrm{V_a} = \frac{1}{\mathrm{c}} = \mathrm{e} + 1 \qquad \text{Équation 20}$$

$\mathrm{V_a}$: volume apparent

c : compacité

e: indice des vides

En 1950, **Mooney** crée le modèle de viscosité des suspensions. Ce dernier, qui est un modèle d'empilement, constitue la source d'inspiration pour Stovall et de Larrard. Il traite la viscosité d'un mélange de grains en suspension dans un liquide newtonien (Mooney, 1951). Le modèle de Money fait une génération des modèles de compacité disant que la viscosité relative η_r d'un mélange de n classes s'écrit (Équation 21) :

Licence CC BY-NC-ND 3.0

$$\eta_r = \exp\left(\sum_{i=1}^{n} \frac{2{,}5\, y_i}{\frac{1}{\Phi} - \frac{1}{c_i}}\right) \qquad \text{Équation 21}$$

η_r : viscosité relative de la suspension

Φ : volume solide du mélange dans un volume total unité,

c_i : compacité atteinte par le mélange vidé de son liquide, si la classe i est dominante.

y_i : proportion volumique de la classe i

Entre 1967 et 1970, **Ben-Aïm**, complète les travaux précédents tout en mettant l'accent sur l'importance de l'effet de paroi sur l'évolution de la porosité des mélanges. il développe un excellent outil pour expliquer les mécanismes d'empilement de deux groupes de particules (Ben-Aim, 1970).

En 1976, **Toufar, Klose** et **Born** mettent au point un modèle de compacité pour les mélange binaires (Toufar et al., 1976). En 1997, ce modèle est modifié par **Goltermann, Johansen et Palbol** (Goltermann et al., 1997) et devient (modèle Toufar modifié), étendu aux mélanges ternaires. Utilisant un diamètre caractéristique (d_{char} correspondant à un refus de 36,8 % lors du tamisage du constituant) pour chaque fraction, ils combinent les deux fractions extrêmes et mélangent cette dernière avec l'intermédiaire. Les vides de cette théorie sont minimisés par le biais d'un outil informatique (Europack). Des séries de tableaux permettant les combinaisons de granulats ont été mises **Andersen et Johansen** par la suite. C'est le résultat de la combinaison des modèles de Ben-Aïm et de Toufar. Lorsque $\beta_1=\beta_2$, la compacité virtuelle du mélange binaire s'écrit pour les gros dominants de la façon suivante (Équation 22)

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{1 - \left[\frac{(1-x)}{(1+x)} \frac{0{,}3881}{0{,}4753}\right] y_2} \qquad \text{Équation 22}$$

On en déduit aisément le coefficient d'effet de desserrement $a_{GJP}(x)$ (Équation 23)

$$a_{GJP}(x) = 1 - 0{,}8165 \frac{(1-x)}{(1+x)} \qquad \text{Équation 23}$$

$a_{GJP}(x)$: représente le coefficient d'effet de desserrement d'après la modification de Goltermann, Johansen, Palbol apportée à la théorie de Toufar, Klose et Born (Figure 41)

Licence CC BY-NC-ND 3.0

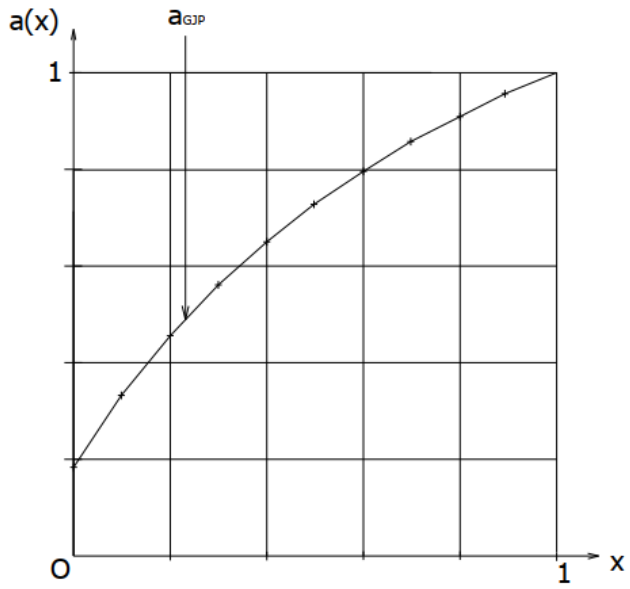


Figure 41 : Coefficient d'effet de desserrement a(x) en fonction du rapport des diamètres d'après la modification de Goltermann, Johansen, Palbol apportée à la théorie de Toufar, Klose et Born lorsque $\beta_1=\beta_2$

En 1986, **Stovall** (s'inspirant de Mooney) développe son modèle en prenant comme point de départ un mélange binaire sans, puis avec interactions. En prenant en compte les effets d'une part de paroi et d'autre part de desserrement, **de Larrard** généralise cette proposition à un mélange de n classes granulaires : c'est le **modèle linéaire de compacité (MLC)** (de Larrard, 1988; Stovall and de Larrard, 1986)**.**

En 1987, **Yu et Standish** élaborent également un modèle linéaire de compacité, très semblable au précédent, mais tirant son origine des équations de **Westman et Hugill**. Les interactions granulaires sont prises en compte à travers les expressions établies en 1968 par **Ridgway et Tarbuck** (1968). Le modèle linéaire de compacité de Stovall et celui de **Yu et Standish** sont étroitement liés (Yu and Standish, 1987). Par la suite le MLC a souffert de deux défauts. Le mélange de deux granulats de même taille mais de compacités réelles différentes n'était pas possible. Le modèle pêchait aussi ''par optimisme'' contre les compacités élevées. La correction de ces défauts a donné naissance au **modèle de suspension solide** (De Larrard and Buil, 1987; de Larrard and Sedran, 1994; Sedran, 1999; Sedran et al., 1994a, 1994b). Pour un empilement unimodal, la compacité propre virtuelle β_i et la compacité propre réelle α_i sont liées par (Équation 24) :

$$\eta_r^*=\exp\left(\frac{2,5}{\frac{1}{\alpha_i}-\frac{1}{\beta_i}}\right) \qquad \text{Équation 24}$$

η_r^* : viscosité relative de référence

β_i : compacité propre virtuelle

α_i : compacité propre réelle

Dans le cas multimodal, l'Équation 24 devient l'Équation 25 :

Licence CC BY-NC-ND 3.0

$$\eta_r^* = \exp\left(\sum_{i=1}^{n} \frac{2{,}5\, y_i}{\frac{1}{C} - \frac{1}{\gamma_i}}\right) \qquad \text{Équation 25}$$

Avec η_r^* : viscosité relative de référence. Elle est caractéristique de l'intensité de serrage. Elle sera élevée lorsque le mélange sera plus serré.

y_i : volume partiel de la classe i, par rapport au volume solide total

C : Compacité prédite du mélange

γ_i : compacité virtuelle d'un mélange polydispersé, lorsque la classe i est dominante

n : nombre de classe granulaire

Pour des sphères de même diamètre (unimodal) dans un cube compact, viscosité relative de référence $\eta_r^* = 1{,}36.10^5$ en prenant $\alpha_i = 0{,}64$ et $\beta_i = 0{,}74$.

Les coefficients d'interaction du modèle de suspension solide sont décrits par l'Équation 26 et l'Équation 27.

$$a_{ij} = \sqrt{d_j/d_i)} \qquad \text{Équation 26}$$

$$b_{ij} = d_i/d_j \qquad \text{Équation 27}$$

a_{ij} : paramètre décrivant l'effet de desserrement exercé par la classe j sur la classe i dominante

b_{ij} : paramètre décrivant l'effet de paroi exercé par la classe j sur la classe i dominante

d_i : diamètre des grains de la classe i. lorsque i > j, $d_i < d_j$

Quelques temps après, la notion de viscosité (descriptive du degré de serrage du système) prête à confusion et inhérente au mode de mise en œuvre, et les fonctions régissant les interactions granulaires se sont révélées imparfaites (de Larrard, 1999).

En 1999, **de Larrard** crée le **modèle d'empilement compressible (MEC)** en intégrant un indice de compactage qui est représentatif de l'énergie lors de sa mise en œuvre avec la prise des interactions (de Larrard, 1999). Ce modèle a été développé pour des empilements secs et nous allons, dans le cadre de cette thèse, l'appliquer au cas des enrobés à base de CNP.

Le MEC, initialement développé pour les bétons hydrauliques techniques (Sedran, 1999), a été également utilisé dans la formulation des bétons bitumineux : des GB5 (Eiffage, 2021; Olard, 2012; Pouget et al., 2016), des SMA (Perraton et al., 2007), des enrobés (Yuan et al., 2020) et des EME (Baghaee Moghaddam, 2019; Baghaee Moghaddam and Baaj, 2018a, 2018b). Récemment il a connu des avancées pour les fonctions d'interaction avec les travaux de Roquier pour devenir MEC-4 paramètres (Roquier, 2017, 2016a, 2016b).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

IV.2. Focus sur le MEC

IV.2.1. Présentation

Les bétons hydrauliques ou hydrocarbonés sont fabriqués avec des inclusions granulaires dans une matrice liante. L'objectif est de combiner les granulats de façon à minimiser la porosité (maximiser la compacité). Un mélange compact dépend principalement de trois paramètres :

- la taille des grains (décrite par la courbe granulométrique)
- la forme des grains (leur morphologie, souvent décrite par leur coefficient d'aplatissement FI et leur état de surface)
- et la façon dont est réalisé l'empilement, après mélange, c'est-à-dire des moyens énergétiques de mise en place (chocs, vibrations avec ou sans surcharge par exemple)

Le Modèle d'Empilement Compressible (MEC) couvre la combinaison d'un nombre quelconque d'agrégats et de distributions granulaires également quelconques (de Larrard, 1999). Le MEC est la version améliorée et évoluée du Modèle Linéaire de Compacité pour mélanges granulaires (Stovall and de Larrard, 1986) et par la suite du Modèle de Suspension Solide (Sedran et al., 1994a, 1994b). Les fondements de ce modelé sont présentés ci-après.

IV.2.2. Formalisme d'un mélange polydispersé

IV.2.2.1. Vocabulaire

Pour un mélange granulaire, la compacité est égale au volume solide Φ dans le volume total unité. Cette compacité peut être déduite de la porosité ou de l'indice des vides. Les grains solides sont supposés indéformables.

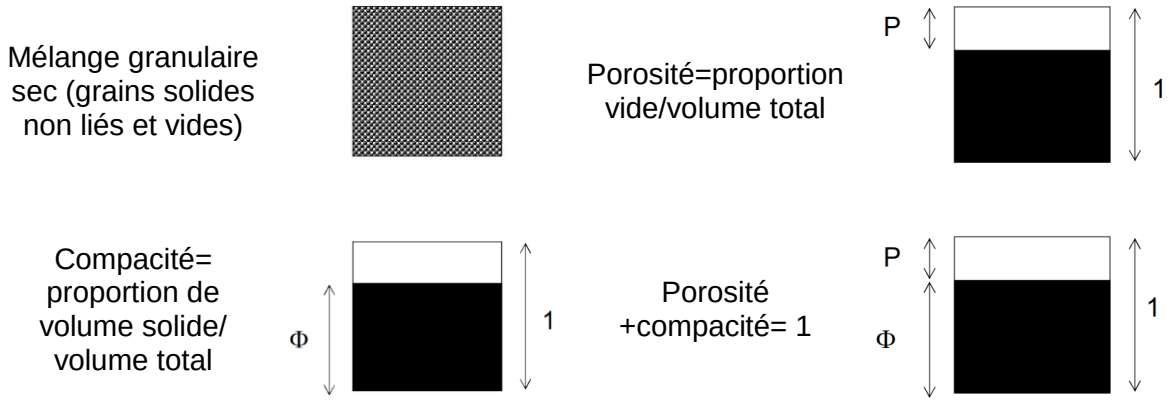


Figure 42 : Compacité et porosité d'un mélange granulaire (de Larrard, 1999)

La compacité dépend de plusieurs paramètres dont :

- la forme et de la rugosité des grains
- le mode de mise en place (indice de serrage)

La compacité virtuelle est la compacité maximale que l'on pourrait atteindre en arrangeant, au mieux, l'empilement grain par grain, chaque particule, placée une à une, gardant sa forme

Licence CC BY-NC-ND 3.0

originelle. Dans la pratique, au contraire, les grains se positionnent avec un certain désordre. C'est ainsi que la compacité expérimentale est toujours inférieure à la compacité virtuelle. Par exemple pour une classe unidimensionnelle de billes, la compacité expérimentale maximale est de l'ordre de 0,60 à 0,64, alors qu'un arrangement cubique compact à faces centrées donne une compacité de 0,74 (de Larrard, 1999).

IV.2.3. Mélange binaire sans interaction $(\boldsymbol{d_1} \gg \boldsymbol{d_2})$

Soit un mélange de grains 1 et 2 de diamètres d_1 et d_2 respectivement. Le mélange est dit sans interaction si $\boldsymbol{d_1} \gg \boldsymbol{d_2}$), c'est-à-dire que l'arrangement local des grains de taille d_1 n'est pas perturbé par les grains de taille d_2 (Figure 43).

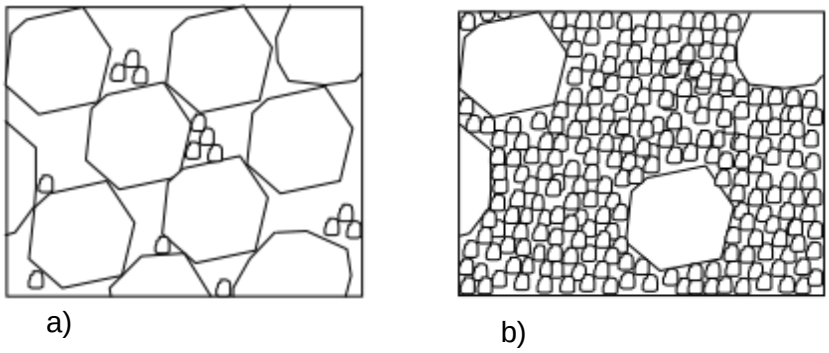


Figure 43 : a) Mélange binaire sans interaction : Gros grains dominants ; b) Mélange binaire sans interaction. Grains fins dominants (de Larrard, 1999)

Les compacités virtuelles lorsque la classe 1 est dominante γ_1 (Équation 28) et lorsque la classe 2 est dominante γ_2 (Équation 29)

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{1\text{-}y_2} \qquad \text{Équation 28}$$

$$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{1\text{-}(1\text{-}\beta_2)y_1} \qquad \text{Équation 29}$$

IV.2.4. Mélange binaire avec interaction totale $(\boldsymbol{d_1} = \boldsymbol{d_2})$

On parle d'interaction totale lorsque des grains ont de tailles égales $(d_1 = d_2)$ mais des compacités résiduelles différentes (Figure 44).

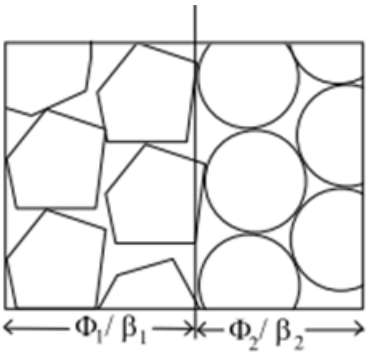


Figure 44 : Calcul de la compacité dans le cas d'une interaction totale (de Larrard, 1999)

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Les compacités virtuelles γ_1 (Équation 30) et γ_2 sont égales (Équation 31)

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{1-(1-\beta_1/\beta_2)y_2} \qquad \text{Équation 30}$$

$$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{1-(1-\beta_2/\beta_1)y_1} \qquad \text{Équation 31}$$

IV.2.5. Mélange binaire avec interaction partielle $(\boldsymbol{d_1 \geq d_2})$

Dans ce le cas d'une interaction $(d_1 \geq d_2)$, interviennent les interactions : l'**effet de desserrement** et **l'effet de paroi** précédemment définies**.**

L'**effet de desserrement :** Si un grain fin (2) est inséré dans la porosité de l'empilement des gros grains (1), lesquels sont dominants, et s'il n'est pas suffisamment petit pour se placer dans un vide, il y a alors localement une diminution du volume des gros grains (Figure 45).

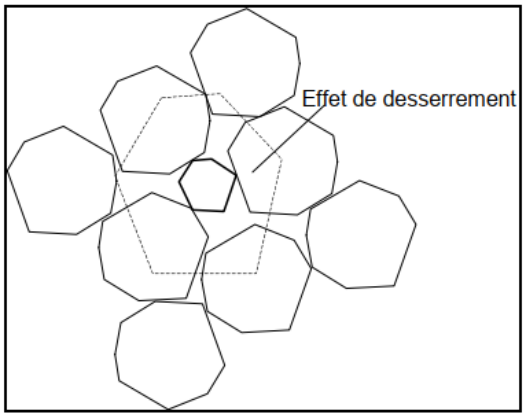


Figure 45 : Effet de desserrement exercé par un grain fin dans un empilement (de Larrard, 1999)

La compacité virtuelle γ_1 est alors (Équation 32) :

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{1-(1-a_{12}\beta_1/\beta_2)y_2} \qquad \text{Équation 32}$$

a_{12} : coefficient de desserrement.
Si $(d_1 \gg d_2)$ (sans interaction), $a_{12} = 0$; l'Équation 32 devient l'Équation 28
Si $(d_1 = d_2)$ (interaction totale), $a_{12} = 1$; l'Équation 32 devient l'Équation 30

L'effet de paroi : Lorsque quelques gros grains (1) isolés sont immergés dans des grains fins (2) (lesquels sont dominants), il existe une certaine quantité de vides dans l'empilement des grains 2, localisée à l'interface (Figure 46).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

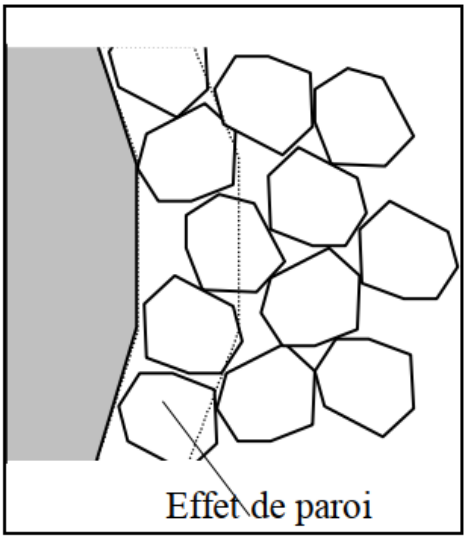


Figure 46 : Effet de paroi exercé par un gros grain dans un empilement des grains fins (de Larrard, 1999)

La compacité virtuelle γ_2 est alors (Équation 33) :

$$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{1-[1-\beta_2+b_{21}\beta_2(1-1/\beta_1)]y_1} \qquad \text{Équation 33}$$

b_{21} : coefficient d'effet de paroi.
Si $(d_1 \gg d_2)$ (sans interaction) $b_{21} = 0$; l'Équation 33 devient l'Équation 29
Si $(d_1 = d_2)$ (interaction totale), $b_{21} = 1$; l'Équation 33 devient l'Équation 31

IV.2.6. Mélange polydispersé sans interaction

Le modèle peut être facilement généralisée aux n classes d'un mélange granulaire.

Considérons le cas général avec interactions pour un mélange de n classes granulaires telles que $d_1 \geq d_2 \geq ..... \geq d_i \geq d_{i+1} \geq ..... \geq d_n$.

La compacité virtuelle peut être déterminée par l'Équation 34 (de Larrard, 1999).

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1-\sum_{j=1}^{i-1}\left[1-\beta_i+b_{ji}\beta_i\left(1-{}^{1}/_{\beta_j}\right)\right]y_j-\sum_{j=i+1}^{n}\left[1-a_{ij}\beta_i/\beta_j\right]y_j} \qquad \text{Équation 34}$$

Cette formulation linéaire assure l'additivité de toutes les interactions exercées sur une classe. Elle peut être facilement généralisée aux n classes d'un mélange granulaire. On obtient ainsi, la compacité virtuelle γ (Équation 35) du mélange ; la compacité γ_i, lorsque la classe i est dominante.

$$\gamma = \inf_{1\leq i\leq n}\gamma_i \qquad \text{Équation 35}$$

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Ces relations décrivent de la façon la plus générale la compacité virtuelle d'un mélange granulaire. Après l'étalonnement du modèle, les coefficients a_{ij} (effet de desserrement) et b_{ij} (effet de paroi) expliqués sur la Figure 47, sont déterminés d'après l'Équation 36 et l'Équation 37 respectivement. Ces coefficients d'interaction (a_{ij} et b_{ji}) ne dépendent que du contraste de taille entre les grains d_i et d_j.

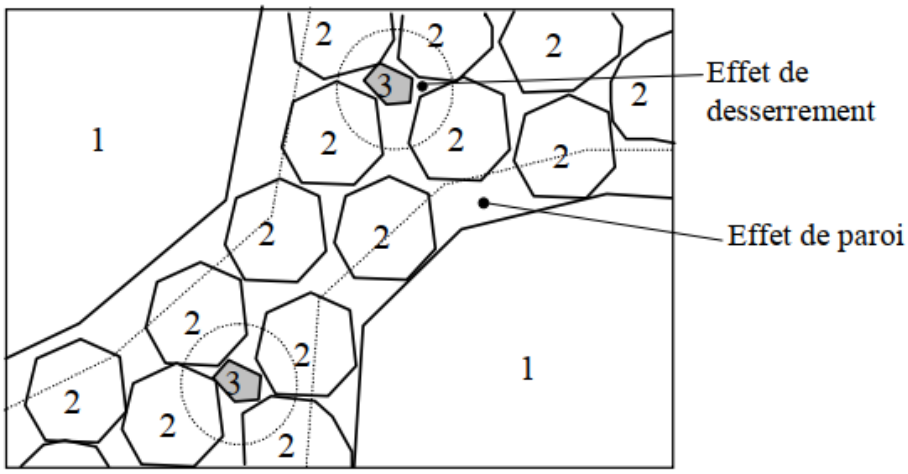


Figure 47 : Perturbations exercées sur la classe intermédiaire par les gros gains et les grains fins : cas d'un mélange ternaire (de Larrard, 1999).

Effet de desserrement de j sur i ($d_i \geq d_j$)

$$a_{ij}=\sqrt{1-(1-d_j/d_i)^{1,02}} \qquad \text{Équation 36}$$

Effet de paroi de j sur i ($d_j \geq d_i$)

$$b_{ji}=1-(1-d_i/d_j)^{1,5} \qquad \text{Équation 37}$$

d_i et d_j sont des diamètres moyens des granulats de classe i et j.

IV.2.7. Diamètres moyens des granulats

IV.2.8. Indice de serrage

La compacité expérimentale C dépend non seulement du matériau mais également du protocole de compactage. La grandeur scalaire K, est représentative du protocole (ou de l'énergie) de compactage. Cette grandeur est exprimée sous la forme suivante (Équation 38):

$$K=\sum_{i=1}^{n} K_i=\sum_{i=1}^{n}\frac{y_i/\beta_i}{\frac{1}{C}-\frac{1}{\gamma_i}} \qquad \text{Équation 38}$$

Licence CC BY-NC-ND 3.0

K : indice de serrage du mélange

K_i : indice de serrage de la classe i

y_i : volume partiel de la classe i, par rapport au volume total

β_i : compacité résiduelle d'une classe de diamètre égal à d_i.

C : compacité réelle du mélange prédite

γ_i : compacité virtuelle lorsque la classe i est dominante

n: nombre de classe de grain de classe de granulats

Cette équation permet donc de déterminer, de façon implicite, la compacité expérimentale d'un matériau connaissant sa compacité virtuelle et l'indice associé au protocole de compactage utilisé. Il est facile de vérifier que la compacité expérimentale est une fonction croissante de l'indice de compaction. Dans le cas particulier d'une classe unidimensionnelle de compacité expérimentale α_i, on a (Équation 39):

$$K=\frac{1}{\frac{\beta_i}{\alpha_i}-1} \qquad \text{Équation 39}$$

Le Tableau 22 résume les valeurs d'indice de compaction correspondant à différents protocoles de mesure de compacité. Il est satisfaisant de voir que, plus le compactage est énergique, plus l'indice est élevé.

Tableau 22 : Indice de compaction pour différents protocoles (de Larrard, 1999)

Procédé de remplissage	Remplissage à sec				Remplissage en présence de l'eau
	Déversement	Piquetage	Vibration	**Vibration +10 kPa**	Pâte lisse
Indice de serrage (K)	4,1	4,5	4,75	**9**	6,7

IV.2.9. Comment définir les paramètres d'entrée du MEC ?

Les caractéristiques d'entrée du modèle sont : les masses volumiques, les granularités, les compacités, l'indice de serrage, l'effet de confinement. Elles nécessitent des essais préliminaires. Ces essais ont pour but de mesurer la compacité d'une fraction granulaire de masse déterminée lorsqu'elle est soumise, dans un moule, à une sollicitation mécanique définie conventionnellement.

Dans la méthode LPC n°61, l'essai consiste à placer un échantillon de granulats dans un moule sous un chargement statique équivalent à 10 kPa, et à appliquer à l'ensemble des secousses mécaniques (table à chocs dans le protocole LPC n°61) ou tables vibrantes provoquant un réarrangement des grains, et donc un compactage de l'échantillon (Figure 48). La mesure réalisée est alors celle de la masse volumique apparente de l'échantillon, qui permet, connaissant la masse volumique spécifique des grains d'en déduire la compacité du mélange.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

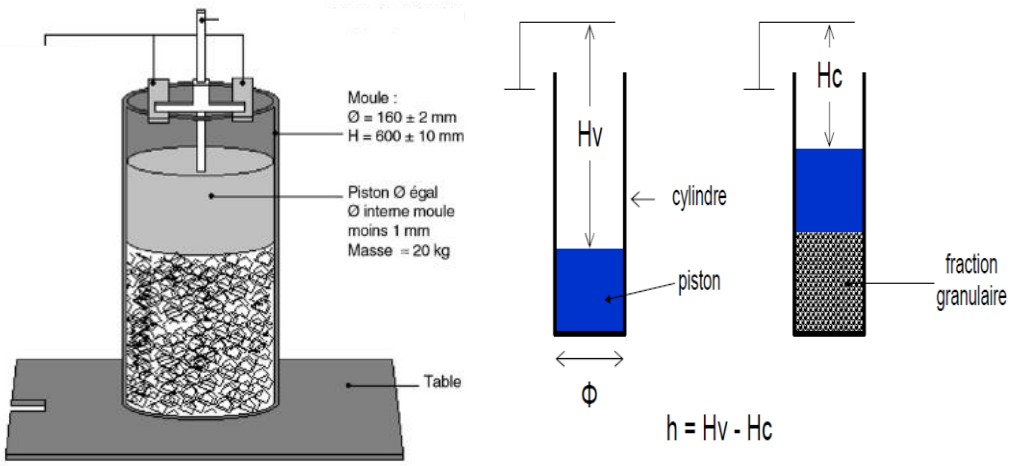


Figure 48 : Mesure de compacité (Méthode LPC n°61) (de Larrard, 1999)

IV.2.10. L'effet du confinement du récipient

Caquot (Caquot, 1937) remarque une augmentation du volume de vide engendrée au contact de la surface plane du récipient. Cette augmentation est proportionnelle à la surface plane S et la taille d des grains. Son modèle ne tient pas compte d'une éventuelle courbure de la surface. Cette approche a été modifiée par Ben-Aïm (Ben-Aim, 1970) en tenant compte de la courbure de la paroi. Ben-Aïm utilise donc le volume perturbé Vp situé entre la distance d/2 et la paroi du moule (Figure 49).

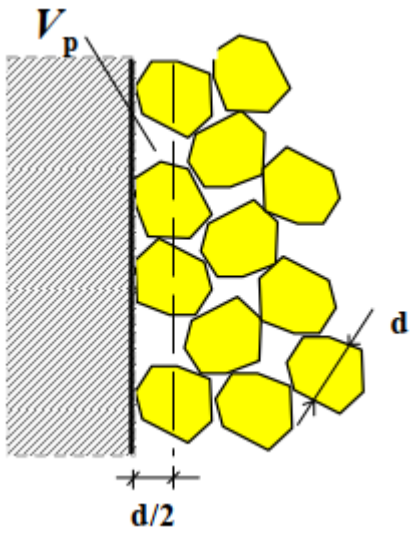


Figure 49 : Modèle de Ben-Aïm pour calculer la compacité moyenne dans un volume soumis à un effet de paroi (de Larrard, 1999)

Dans ce volume perturbé, la compacité moyenne devient $k_w{*}\alpha$, avec $k_w < 1$. Au centre du moule, α reste inchangée. Pour tout le moule, la compacité moyenne est alors (Équation 40) :

$$\bar{\alpha}=(1\text{-}V_p)\alpha+V_p k_w \alpha$$

Équation 40

$$\bar{\alpha} = [1-(1-k_w)V_p]\alpha$$

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Selon Ben-Aïm, la probabilité pour un grain de se trouver dans le volume perturbé est V_p pour un mélange polydispersé (Figure 50) et le modèle convient pour les granulats de formes aléatoires.

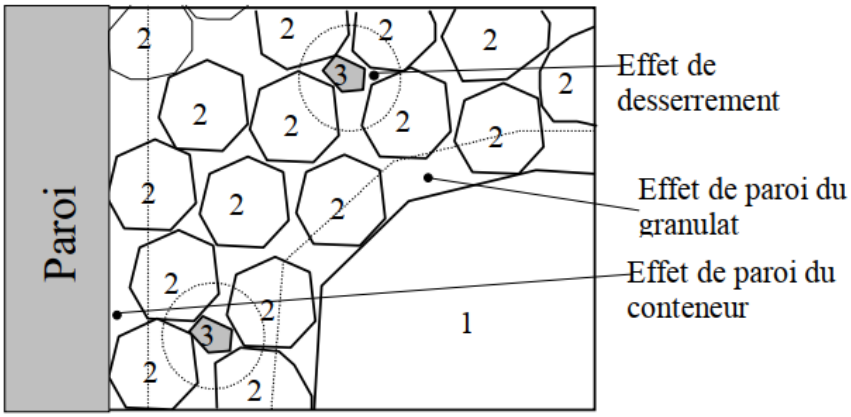


Figure 50 : Effet de paroi du récipient dans un mélange polydispersé (cas d'un mélange ternaire où la classe intermédiaire est dominante)

Pour la prise en compte de l'effet de paroi dans le MEC, les équations de base (Équation 34 et Équation 38) restent inchangées. Si les grains du granulat sont monodispersés, la compacité résiduelle devient alors l'Équation 41 (d'après Équation 39) :

$$\bar{\beta}=\left(1+\frac{1}{K}\right)\phi \qquad \text{Équation 41}$$

où $\bar{\beta}$ est la compacité résiduelle moyenne (pénalisée par l'effet de paroi). β la compacité résiduelle dans un volume infini est calculée d'après l'Équation 42:

$$\beta=\frac{\bar{\beta}}{1\text{-}(1\text{-}k_w)[1\text{-}(1\text{-}d/\emptyset)^2(1\text{-}d/h)]} \qquad \text{Équation 42}$$

où d : la taille moyenne des grains,

k_w : un coefficient d'effet de paroi, (pour les grains concassés k_w= 0,73 et pour les grains roulés k_w=0,88)

$\emptyset$: le diamètre du cylindre,

h : la hauteur finale de l'échantillon de granulats compactés (Figure 48)

$\emptyset$ et h et sont des paramètres pendant l'expérience de la compacité.

De nos essais, après la pesée de la masse de M du granulat, on procède à une homogénéisation. Le cylindre (16x29) contenant le granulat est ensuite fermé par un piston pesant 20 kg (soit une pression moyenne de 10 kPa) sur la partie supérieure de l'échantillon. L'ensemble cylindre-piston est fixé sur la table vibrante (constituée par une machine de vibration de béton) et soumis à une séquence de vibration. La hauteur de l'échantillon est mesurée après le temps de vibration (voir Figure 51). La compacité est alors calculée conformément à au développement du paragraphe IV.2.9. Chaque valeur expérimentale est

Licence CC BY-NC-ND 3.0

la moyenne de deux mesures successives sur le même granulat. Ce processus a été identique pour les granulats.

Figure 51 : Processus de détermination de la compacité expérimentale

IV.3. Le liant

Les propriétés de l'enrobé bitumineux dépendent beaucoup de la quantité de liant utilisée dans sa composition. Il s'agit de la teneur en liant, calculée à partir de la surface spécifique des granulats, notée ∑ et exprimée en m^2/kg. Cette dernière équivaut à la surface développée qu'auraient les agrégats assimilés à des sphères.

Pour une granulométrie donnée, l'Équation 43 permet d'avoir une approximation de la surface spécifique.

$$100 \cdot \sum = 0{,}25 \cdot G + 2{,}3 \cdot S + 12 \cdot s + 150 \cdot f$$

Équation 43

avec les proportions massiques :
G : éléments de diamètre supérieur à 6,3 mm
S : éléments de diamètre compris entre à 6,3 mm et 0,250 mm
s : éléments de diamètre compris entre à 0,250 mm et 0,063 mm
f : éléments de diamètre inférieur à 0,063 mm

Plus la surface spécifique est importante (beaucoup de fines), plus la surface de contact entre les composants et le bitume est grande. La teneur en liant est déterminée selon l'ancienne méthode Française avec une teneur en liant conventionnelle associée à un module de richesse fixé à K et des surfaces spécifiques normatives.

$$TL_{ext} = K \cdot \alpha \cdot (\sum)^{\frac{1}{5}}$$

Équation 44

Licence CC BY-NC-ND 3.0

TL_{ext} : teneur en liant (p.p.c)

α : facteur fonction du type de granulats (2,65/masse volumique réelle des granulats)

K : module de richesse (K variant de 2,75 pour les enrobés les plus résistants à la déformation, à 3,5 pour les enrobés les plus souples (Delorme et al., 2007). Il a été pris K=3,5 dans ce travail (Annexe 3),

$\sum$: surface spécifique des granulats (m²/kg),

Mais selon Bressi (Bressi, 2016; Bressi et al., 2016), cette méthode de calcul de TL_{ext} exposée haut est approximative. L'auteur propose donc une nouvelle méthodologie pour estimer la quantité de bitume nécessaire dans les mélanges bitumineux avec les granulats d'enrobés. Ces surfaces spécifiques sont estimées par l'analyse d'images sur la classe de granulats supérieur à 22,4 mm et par interpolation sur les classes inferieures. Elles sont résumées dans le Tableau 23.

Tableau 23 : Surface spécifique estimés des granulats concassés (Bressi et al., 2016).

Fraction granulaire (mm)	αi (m²/kg)	Surface spécifique conventionnelle (m²/kg)
22,4/31,5	0,0999	0,25
16/22,4	0,1444	
8/16	0,2599	
6,3/8	0,5395	
4/6,3	0,5395	2,5
2/4	0,9842	
1/2	1,9171	
0,5/1	3,8776	
0,25/0,5	8,1934	
0,125/0,25	15,8527	12
0,063/0,125	30,4403	

Du Tableau 23, on remarque la surface spécifique conventionnelle est presque la moyenne de celles obtenues par Bressi.

Dans cette perspective, nous avons estimé la surface spécifique des CNP en considérant qu'elles ont une forme de parallélépipède rectangle. Ces estimations sont consignées dans le

Tableau 24 : Surface spécifique des CNP

Fractions de CNP (mm)	αi(m²/kg)	Surface spécifique conventionnelle (m²/kg)
10/14	0,85462	0,25
8/10	0,73688	
6,3/8	0,75416	
4/6,3	1,2200	2,5
2/4	1,2200	

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Sur le mélange 6/10+4/6+2/4+0/2+filler, nous appliqué la méthode classique (Équation 44) et la méthode proposée par Bressi (Bressi et al., 2016). La méthode classique un résultat de TL_{ext}: 5,7 % tandis que l'autre donne TL_{ext}: 5,3 % soit un écart de 6%.

Face à la difficulté de faire une comparaison objective entre les valeurs des surfaces spécifiques des CNP et les valeurs conventionnelles et le petit écart entre les teneurs en bitume selon les deux méthodes, nous avons utilisé dans la suite la méthode conventionnelle pour déterminer les teneurs en liant.

Le chapitre IV a été consacré au développement du Modèle d'Empilement Compressible utilisé pour la formulation des enrobés. Le chapitre suivant présente les caractéristiques physiques et mécaniques des enrobés incorporant des CNP et de l'enrobé de référence. Les données issues de l'expérimentale seront analysées et discutées.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

CHAPITRE V : CARACTERISTIQUES DES ENROBES A BASE DE CNP

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Chapitre V. Caractéristiques des enrobés à base de CNP

Après l'analyse des informations synthétisées dans le chapitre précèdent (Chap. IV), le MEC est un outil de formulation puissant qui s'adapte aussi aux bétons hydrauliques qu'aux enrobés. C'est un modèle qui prend en compte tous les paramètres individuels de chaque classe granulaire et fournit les proportions optimales conduisant à la compacité maximale du mélange à sec.

Dans cette partie, nous avons présenté les résultats obtenus en appliquant des méthodes expérimentales. L'analyse de ces résultats met en relief les effets des facteurs clés étudiés sur les propriétés de l'enrobé à base de CNP. À la lumière de cette analyse, il sera alors possible de cibler la composition idéale selon les propriétés recherchées et surtout de cerner l'influence de chaque paramètre clé de formulation sur les performances physico-mécaniques de l'enrobé mis au point.

Cette section traite des résultats des formules optimales des agrégats après l'utilisation du MEC. Les résultats de la tenue à l'eau sont présentés et discutés. De plus, une brève analyse est proposée en comparant les performances d'un enrobé de référence à celles des enrobés incorporant des CNP comme granulats grossiers.

V.1. Description des enrobés confectionnés

Dans cette recherche, les efforts seront mis sur la détermination de formulations optimales pour la couche de roulement incorporant des CNP.

Afin d'obtenir des résultats répondant aux objectifs du programme de recherche, il sera nécessaire de cerner l'effet de l'ajout de CNP sur les performances de l'enrobé. Ainsi, il sera possible de déterminer le taux de CNP admissible afin d'obtenir des résultats acceptables aux recommandations. Au total quatre enrobés à base de CNP ont été réalisés en laboratoire et un enrobé de référence.

V.2. Caractéristiques physiques des granulats

Les granulats utilisés sont de trois types : les granulats minéraux 0/2, 2/4, 4/6 et 6/10 (migmatite/granite, carrière de Saint Rémy (migmatite) et de Lapleau (granite)) ; le filler calcaire et les granulats légers d'origine végétale CNP (triés au vent afin d'éliminer les fibres).

La granulométrie des fractions 0/2, 2/4 et 4/6 et 6/10, issues des analyses selon la norme NF EN 933-1, sont présentées sur la Figure 52.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

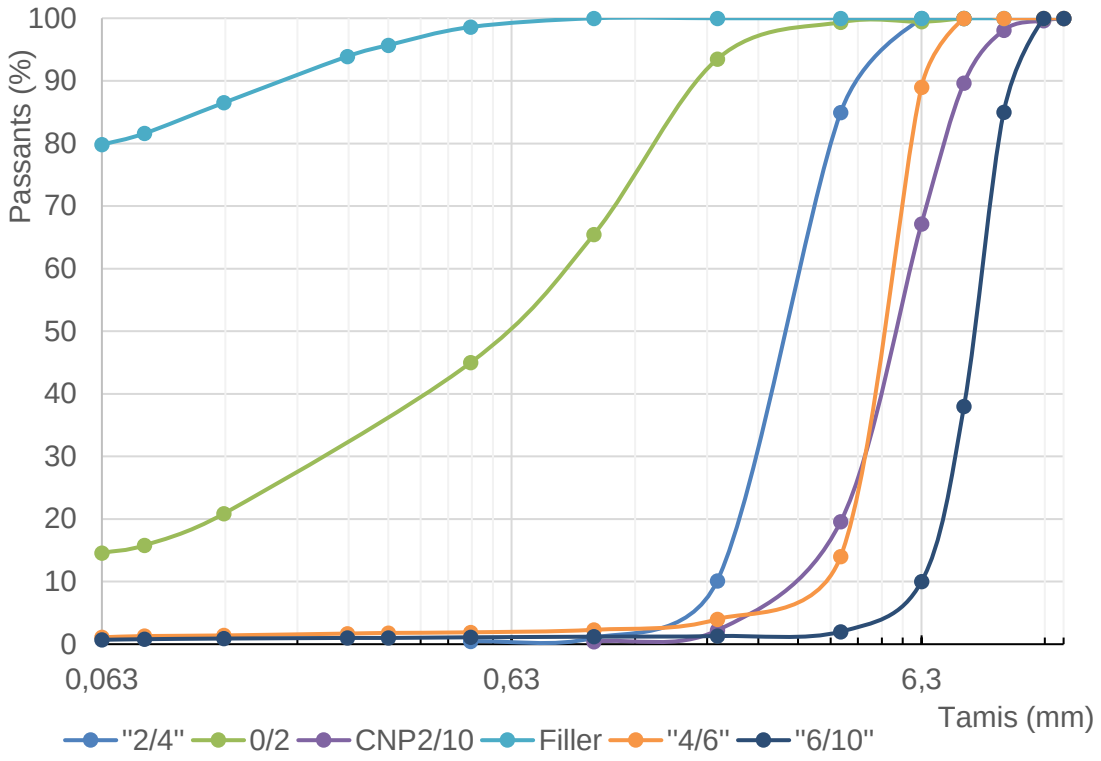


Figure 52 : Courbes granulométriques des granulats

Le filler calcaire n'a pas l'objet d'une analyse spécifique. Sa masse volumique spécifique est prise égale à 2 700 kg/m^3 et que son diamètre moyen est 0,034 mm.

Les CNP ont été ensuite séparées éventuellement en différentes coupures granulaires par tamisage à sec.

Dans le mesure où des CNP seront utilisées dans des techniques routières à chaud (150 à 180°C), une étude d'influence de la température de séchage a été réalisée. Les résultats sont présentés à la Figure 53. A 40°C, la masse des CNP varie considérablement et se stabilise après 48 heures. A 110°C la masse de CNP chute très rapidement pendant la première heure. La masse sèche est atteinte déjà au bout de deux heures d'horloge. Après la masse sèche, la variation de masse est presque inexistante à 160°C. En quatre de heures la variation de masse est de 0,5%. Cela implique qu'à 160°C, les CNP ne perdent pas de la matière et conserve leurs principales caractéristiques. Cela confirme les travaux de (Sabil et al., 2013; Sukiran et al., 2017) selon lesquels la torréfaction des CNP commence de 200 à 300°C.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

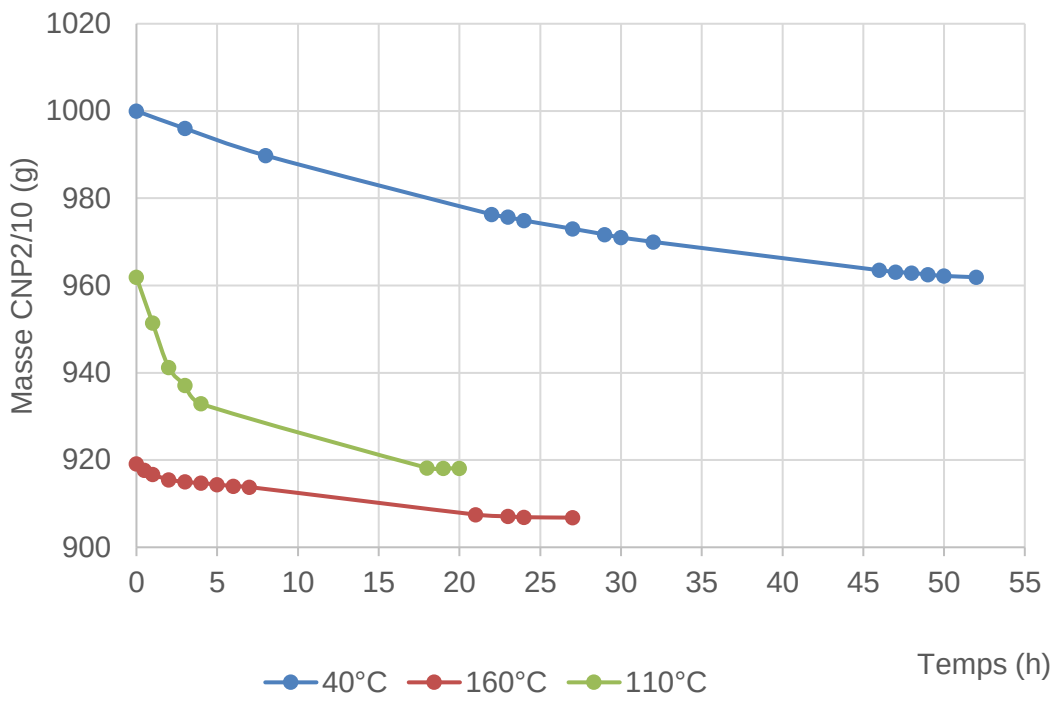


Figure 53 : Variation de la masse de CNP en fonction de la température et temps

V.3. Caractéristiques des granulats

La formule de référence est issue d'une FTP de la centrale locale et correspond à un EB10 (BBSG 0/10 de classe 3). Sa courbe granulométrique est une courbe de référence (Annexe 3).

V.3.1. Temps de vibration

La Figure 54 montre l'évolution de la compacité en fonction du temps. En une minute de vibration, la compacité du granulat s'est augmenté de 12% par à la compacité du mode de déversement. Ce qui implique que plus le serrage est élevé plus la compacité le sera aussi. Au-delà d'une minute, la compacité de l'échantillon très peu. Mais une telle expérience, on n'observe pas une stabilité de la hauteur de l'échantillon. Cela confirme la conclusion de Sedran (Sedran, 1999) selon laquelle la compacité n'est une valeur intrinsèque à l'échantillon mais fortement du mode opératoire adopté. Pour ce granulat, la première compacité maximale est obtenue à deux minutes de vibration (68,4%). Le temps de vibration pour la suite du travail est donc deux minutes correspondant à la proposition de Sedran (Sedran, 1999) et de De Larrard (de Larrard, 1999).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

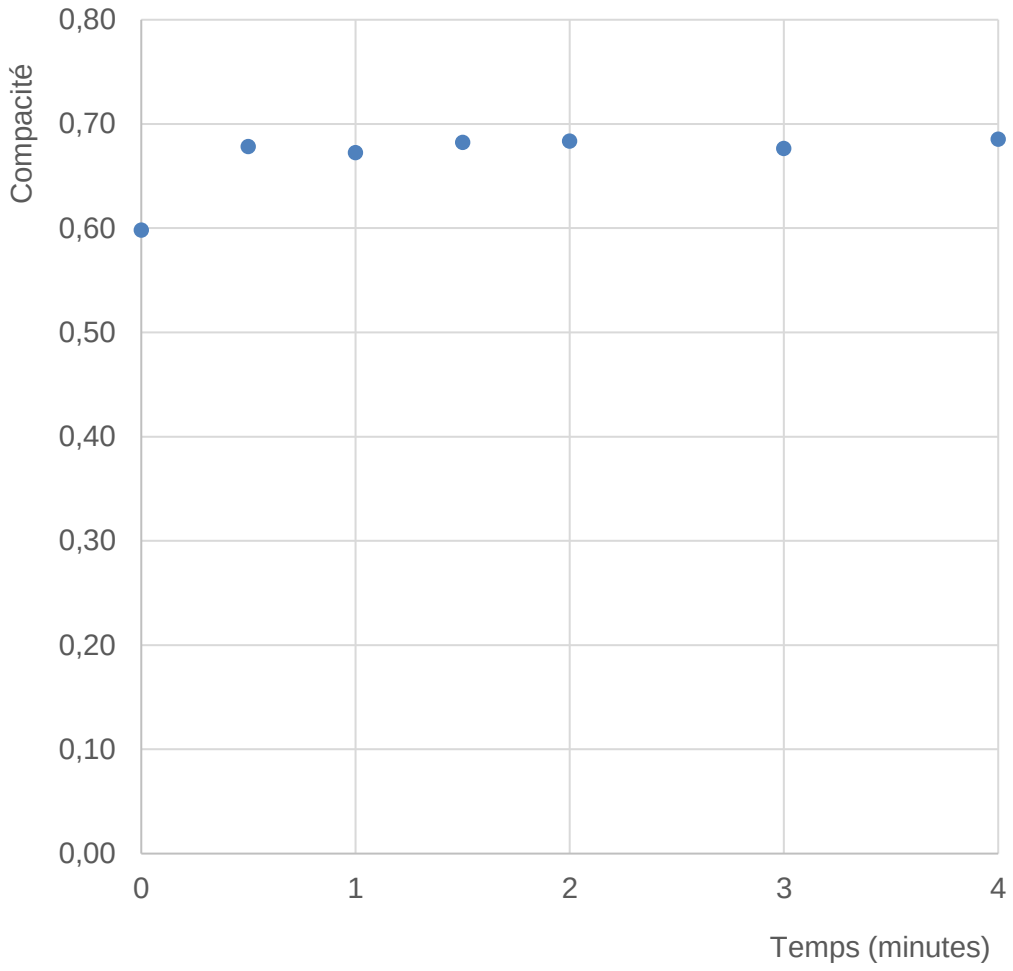


Figure 54 : Variation de la compacité en fonction du temps de vibration

V.3.2. Choix du diamètre moyen

Selon Dodds (Dodds and Baluais, 1993), il existe plusieurs types de diamètres moyens :

- ✓ Diamètre le plus fréquent **df** (mode) : maximum de la courbe des fréquences relatives ou point d'inflexion de la courbe des fréquences cumulées
- ✓ Médiane **d50** diamètre correspondant à la fréquence cumulée de 50% qui divise l'histogramme des fréquences relatives en deux parties de même aire ;
- ✓ le diamètre de Sauter ds=d32 (ou diamètre en surface et volume) qui correspond à un diamètre moyen pondéré par la surface des particules

L'optimisation du mélange (gravillon + sable) par MEC fournit les résultats consignés dans le Tableau 25.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Tableau 25 : Résultats d'optimisation d'un mélange en fonction des différents diamètres

Type du diamètre moyen	$y_1 = x = \frac{g}{(g+s)}$	$y_2 = \frac{s}{(g+s)}$	Compacité théorique du mélange prédite par MEC	Indice des vides théorique du mélange
d50	0,559	0,441	0,841	0,188
d32	0,551	0,449	0,839	0,191
df	0,531	0,469	0,827	0,210

Les droites de Caquot correspondant au mélange de gravillon + sable sont représentées sur la Figure 55. La droite D1 d'Équation 45 représente quelques gros dans les fins tandis que la droite de D2 d'Équation 46 représente quelques fins dans le gros.

$$e_m = e_f.(1-x)$$

Équation 45

$$e_m = x.(e_g+1)-1$$

Équation 46

e_m : indice des vides du mélange

e_f : indice des vides des fins (sable)

e_g : indice des vides des gros (gravillon)

x : proportion volumique des gros (Équation 47)

$$x = \frac{g}{(g+s)}$$

Équation 47

Licence CC BY-NC-ND 3.0

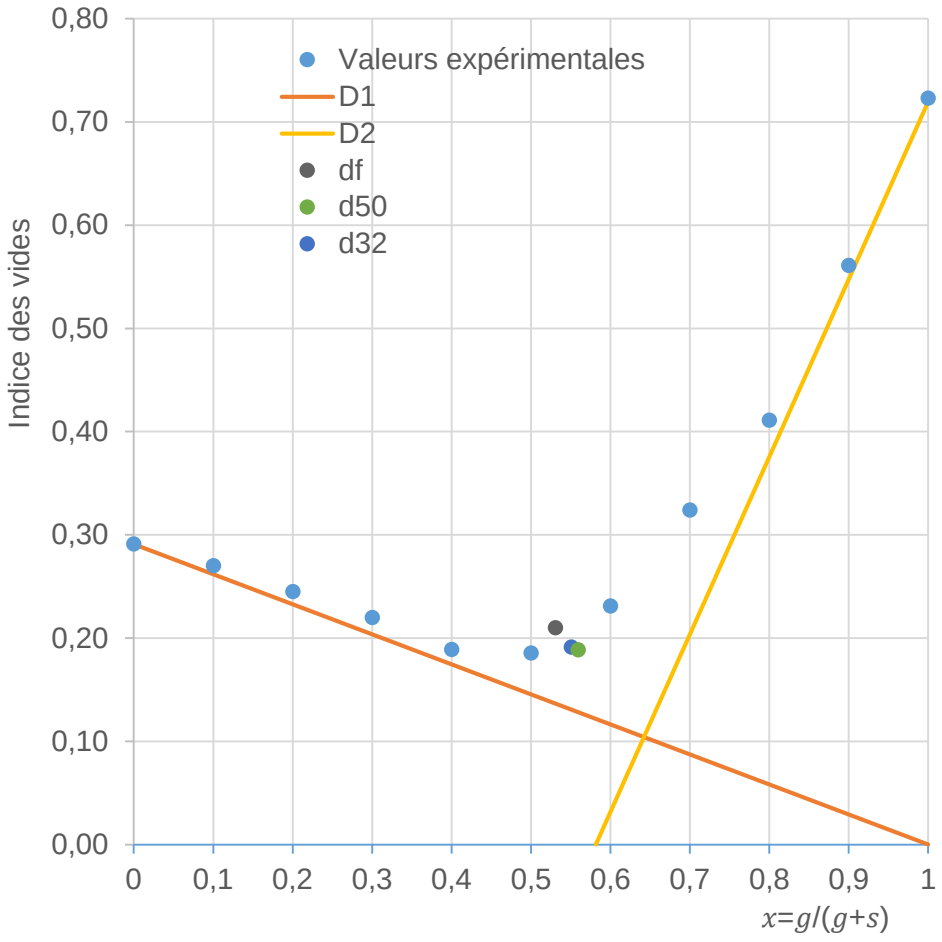


Figure 55 : Position des optima du mélange sur le graphique de Caquot

Du Tableau 25 et de la Figure 55, on note que la meilleure compacité est obtenue avec le diamètre d50. C'est ce diamètre moyen qui a été utilisé par Jones, Zheng et Newlands (Jones et al., 2002) pour leur étude de comparaison des modèles en terme de capacité de prédiction de l'indice des vides et de la combinaison des proportions conduisant à l'optimum. L'écart entre les prédictions et les valeurs mesurées est moyenne inférieur à 1,5%.

V.3.3. Données d'entrée de MEC

Dans notre étude, et conformément à ce qui est demandé dans la MEC, le protocole de calcul de compacité réelle consiste en un compactage sous pression, sur une table vibrante, des fractions granulaires minérales ou organiques, dans un moule à béton 16x32 standard équipé d'un contre-moule en acier, avec une surcharge de 200 N (10 kPa) et un temps de vibration de 120 secondes, temps préalablement optimisé. La compacité du filler est issue de la littérature et prise égale 0,595 (de Larrard, 1999).

Les propriétés physiques principales des différentes fractions ainsi que leurs compacités expérimentales élémentaires après vibration dans les conditions définies ci-dessus sont résumées dans le Tableau 26. La relation entre compacité expérimentale et compacité virtuelle peut être déterminée par différents procèdes, caractérisés par un indice de serrage (Tableau 22). L'expérience montre que les procédés conduisant à un empilement compact

Licence CC BY-NC-ND 3.0

sont préférables car ils engendrent une moindre variabilité. La méthode exposée dans ce travail de thèse correspond à un indice K=9.

Tableau 26 : Propriétés des granulats.

Matériau	CNP 2/10	CNP 2/6	Filler calcaire	(0/2) migmatite	(2/4) migmatite	(4/6) granite	(6/10) granite
ρ_s (kg/m^3) (NF EN 1097-6)	1360	1360	2700	2730	2690	2640	2640
Compacité réelle	0,522	0,518	0,595	0,770	0,565	0,609	0,597
d_{50} (mm)	5,35	4,62	0,034	0,59	2,89	4,98	8,47

V.3.4. Bitume

La teneur en liant est déterminée, en l'absence d'autres données disponibles, selon la méthode française avec une teneur en liant conventionnelle associée à un module de richesse fixé à K = 3,5 (équivalent à la fiche produit, et garantissant a priori un enrobage de toutes les surfaces granulaires) et des surfaces spécifiques normatives.

Le bitume utilisé est un bitume pur de grade 35/50 ; sa masse volumique est de l'ordre de 1020 kg/m^3 et provient de Total France (Plateforme de Feyzin).

La valeur de la pénétrabilité (à 25˚C) est 44 [1/10 mm]. Cet essai a été réalisé selon la norme NF EN 1426 : Bitumes et liants bitumineux : Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille. La valeur de la Température Bille Anneau (TBA) est 52,5˚C. Cet essai a été réalisé selon la norme NF EN 1427 : Bitumes et liants bitumineux : Détermination du point de ramollissement (Méthode Bille et Anneau).

V.4. Résultats d'optimisation des mélanges

Lors de l'optimisation MEC, les effets d'interaction granulaire ont été déterminés avec le diamètre moyen correspondant à d50, médiane des diamètres granulaires de la classe considérée, préalablement étudiée, afin d'obtenir les proportions volumiques optimales des mélanges. L'optimisation consiste à résoudre le système d'équations implicites (Équation 48). Il s'agit de déterminer les proportions volumiques y_i des différents constituants tout en maximisant la compacité réelle C du mélange. Cette dernière est la compacité du mélange granulaire prédite par le MEC. Les proportions optimales obtenues, soit à partir d'une courbe de référence soit à partir du MEC sont présentées dans le Tableau 27.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

$$\begin{cases} \gamma_i = \dfrac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1}\left[1 - \beta_i + b_{ji}\beta_i\left(1 - {}^{1}/_{\beta_j}\right)\right] y_j - \sum_{j=i+1}^{n}\left[1 - a_{ij}\beta_i/\beta_j\right] y_j} \\ K = \sum_{i=1}^{n} \dfrac{y_i/\beta_i}{\frac{1}{C} - \frac{1}{\gamma_i}} \end{cases}$$

Équation 48

Le Tableau 27 donne la composition granulaire et la teneur en liant des différents mélanges, , que ce soit dans l'optique d'une courbe de référence ou d'un mélange optimisé au sens du MEC.

La teneur en liant correspondante est conforme à un module de richesse constant (K = 3,5).

Tableau 27 : Composition optimale de chaque formule avec la teneur en liant correspondante.

Mélange	***Composition du mélange granulaire (% volumique)***	***Teneur en liant TL_{ext} (ppc) / et % volumique***
Mélange minéral de référence : Filler +0/2 + 2/4 + 4/6 + 6/10		
Courbe de référence	Filler : 3,2% *0/2* : 23,8% *2/4* : 11,1%; *4/6* : 23,2% *6/10* : 38,7%	TL_{ext}: 5,7 % % volumique: 14,8%
MEC **Mélange A**	Filler : 0%; *0/2* : 40,4% *2/4* : 0%; *4/6* : 14,6% *6/10* : 45%	TL_{ext}: 5,6% % volumique: 14,7%
Filler + 0/2 + CNP2/6 + 6/10		
Courbe de référence	*Filler* : 3%; *0/2* : 26,9% *CNP 2/6*: 29,8% *6/10* : 40,3%	TL_{ext}: 6,8% volumique:15,3%
MEC	*Filler* : 6,6%; *0/2* : 40,8% *CNP 2/6*: 0% *6/10* : 52,6%	TL_{ext}: 6,2% %volumique:16,4%
MEC (avec 30% de CNP 2/6) **Mélange H**	*Filler* : 7,9% ; *0/2* : 41,2% *CNP 2/6* :30% ; *6/10* : 20,9%	TL_{ext}: 7,6 % % volumique: 17,1%
MEC (avec 40% de CNP 2/6) **Mélange L**	*Filler* : 8,7% ; *0/2* : 44,5% *CNP 2/6* :40% ; *6/10* : 6,9%	TL_{ext}: 8,3 % % volumique: 17,6%
Filler + 0/2 + CNP 2/6		
Mélange O	*CNP 2/6* : 36,9%; *0/2* : 53,7% ; *Filler* : 9,4%	TL_{ext}: 8,3% % volumique:18,0%
Filler + 0/2 + CNP 2/10		
Courbe de référence	*Filler* : 6,6% ; *0/2* : 17,2% *CNP 2/10* : 76,2%	TL_{ext}: 10,2% % volumique:16,7%
MEC **Mélange N**	*Filler* : 8,9% ; *0/2* : 51,8% *CNP 2/10* : 39,3%	TL_{ext}: 8,3% % volumique:17,9%

Licence CC BY-NC-ND 3.0

V.5. Analyse des mélanges granulaires

V.5.1. Mélange de référence Filler +0/2 + 2/4 + 4/6 + 6/10

Les résultats préliminaires du mélange 6/10+4/6+2/4+0/2+filler (MEC et courbe de référence sont consignés dans le Tableau 28. On remarque MEC privilégie les mélanges discontinus (Figure 56). Les teneurs en liant sont quasiment égales, cela voudra impliquer que l'utilisation du MEC n'impacte pas la quantité du bitume dans le mélange. Son l'apport essentiel du MEC réside dans l'optimisation du mélanger granulaire à secs tout en prenant en compte les paramètres réel lié aux granulats.

Tableau 28 : Résultats préliminaires du mélange 6/10+4/6+2/4+0/2+filler (MEC et courbe de référence

Mélange	***Composition du mélange granulaire (% volumique)***	**Compacité prédites par MEC**	***Teneur en liant TL_{ext} (ppc)***	**MVRE (kg/m^3)**	**Compacité sur 2 éprouvettes**
Courbe de référence	Filler : 3,2% *0/2* : 23,8% *2/4* : 11,1%; *4/6* : 23,2% *6/10* : 38,7%	82,7%	TL_{ext}: 5,7%	2456	94%
MEC **Mélange A**	Filler : 0%; *0/2* : 40,4% *2/4* : 0%; *4/6* : 14,6% *6/10* : 45%	84,5%	TL_{ext}: 5,6%	2466	94%

Licence CC BY-NC-ND 3.0

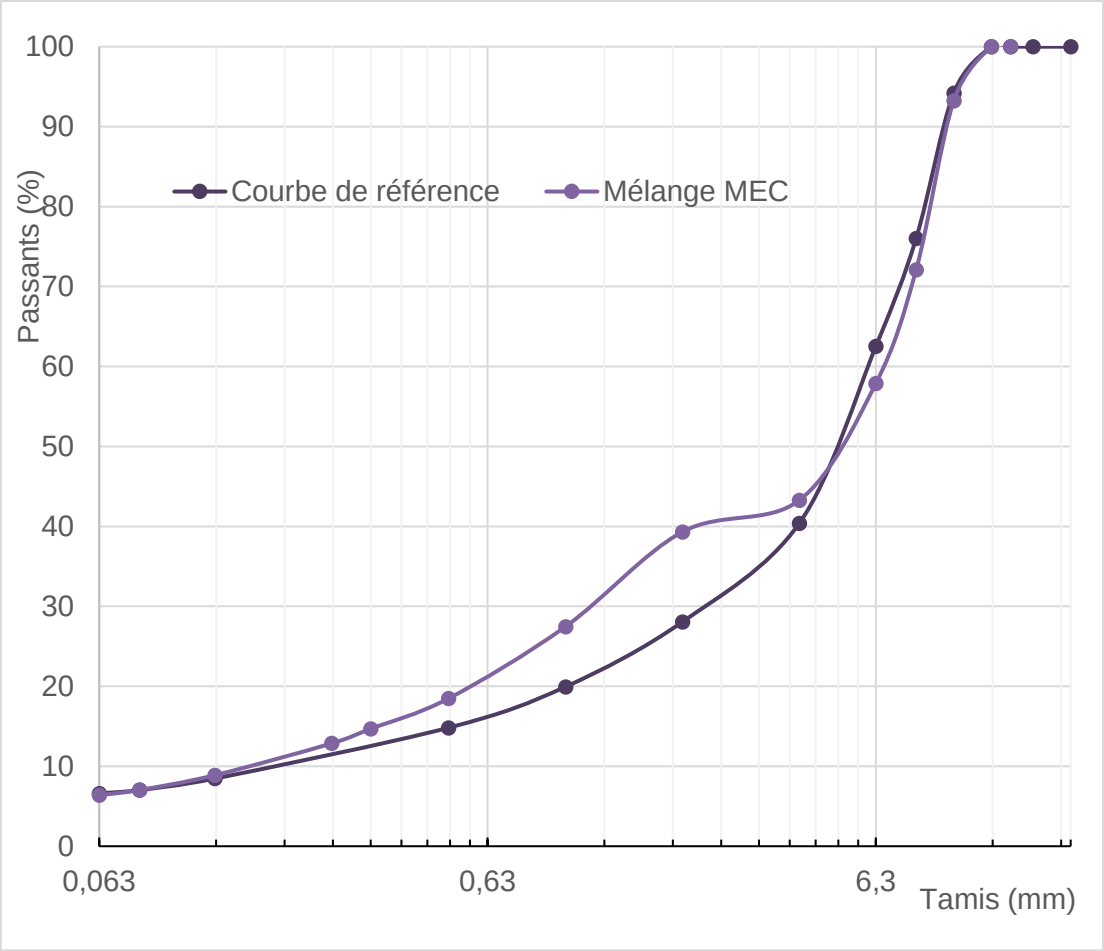


Figure 56 : Courbes granulométriques du mélange 6/10+4/6+2/4+0/2+filler (MEC et courbe de référence

Nous retenons pour la suite le mélange obtenu par MEC pour le mélange minéral de référence.

V.5.2. Etude paramétrique du mélange filler+0/2+CNP2/6+6/10

Pour l'ensemble des mélanges et avec les matériaux utilisés, la compacité optimale du mélange granulaire filler + sable + gravillons ou CNP est clairement obtenue par la méthode d'empilement compressible, mais souvent en augmentant notablement le pourcentage de fines de la formule c'est-à-dire aussi la teneur en liant. Pour le mélange filler+0/2+CNP2/6+6/10, le MEC prédit un arrangement optimal sans CNP, ce qui a conduit à une étude paramétrique (Figure 57) d'ajout des CNP sur la compacité et une proposition de formule, à taux de CNP fixé (de 0 à 50%).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

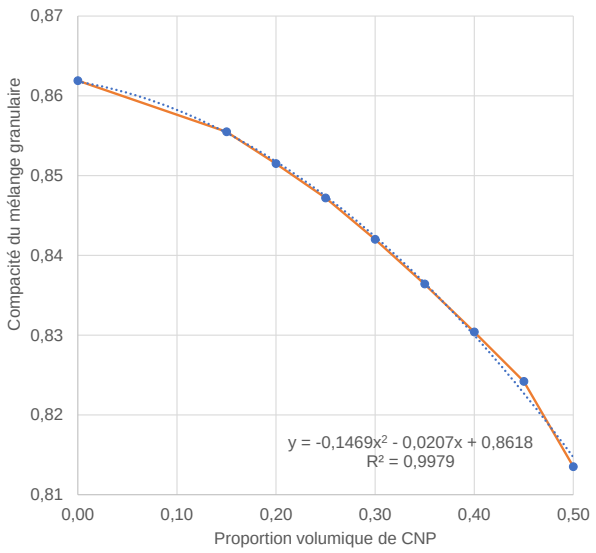


Figure 57 : Variation de la compacité théorique du mélange granulaire en fonction de CNP

D'après la Figure 57, on constate que la compacité du mélange granulaire (filler+0/2+CNP2/6+6/10) prédite par le MEC diminue de 86,3% à 81,4% lorsque le pourcentage de CNP augmente de 0% à 50 %.

V.6. Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses.

V.6.1. Principe

La méthode B utilise la résistance à la compression d'éprouvettes cylindriques de mélanges bitumineux. Un ensemble d'éprouvettes cylindriques est divisé en deux lots équivalents et mis en conservation. Un lot est conservé sec à 50% d'humidité, tandis que l'autre est saturé et conservé dans l'eau. Après conservation, la résistance à la compression de chacun des deux lots est déterminée à 18°C. Le rapport entre la résistance à la compression du lot conservé dans l'eau et celle du lot sec est déterminé et exprimé en pourcentage.

V.6.2. Malaxage

Les granulats sont pesés et chauffés à la température de 160˚C. Le bitume est lui aussi chauffé à la température de 160˚C. Les différentes masses sont déterminés en fonction de la compacité visée. Tous les granulats sont d'abord malaxés dans le malaxeur manuel pendant 30 secondes ; puis la quantité de bitume nécessaire est ajoutée. Le mélange est ensuite malaxé pendant au moins 2 min jusqu'à ce que le mélange soit homogène.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Figure 58 : Procédure de malaxage

V.6.3. Mode opératoire de fabrication

La température de référence de préparation des éprouvettes de mélanges à base de bitume 35/50 est de 160°C. Les moules et les granulats (sans le filler) sont portés à la température de référence de préparation des éprouvettes (2 h au minimum). Il s'agit des moules métalliques cylindriques de diamètre intérieur compris entre [80,0 - 0,1] mm et [80,0 + 0,3] mm et de hauteur minimale 190 mm et des pistons de diamètre extérieur minimal de 79,75 mm et pouvant coulisser librement par rapport au moule.

Un piston est placé à la partie inférieure du moule. Le prélèvement est introduit en une seule fois dans le moule très légèrement enduit d'oléate de soude glycériné. Les moules pleins sont ensuite introduits dans une étuve à la température de référence ; ils séjournent entre ½ h et 2 h. Un autre piston est placé à la partie supérieure du moule. Le compactage des éprouvettes est donc réalisé par double effet avec une charge appliquée de 60 kN atteinte entre 5 s et 60 secondes maximum et maintenue entre 300 s et 305 s. Au bout de ce temps, la mise en charge est interrompue. Les éprouvettes sont conservées couchées dans leur moule au minimum 4 h jusqu'à retour à la température ambiante, puis elles sont démoulées.

Pour chaque échantillon soumis à essai, au moins huit corps d'épreuve cylindriques sont préparés le même jour.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Figure 59 : Procédure de compactage a) Presse b) Quelques éprouvettes d'enrobés de CNP après démoulage

V.6.4. Masses volumiques

La masse volumique apparente MVagéo est déterminée sur toutes les éprouvettes. La méthode de pesée hydrostatique MVAhydro réalisé sur au moins deux éprouvettes, associée au calcul théorique de la MVRE, selon la norme NF EN 12697-6, permet d'aboutir à la compacité des différentes formules, selon le mode opératoire choisi.

V.6.5. Mise sous vide

Le lot de corps d'épreuve humides est placé sur la plaque perforée dans le récipient sous vide. Une pression (résiduelle) absolue de (47) kPa est appliquée et maintenue pendant (60) min. En maintenant toujours la pression, l'eau est introduite jusqu'au moins 20 mm à la face supérieure des corps d'épreuve. Les corps d'épreuve sont donc immergés dans l'eau pendant (120) minutes supplémentaires ; la pression étant maintenue à (47) kPa. Les éprouvettes sorties de l'eau sont alors pesées.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

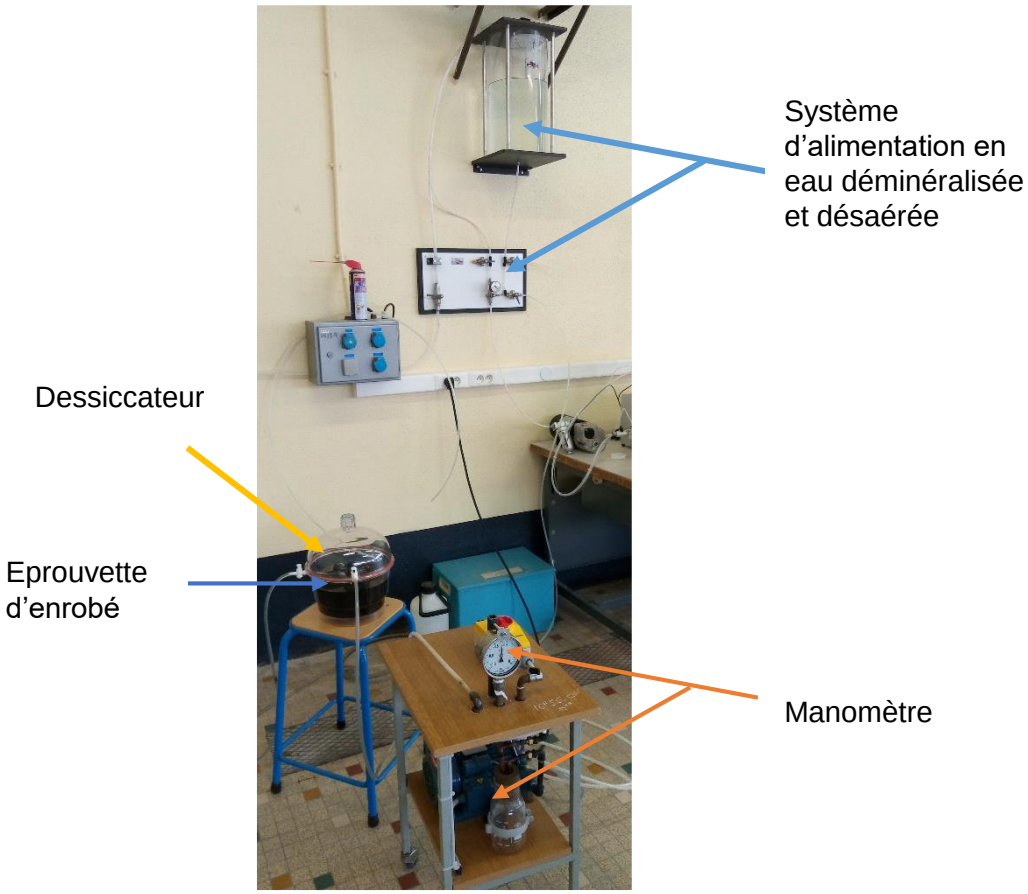


Figure 60 : Système de mise sous vide

V.6.6. Conservation

Le lot sec debout sur une surface plane à une humidité de 50% et lot humide dans un bain d'eau sont conservés dans une chambre climatique à (18 ± 1) °C pendant une durée de (168 ± 2) heures soit 7 jours.

V.6.7. Essai de compression

La mesure de la tenue à l'eau, réalisée selon la méthode B de la norme (NF EN 12697-12, 2018), a pour but d'évaluer la chute de résistance d'un enrobé bitumineux ayant subi un vieillissement accéléré provoqué par une immersion dans l'eau. Pour ce faire, les éprouvettes confectionnées conformément au paragraphe précédent sont séparées en deux lots homogène, un premier lot qui subira un vieillissement accéléré par trempage tandis que le second ne sera soumis à aucune condition particulière avant l'essai. Ensuite, ces éprouvettes sont toutes testées à la presse (Figure 61) afin de déterminer leur résistance en compression.

A la sortie de la conservation, la surface des corps d'épreuve humides sont séchés avec un chiffon et l'essai est immédiatement réalisé dans les conditions ambiantes de laboratoire (18 ± 1) °C. Pour chaque corps d'épreuve, nous mesurons respectivement la force maximale pour le lot humide (Fw) et pour le lot sec (Fd) servant à déterminer respectivement les résistances à la compression Cw et Cd.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

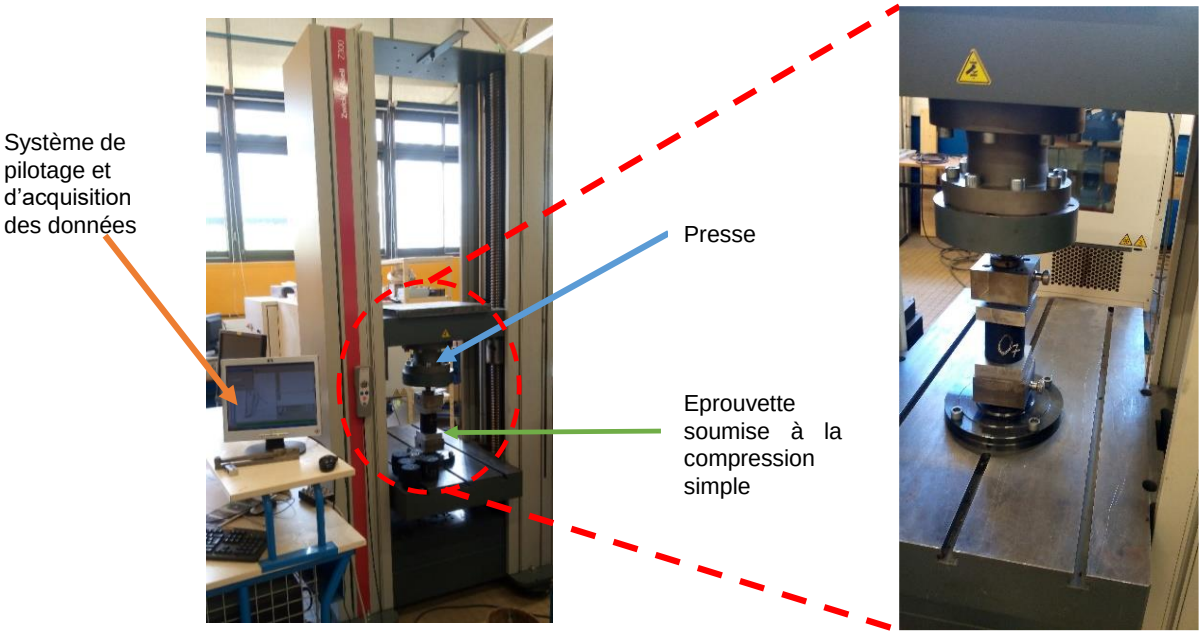


Figure 61 : Dispositif d'essai de compression

La sensibilité à l'eau $^{i}/_{C}$ est déterminée selon la formule suivante (Équation 49) :

$$^{i}/_{C} = 100x\frac{C_w}{C_d} \qquad \text{Équation 49}$$

où

C_w : résistance moyenne en compression (MPa) du lot humide ;

C_d : résistance moyenne en compression (MPa) du lot sec.

Lors de la réalisation de l'essai, l'éprouvette cylindrique est placée à la verticale (voir Figure 61) et une force est appliquée par la presse sur cette éprouvette à une vitesse de 50 mm/min. Avec le système de collecte de données, la force maximale induite est obtenue ainsi que le déplacement vertical de l'éprouvette sont enregistrés. Il s'agit des données qui ont servi non seulement à déterminer la résistance en compression de l'éprouvette pour ensuite calculer la sensibilité à l'eau mais aussi à tracer les courbes de contraintes/déformations. Que l'éprouvette soit sèche ou humide, la procédure de l'essai à la presse reste la même. Une fois la tenue à l'eau déterminée, le résultat est comparé aux spécifications. Dans le cas des enrobés étudiés, la norme (EN NF 13108-1, 2007) demande un résultat à la tenue à l'eau supérieur ou égal à 70%.

V.6.8. Précision des mesures expérimentales : Validation des expérimentations

Les essais de caractérisation physiques et mécaniques sont réalisés sur au moins quatre éprouvettes. On calcule ensuite la moyenne des résultats obtenus et l'écart type qui renseigne sur la dispersion de cette valeur par rapport à la valeur moyenne. Si l'un des quatre résultats diffère de ±10% de la moyenne, ce résultat est écarté et le calcul est réitéré de la moyenne des restants.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

V.7. Caractéristiques des enrobés

V.7.1. Compacité des enrobés

Le Tableau 29 résume les caractéristiques physiques des différents mélanges étudiés.

Tableau 29: Caractéristiques physiques des formules étudiées

Mélange	Teneur en liant TL_{ext} (ppc)	MVa.géo (kg/m³)	MVA. Hydro (kg/m³)	% d'imbibition à j+1	% d'imbibition à j+8	Compacité de l'enrobé (%)
Mélange A Filler +0/2 + 2/4 + 4/6 + 6/10	5,6%	2251	2320	1,7	2,8	94,1
Mélange H *Filler + 0/2 + CNP2/6 + 6/10 : 30% de CNP*	7,6 %	1913	1965	1,9	6,3	93,1
Mélange L *Filler + 0/2 + CNP2/6 + 6/10 : 40% de CNP*	8,3 %	1795	1846	2,3	5,6	92,3
Mélange O *Filler + 0/2 + CNP 2/6*	8,3%	1848	1887	2,3	5,2	92,5
Mélange N *Filler + 0/2 + CNP 2/10*	8,3%	1831	1859	2,2	5,6	92,4

Pour les mélanges incorporant des CNP, on note une diminution de la compacité avec l'augmentation du pourcentage volumique de CNP et ce quelle que soit la classe granulaire des coques (Figure 62).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

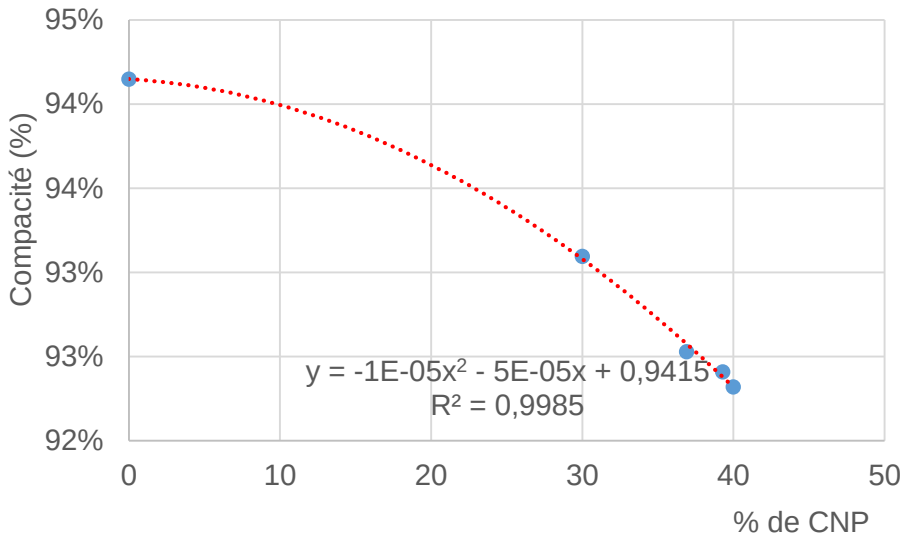


Figure 62 : Evolution de la compacité des enrobés en fonction de % volumique des CNP

V.7.2. Masses volumiques des enrobés

Les résultats des masses volumiques sont présentés dans le Tableau 29 et en graphique (Figure 63).

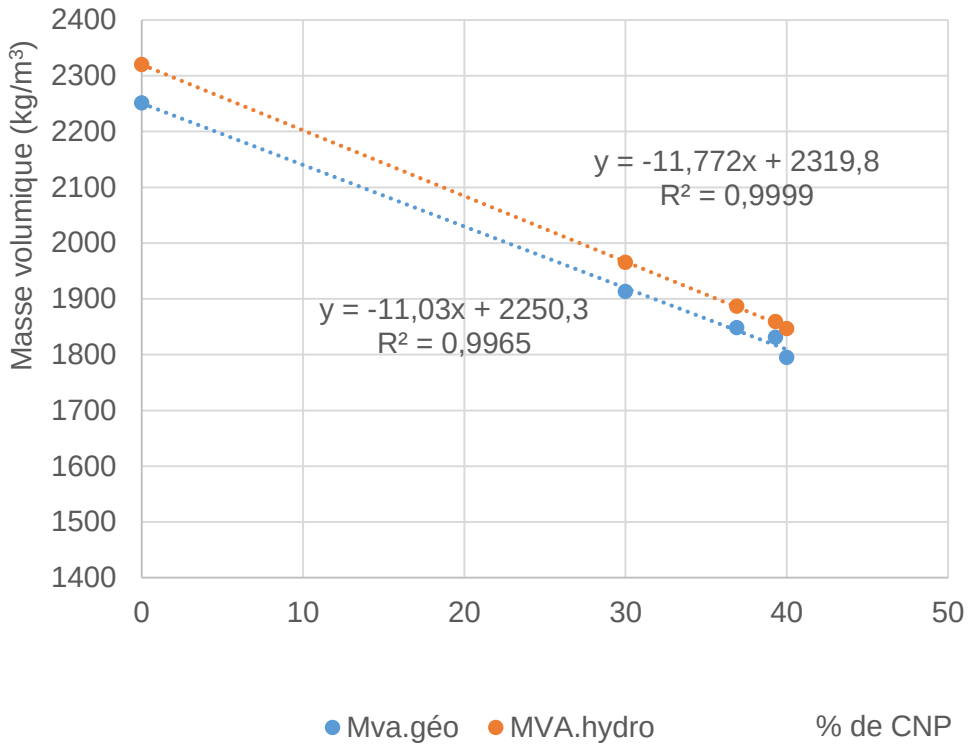


Figure 63 : Evolution des masses volumiques en fonction de % volumique des CNP

Toutes les masses volumiques des enrobés de CNP sont inférieures à 2000 kg/m^3 au-delà de 10 % de CNP. Ce constat est aussi fait par (Ndoke, 2006) et s'explique par la faible densité des CNP par rapport aux granulats classiques.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

V.8. Caractéristiques mécaniques : Résistance en compression

Dans le Tableau 30, on note que pour chaque formule, la résistance à la compression sur éprouvette cylindrique augmente pour atteindre une valeur maximale, avant de diminuer, selon la quantité de coques dans le mélange.

Tableau 30 : Caractéristiques mécaniques des enrobés

Mélange	% volumique de CNP	Résistance lot sec Cd (MPa)	Ecart type Cd (MPa)	Résistance lot humide Cw (MPa)	Ecart type Cw (MPa)	i/C (%)
Mélange A	0	8,8	0,16	8,5	0,41	97
Mélange H (CNP2/6)	30	7,4	0,34	5,3	0,23	71
Mélange L (CNP2/6)	40	8,0	0,15	7,3	0,26	91
Mélange O (CNP2/6)	36,9	9,2	0,52	8,5	0,31	93
Mélange N (CNP2/10)	39,3	8,7	0,64	6,7	0,31	78

Pour le mélange O avec 37% de CNP (soit 22,6% en proportion massique) nous avons enregistré la plus grande valeur de la résistance à la compression de 9,2MPa.

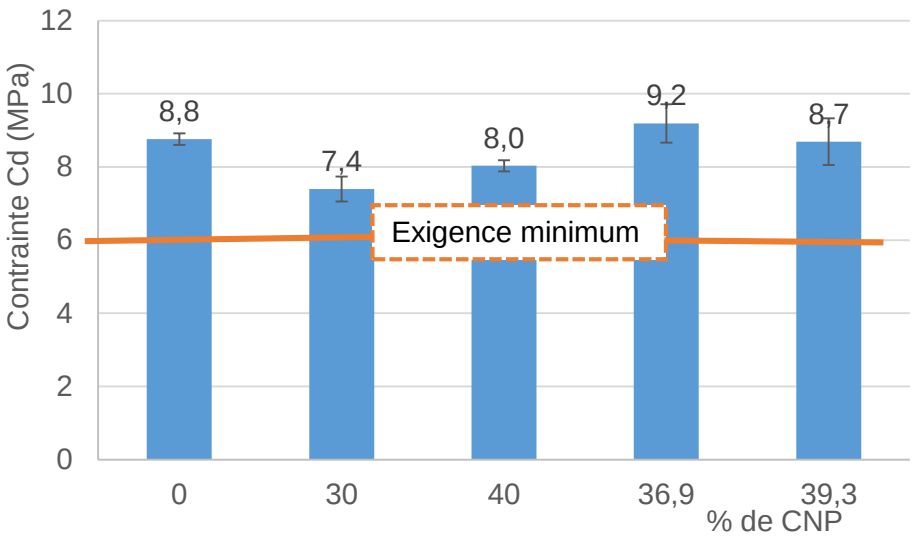


Figure 64 : Variation de la résistance en compression en fonction du % volumique de CNP

Toutes les formules de valorisation étudiées ont entre 18 à 25% de CNP (proportion massique) de la partie solide du composite. Cela rejoint ce qui s'observe en terme de valorisation de CNP comme granulats grossiers dans le béton léger de structure qui varie 20 et 27% de la partie du béton (Gibigaye et al., 2017; Shafigh et al., 2011).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

V.9. Durabilité des enrobés à base de CNP : tenue à l'eau

Toutes les formules sont testées selon la méthode B expliquée plus haut. Dans tous les cas, les huit éprouvettes ont été séparées en deux lots distincts et homogènes, soit quatre ayant subi un vieillissement accéléré par trempage, contrairement aux quatre autres. Les résultats présentés au tableau précédent ont été mis sous forme de graphique en fonction du pourcentage de CNP.

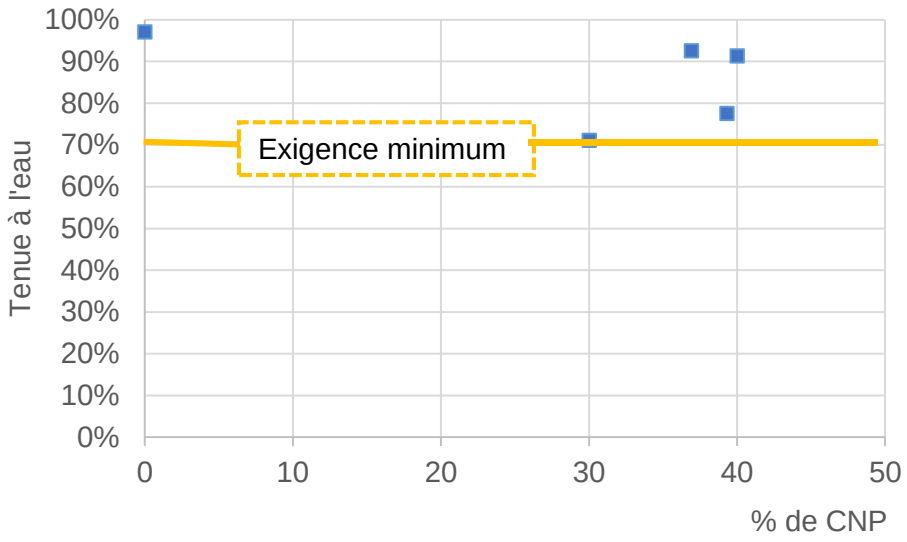


Figure 65 : Résultat de tenue à l'eau en fonction du % volumique des CNP

En analysant les résultats présentés à la Figure 65, tous les enrobés de surface contenus dans ce plan expérimental ont offert des résultats supérieurs à l'exigence fixée à 70 % (Delorme et al., 2007; EN NF 13108-1, 2007).

V.10. Détermination du module de tangent et du module sécant des enrobés

D'un point de vue géométrique, un module d'élasticité est défini comme la pente de la droite représentant la partie linéaire de la courbe contrainte – déformation. Ces deux modules ne sont pas des modules de dimensionnement pour les composites mais des éléements comparatifs des différentes formules. La détermination des modules d'élasticité en compression nécessite deux étapes complémentaires : le repérage de la zone élastique et la régression linéaire sur cette zone. En effet, en raison de petites erreurs de lectures au cours de l'enregistrement des données, la courbe peut sembler présenter plusieurs parties linéaires, rendant plus confuse la délimitation de la partie se rapprochant le plus d'une droite. Pour déterminer avec plus de précision, la zone élastique de la courbe, nous avons opté pour le module tangent la plage entre $\sigma_{10\%}$ et $\sigma_{30\%}$ et pour le module sécant $\sigma_{10\%}$ et $\sigma_{\max}$. $\sigma_{10\%}$ et $\sigma_{30\%}$ représentent respectivement 10% et 30% de la contrainte maximale $\sigma_{\max}$.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

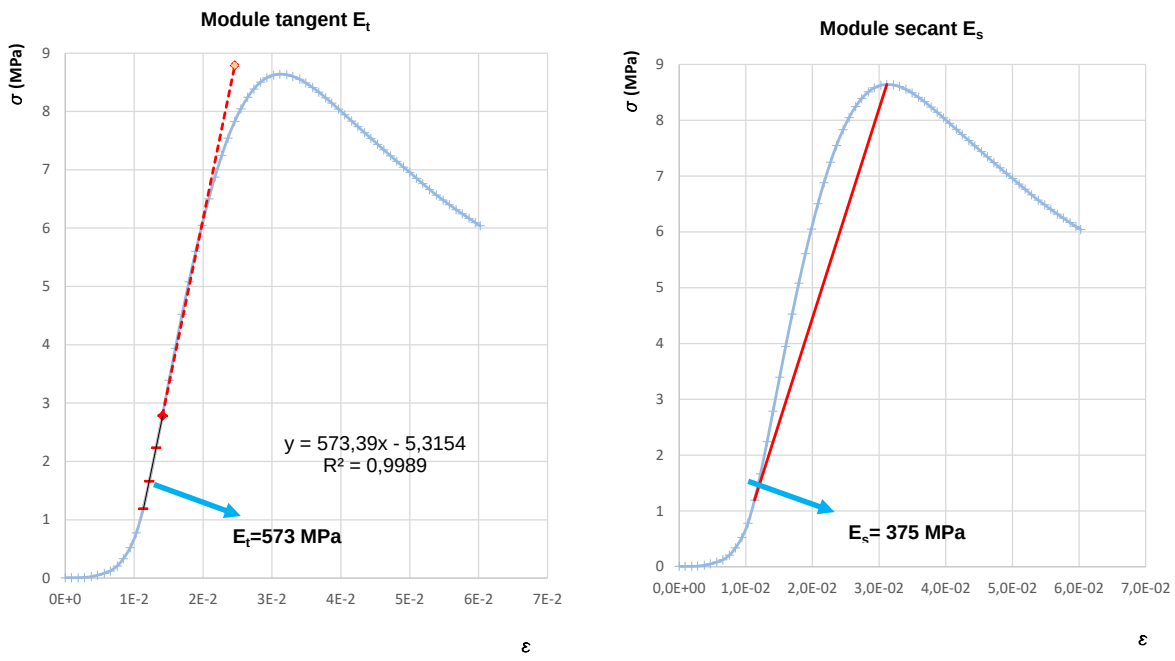


Figure 66 : Courbe contrainte-déformation : détermination du module tangent et module sécant

V.11. Module tangent et module sécant

Les essais effectués suivant la méthode exposée au paragraphe V.2 ont permis d'enregistrer les données relatives aux charges et aux déplacements verticaux et les déformations longitudinales sont déduites à partir de l'expression :

$$\varepsilon = \Delta l / l_0 \qquad \text{Équation 50}$$

Le comportement en compression à 8 jours est présenté sur la Figure 67 pour la Formule A, la Figure 68 pour la Formule H, la Figure 69 pour la Formule L , la Figure 70 pour la Formule O et la Figure 71 pour la Formule N.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

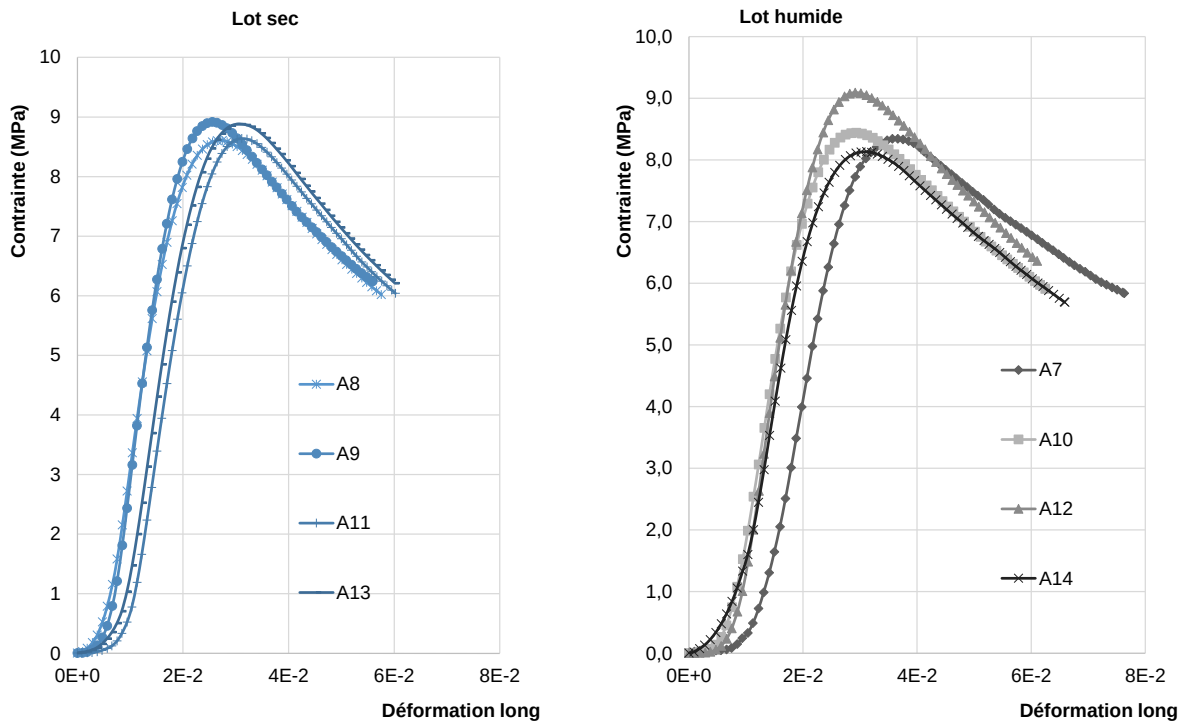


Figure 67 : Variation de la résistance en fonction des déformations (Formule A)

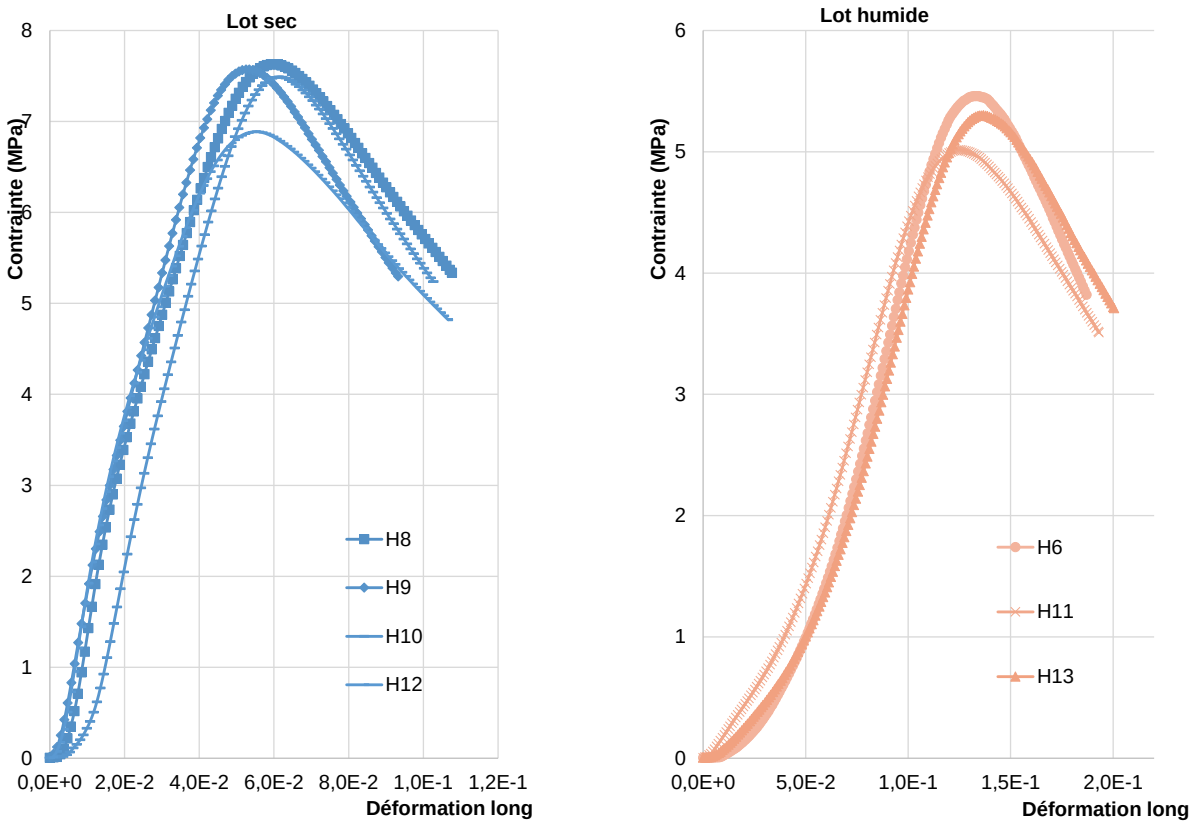


Figure 68 : Variation de la résistance en fonction des déformations (Formule H)

Licence CC BY-NC-ND 3.0

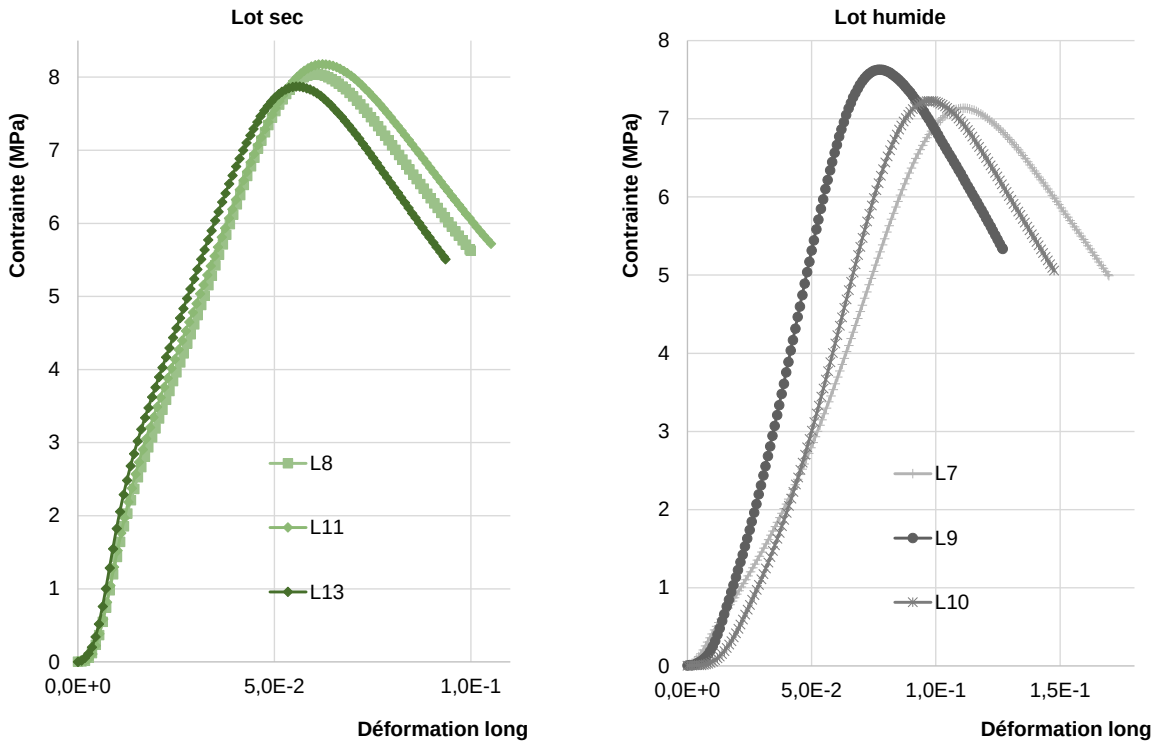


Figure 69 : Variation de la résistance en fonction des déformations (Formule L)

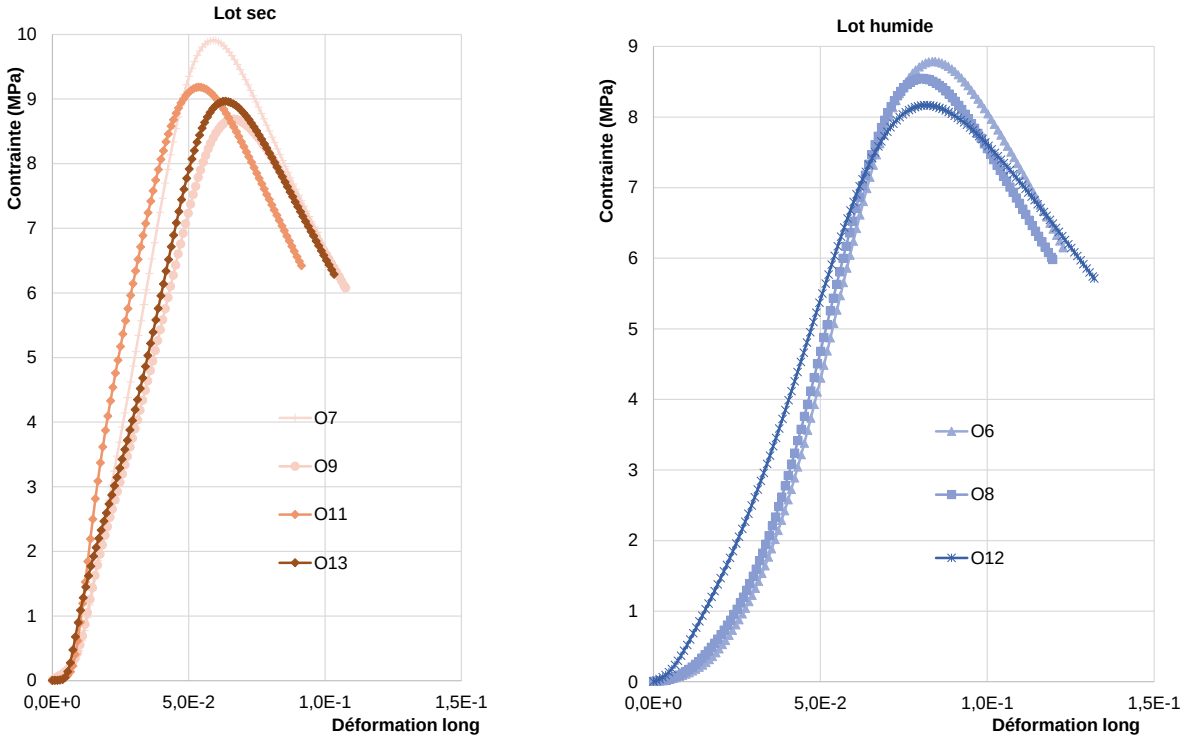


Figure 70 : Variation de la résistance en fonction des déformations (Formule O)

Licence CC BY-NC-ND 3.0

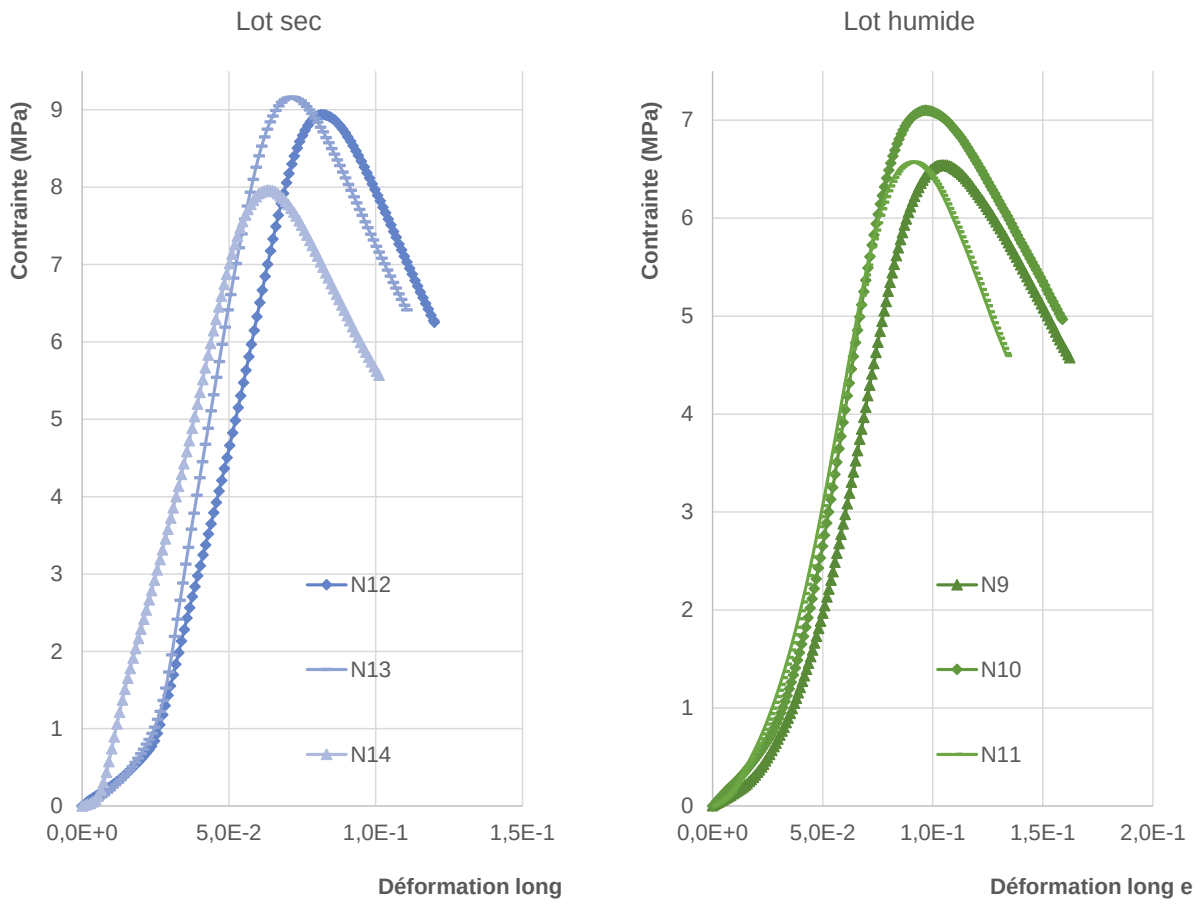


Figure 71 : Variation de la résistance en fonction des déformations (Formule N)

Des Figure 67 à la Figure 71, on déduit les valeurs du module tangent et du module sécant des enrobés de CNP. Le Tableau 32 montre les modules obtenus pour l'enrobé béton de CNP et pour l'enrobé classique.

Le Tableau 31 regroupe le module tangent et le module sécant différents mélanges.

Tableau 31 : Module tangent et module sécant (Lot sec)

Mélange	% volumique de CNP	Module tangent Moy (MPa)	Ecart Type module tangent (MPa)	Module secant Moy (MPa)	Ecart Type module secant (MPa)
Mélange A	0	570	19	381	33
Mélange H (CNP2/6)	30	235	24	135	8
Mélange L (CNP2/6)	40	283	78	166	56
Mélange O (CNP2/6)	36,9	229	74	169	26
Mélange N (CNP2/10)	39,3	216	79	173	46

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Du Tableau 31, sont tracés les histogrammes des Figure 72 et Figure 73.

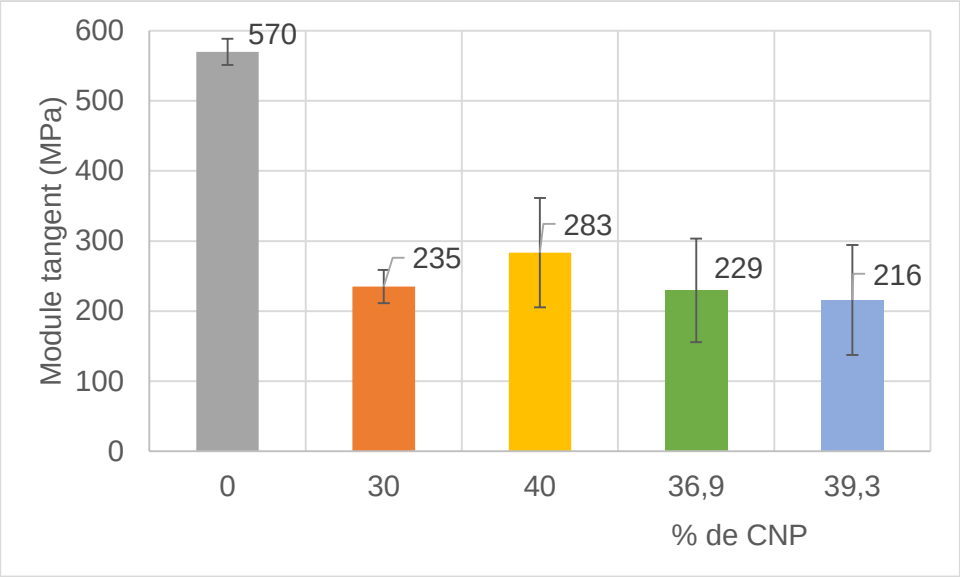


Figure 72 : Variation du module tangent en fonction du % volumique des CNP

De la Figure 72, l'enrobé de CNP a un module tangent de 216 MPa et celui de l'enrobé classique est de 570 MPa (soit un rapport de 38%). L'écart-type de la mesure pour l'enrobé de CNP est supérieur à 10% tandis que pour celui du l'enrobé classique est de 3% par rapport à la valeur moyenne correspondante. La faible valeur du module du béton de CNP s'explique par la plus faible rigidité des granulats légers de CNP par rapport au mortier. Cette valeur explique bien la plus grande déformabilité des enrobés CNP par comparaison à l'enrobé classique. Ce rapport entre module de composite à base de CNP et le composite classique est aussi observé par (Godonou, 2019) dans le cadre du béton. Pour lui, le béton de CNP a un module de Young de 5 619 MPa et celui du béton classique est de 15 010 MPa.

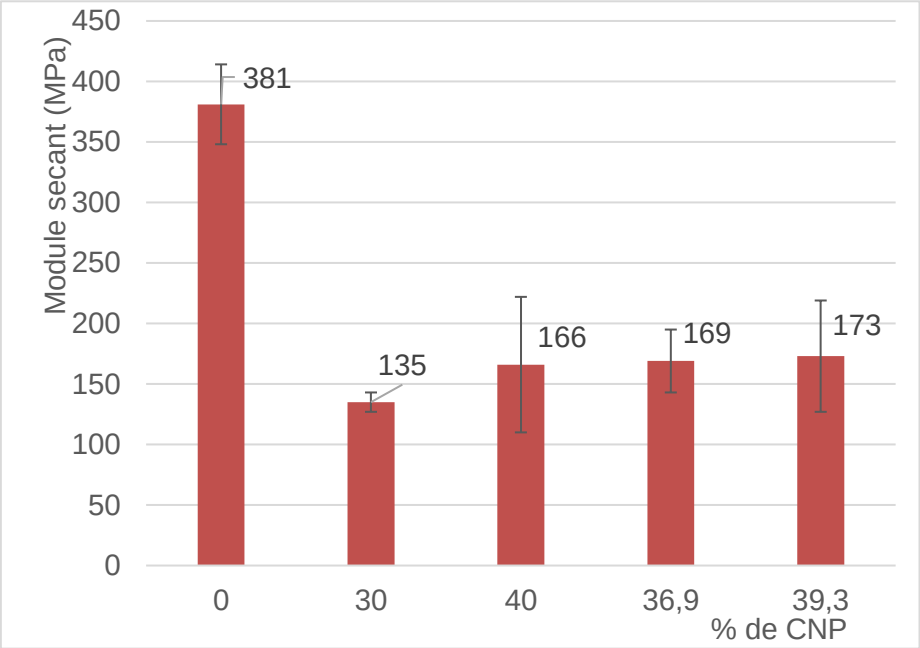


Figure 73 : Variation du module sécant en fonction du % volumique des CNP

Licence CC BY-NC-ND 3.0

La Figure 73 renseigne sur l'évolution du module sécant des enrobés en fonction du pourcentage des CNP. Le constat est le même que le module tangent. Le module sécant de l'enrobé de CNP est (167 ± 61) MPa contre (405 ± 38) MPa pour l'enrobé classique.

Le Tableau 32 résumé la synthèse du module tangent et sécant des enrobés incorporant CNP et d'enrobé classique.

Tableau 32 : Synthèse du module tangent et sécant d'enrobé de CNP et d'enrobé classique

	Enrobé de CNP (30-40%)	Enrobé classique
Module tangent (MPa)	216 ± 79	570 ± 19
Module sécant (MPa)	135 ± 56	381 ± 33

Au vu ces résultats, les CNP du Sud-Bénin pourraient être utilisées comme agrégats grossiers du béton bitumineux de CNP pour la couche de roulement des chaussées à faible trafic.

V.12. Conclusion partielle

Dans cette partie les performances de durabilité des enrobés de CNP ont été étudiées pour une utilisation en couche de roulement des routes à faible trafic. Le modèle d'empilement compressible utilisé pour l'optimisation de la composition granulaire permet de la compacité du mélange à sec connaissant les caractéristiques (granularité et compacité propre) des classes élémentaires. Ce modèle s'applique remarquablement aux granulats légers d'origine végétale et la formulation des bétons bitumineux bien qu'il ait développé à l'origine pour les granulats classiques (concassés et roulés) et la formulation des bétons hydrauliques. Les résultats montrent et confirment que les granularités discontinues conduisent aux plus fortes compacités. De par sa fiabilité, le modèle d'empilement compressible ouvre de nouvelles perspectives dans les formulations des composites en génie civil.

De valeurs ainsi obtenues des essais, il ressort que l'enrobé de CNP présente des performances physico-mécaniques minimales quant à son utilisation en couche de roulement des chaussées à faible trafic. Pour une application nous recommanderons le mélange N avec l'option de cloutage.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Conclusion

La valorisation des ressources renouvelables d'origine végétale connaît actuellement un indéniable regain d'intérêt auprès des chercheurs, pour l'élaboration de matériaux alternatifs à ceux conventionnellement utilisés jusque-là dans les pays tropicaux. Partant de ce constat, la première partie de ce travail a vu l'élaboration de composites, constitués à base de la terre de barre et des coques de noix de palmiste en vue de leur utilisation en couches de fondation des chaussées à faible trafic. Les CNP et la terre de barre ont été sélectionnées pour leur grande disponibilité (accessibilité) et leur faible coût de production et de transport dans les zones tropicales (cas du Sud du Bénin). L'ajout de 15% de sable lagunaire provenant également de carrières locales a été nécessaire pour l'amaigrissement des composites. Les résultats obtenus montrent une certaine similitude entre les caractéristiques des granulats de CNP et celles des granites concassés dans l'amélioration des performances mécaniques des matériaux routiers. Selon les résultats, l'apport minimum de 37 % de CNP (en volume) valorise la terre de barre (matériau argileux) pour une utilisation en couche de forme et en plate-forme des chaussées, visées par la présente étude. L'ajout de CNP au sol latéritique (terre de barre) réduit le pourcentage de fines proportionnellement et augmente l'indice CBR des mélanges, obtenus. Ainsi, i) le mélange composé de 39% de sol latéritique et de 61% de CNP avec un indice CBR égal à 30 et ii) le mélange composé de 40% de CNP avec 45% de sol latéritique et de 15% de sable lagunaire avec un indice CBR égal à 41, peuvent être utilisés comme matériaux de couche de fondation pour les routes à faible et moyen trafics respectivement, dans le cas de nouvelles constructions ainsi que de réhabilitations. D'après ces résultats on peut retenir que les courbes de Fuller ont conduit à de fortes compacités. La loi parabolique de Fuller (établie par les modèles d'empilement) constitue un outil précieux pour la conception des mélanges de sols en lieu et place des techniques formulation « essais erreurs ».

Dans la deuxième partie de la thèse, l'importance du modèle d'empilement compressible a été mise en évidence. Sur la base des concepts associés aux combinaisons granulaires, il a été montré que l'on pouvait optimiser le squelette granulaire des enrobés, même avec des granulats légers d'origine végétale. L'utilisation du MEC a permis d'optimiser plus rapidement la compacité de l'enrobé. Les résultats de laboratoire laissent entrevoir une valorisation de 30 à 40% des CNP en remplacement partiel et total des granulats minéraux au cours de la formulation des enrobés, contribuant ainsi à une réduction appréciable de la pression humaine sur les ressources naturelles. Les intérêts de l'utilisation des CNP en construction routière sont

i) la meilleure gestion et la valorisation des déchets agricoles,

ii) la réduction de la pollution atmosphérique engendrée lors de l'extraction et du transport des granulats minéraux et

iii) la réduction de la pauvreté au niveau des producteurs et exploitants du palmier à huile des pays tropicaux.

Ainsi donc, la construction de la route avec une tonne d'enrobé à base de CNP correspond à environ 200 kg de CO_2 stockée. La valorisation des sous-produits agricoles et l'élaboration des matériaux alternatifs à l'échelle nationale, régionale et internationale, en intégrant les

Licence CC BY-NC-ND 3.0

aspects liés aussi bien au comportement mécanique et environnemental que l'aspect économique, ouvrent des perspectives de développement importantes.

En perspectives

Les perspectives de ce travail de thèse pourraient porter sur les aspects suivants.

i) Pour les deux composites, élaborer des modèles de corrélation et d'homogénéisation qui lieront les caractéristiques des composites à celles des proportions des constituants de base des composites élaborés.

ii) Il serait intéressant d'étudier le comportement de Zone Transition Inter faciale (ZTI) entre les CNP et la matrice argileuse de la terre de barre afin de comprendre et d'interpréter le comportement mécanique des différents composites.

iii) D'un point de vue mécanique une étude de durabilité des composites (couche de roulement, couche de fondation) est nécessaire afin de voir comment les composites se comporteront à long terme et l'effet des espèces chimiques que pourrait larguer le granulat végétal dans les composites.

iv) Une planche expérimentale va permettre de suivre le comportement de la chaussée en grandeur nature.

v) Aussi serait-il intéressant d'étudier les déformations permanentes des enrobés de CNP et l'optimisation de la teneur en bitume en tenant compte de la surface spécifique des CNP et leur caractère absorbant.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Références bibliographiques

Aberg, B., 1992. Void ratio of non-cohesive soils and similar materials. J. Geotech. Eng. 118, 1315–1334. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1992)118:9(1315)

Achour, R., 2013. Valorisation et caractérisation de la durabilité d ' un matériau routier et d'un béton à base de sédiments de dragage. Faculté de génie de l'université de Sherbrooke et l'Université des sciences et technologie de Lille 1.

Adadja, C.E., 2020. Modélisation multi-échelles des propriétés élastiques du composite argile-pailles de riz. Université de Lorraine; Université d'Abomey-Calavi (Bénin).

Adagbe, M., 2021. Utilisation de la terre renforcée par des tiges de paille de riz comme matériau des éléments porteurs des bâtiments armés avec le rônier. Université Paul Sabatier-Toulouse III; Université d'Abomey-Calavi.

Adeboje, A., Kupolati, W., Sadiku, E., Ndambuki, J., Kambole, C., Ogunleye, O., 2017. Stabilization of lateritic soil with pulverized palm kernel shell (PPKS) for road construction. Afr. J. Sci. Technol. Innov. Dev. 9, 55–60.

Affaton, P., Houessou, A., Gomez, G., 1985. La formation d'Adakplamé (Bénin, Ouest-Afrique) n'appartient pas au Continental Terminal. J. Afr. Earth Sci. 3, 359–364.

Ahouet, L., Elenga, R.G., Bouyila, S., Ngoulou, M., Kengue, E., 2018. Amélioration des propriétés géotechniques du graveleux latéritique par ajout de la grave alluvionnaire concassée 0/31,5. Rev. RAMReS – Sci. Appliquées L'Ingénieur 3, 1–6.

Alengaram, U.J., Mahmud, H., Jumaat, M.Z., 2011. Enhancement and prediction of modulus of elasticity of palm kernel shell concrete. Mater. Des. 32, 2143–2148. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.11.035

Alengaram, U.J., Mahmud, H., Jumaat, M.Z., Shirazi, S.M., 2010. Effect of aggregate size and proportion on strength properties of palm kernel shell concrete. Int. J. Phys. Sci. 5, 1848–1856.

Alengaram, U.J., Muhit, B.A.A., Jumaat, M.Z. bin, 2013. Utilization of oil palm kernel shell as lightweight aggregate in concrete – A review. Constr. Build. Mater. 38, 161–172. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.026

Allam, H., Duplan, F., Amziane, S., Burtschell, Y., 2022. About the self-sensing behavior of smart concrete and its interaction with the carbon fiber percolation status, sand connectivity status and grain size distribution. Constr. Build. Mater. 324, 126609.

Amu, O., Adeyeri, J., Haastrup, A., Eboru, A., 2008. Effects of Palm Kernel Shells in Lateritic Soil for Asphalt Stabilization. Res. J. Environ. Sci. 2, 132–138.

Amziane, S., Collet, F., Lawrence, M., Magniont, C., Picandet, V., Sonebi, M., 2017. Recommendation of the RILEM TC 236-BBM: characterisation testing of hemp shiv to determine the initial water content, water absorption, dry density, particle size distribution and thermal conductivity. Mater. Struct. 50, 167. https://doi.org/10.1617/s11527-017-1029-3

Andreasen, A.H.M., Andersen, J., 1930. ÜBer die beziehung zwischen kornabstufung und Zwischenraum in produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). Kolloid-Z. 50, 217–228.

Asphalte Institute, 2001. Superpave Mix Design, Asphalt Institute. ed, Superpave Series No.2. Lexington.

Asphalte Institute, 1997. Mix Design Methods, Asphalt Institute. ed, Manual Series. Lexington.

Asphalte Institute, 1994. The Asphalte Handbook, (No. Manuel series n°4). Lexington, Etats Unis.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Attoh-Okine, N.O., 1995. Lime treatment of laterite soils and gravels — revisited. Constr. Build. Mater. 9, 283–287. https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00030-J

Autret, P., 1983. Latérites et graveleux latéritiques, Laboratoire des ponts et chaussées de Paris.

Azontonde, A., 1993. Dégradation et restauration des terres de barre (sols ferrallitiques faiblement désaturés argilo-sableux) au Bénin. Cah Orstom Sér Pédol XXVlll, 217–226.

Azontonde, H.A., 1991. Propriétés physiques et hydrauliques des sols au Bénin, in: Soil Water Balance in the SudanoSahelian Zone. Presented at the Proceedings of the Niamey Workshop, IAHS, Niamey, p. 10.

Babaliye, O., Houanou, K.A., Vianou, A., Tchehouali, A., Foudjet, A.E., 2020. Litho stabilization of the lateritic gravelly by granite crushed for their use in flexible pavement in Benin. Int. J. Adv. Res. 8, 1008–1016. https://doi.org/10.21474/IJAR01/10871

Baghaee Moghaddam, T., 2019. Development of high modulus asphalt concrete mix design technology for use on Ontario's highways. University of Waterloo, Ontario, Canada.

Baghaee Moghaddam, T., Baaj, H., 2018a. The use of compressible packing model and modified asphalt binders in high-modulus asphalt mix design. Road Mater. Pavement Des. 21, 1061–1077. https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1536611

Baghaee Moghaddam, T., Baaj, H., 2018b. Application of compressible packing model for optimization of asphalt concrete mix design. Constr. Build. Mater. 159, 530–539. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.004

Basiron, Y., 2007. Palm oil production through sustainable plantations. Eur. J. Lipid Sci. Technol. 109, 289–295.

Basri, H.B., Mannan, M.A., Zain, M.F.M., 1999. Concrete using waste oil palm shells as aggregate. Cem. Concr. Res. 619–622.

Ben-Aim, R., 1970. Etude de la texture des empilements de grains: application à la détermination de la perméabilité des mélanges binaires en régime moléculaire, intermédiaire, laminaire. Faculté des Sciences de l'Université de Nancy.

Bohi, Z.P.B., 2008. Caractérisation des sols latéritiques utilisés en construction routière: cas de la région de l'Agneby (Côté d'Ivoire) (Géotechnique). Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Champs-sur-Marne.

Bressi, S., 2016. Advanced methodology for optimization of mixture design of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement material (PhD Thesis). Lausanne. https://doi.org/10.1617/s11527-016-0837-1

Bressi, S., Dumont, A.G., Partl, M.N., 2016. A new laboratory methodology for optimization of mixture design of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement material. Mater. Struct. Constr. 49, 4975–4990. https://doi.org/10.1617/s11527-016-0837-1

Caquot, A., 1937. Le rôle des matériaux dans le béton, mémoires de la Société des ingénieurs civils de France. Fasc.

Carsky, R.J., 2003. Response of cowpea and soybean to P and K on terre de barre soils in southern Bénin. Agric. Ecosyst. Environ. 100, 241–249. https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00192-0

CEBTP, 1984. Guide Pratique de Dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux.

CEBTP, 1980. Guide pratique de Dimensionnement des Chaussées pour les Pays Tropicaux.

Conner, J.R., Hoeffner, S.L., 1998. A Critical Review of Stabilization/Solidification Technology Critical Reviews. Environ. Sci. Technol. 28, 397–462.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Corté, J.-F., Di Benedetto, H., 2004. Matériaux routiers bitumineux 1 : description et propriétés des constituants, Hermes Lavoisier. ed. Paris.

CRR, 1997. Code de bonne pratique pour la formulation des enrobes bitumineux denses, Recommandations C.R.R.

CRR, 1987. Code de bonne pratique pour la formulation des enrobes bitumineux denses, Recommandations C.R.R.

de Larrard, F., 1999. “Concrete mixture-proportioning – a scientific approach”, modern concrete technology series.

de Larrard, F., 1988. Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances (Rapport de recherche des LPC).

De Larrard, F., Buil, M., 1987. Granularité et compacité dans les matériaux de génie civil. Mater. Struct. 20, 117–126.

de Larrard, F., Sedran, T., 1994. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. Cem. Concr. Res. 24, 997–1009.

Delorme, J.-L., de la Roche, C., Wendling, L., 2007. Manuel LPC d’aide à la formulation des enrobés.

Di Benedetto, H., Corté, J.-F., 2005. Matériaux routiers bitumineux 2: Constitution et propriétés des thermomécaniques des mélanges, Hermès Lavoisier. ed.

Dia, M., 2013. Traitement et valorisation de sédiments de dragage phosphatés en technique routière. Mines DOUAI / d’ARTOIS.

Dinger, D., Funk, J., 1994. Predictive process control of crowded particulate suspensions. Springer.

Dodds, J., Baluais, G., 1993. Caractérisation de la taille des particules. Sci. Géologiques Bull. 46, 79–104. https://doi.org/10.3406/sgeol.1993.1898

Dreux, G., Festa, J., 1998. Formulation de Bolomey datant de 1947 exposée dans: Nouveau guide du béton et de ses constitutants. Eyrolles.

Dubois, V., 2006. Etude du comportement physico-mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins – Valorisation en technique routière. Mines Douai et Université d’Artois.

Edmund, C.O., Christopher, M.S., Pascal, D.K., 2014. Characterization of palm kernel shell for materials reinforcement and water treatment. J. Chem. Eng. Mater. Sci. 5, 1–6. https://doi.org/10.5897/JCEMS2014.0172

Eiffage, 2021. L’enrobé GB5® d’Eiffage Route fête ses 12 ans [WWW Document]. www.eiffage.com. URL https://www.eiffage.com/medias/actualites/lenrobe-gb5-deiffage-route-fete-ses-12-ans (accessed 2.1.22).

EN NF 13108-1, 2007. Mélanges bitumineux-Specifications des materiaux-Partie 1: Enrobes bitumineux.

Epesse Misse, S., Obounou, M., Ayina Ohandja, L.M., Caillat, S., 2013. Utilisation des coques de noix de palmiste comme combustible dans un four de fusion de la ferraille. Rev. Energ. Renouvelables.

Fang, M., Park, D., Singuranayo, J.L., Chen, H., Li, Y., 2018. Aggregate gradation theory, design and its impact on asphalt pavement performance: a review. Int. J. Pavement Eng. 8436, 1–17. https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1430365

FAOSTAT, 2017. Production du palmier à huile au Bénin. [WWW Document]. URL http://www.fao.org/faostat/fr/#home (accessed 3.10.18).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Faury, J., 1958. Le Béton: influence de ses constituants inertes, règles à adopter pour sa meilleure composition, sa confection et son transport sur les chantiers, 3ème Edition. ed. Dunod, Paris.

Féret, R., 1892. Sur la compacité des mortiers hydrauliques. Ann. Ponts Chaussées 4, 5–164.

Fournier, S., Ay, P., Jannot, C., Okounlola-Biaou, A., Pédé, E., 2001. La transformation artisanale de l'huile de palme au Bénin et au Nigeria. CERNA, CIRAD, Freie Universität Berlin, SRPH.

Fuller, B.W., Thompson, E.S., 1907. The laws of proportioning concrete. Trans. Am. Soc. Civ. Eng. 59, 67–143. https://doi.org/10.1061/TACEAT.0001979

Furnas, C.C., 1929. Furnas, C. C. (1929). Department of Commerce, Bureau of Mines, Report of Investigation Serial No. 2894, 1928 (Bulletin of US Bureau of Mines No. Serial No. 2894).

Gbaguidi, V.S., Tankpinou Kiki, Y., Zevounou, C., Vedogbeton, N., Zankpe, M., 2018. Identification of the strata of lateritic soils and alterites in Benin. Int. J. Adv. Res. 6, 282–293. https://doi.org/10.21474/ijar01/7674

Gérard, J., Kouassi, A.E., Daigremont, C., Détienne, P., Fouquet, D., Vernay, M., 1998. Synthèse sur les caractéristiques technologiques de référence des principaux bois commerciaux africains. CIRAD-forêt-CNRA Abidjan.

GERES, 2013. Guide d'utilisation des équipements de transformation des fruits de palme Guide palme. Bohicon, Zou, Bénin.

Gibigaye, M., Godonou, F.G., Yabi, C.P., Degan, G., 2019. Estimation of Elastic Properties of Oil Palm Kernel Shell Concrete by Semianalytical Methods of Homogenisation. Adv. Civ. Eng. 2019, 1–12. https://doi.org/10.1155/2019/9256260

Gibigaye, M., Godonou, G.F., Katte, R., Degan, G., 2017. Structured mixture proportioning for oil palm kernel shell concrete. Case Stud. Constr. Mater. 6, 219–224. https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2017.04.004

Godonou, E.F.G., 2019. Caractérisation physico-mécanique et durabilité du béton de coques de noix de palmistes du sud -Bénin. Université d'Abomey-Calavi, Abomey-Calavi.

Goltermann, P., Johansen, V., Palbol, L., 1997. Packing of aggregates: an alternative tool to determine the optimal aggregate mix. Mater. J. 94, 435–443.

Guilcher, A., 1959. La région côtière du B as-Dahomey occidental. Etude de géographie physique et humaine appliquée. Bull IFAN XXI B 357–424.

Gunasekaran, K., Ramasubramani, R., Annadurai, R., Prakash Chandar, S., 2014. Study on reinforced lightweight coconut shell concrete beam behavior under torsion. Mater. Des. 57, 374–382. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.058

Houben, H., Guillaud, H., 1989. Traité de construction en terre, Editions Parentheses. ed, Habitat / Ressources.

Houessou, A., Lang, J., 1978. Contribution à l'étude du «Continental terminal» dans le Bénin méridional. Sci. Géologiques Bull. 31, 137–149. https://doi.org/10.3406/sgeol.1978.1543

Issiakou Souley, M., 2016. Caractérisation et valorisation des matérieux latéritiques utilisés en construction routière au Niger. BORDEAUX, BORDEAUX.

Jacquemard, J.-C., 2011. Le palmier à huile, 1ère édition. ed, Agricultures tropicales en poche. Quae, CTA, Presses agronomiques de Gembloux.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Jones, M.R., Zheng, L., Newlands, M.D., 2002. Comparison of particle packing models for proportioning concrete constitutents for minimum voids ratio. Mater. Struct. 35, 301–309.

Jumaat, M.Z., Johnson Alengaram, U., Mahmud, H., 2009. Shear strength of oil palm shell foamed concrete beams. Mater. Des. 30, 2227–2236. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.09.024

Junod, A., Dumont, A.G., 2004. Formulation et optimisation des formules d'enrobés (Partie 2: Formulation No. UNTERHALT 2000), Projet 3: Durabilité des enrobés. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) Laboratoire des voies de circulation (LAVOC, Lausanne.

Karaky, H., 2018. Élaboration et caractérisation physique et hygrothermique d'un agro-matériau à base de pulpe de betterave et d'amidon. Reims.

Kiki, S.Y., 2004. Contribution à la mise au point de méthodes de stabilisation des sols gonflants: Application aux sols argileux de la Lama (Bénin). Cheikh Anta Diop, Sénégal.

Kilian, C., 1931. Des principaux complexes continentaux du Sahara, C.R. somm. Soc. Géol.

Labintan, C., Adadja, C., Gibigaye, M., Zahrouni, H., Hattab, M., 2019. The influence of rice straw on the physical and mechanical properties of banco, an adobe reinforced with rice straw. Int J Eng Adv Technol 9, 2363–2367.

LCPC-SETRA, 2000a. Réalisation des remblais et des couches de forme. Fascicule II : Annexes techniques, 2ème. ed, LCPC-SETRA Guide Technique.

LCPC-SETRA, 2000b. Réalisation des remblais et des couches de forme. Fascicule I : Principes généraux, 2ème. ed, LCPC-SETRA Guide Technique.

Lyon Associates, 1971. Laterites and lateritic soils and other problem soils of Africa. Build. Road Res. Inst. 64–140.

Madjadoumbaye, J., Kamdjo, G., Mbessa, M., Defo, F.E.H., Tamo, T.T., 2013. Possibilities for Improving the Bearing Capacity of Laterite with a Vegetable Shell: the Shell of Palm Kernels. Electron. J. Geotech. Eng. 18, 1917–1928.

MAEP, 2020. Relance du palmier à huile au Bénin : Le Ministre DOSSOUHOUI lance la campagne de plantation. MAEP/ Gouv Bénin, Ifangni.

MAEP, 2017. Plan Stratégique de Développement du Secteur Agricole (PSDSA) 2025 et Plan National d'Investissements Agricoles et de Sécurité Alimentaire et Nutritionnelle PNIASAN 2017 - 2021.

Magnan, J.P., 1997. Description, identification et classification des sols. Tech. Ing.

Mahmud, H., Jumaat, M.Z., Alengaram, U.J., 2009. Influence of Sand/Cement Ratio on Mechanical Properties of Palm Kernel Shell Concrete. J. Appl. Sci. 9, 1764–1769. https://doi.org/10.3923/jas.2009.1764.1769

Malviya, R., Chaudhary, R., 2006. Leaching behavior and immobilization of heavy metals in solidified/stabilized products. J. Hazard. Mater. 137, 207–217.

Mannan, M.A., Alexander, J., Ganapathy, C., Teo, D.C.L., 2006. Quality improvement of oil palm shell (OPS) as coarse aggregate in lightweight concrete. Build. Environ. 41, 1239–1242. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.018

Mannan, M.A., Ganapathy, C., 2002. Engineering properties of concrete with oil palm shell as coarse aggregate. Constr. Build. Mater. 16, 29–34. https://doi.org/10.1016/S0950-0618(01)00030-7

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Mannan, M.A., Ganapathy, C., 2001a. Mix design for oil palm shell concrete. Cem. Concr. Res. 319 1323–1325.

Mannan, M.A., Ganapathy, C., 2001b. Long-term strengths of concrete with oil palm shell as coarse aggregate. Cem. Concr. Res. 31, 1319–1321. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00584-1

Ministère de la Transition Ecologique Français, 2018. Stratégie nationale de lutte contre la déforestation importée (SNDI): Huile de palme [WWW Document]. URL https://www.deforestationimportee.fr/fr/produits/huile-de-palme-8 (accessed 8.24.21).

Mohammed, Afolabi, K.O., Umoru, L.E., 2014. CRUSHED PALM KERNEL SHELL AS A PARTIAL REPLACEMENT OF FINE AGGREGATE IN ASPHALTIC CONCRETE. Int. J. Mater. Methods Technol. 2, 1–5.

Mohammed, H., Afolabi, K.O., Umoru, L.E., 2014. Crushed Palm Kernel Shell as a Partial Replacement of Fine Aggregate in Asphaltic Concrete. Int. J. Mater. Methods Technol. 2, 1–5.

Mooney, M., 1951. The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles. J. Colloid Sci. 6, 162–170.

Ndapeu, D., Yagueka, J.B.K., Nkemaja, E.D., Koungang, B.M.G., Fogue, M., Njeugna, E., 2020. Contribution to the Characterization of Palm Kernel Shell from Littoral, Cameroon. Mater. Sci. Appl. 11, 668.

Ndiaye, M., 2013. Contribution à l'étude des sols latéritiques du Sénégal et du Brésil (PhD Thesis). UNIVERSITE DE PARIS EST; UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR.

Ndiaye, M., Magnan, J.P., Cissé, I.K., Cissé, L., 2013. Étude de l'amélioration de latérites du Sénégal par ajout de sable. Bull. Lab. Ponts Chaussées 123–137.

Ndoke, N.P., 2006. Performance of Palm Kernel Shells as a Partial replacement for Coarse Aggregate in Asphalt Concrete. Leonardo Electr. J. Pract. Technol. 5, 145–152.

Neville, A.M., 2011. Properties of concrete.

NF EN 933-1, 2012. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage.

NF EN 933-3, 2012. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 3 : détermination de la forme des granulats - Coefficient d'aplatissement.

NF EN 1097-3, 1998. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 3 : méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire.

NF EN 1097-6, 2014. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau.

NF EN 12697-12, 2018. Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses.

NF EN ISO 17892-3, 2015. Reconnaissance et essais géotechniques — Essais de laboratoire sur les sols — Partie 3 : Détermination de la masse volumique des particules solides.

NF EN ISO 17892-4, 2018. Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 4: détermination de la distribution granulométrie des particules.

NF P 11-300, 1992. Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.

NF P 94-093, 2014. Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor Normal - Essai Proctor modifié.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

NF P94-051, 1993. Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau.

NF P94-068, 1998. Sols : reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tâche.

NF P94-078, 1997. Sols : reconnaissance et essais - Indice CBR après immersion. Indice CBR immédiat. Indice Portant Immédiat - Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR.

Nijboer, L.W., 1948. Plasticity as a factor on the design of dense bituminous road carpets,. Elsevier 140–155.

Niyigena, C., 2016. Variabilité des performances de bétons de chanvre en fonction des caractéristiques de la chènevotte produite en Auvergne. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II.

Njeugna, E., Ndapeu, D., Bistac, S., Drean, J.Y., Ngenefeme Foba, J., Fogue, M., 2013. Contribution to the Characterisation of the Coconut Shells (Coco nucifera) of Cameroon. Int. J. Mech. Struct. 4, 1–22.

Nozahic, V., 2012. Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux lignocellulosiques basée sur la compréhension et l'amélioration de l'interface liant/végétal: application à des granulats de chenevotte et de tige de tournesol associés à un liant ponce/chaux. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II.

Nwaiwu, C.M.O., Alkali, I.B.K., Ahmed, U.A., 2006. Properties of ironstone lateritic gravels in relation to gravel road pavement construction. Geotech. Geol. Eng. 24, 283–298.

Nzabakurikiza, A., Onana, V.L., Ngo'o Ze, A., Mvindi, A.T.N., Ekodeck, G.E., 2017. Geological, geotechnical, and mechanical characterization of lateritic gravels from Eastern Cameroon for road construction purposes. Bull. Eng. Geol. Environ. 76, 1549–1562. https://doi.org/10.1007/s10064-016-0979-y

Ogundipe, K.E., Ogunbayo, B.F., Olofinnade, O.M., Amusan, L.M., Aigbavboa, C.O., 2021. Affordable housing issue: Experimental investigation on properties of eco-friendly lightweight concrete produced from incorporating periwinkle and palm kernel shells. Results Eng. 9, 100193. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100193

Okafor, F.O., 1988. Palm kernel shell as a lightweight aggregate for concrete. Cem. Concr. Res. Concr Res 901–910.

Okpala, D.C., 1990. Palm kernel shell as a lightweight aggregate in concrete. Build Env. 291–296.

Olanipekun, E.A., Olusola, K.O., Ata, O., 2006. A comparative study of concrete properties using coconut shell and palm kernel shell as coarse aggregates. Build. Environ. 41, 297–301. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.029

Olard, F., 2012. GB5 mix design: high-performance and cost-effective asphalt concretes by use of gap-graded curves and SBS modified bitumens. Road Mater. Pavement Des. 13, 234–259.

Olugbenga Joseph Oyedepo, Lekan Makanju Olanitori, E.O.O., 2015. INVESTIGATION OF PALM KERNEL SHELL AS PARTIAL REPLACEMENT FOR AGGREGATE IN ASPHALTIC CONCRETE. Malays. J. Civ. Eng. 27, 223–234.

Olutaiwo, A., Owolabi, A., 2015. Investigation of the effects of partial replacement of coarse aggregate with graded palm kernel shell in asphaltic binder course. Br. J. Appl. Sci. Technol. 10.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Onana, V.L., Ngo'o Ze, A., Eko, R.M., Ntouala, R.F.D., Nanga Bineli, M.T., Owoudou, B.N., Ekodeck, G.E., 2017. Geological identification, geotechnical and mechanical characterization of charnockite-derived lateritic gravels from Southern Cameroon for road construction purposes. Transp. Geotech. 10, 35–46. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.12.001

Oyedepo, O.J., Olanitori, L.M., Olukanni, E.O., 2015. Investigation of palm kernel shell as partial replacement for aggregate in asphaltic concrete. Malays. J. Civ. Eng. 27.

Pawlak-Kruczek, H., Arora, A., Mościcki, K., Krochmalny, K., Sharma, S., Niedzwiecki, L., 2020. A transition of a domestic boiler from coal to biomass–Emissions from combustion of raw and torrefied Palm Kernel shells (PKS). Fuel 263, 116718.

Pedraza, A., 2018. Propriétés thermomécaniques d'enrobés multi-recyclés. Université de Lyon.

Peronius, N., Sweeting, T.J., 1985. On the correlation of minimum porosity with particle size distribution. Powder Technol. 42, 113–121. https://doi.org/10.1016/0032-5910(85)80043-7

Perraton, D., Meunier, M., Carter, A., 2007. Application des méthodes d'empilement granulaire à la formulation des Stones Matrix Asphalts (SMA). Bull. Lab. Ponts Chaussees 87–108.

Poirier, J.-E., Leroy, C., 2013. Le projet MURE: enrobe tiedes et multirecyclage des agregats d'enrobes. Rev. Gen. Routes Amenagement.

Pouget, S., Olard, F., Hammoum, F., 2016. GB5® mix design: a new approach for aggregate grading optimization for heavy duty flexible pavements, in: 8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements. Springer, pp. 17–23.

Quadri, H.A., Adeyemi, O.A., Olafusi, O.S., 2012. Investigation of the Geotechnical Engineering Properties of Laterite as a Subgrade and Base Material for Road Constructions in Nigeria. Civ. Environ. Res. 2, 11.

Quoi dans mon assiette, 2016. Le véritable enjeu de l'huile de palme n'est pas la santé, mais l'environnement. Quoi Dans Mon Assiette. URL https://quoidansmonassiette.fr/le-veritable-enjeu-de-lhuile-de-palme-nest-pas-la-sante-mais-lenvironnement/ (accessed 9.7.21).

Raheem, A.A., Oriola, K.O., Kareem, M.A., Abdulwahab, R., 2021. Investigation on thermal properties of rice husk ash-blended palm kernel shell concrete. Environ. Chall. 5, 100284. https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100284

Ribier, D., Rouzière, A., 1995. La transformation artisanale des plantes à huile: expériences et procédés. GRET.

Rival, A., 2020. Huile de palme - Défis renouvelés de la durabilité. Tech. Ing., Procédés chimie - bio - agro | Agroalimentaire 17.

Roquier, G., 2017. The 4-parameter Compressible Packing Model (CPM) for crushed aggregate particles. Powder Technol. 320, 133–142. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.07.028

Roquier, G., 2016a. Etude de la compacité optimale des mélanges granulaires binaires : classe granulaire dominante, effet de paroi, effet de desserrement. Université Paris Est.

Roquier, G., 2016b. The 4-parameter Compressible Packing Model (CPM) including a new theory about wall effect and loosening effect for spheres. Powder Technol. 302, 247–253. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.08.031

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Saadon, S., Uemura, Y., Mansor, N., 2014. Torrefaction in the Presence of Oxygen and Carbon Dioxide: The Effect on Yield of Oil Palm Kernel Shell. Procedia Chem. 9, 194–201. https://doi.org/10.1016/j.proche.2014.05.023

Sabil, K.M., Aziz, M.A., Lal, B., Uemura, Y., 2013. Effects of torrefaction on the physiochemical properties of oil palm empty fruit bunches, mesocarp fiber and kernel shell. Biomass Bioenergy 56, 351–360.

Sedran, T., 1999. Rhéologie et rhéomètrie des bétons. Application aux bétons autonivelants. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Sedran, T., De Larrard, F., Angot, D., 1994a. Prevision de la compacité des mélanges granulaires par le modèle de suspension: Fondements théoriques et calibrages du modèle. Bull. Liaison Lab. Ponts Chaussées 59–70.

Sedran, T., De Larrard, F., Angot, D., 1994b. Prevision de la compacité des mélanges granulaires par le modèle de suspension: Validation et cas des mélanges confinés. Bull. Liaison Lab. Ponts Chaussées 71–86.

Shafigh, P., Mahmud, H., Jumaat, M.Z., 2011. Effect of steel fiber on the mechanical properties of oil palm shell lightweight concrete. Mater. Des. 32, 3926–3932. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.02.055

Sheffield, A., Makena, S., Tittlebaum, M., Eaton, H., Cartledge, F., 1987. Effects of three organics on selected physical properties of Type I Portland cement Hazardous Waste and Hazardous Materials 4, 273–286.

Shetty, M.S., 1993. Concrete technology. India.

Slansky, M., 1962. Contribution à l'étude géologique du bassin sédimentaire côtier du Dahomey et du Togo, Éditions Technip, Mémoires du Bureau de recherches géologiques et minières. ed, Mémoires du Bureau de recherches géologiques et minières. Technip, Paris, France.

Sohm, J., 2011. Prédictions des déformations permanentes des matériaux de chaussées. Ecole Centrale de Nantes, Nantes.

Stovall, T., de Larrard, F., 1986. Linear packing density of grain mixture. Powder Technol. 48.

Sukiran, M.A., Abnisa, F., Wan Daud, W.M.A., Abu Bakar, N., Loh, S.K., 2017. A review of torrefaction of oil palm solid wastes for biofuel production. Energy Convers. Manag. 149, 101–120. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.011

Talbot, A.N., Brown, H.A., Richart, F.E., 1923. The strength of concrete: its relation to the cement aggregates and water. University of Illinois.

Tankpinou Kiki, S.Y., 2016. Caractérisation minéralogique, thermique et microscopique de sols fins en technique routière. Université de Bordeaux et Université d'Abomey-Calavi.

Tenn, N., Allou, F., Petit, C., Absi, J., Rossignol, S., 2015. Formulation of new materials based on geopolymer binders and different road aggregates. Ceram. Int. 41, 5812–5820.

Teo, D.C.L., Mannan, M.A., Kurian, V.J., 2006. Structural concrete using oil palm shell (OPS) as lightweight aggregate. Turk. J. Eng. Environ. Sci. 251–257.

Teo, D.C.L., Mannan, M.A., Kurian, V.J., Ganapathy, C., 2007. Lightweight concrete made from oil palm shell (OPS): Structural bond and durability properties. Build. Environ. 42, 2614–2621. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.013

Thieblesson, L.M., 2018. Élaboration et caractérisation de matériaux issus de ressources locales recyclées ou biosourcées. Université Rennes 1; Université Félix Houphouët-Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Toffa, J.A.H., 2009. Renforcement des capacités organisationnelles et techniques des producteurs du palmier à huile sélectionné dans la commune d'Adjarra : cas de la CVPPH de Lindja-Dangbo. Université d'Abomey-Calavi, Abomey-Calavi.

Toufar, W., Born, M., Klose, E., 1976. Contribution of optimisation of components of different density in polydispersed particles systems. Freib. Bookl. A 558, 29–44.

Tran, N.T., 2009. Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière. Mines Douai et Université d'Artois.

Traore, Y.B., Messan, A., Hannawi, K., Gerard, J., Prince, W., Tsobnang, F., 2018. Effect of oil palm shell treatment on the physical and mechanical properties of lightweight concrete. Constr. Build. Mater. 161, 452–460. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.155

Tsirel, S.V., 1997. Methods of granular and fragmented material packing density calculation. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 34, 263–273. https://doi.org/10.1016/S0148-9062(96)00029-0

USDA, F. agricultural S., 2021. World Agricultural Production (No. WAP 8-21). USDA.

Westman, A.E.R., Hugill, H.R., 1930. The packing of particles. J. Am. Ceram. Soc. 13, 767–779.

WesTrack Forensic Team Consensus Report, 2001. Superpave mixture design guide. Washington D.C.,.

Winterkorn, H.F., Chandrasekharan, E.C., 1951. Laterite soils and their stabilization. ASTM Spec. Tech. Publ.

XP P 94-047, 1998. Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un matériau - Méthode par calcination.

Yu, A.B., Standish, N., 1987. Porosity calculations of multi-component mixtures of spherical particles. Powder Technol. 52, 233–241.

Yuan, G., Hao, P., Li, D., Pan, J., Dong, S., 2020. Optimization design and verification of Large Stone Porous asphalt Mixes gradation using Compressible Packing Model. Constr. Build. Mater. 230, 116903. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116903

Zolfeghari Far, S.Y., Kassim, K.A., Eisazadeh, A., Khari, M., 2013. An Evaluation of the Tropical Soils Subjected Physicochemical Stabilization for Remote Rural Roads. Procedia Eng. 54, 817–826. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.075

Licence CC BY-NC-ND 3.0

TABLE DES MATIERES

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Tables des matières

Remerciements 5
Droits d'auteurs 7
Sommaire 9
Résumé 11
Abstract 12
Liste des figures 13
Liste des tableaux 17
Listes des sigles et abréviations 19
Listes des notations/ Symboles 22
Introduction 25
Chapitre I. Revue de la littérature 29
I.1. Généralités sur les CNP 29
I.1.1. Palmier à huile dans le monde 29
I.1.2. Palmier à huile au Bénin 33
I.1.3. Description du processus d'obtention artisanale des CNP 34
I.1.4. Caractéristiques des CNP 37
I.1.4.1. Caractéristiques géométriques 37
I.1.4.2. Microstructure 37
I.1.4.3. Caractéristiques chimiques 38
I.1.4.4. Caractéristiques physiques des CNP (Masse volumique et absorption) 39
I.1.4.4.1. Masses volumiques absolue et relative 39
I.1.4.4.2. Absorption WA_{24} 39
I.1.4.5. Caractéristiques mécaniques des CNP 39
I.1.5. Usage endogène des CNP 40
I.2. Des recherches sur la valorisation des CNP en Génie Civil 42
I.2.1. Sous forme de granulats alternatifs dans le béton léger de structure 42
I.2.2. En technique routière 43
I.3. Généralités sur les sols latéritiques 44
I.3.1. Définition et Origine 44
I.3.2. Sols latéritiques au Bénin : terre de barre 44
I.3.2.1. Contexte géologique des Sols au Bénin 44
I.3.2.2. La terre de barre au Bénin 45
I.3.3. Traitement et leurs effets sur les propriétés géotechniques 46
I.4. Conditions d'utilisation des sols latéritiques (sols fins) en technique routière (structure de chaussée) 46
I.4.1. Selon le GTR-GTS 47
I.4.2. Selon le CEBTP 47
I.4.2.1. Spécification en plateforme 48
I.4.2.2. Spécification en couche de forme 49
I.4.2.3. Spécification en couche de fondation 49
I.5. Généralités sur les enrobés bitumineux : formulation 49
I.5.1. Composants granulaires des enrobés 50
I.5.2. Le liant hydrocarboné 50
I.5.3. Méthode de formulation des enrobés bitumineux 50

Licence CC BY-NC-ND 3.0

I.5.3.1. Méthode HVEEM 51
I.5.3.2. MARSHALL MIX DESIGN.....52
I.5.3.3. SUPERPAVE MIX DESIGN 52
I.5.3.4. Méthode française de formulation 53
I.5.3.5. Formulation C.R.R. 54
1ère Partie : Elaboration de matériaux composites à base de coques de noix de palmiste à matrice argileuse utilisables en couche de fondation des routes à faible trafic 57
Chapitre II. Milieu d'étude, matériaux, matériel et méthodes des mélanges CNP/Terre de barre.....59
II.1. Caractérisation des CNP.....59
II.1.1. Zone de provenance.....59
II.1.2. Granulométrie.....59
II.1.3. Forme.....60
II.1.4. Caractéristiques physiques.....61
II.1.4.1. Masses volumiques.....61
II.1.4.2. Coefficient d'absorption des CNP.....63
II.2. Caractérisation géotechnique de la terre de barre.....64
II.2.1. Site de prélèvement.....64
II.2.2. Prélèvement 65
II.2.3. Essais d'identifications 65
II.2.3.1. Analyse granulométrique (AG) 65
II.2.3.2. Les limites d'Atterberg.....66
II.2.3.3. Teneur en matières organiques (MO).....66
II.2.3.4. Essai au bleu de méthylène 66
II.2.3.5. Masse de volumique des particules solides.....67
II.2.3.6. Essai Proctor.....67
II.2.3.7. L'essai CBR (California Bearing Ratio).....68
II.2.4. Les systèmes de classification.....69
II.3. Description de l'étude de formulation des composites CNP/TB: Loi Parabolique de Fuller- Thompson.....70
II.3.1. Loi parabolique de Fuller- Thompson 71
II.3.2. Mélange des composites.....74
II.4. Synthèse.....75
Chapitre III. Valorisation des mélanges CNP/Terre de barre en couche de fondation.....77
III.1. Caractérisation géotechnique du sol naturel 77
III.1.1. Granulométrie.....77
III.1.2. Identification géotechnique.....77
III.1.2.1. Plasticité 78
III.1.2.2. Classification.....79
III.1.3. Résultats de caractérisation mécanique sur le sol naturel 79
III.1.4. Utilisation de la terre de barre en technologie routière.....81
III.2. Performance géotechniques des composites CNP/TB 82
III.2.1. Caractéristiques géotechniques des composites (CNP/TB).....82
III.2.1.1. Teneur en fines (P_{80}).....85
III.2.1.2. Teneur en eau W_{OPM} 85
III.2.1.3. Masse volumique sèche maximale (t/m^3) et compacité des mélanges 86
III.2.1.4. CBR après 4 jours d'immersion et de gonflement.....87

Licence CC BY-NC-ND 3.0

III.2.2. Utilisation des composites en construction routière 88
III.3. Performances géotechniques des composites CNP/Terre de barre/ Sable. 89
III.4. Synthèse.....92
2ème Partie : Elaboration de matériaux composites à base de coque de noix de palmiste à matrice hydrocarbonée utilisable en couche de roulement des routes à faible trafic.....95
Chapitre IV. Optimisation des formulations d'enrobés 97
IV.1. Optimisation du squelette granulaire.....97
IV.1.1. Méthodes liées à la recherche d'une courbe idéale.....97
IV.1.2. Modèles d'empilement granulaire.....100
IV.2. Focus sur le MEC 104
IV.2.1. Présentation.....104
IV.2.2. Formalisme d'un mélange polydispersé 104
IV.2.2.1. Vocabulaire.....104
IV.2.3. Mélange binaire sans interaction ($\boldsymbol{d1} \gg \boldsymbol{d2}$) 105
IV.2.4. Mélange binaire avec interaction totale ($\boldsymbol{d1} = \boldsymbol{d2}$) 105
IV.2.5. Mélange binaire avec interaction partielle ($\boldsymbol{d1} \geq \boldsymbol{d2}$) 106
IV.2.6. Mélange polydispersé sans interaction.....107
IV.2.7. Diamètres moyens des granulats 108
IV.2.8. Indice de serrage 108
IV.2.9. Comment définir les paramètres d'entrée du MEC ? 109
IV.2.10. L'effet du confinement du récipient.....110
IV.3. Le liant.....112
Chapitre V. Caractéristiques des enrobés à base de CNP 116
V.1. Description des enrobés confectionnés 116
V.2. Caractéristiques physiques des granulats.....116
V.3. Caractéristiques des granulats 118
V.3.1. Temps de vibration.....118
V.3.2. Choix du diamètre moyen 119
V.3.3. Données d'entrée de MEC 121
V.3.4. Bitume.....122
V.4. Résultats d'optimisation des mélanges.....122
V.5. Analyse des mélanges granulaires 124
V.5.1. Mélange de référence Filler +0/2 + 2/4 + 4/6 + 6/10 124
V.5.2. Etude paramétrique du mélange filler+0/2+CNP2/6+6/10 125
V.6. Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses.....126
V.6.1. Principe.....126
V.6.2. Malaxage 126
V.6.3. Mode opératoire de fabrication.....127
V.6.4. Masses volumiques.....128
V.6.5. Mise sous vide 128
V.6.6. Conservation.....129
V.6.7. Essai de compression 129
V.6.8. Précision des mesures expérimentales : Validation des expérimentations 130
V.7. Caractéristiques des enrobés 131
V.7.1. Compacité des enrobés 131
V.7.2. Masses volumiques des enrobés 132
V.8. Caractéristiques mécaniques : Résistance en compression 133

Licence CC BY-NC-ND 3.0

V.9. Durabilité des enrobés à base de CNP : tenue à l'eau 134
V.10. Détermination du module de tangent et du module sécant des enrobés 134
V.11. Module tangent et module sécant 135
V.12. Conclusion partielle 140
Conclusion et perspectives 142
Références bibliographiques 145
Tables des matières 156
Annexes 160
Annexe 1. Classification des sols 161
Annexe 1.1. Classification GTR 161
Annexe 1.2. Classification LPC/USCS (Magnan, 1997) 166
Annexe 1.3. Classification américaine des sols selon HRB (HIGHWAY RESEARCH BOARD) 168
Annexe 2. Références Proctor des mélanges (TB/CNP) 170
Annexe 3. Fiche produit EB10 172

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Annexes

Annexe 1. Classification des sols 161
Annexe 1.1. Classification GTR 161
Annexe 1.2. Classification LPC/USCS (Magnan, 1997) 166
Annexe 1.3. Classification américaine des sols selon HRB (HIGHWAY RESEARCH BOARD) 168
Annexe 2. Références Proctor des mélanges (TB/CNP) 170
Annexe 3. Fiche produit EB10 172

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Annexe 1. Classification des sols

Annexe 1.1. Classification GTR

Trois catégories de paramètres sont retenues par GTR pour la classification des sols. Il s'agit de :

1) Paramètres de comportement mécanique : Ils sont considérés pour juger de l'utilisation du sol dans le corps de chaussée (couche de forme).
2) Paramètres de nature
3) Paramètres d'état

Paramètres de nature

A partir des paramètres de nature, la classification des sols de $D_{max} \leq 50$ mm est consignée dans la figure suivante.

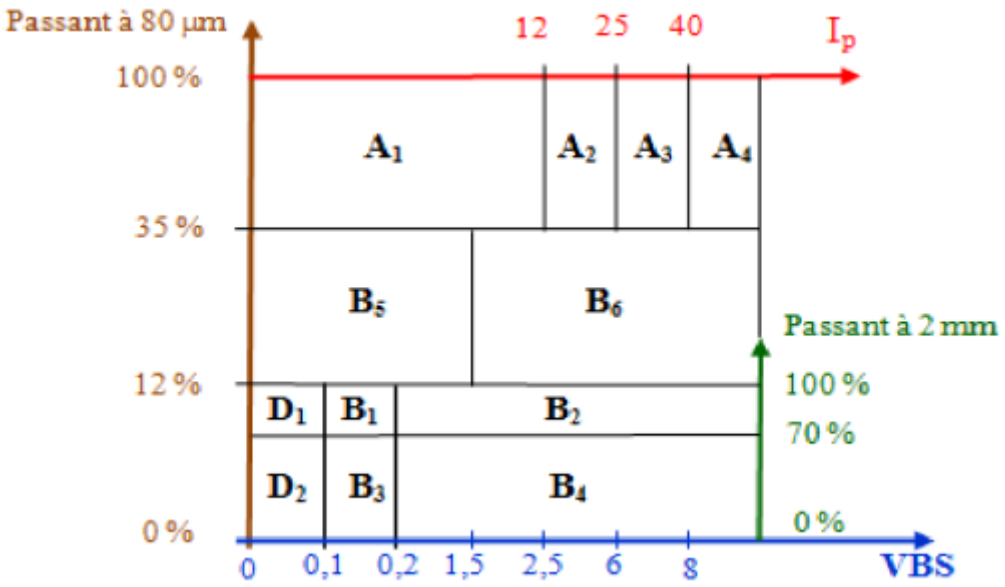


Figure 74 : Tableau synoptique de la classification de selon leur nature (Dmax ≤ 50 mm) (LCPC-SETRA, 2000a)

Cette catégorie de paramètres est basée sur :

- ***Les caractéristiques granulométriques : D_{max} et D passant à 80µm.***

La détermination de la taille des particules selon les spécifications de la norme **XP P94-041** renseigne sur la proportion de particules fines inférieures à 80 µm. Cette partie peut ensuite être étudiée lors de l'essai de sédimentation (**NF P94-057**) pour définir la quantité d'argile (fraction de l'échantillon inférieure à 2µm). Pour des raisons techniques telles que le mélange, un seuil de 50 mm a été établi. Pour les sols fins (granulométrie inférieure ou égale à 50 mm), des sous-catégories sont réparties selon la granulométrie (valeurs seuils de 2 mm et 80 microns) et l'argile, puis ces sols sont encore classés pour des raisons de sensibilité à l'eau. Fondamentalement, ces sols secs se comportent comme de la roche tendre, tandis que les sols gorgés d'eau se comportent comme de la boue.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

- ***L'activité argileuse par la valeur au bleu du sol VB (NF P94-068) et/ou l'argilosité par l'indice de plasticité IP (NF P94-051) : influence de la fraction argileuse et sensibilité à l'eau.***

Étant donné que la surface spécifique de l'argile est supérieure à celles des autres particules fines, il existe une corrélation directe entre la quantité de bleu absorbée par les particules du sol et son activité argileuse. Cette dernière a pour but d'estimer le risque retrait/gonflement des argiles en fonction des variations hydriques.

La plasticité IP définie par la norme **NF P94-051**, se calcule à partir des limites d'Atterberg sur la fraction 0/400µm du sol.

Pour la détermination d'une sous-classe par reconnaissance d'un état hydrique, il existe cinq (05) états dont :

- *l'état très humide (th)*: c'est un état d'humidité très élevé ne permettant plus la réutilisation du sol dans les conditions technico-économiques françaises courantes actuelles.
- *l'état humide (h)*: un état d'humidité élevé autorisant toutefois la réutilisation du sol en prenant des dispositions particulières (aération, traitement, remblais de faible hauteur ...) estimées comme normales dans les conditions technico-économiques françaises courantes actuelles;
- *l'état d'humidité "moyen" (m)*: c'est un état d'humidité optimum (minimum de contraintes pour la mise en œuvre);
- *l'état "sec"*: c'est un état d'humidité faible encore une mise en œuvre en prenant des dispositions particulières (arrosage, sur-compactage ...) estimées comme normales dans les conditions technico-économiques françaises courantes actuelles ;
- *l'état "très sec"*: c'est un état d'humidité très faible n'autorisant plus la réutilisation du sol dans les conditions technico-économiques françaises courantes actuelles.

Paramètres d'état

Un état hydrique peut être caractérisé selon l'un ou l'autre des trois paramètres suivant:

- la position de la teneur en eau naturelle (w_n) de la fraction 0/20 du matériau par rapport à l'optimum Proctor normal (w_{OPN}) exprimée par le rapport : $\frac{w_n}{w_{OPN}}$. Ce rapport est le paramètre d'état le plus fiable pour caractériser les états (s) et (ts) car les difficultés d'obtention de la compacité requise en dépendent directement. Sa signification est en revanche moins claire pour distinguer les états (h) et (th).

la position de la teneur en eau naturelle (w_n) de la fraction 0/20 du matériau par rapport aux limites d'Atterberg (w_L et w_p) qui s'exprime par *l'indice de consistance (Ic)*. L'Ic permet de caractériser correctement les cinq états mais seulement dans le cas des sols fins moyennement et très argileux comportant au moins 80 à 90% d'éléments ≤ 400 µm (la wn à considérer pour le calcul de l'Ic doit être rapportée à la fraction 0/400µm).

l'indice portant immédiat (IPI)

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Tableau 33 : Classification des sols fins : Classe A (LCPC-SETRA, 2000a).

Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique	
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état
Dmax ≤ 50 mm et Tamisat à 80 µm > 35%	A Sols fins	**VBS ≤ 2,5** (*) ou $I_p \leq 12$	**A_1** Limons peu plastiques, loess, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...	$\lvert I \rvert$ (*) ≤ 3 ou $w_n \geq 1{,}25\ w_{OPN}$	A_1 th
				3 < $\lvert I \rvert$ (*) ≤ 8 ou $1{,}10 \leq w_n < 1{,}25\ w_{OPN}$	A_1 h
				8 < $\lvert I \rvert$ ≤ 25 ou $0{,}9\ w_{OPN} \leq w_n < 1{,}1\ w_{OPN}$	A_1 m
				$0{,}7\ w_{OPN} \leq w_n < 0{,}9\ w_{OPN}$	A_1 s
				$w_n < 0{,}7\ w_{OPN}$	A_1 ts
		$12 < I_p \leq 25$ (*) ou 2,5 < VBS ≤ 6	**A_2** Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes...	$\lvert I \rvert$ (*) ≤ 2 ou I_c (*) ≤ 0,9 ou $w_n \geq 1{,}3\ w_{OPN}$	A_2 th
				2 < $\lvert I \rvert$ (*) ≤ 5 ou 0,9 ≤ I_c (*) < 1,05 ou $1{,}1\ w_{OPN} \leq w_n < 1{,}3\ w_{OPN}$	A_2 h
				5 < $\lvert I \rvert$ ≤ 15 ou 1,05 < I_c ≤ 1,2 ou $0{,}9\ w_{OPN} \leq w_n < 1{,}1\ w_{OPN}$	A_2 m
				1,2 < I_c ≤ 1,4 ou $0{,}7\ w_{OPN} \leq w_n < 0{,}9\ w_{OPN}$	A_2 s
				I_c > 1,3 ou $w_n < 0{,}7\ w_{OPN}$	A_2 ts
		$25 < I_p \leq 40$ (*) ou 6 < VBS ≤ 8	**A_3** Argiles et argiles marneuses, limons très plastiques...	$\lvert I \rvert$ (*) ≤ 1 ou I_c (*) ≤ 0,8 ou $w_n \geq 1{,}4\ w_{OPN}$	A_3 th
				1 < $\lvert I \rvert$ (*) ≤ 3 ou 0,8 ≤ I_c (*) < 1 ou $1{,}2\ w_{OPN} \leq w_n < 1{,}4\ w_{OPN}$	A_3 h
				3 < $\lvert I \rvert$ ≤ 10 ou 1 < I_c ≤ 1,15 ou $0{,}9\ w_{OPN} \leq w_n < 1{,}2\ w_{OPN}$	A_3 m
				1,15 < I_c ≤ 1,3 ou $0{,}7\ w_{OPN} \leq w_n < 0{,}9\ w_{OPN}$	A_3 s
				I_c > 1,3 ou $w_n < 0{,}7\ w_{OPN}$	A_3 ts
		$I_p > 40$ (*) ou VBS > 8	**A_4** Argiles et argiles marneuses, très plastiques...	Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique	A_4 th
					A_4 h
					A_4 m
					A_4 s

Licence CC BY-NC-ND 3.0

(*) : Paramètres dont le choix est à privilégier

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Tableau 34 : Classification des sols sableux et graveleux avec fines : Classe B (LCPC-SETRA, 2000a)

← CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES REMBLAIS →

← CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES COUCHES DE FORME →

Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		Classement selon le comportement	
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état	Paramètres de comportement	sous classe fonction du comportement
Dmax ≤ 50 mm et Tamisat à 80 µm ≤ 35%	B Sols sableux et graveleux avec fines	tamisat à 80 µm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% 0,1 ≤ VBS ≤ 0,2	B_1 Sables silteux...	Matériaux généralement insensibles à l'eau		FS ≤ 60	B_{11}
						FS > 60	B_{12}
		tamisat à 80 µm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% VBS > 0,2	B_2 Sables argileux (peu argileux)...	IPI (*) ≤ 4 ou $w_n \geq 1,25\ w_{OPN}$	B_2 th	FS ≤ 60	B_{21} th
						FS > 60	B_{22} th
				4 < IPI (*) ≤ 8 ou $1,10\ w_{OPN} \leq w_n < 1,25\ w_{OPN}$	B_2 h	FS ≤ 60	B_{21} h
						FS > 60	B_{22} h
				$0,9\ w_{OPN} \leq w_n < 1,10\ w_{OPN}$	B_2 m	FS ≤ 60	B_{21} m
						FS > 60	B_{22} m
				$0,5\ w_{OPN} \leq w_n < 0,9\ w_{OPN}$	B_2 s	FS ≤ 60	B_{21} s
						FS > 60	B_{22} s
				$w_n < 0,5\ w_{OPN}$	B_2 ts	FS ≤ 60	B_{21} ts
						FS > 60	B_{22} ts
		tamisat à 80 µm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% 0,1 ≤ VBS ≤ 0,2	B_3 Graves silteuses...	Matériaux généralement insensibles à l'eau		LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B_{31}
						LA > 45 et MDE > 45	B_{32}

(*) : Paramètres dont le choix est à privilégier

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Annexe 1.2. Classification LPC/USCS **(Magnan, 1997)**

La classification LPC (1965) utilise les résultats d'essais classiques d'identification des sols :

- des critères granulométriques :
  - les pourcentages de gravier, sable et particules fines (tamisats à 2 mm et 0,08 mm) ;
  - la forme de la courbe granulométrique :
    - coefficient d'uniformité ou de Hazen C_u
    - coefficient de courbure C_c ;
- les caractéristiques de plasticité w_L et I_P , et la ligne A d'équation $I_P = 0{,}73\ (w_L - 20)$ (relation de Casagrande
- la teneur en matières organiques

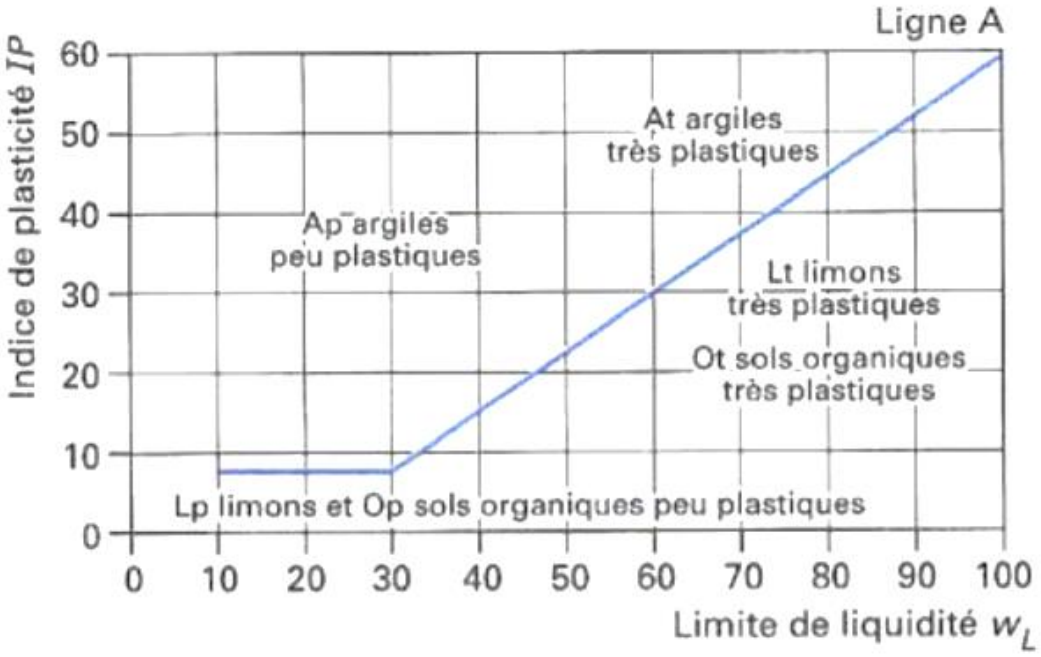


Figure 75 : – Classification des sols fins en laboratoire : Diagramme de plasticité

Licence CC BY-NC-ND 3.0

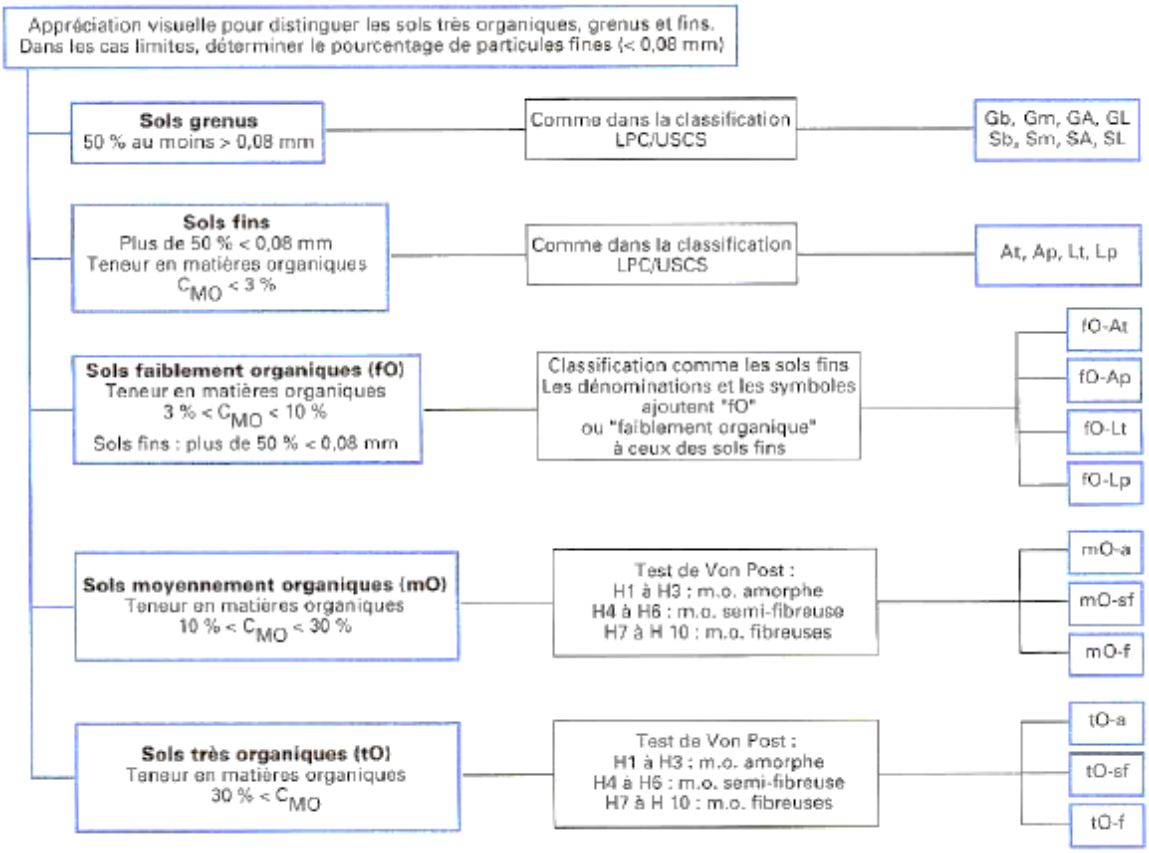


Figure 76 : Classification des sols ; LCP modifiée (1974/1980)

Tableau 35 : Signification des symboles de classification LPC

Catégorie	Symbole	Signification
Éléments du sol	G	Grave. Le gravier est la fraction principale
	S	Sable. Le sable est la fraction principale
	L	Limon ou limoneux
	A	Argile ou argileux
	T	Tourbe
	O	Organique. Le sol contient des matières organiques
Granularité du sol	b	Bien gradué
	m	Mal gradué
Plasticité du sol	t	Très plastique
	p	Peu plastique
Autres symboles	a	à matière organique amorphe
	sf	à matière organique semi-fibreuse
	f	à matière organique fibreuse

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Annexe 1.3. Classification américaine des sols selon HRB (HIGHWAY RESEARCH BOARD)

Tableau 36 : Paramètres de classification HRB

Classification générale		**SOLS GRENUS**							**SOLS FINS**				
Groupe ou sous-groupe de classification		A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
		A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
Analyse granulométrique % de passant au tamis	2 mm	max. 50											
	0,5 mm	max. 30	max. 50	max. 50									
	80 µm	max. 15	max. 35	max. 10	max. 35	max. 35	max. 35	max. 35	min. 35	min. 35	min. 35	min. 35	min. 35
Caractéristiques du mortier (Fraction passant au tamis de 0,5mm)	Limite de liquidité				max. 40	min. 40	max. 40	min. 40	max. 40	max. 40	max. 40	min. 40	min. 40
	Indice de plasticité	max. 6	max. 6		max. 10	max. 10	min. 10	min. 10	max. 10	max. 10	min. 10	min. 10 $I_p<w_L-30$	min. 10 $I_p>w_L-30$
Indice de groupe (IG)		0	0	0	0	0	max. 4	max. 4	max. 8	max. 12	max. 16	max. 20	max. 20
Type de matériaux habituels significatifs		Pierres, graviers et sable		Sable fin	Graviers et sables limoneux ou argileux				Sols limoneux		Sols argileux		

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Classification générale	SOLS GRENUS	SOLS FINS
Estimation générale comme sous-sol de chaussée	EXCELLENT A BON	PASSABLE A MAUVAIS
NB : Pour chaque sol identifié, on indiquera après son symbole de groupe, son indice de groupe entre parenthèses : Exemples : A – 2 – 6 (3) ou A -7 – 5 (17)		

L'indice du groupe (IG) est calculé d'après l'équation suivante :

$$IG=0,2a+0,005.a.c+0,01.b.d \qquad \text{Équation 51}$$

L'indice du groupe est arrondi au nombre entier le plus proche ; la valeur 0,50 est prise pour l'unité.
Si **x** est le pourcentage de passant à 80 µm, alors :

Tableau 37 : Valeurs de a, b, c et d en fonction de % des fines (classification HRB)

Valeur de a		Valeur de b		Valeur de c		Valeur de d	
x < 35	a = 0	x < 15	b = 0	w_l < 40	c = 0	Ip < 10	d = 0
35 < x < 75	a = x -35	15 < x < 55	b = x -15	40 < w_l < 60	c = wl -40	10 < Ip < 30	d = Ip -10
Si x > 75	a = 40	x > 55	b = 40	wl > 60	c = 20	Ip > 30	d = 20

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Annexe 2. Références Proctor des mélanges (TB/CNP)

Cette annexe ressort les courbes de l'essai Proctor Modifié des mélanges (TB/CNP)

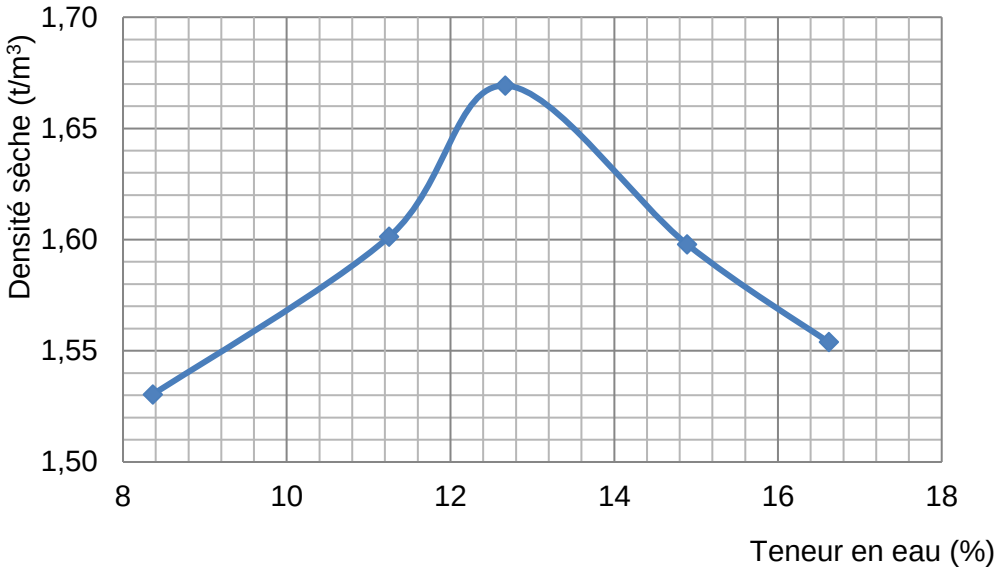


Figure 77 : Courbe Proctor Modifié du mélange 37

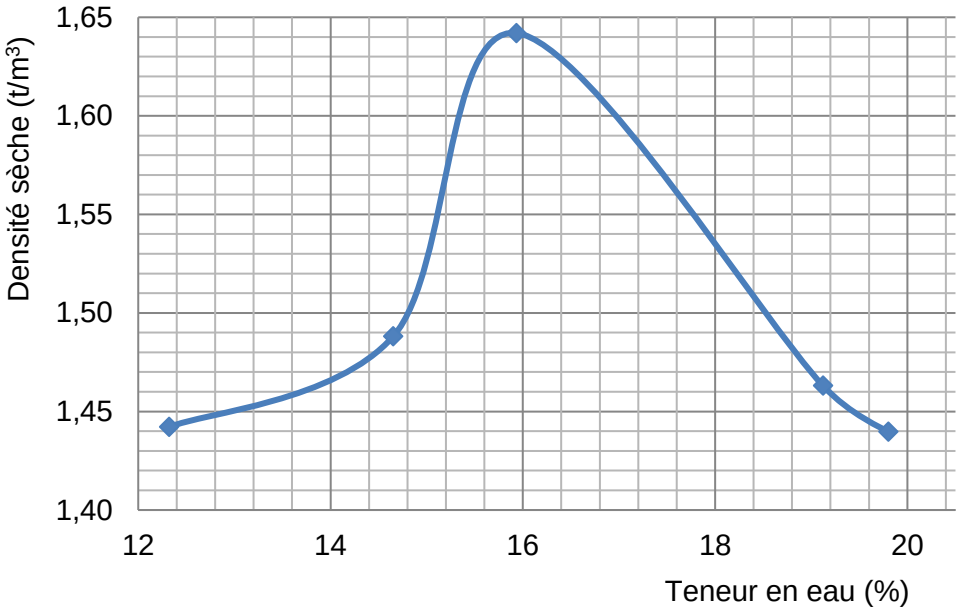


Figure 78 : Courbe Proctor Modifié du mélange 46

Licence CC BY-NC-ND 3.0

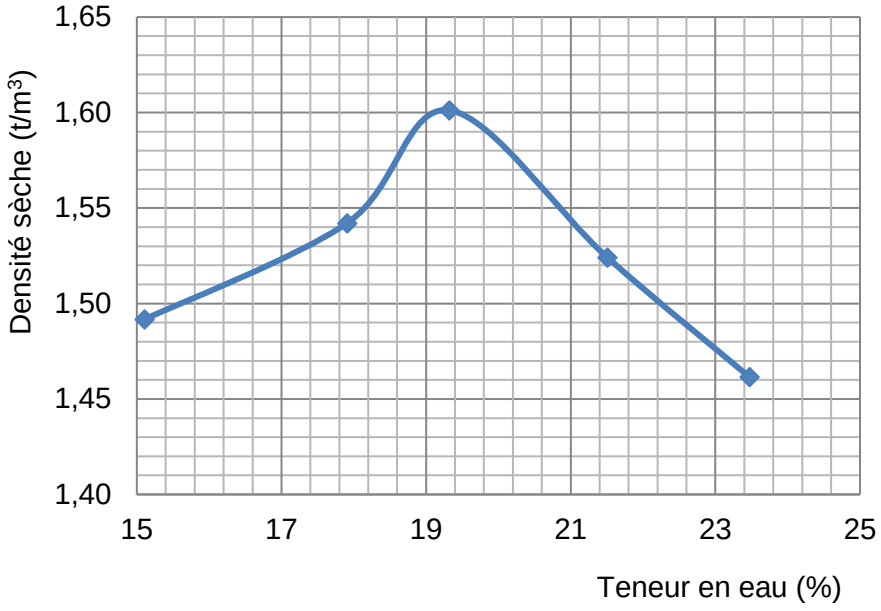


Figure 79 : Courbe Proctor Modifié du mélange 54

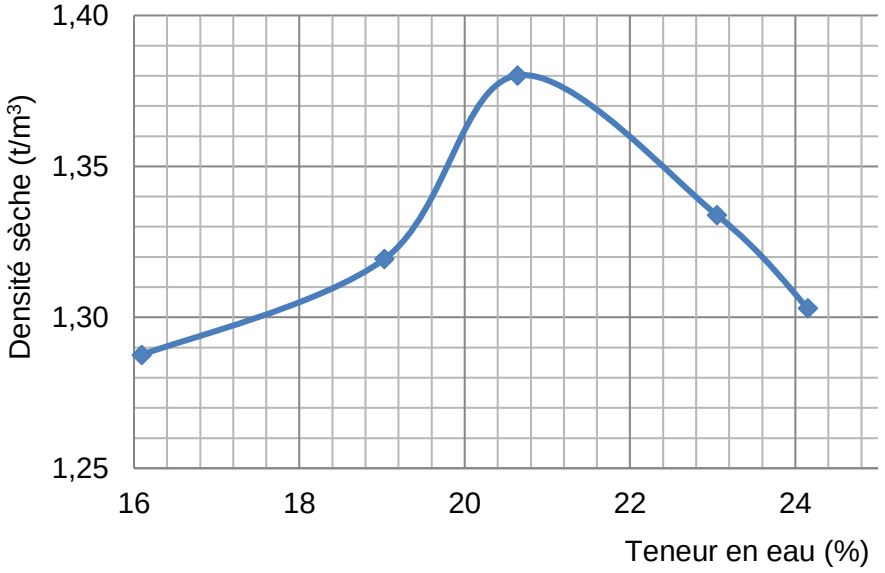


Figure 80 : Courbe Proctor Modifié du mélange 67

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Annexe 3. Fiche produit EB10

Document 1 : Fiche produit d'un *EB10 roulement /liaison*
(Corrèze Enrobés, centrale d'Egletons, EUROVIA PCL)

Catalogue de poste

CORREZE ENROBES

FICHE PRODUIT

NF EN 13 108-1

EB 10 roulement / liaison 35/50

BBSG 3 0/10

Etude de niveau 2

Intervention	Etude réalisée par	Etude réalisée pour	Référence et Date de l'étude	Date de validité
LJM 09_001/13	Eurovia Management DTSO	Catalogue de poste Corrèze Enrobés	BDX 08_373/01 de Octobre 2008	octobre-13

Origine des échantillons	Code centrale
Moyennes granulométriques 2008	4

FORMULATION

		% inférieur	% supérieur
0/4	LAPLEAU	33,2 %	35,0 %
4/6	LAPLEAU	18,9 %	20,0 %
6/10	LAPLEAU	39,7 %	42,0 %
Fines :	Filler d'apport	2,8 %	3,0 %
Ajout :			
Liant:	BITUME 35/50	5,4 %	5,7 ppc

CARACTERISTIQUES INTRINSEQUES

Nature granulats: Granite

MVRG (NF EN 1097-6 & 7):	2645	Kg/m³
MVRE (NF EN 12697-5) :	2439	Kg/m³
Module de richesse:	3,48	
Surface spécifique:	11,71	m²/kg
TL_{mix} :	5,2	%
Pénétrabilité :	40	1/10mm
Bille- Anneau :	52,4	°C
Température du mélange :	150-190	°C

Granulométrie (NF EN 933-1) - Passant en %

Tamis	0/4	4/6	6/10	Filler	Mélange	Courbe étude
20	100	100	100	100	100	100,0
16	100	100	100	100	100	100,0
14	100	100	100	100	100	100,0
12,5	100	100	100	100	100	100,0
10	100	100	85	100	93,7	96,2
8	100	100	38	100	74,0	77,7
6,3	100	89	10	100	60,0	60,8
4	96	14	2	100	40,3	40,7
2	66	4	1,3	100	27,5	27,6
1	45	2,3	1,2	100	19,9	20,1
0,5	32	1,6	1,1	98,6	14,9	15,4
0,315	26	1,8	1,0	95,7	12,7	13,3
0,250	23	1,7	1,0	93,9	11,7	12,1
0,125	16	1,4	0,9	86,5	8,8	9,1
0,08	12,2	1,3	0,8	81,6	7,3	7,4
0,063	10,6	1,1	0,7	79,8	6,6	6,5
MVRG	2,65	2,64	2,64	2,70	2,645	

Courbe granulométrique du mélange

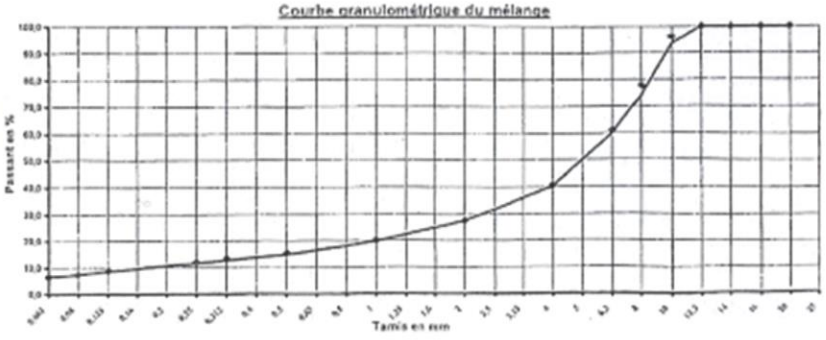


Figure 81 : Fiche produit EB10

Licence CC BY-NC-ND 3.0

VALORISATION DES COQUES DE NOIX DE PALMISTE DANS LA CONSTRUCTION DES ROUTES A FAIBLE TRAFIC

La production de l'huile de palme génère plusieurs déchets dont les coques de noix de palmistes (CNP). Face à l'épuisement des ressources naturelles, utilisables en technique routière, la valorisation des déchets agricoles comme les coques de noix de palmiste constitue une solution alternative d'avenir pour les pays producteurs du palmier à huile. Cette thèse étudie l'utilisation des coques de noix de palmiste comme agrégat grossier dans la formulation des composites, proposables comme matériaux de couches d'assises des chaussées à faible trafic. La première partie du manuscrit traite de l'élaboration des mélanges des coques de noix de palmiste et de la terre de barre (terre latéritique abondante dans le sud du Bénin) pour une utilisation en couche de fondation. Les proportions volumiques de chaque composite sont déterminées par la loi parabolique de Fuller-Thompson. Au laboratoire, les essais géotechniques sur le sol latéritique et sur les composites ont montré que l'ajout de 61% des CNP à la terre de barre augmente l'indice CBR de 76% à 95% de l'optimum Proctor Modifié. L'ajout de 15% de sable lagunaire dans la formulation a permis de réduire la plasticité de 29%. Ainsi, le composite (39 % de sol latéritique + 61 % de CNP) avec un indice CBR égal à 30 et le composite (45 % de sol latéritique, 40 % de CNP et 15 % de sable de lagune) avec un indice CBR égal à 41 sont utilisables en couche de fondation des routes à faible trafic. La deuxième partie est consacrée au remplacement dans un béton bitumineux semi grenu 0/10 utilisable en couche de roulement des gros granulats classiques par les coques de noix de palmiste. Les différentes compositions granulaires sont obtenues par le modèle d'empilement compressible de De Larrard. La tenue à l'eau, étudiée à travers l'essai de Duriez montre que les CNP peuvent remplacer les granulats grossiers dans les enrobés des chaussées à faible trafic. La valorisation des coques de noix de palmistes en technique routière, constitue une grosse solution technico-économique dans le désenclavement des milieux ruraux des pays tropicaux et surtout pour le transport des produits des zones de production vers celles de transformation et de consommation.

Mots-clés : Coques de noix de palmiste, terre de barre, couche de fondation, loi parabolique de Fuller, Modèle d'empilement compressible, couche de roulement

VALORIZATION OF PALM KERNEL SHELL IN THE CONSTRUCTION OF LOW-TRAFFIC ROADS

The The production of palm oil generates several wastes including palm kernel shells (PKS). Facing the depletion of natural resources that can be used in pavement construction, the recovery of agricultural waste such as palm kernel shells is an alternative solution for the future for oil palm producing countries. This thesis studies the use of palm kernel shells as coarse aggregate in the formulation of composites materials. The latter can be used as subbase course materials for low-traffic pavements. The first part of the manuscript deals with the production of mixtures of palm kernel shells and lateritic soil (lateritic soil abundant in the south of Benin) for use as a foundation layer. Parabolic law of Fuller-Thompson is utilized to determine the volume proportions of each composite. In the laboratory, geotechnical experiments on lateritic soil and on composites have shown that the addition of 61% PKS increases the CBR index from 76% to 95% of the Modified Proctor optimum. The addition of 15% lagoon sand in the formulation decreases the plasticity by 29%. Thus, the composites with a CBR index of 30 (39% lateritic soil + 61% PKS) and 41 (45% lateritic soil, 40% PKS and 15% lagoon sand) can be used in the foundation layer for low traffic roads. The second part focuses on the substitution of the traditional coarse aggregates by palm kernel shells in a semi-grained bituminous concrete 0/10. This type of asphalt is usable in surface wearing course. The different granular compositions are obtained by the compressible stacking model of De Larrard. The moisture resistance, studied through the Duriez test, shows that PKS can be a good alternative of coarse aggregates in lightly trafficked pavement mixes. The valorization of palm kernel shells in transportation technology is a major technical and economical solution to provide a better access to the rural areas in tropical countries. Especially, it can be useful for the transport of products from production areas to those of processing and consumption.

Keywords: palm kernel shells, lateritic soil, sub base layer, parabolic law of Fuller-, compressible packing model, surface wearing course