

Étude et valorisation des cendres de tailles micrométriques et
nanométriques issues d'un réacteur de pyrolyse des coques
d'anacarde : Application aux bétons hydraulique et
bitumineux

Par

Augias Laurens Louison T. ANAGONOU

THESE PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DU
DOCTORAT EN GENIE
Ph.D.

MONTRÉAL, LE 20 AOÛT 2020

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés, Augias Anagonou, 2020

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Victor Songmene, directeur de thèse
Département génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Thierry Godjo, codirecteur de thèse
Département génie industriel à l'Institut National Supérieur de Technologie Industrielle de
l'Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques Abomey

Robert Hausler, président du jury
Département génie de la construction à l'École de technologie supérieure

François Garnier, membre du jury
Département génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Edmond Adjovi, membre de jury externe
Département génie civil à l'Institut National Supérieur de Technologie Industrielle de
l'Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques Abomey

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 15 JUILLET 2020

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens avant tout à exprimer ma reconnaissance à mon directeur de recherche, Professeur **Victor Songmene**, pour avoir accepté de m'encadrer dans cette étude. Je le remercie pour son implication, son soutien et ses encouragements tout au long de ce travail.

Je souhaite également remercier mon co-directeur, Professeur **Thierry Godjo**, pour avoir su me faire confiance et m'avoir conseillé tout au long de ces années.

Merci aux membres de jury pour avoir accepté d'évaluer mon travail.

J'aimerais souligner la contribution de Monsieur **Pierre Dagbedji**, ingénieur du laboratoire géotechnique de l'entreprise ADEOTIE Sarl au Bénin pour son aide dans la réalisation des essais Marshall sur les bétons bitumineux étudiés dans ce travail.

Je remercie également **Dr Jules Kouam** pour son implication dans l'analyse granulométrique des particules de cendre.

Je remercie mon père **Marcel Anagonou** et ma mère **Yolande Anagonou** pour leurs précieux conseils méthodologiques.

Je souhaite également remercier mes frères **Corneille et Sergio** pour leur soutien moral.

Merci aux professeurs de l'école de technologie supérieure de Montréal (Canada) et ceux de l'INSTI Abomey (Benin).

J'adresse des remerciements particuliers à tous ceux qui ont accepté de participer à cette thèse et sans qui ce travail n'aurait jamais vu le jour.

Étude et valorisation des cendres de tailles micrométriques et nanométriques issues d'un réacteur de pyrolyse de coques d'anacarde : Application aux bétons hydraulique et bitumineux

Augias Laurens Louison T. ANAGONOU

RÉSUMÉ

Le développement industriel a entraîné au fil des années une importante production des matières résiduelles et des matières organiques dans le monde. Au Canada ou au Bénin, la gestion de ces matières résiduelles constitue un véritable problème. Ainsi, une mauvaise gestion des sites d'enfouissements entraînera plus tard une infiltration du lixiviat dans la nappe phréatique avec des risques d'impacts environnementaux potentiellement élevés. C'est dans le but de réduire ces risques que l'étude de valorisation des cendres des coques d'anacarde a été menée. L'anacarde est une culture de grande importance au Bénin (près de 150 000 tonnes/an). Son traitement industriel entraîne une production abondante de coques déchets (plus de 10 000 tonnes) difficiles à gérer car ils sont corrosifs, nocifs et toxiques. Une expérience de valorisation des coques d'anacarde par pyrolyse avait été menée au Bénin mais celle-ci génère des cendres qui doivent aussi être aussi valorisées.

Cette étude consiste en l'incorporation des cendres dans du béton hydraulique ou du béton bitumineux. Les différents ajouts de cendres, se substituent à la quantité de ciment additionné au béton, graduellement à des proportions de **5%, 10%, 15%, 20%** et **25%** de cendres. Les caractéristiques physico-mécaniques y afférant à savoir la résistance à la compression, la résistance à la traction, la conductivité hydraulique et l'affaissement du béton dans le temps ont été déterminées. Aussi, le même travail a été réalisé avec le béton bitumineux et les caractéristiques dudit mélange à savoir la stabilité, la compacité, le fluage et l'épaisseur ont été déterminées. L'ajout progressif de cendres dans le béton bitumineux a entraîné une diminution des filets dans le béton bitumineux.

Mots clés : Coques d'anacardes, cendres, béton hydraulique, béton bitumineux, stabilité, fluage, résistance à la traction, résistance à la compression.

Study and valorization of micrometric and nanometric sizes ashes from a pyrolysis of cashew nut shells : Application to hydraulic and bituminous concretes

Augias Laurens Louison T. ANAGONOU

ABSTRACT

Over the years, industrial development has led to a significant production of residual materials and organic matter around the world. In Canada and Benin, the management of these residual materials is a real problem. Thus, poor management of landfill sites will later lead to leachate infiltration into the water table with potentially high environmental impact risks. The cashew nut shell ash recovery study was conducted to reduce these risks. Cashew nut is a crop of great importance in Benin (nearly 150,000 tons/year). Its industrial processing leads to an abundant production of waste shells (more than 10,000 tons) which are difficult to manage because they are corrosive, harmful and toxic wastes. An experiment to recover cashew nut shells by pyrolysis had been carried out in Benin, but this generates ash which must also be recovered. This study consists in incorporating the ashes into hydraulic concrete or bituminous concrete. The different ash additions replace the quantity of cement added to the concrete, gradually at proportions of 5%, 10%, 15%, 20% and 25% ash. The related physical-mechanical characteristics, i.e. compressive strength, tensile strength, hydraulic conductivity and slump of the concrete over time have been determined. Also, the same work was carried out with bituminous concrete and the characteristics of the said mixture, namely stability, compactness, creep and thickness were determined. The progressive addition of ashes in the asphalt concrete resulted in a decrease of the threads in the asphalt concrete.

Key words : Cashew nut shells, ashes, hydraulic concrete, bituminous concrete, stability, creep, tensile strength, compressive strength

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE DE LITTÉRATURE.....	9
1.1 Introduction.....	9
1.2 Revue critique des méthodes de traitement de déchets.....	9
1.3 Les réacteurs thermiques.....	11
1.3.1 Les différents types de réacteurs thermiques	11
1.3.2 La gazéification des déchets	11
1.3.3 La pyrolyse.....	13
1.4 Les cendres végétales.....	14
1.4.1 Composition des cendres végétales	14
1.4.2 Les propriétés physico-mécaniques des cendres végétales.....	16
1.4.3 Méthode de captation des cendres	17
1.4.4 Les aspects de valorisation des cendres	18
1.5 La stabilisation solidification.....	19
1.6 La Solution proposée : le traitement des déchets par solidification-stabilisation (s/s).....	21
1.6.1 Étude des différentes étapes de traitements des déchets par la (s/s)	21
1.6.2 Définition de la méthode de Stabilisation Solidification (S/S).....	22
1.6.3 La vérification du monolithe obtenu à l'aide d'essais géotechniques.....	25
1.6.4 Les retombées immédiates.....	25
1.6.5 Les paramètres à prendre en compte.....	25
1.7 Conclusion	29
CHAPITRE 2 DESCRIPTION DE LA MÉTHODOLOGIE	31
2.1 Introduction.....	31
2.2 Cadre d'étude	31
2.2.1 Analyse granulométrique	32
2.2.2 Équivalence de sable (ES)	33
2.2.3 Essais sur l'affaissement du béton frais	36
2.2.4 Béton durci.....	37
2.3 Essai sur le béton bitumineux	40
2.3.1 Essai de pénétration à l'aiguille VICAT	40
2.3.2 Essai Bille-Anneau.....	41
2.3.3 Essai Marshall.....	42
2.4 Conclusion	50

CHAPITRE 3 ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS PHYSICO-MÉCANIQUES DU BÉTON HYDRAULIQUE CONTENANT DES CENDRES DE COQUES D'ANACARDES DE TAILLES MICROMÉTRIQUES ET NANOMÉTRIQUES SUBSTITUANT PARTIELLEMENT LE CIMENT	51
3.1 Introduction.....	51
3.2 Matériaux et Méthodes	55
3.3 Résultats expérimentaux	62
3.3.1 La résistance à la compression.....	62
3.3.2 La résistance à la traction.....	63
3.3.3 Essai de conductivité hydraulique du béton	64
3.3.4 Mesure de l'affaissement du béton frais.....	66
3.4 Analyse et discussion des résultats	66
3.5 Conclusion	68
CHAPITRE 4 VALORISATION DES CENDRES ISSUES DE LA PYROLYSE DES COQUES DÉCHETS DE NOIX D'ANACARDES DANS LE BÉTON BITUMINEUX : IMPACT SUR LES PROPRIÉTÉS PHYSICO- MÉCANIQUES DU BÉTON	71
4.1 Introduction.....	71
4.2 Matériels et matériaux.....	74
4.2.1 Matériaux	74
4.2.2 Matériels	77
4.3 Méthodes et résultats expérimentaux.....	77
4.4 Analyse et discussions des résultats.....	88
4.5 Conclusion	93
CHAPITRE 5 Analyse et discussion	96
5.1 Introduction.....	96
5.2 Le choix des pourcentages de cendres à mettre dans les mélanges	96
5.3 Autres Facteurs pouvant affecter la performance du mélange.....	97
5.3.1 Maniabilité et rhéologie	97
5.3.2 Retard de prise	98
5.3.3 Température d'hydratation.....	98
5.3.4 Résistance mécanique et durabilité.....	98
5.4 Interaction entre les éléments chimiques des cendres et le béton.....	99
5.5 Conséquence de la cendre de coque d'anacarde sur la santé humaine	101
5.6 La contribution du travail.....	102
5.7 Conclusion	103
5.8 Recommandation	103
CONCLUSION GENERALE.....	105
BIBLIOGRAPHIE.....	106

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 0-1: Bilan de la gestion des déchets résiduel par les ménages de 1998 à 2000	3
Tableau 1-1: Composition chimique des cendres végétales	15
Tableau 1-2: Valorisation des cendres végétales (exemple sur les cendres du riz)	19
Tableau 1-3: Répartition des différents essais réalisables sur la s/s.	27
Tableau 3-1: Composition chimiques des cendres de coque d'anacarde Source (Anowai et Job, 2017).....	58
Tableau 3-2: Mesures de l'affaissement moyen du béton frais	66
Tableau 4-1: Résultats de l'essai Marshall à 00% de cendre	82
Tableau 4-2: Résultats de l'essai Marshall à 05% de cendre.....	82
Tableau 4-3: Résultats de l'essai Marshall à 10% de cendre.....	82
Tableau 4-4: Résultats de l'essai Marshall à 15% de cendre.....	82
Tableau 4-5: Résultats de l'essai Marshall à 20% de cendre.....	82
Tableau 4-6: Résultats de l'essai Marshall à 25% de cendre.....	82

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 0-1 : Plan de gestion des matières résiduelles au Québec.	04
Figure 0-2 : Schéma montrant les différentes méthodes de traitement des déchets	05
Figure 0-3 : Évolution de la quantité de noix d’anacarde produites dans le monde 1905-2013	07
Figure 2-1: Série de tamis pour analyse granulométrique	33
Figure 2-2: Image du fluo mètre	50
Figure 3-1 : Filières de traitement envisageables pour les déchets organiques	52
Figure 3-2 : Analyse granulométrique du sable et du gravier utilisé	56
Figure 3-3 :Processus de transformation des coques d’anacarde en cendre	57
Figure 3-4 : Image des cendres expérimentales de coques d’anacarde	58
Figure 3-5 :Distribution granulométrique des cendres expérimentales de coques	59
Figure 3-6 : Composition des cendres de coque d’anacarde utilisées	59
Figure 3-7 : Étude comparative des principales compositions des cendres végétales et du ciment.....	60
Figure 3-8 :Image montrant la production du béton hydraulique	62
Figure 3-9 : Diagramme exprimant la résistance à la compression (MPa) du béton en fonction des jours d'écrasement du béton.....	63
Figure 3-10 : Diagramme exprimant la résistance à la traction du béton (Mpa) en fonction des jours d'écrasement du béton.....	64
Figure 3-11 : Diagramme exprimant la conductivité hydraulique du béton en fonction des jours d'écrasement du béton.....	65
Figure 4-4: Image du bitume utilisé.....	76
Figure 4-5: presse pour l'essai Marshall	77
Figure 4-6: Exemples d’échantillons de béton bitumineux fabriqués et testés.....	78

Figure 4-7: Processus de réalisation de l'essai Marshall	81
Figure 4-8: Coupe transversale d'une route (http://www.cours-genie-civil.com/wp-content/uploads/Cours_route_Module_C5_IUT.pdf consulté le 31-03-19)	88
Figure 4-9: Stabilité du mélange bitumineux en fonction des pourcentages des cendres ajoutées	89
Figure 4-10: fluage du mélange bitumineux	89
Figure 4-11: Compacité du mélange bitumineux	90
Figure 4-12: Figure montrant l'épaisseur des carottes	90
Figure 4-13: Étude comparative des principales compositions des cendres végétales et du ciment. Adapté de (Anowai et job, 2017)	92

INTRODUCTION

Le développement industriel a fait le nid à la production d'une grande quantité de déchets. Ainsi en Afrique de l'ouest on assiste à une grande production de déchets de coque d'anacarde. Cette dernière est dû à une grande production des noix d'acajou, qui pouvait atteindre une quantité de plus de 1.900.000 tonnes en Afrique de l'ouest. Cette énorme quantité de noix d'anacarde génère 1.300.000 tonnes de cendre.

Il existe deux différentes sortes de déchets à savoir les déchets industriels et domestiques. Ces derniers ne sont à priori pas nuisibles pour les êtres vivants. Seuls les déchets industriels constituent un véritable danger pour les êtres vivants, dans le cas où on assiste à une mauvaise gestion de ceux-ci et aussi une présence des métaux lourds.

La croissance de la population a engendré une énorme augmentation de la quantité de déchets domestique à traiter. Ainsi on ne peut plus s'attendre à ce que ces déchets se dégradent de façon naturelle car cela prendrait beaucoup plus de temps à se produire. On pourrait par exemple prendre les cas décrits dans la figure 0-1. A tout ceci, il faut noter que la dégradation naturelle des métaux lourds est quasiment impossible.

On est obligé de pratiquer un traitement des déchets à l'échelle industrielle dans le but de préserver l'atmosphère. Mis à part la production de déchets domestiques, on assiste aussi à une importante production de déchets industriels avec tout ce que cela comporte comme problème sur la santé humaine. On pourra conclure, qu'avec le temps, la matière résiduelle (déchets domestiques plus déchets industriels) produite annuellement augmente considérablement.

Le développement technologique a permis l'utilisation abusive des ressources naturelles et la production d'une grande quantité de matières résiduelles (déchets industriels plus déchets domestiques). En général il existe trois types de pollution environnementale :

- * **la pollution du sol;**
- * **la pollution de l'air;**
- * **la pollution de l'eau.**

Ces trois types de pollutions ont un lien commun qui sont les matières résiduelles. La mauvaise gestion des matières résiduelles entraîne une pollution environnementale.

Selon statistique canada, en 2012, le Canada a produit **33,4 millions tonnes** de matières résiduelles, parmi lesquelles 25 ont été envoyées, soit dans des incinérateurs, soit dans des sites d'enfouissement et 8,4 récupérées pour le compostage (matières organiques) ou le recyclage (papier, verre, plastique).

Notons, qu'au Canada 25 millions de tonnes de matières résiduelles sont destinées, soit à l'incinération, soit à l'enfouissement. Même les cendres des déchets incinérés se feront finalement enfouis. La figure 0-4 présente les deux options de finalité potentiellement possible aux matières résiduelles au Canada, en 2012. Il faut remarquer une grande production de déchets au niveau du Québec. Il serait opportun d'avoir d'autres méthodes de recyclage de déchets au Québec.

L'enfouissement des déchets est nocif pour la santé humaine (**Quintus, 2007**). Utiliser la méthode d'enfouissement pour traiter les déchets, c'est créer un autre problème, pire que celui qu'on voulait résoudre. En effet, après enfouissement des déchets, on assiste à la putréfaction des matières organiques, qui finissent par produire une lixiviation riche en contaminant et un gaz. Ce lixiviat est nuisible pour la santé humaine.

Il faut remarquer que le Québec est en train progressivement d'abandonner la politique de création de site d'enfouissement. Il faudra trouver une bonne méthode pour traiter les matières résiduelles. Et c'est le but de notre projet. La figure 0-5 présente l'énorme quantité de sol enfouis et de sol traites par année. Remarquons la grande quantité de sol enfouis. Le pic est obtenu en 2001 avec plus de 350.000 tonnes de sol enfouis. Ceci constitue un désastre environnemental.

La gestion des déchets constitue un véritable défi pour les municipalités. Les déchets demeurent dangereux du stockage jusqu'à sa phase de traitement. Déjà, la définition du mot déchet, n'est pas compris de la même manière par tout le monde. Cette dernière dépend des cultures, des croyances religieuses et des peuples. Au Québec, on se remet à la définition du Professeur (**Galvez, 2012**) de l'université Laval qui le définit comme « Résidus solides, liquides ou gazeux provenant d'activités industrielles, commerciaux ou agricoles, détritiques, ordures ménagères, débris de démolition, rebuts pathologiques, cadavres d'animaux, carcasses de véhicules automobiles, pneus hors d'usage, contenants vides et rebuts de toute nature, à l'exclusion des résidus miniers et des matières dangereuses ».

De nos jours, il serait inconcevable de toujours prôner l'ouverture des sites d'enfouissement car ceux-ci ne sont plus conseillés. Le lixiviat qui en résulte ainsi que le gaz qui s'y dégage sont des produits très toxiques. Toutefois, remarquons que d'une année à l'autre on assiste à une meilleure gestion des déchets résiduels par les ménages comme le montre le tableau 0-1.

Tableau 0-1: Bilan de la gestion des déchets résiduel par les ménages de 1998 à 2000

Source : (Galvez, 2012)

Destination	1988	1992	1994	1996	1998	2000
Génération	7.002.000	7.111.000	7.183.000	8.497.000	9.078.000	10.892.000
Elimination	5.744.000	5.513.000	5.189.000	5.491.000	5.705.000	7.056.000
Récupération	1.258.000	1.598.000	1.994.000	3.006.000	3.373.000	3.836.000
Taux de récupération	18%	22%	28%	35%	37%	35%
Population	6.860.400	7.150.000	7.275.000	7.208.884	7.334.094	7.372.448
Taux par habitant (tonne/personne/année)						
Génération	1.02	0.99	0.99	1.18	1.24	1.48
Elimination	0.84	0.77	0.71	0.76	0.78	0.96
Récupération	0.18	0.22	0.27	0.42	0.46	0.52

Concernant les déchets récupérés, leur gestion est assez complexe. Une première partie des déchets sera directement envoyée dans un site d'enfouissement, la deuxième au recyclage et la 3ème restante sera traitée, mais finira quand même dans un site d'enfouissement. Au total, une

très grande majorité des déchets sera envoyée dans un site d'enfouissement. Cette culture d'envoi des déchets dans les sites d'enfouissement est révolue.

Aujourd'hui on doit penser à un mode de traitements écologiques de déchets afin de permettre leur réutilisation. La figure 0-6 présente un plan de gestion des matières résiduelles au Québec mettant en évidence l'état des lieux actuels et comment celles-ci sont traitées.

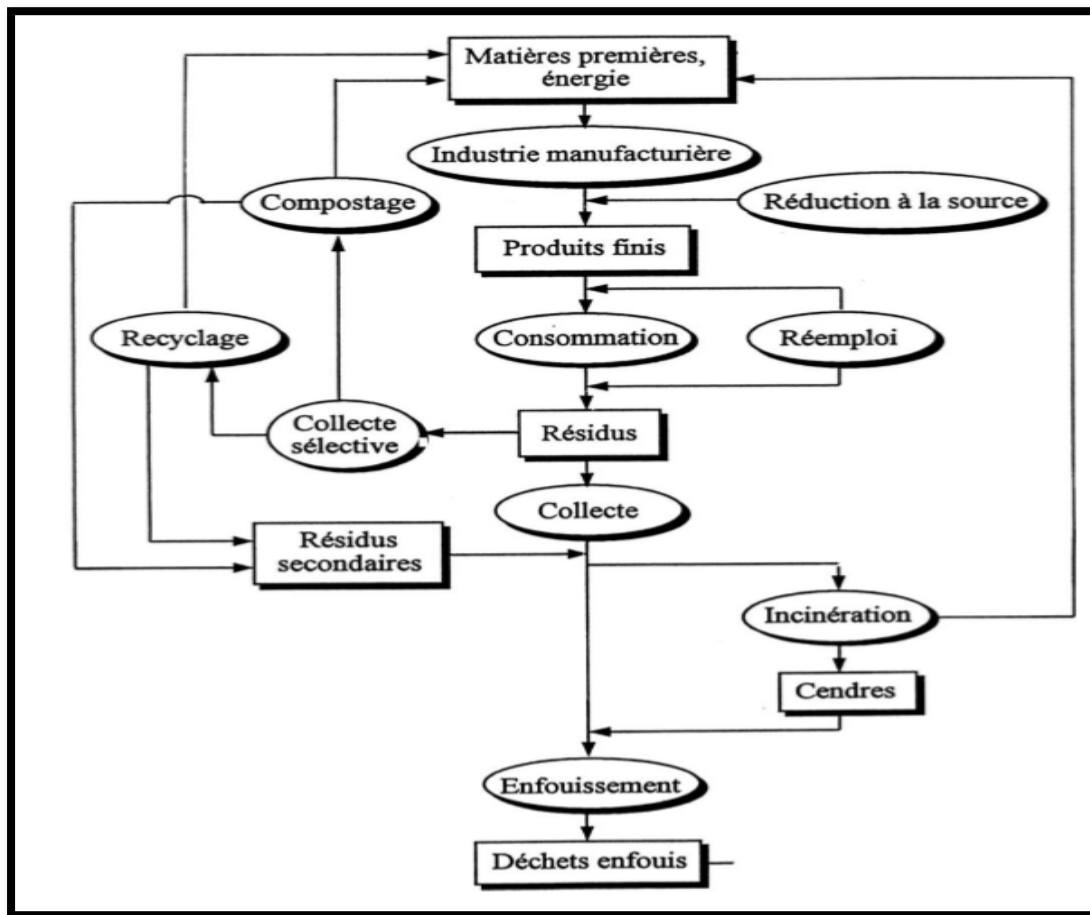


Figure 0-1: Plan de gestion des matières résiduelles au Québec.

Source : (Galvez, 2012)

Il existe différentes méthodes de traitement des déchets industriels. La valorisation des matières résiduelles qui ne peuvent être ni employées, ni recyclées, consiste à obtenir des éléments, des produits utiles ou à exploiter de l'énergie obtenus à partir de celles-ci. Cette

activité permet de réduire ou d'éliminer les coûts liés à la disposition des résidus tout en générant des revenus supplémentaires, (**Damien, 2013**).

Aujourd'hui, les méthodes de production de nouvelles ressources à partir de matières résiduelles sont diverses et nombreuses. Les filières de traitement peuvent être classées en trois grandes catégories comme le montre la figure 0-2.

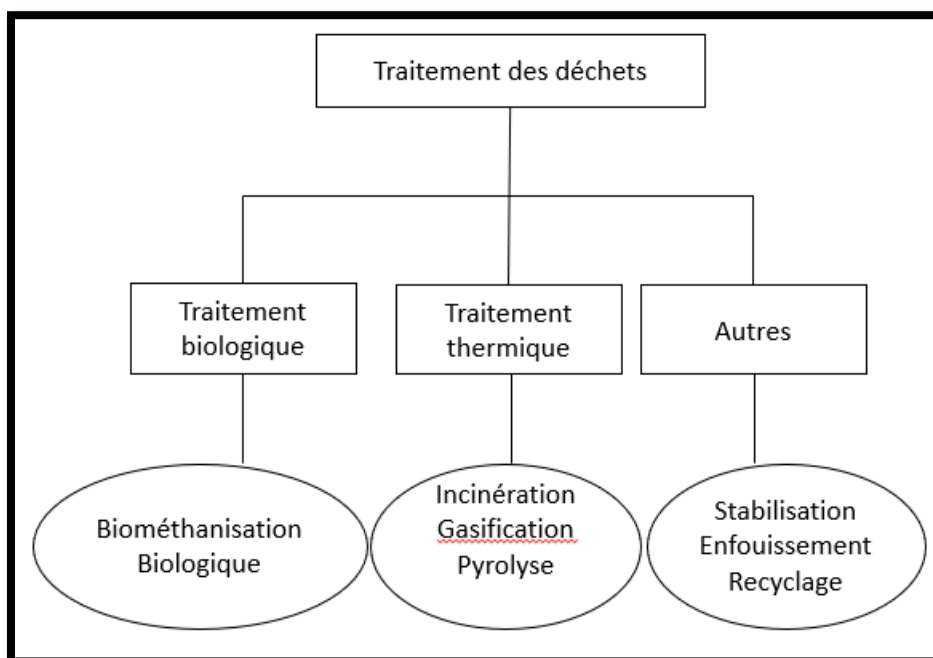


Figure 0-2: Schéma montrant les différentes méthodes de traitement des déchets

OBJECTIFS

La grande production des noix d'anacarde génère une grande quantité de coque d'anacarde. Ces derniers sont des déchets hautement toxiques nuisible pour l'environnement. Il est important de procéder aux traitements minutieux de ces déchets.

L'objectif principal de la thèse est d'étudier la valorisation des cendres issues d'un réacteur de pyrolyse des coques d'anacarde dans les bétons hydrauliques et bitumineux.

De façon spécifique, il s'agit de :

- Étudier les cendres (caractéristiques physico-chimiques, granulométrie) en vue de leur valorisation dans les bétons hydraulique et bitumineux ;

- Déterminer les conditions d'incorporation des cendres en substitution partielle du ciment dans le béton ;
- Étudier les propriétés physico-mécaniques du béton hydraulique contenant des cendres de coques d'anacarde substituant partiellement le ciment ;
- Étudier l'impact de l'ajout des cendres dans l'asphalte sur les propriétés physico-mécaniques du béton bitumineux.

Au cours de cette thèse nous allons procéder à la valorisation des cendres provenant de la pyrolyse coques d'anacarde, produits habituellement considérées comme des déchets. Il a été démontré au cours de cette thèse qu'on pouvait les utiliser comme adjuvant dans le béton et que ces cendres peuvent être un substitut partiel du ciment dans le béton hydraulique et du filet dans le béton bitumineux.

Les coques d'anacardes sont utilisées à cause de leur grande disponibilité en Afrique de l'ouest. Lors de la pyrolyse de ces coques, ces dernières sont transformées en charbon pour un usage domestique (**Godjo, 2017**). Une partie de l'huile produite lors de la pyrolyse peut être utilisée dans les industries et l'autre sert à l'auto-combustion des coques d'anacardes. Les restants (cendres de fond et cendres volantes) sont utilisés pour nos travaux expérimentaux. Une grande quantité d'anacardes est produite à travers le monde. La Figure 1-1 interpelle sur la gestion d'une grande quantité de coque d'anacarde. D'après **Godjo et al. (2015)**, les coques d'anacardes sec représentent 73% de la masse d'une noix d'anacardes. Donc l'amande ne représente que 27% de la masse du fruit. Ce qui nous a permis aussi de développer une technique de traitement écologique de cette grande quantité de déchets. La Figure 0-8 nous présente l'ampleur du problème :

La production annuelle des noix d'anacarde (ou noix de cajou) dans le monde a été multipliée par cinq entre 1985 et 2012 et a dépassé les 2 500 000 tonnes depuis 2013. Plus de la moitié de cette production est en Afrique (ouest et est) et l'autre grande partie en Asie. A en croire **Godjo et al. (2015)**, la production de 2 500 000 tonnes de noix d'anacardes génèrent près 1 825 000 de tonnes de déchets.

Ce sont ces déchets qui peuvent être transformés en charbon (Godjo et al. (2015), Godjo (2017)) et les cendres résiduelles (de fond) que nous voulons réutiliser dans des mélanges bitumineux.

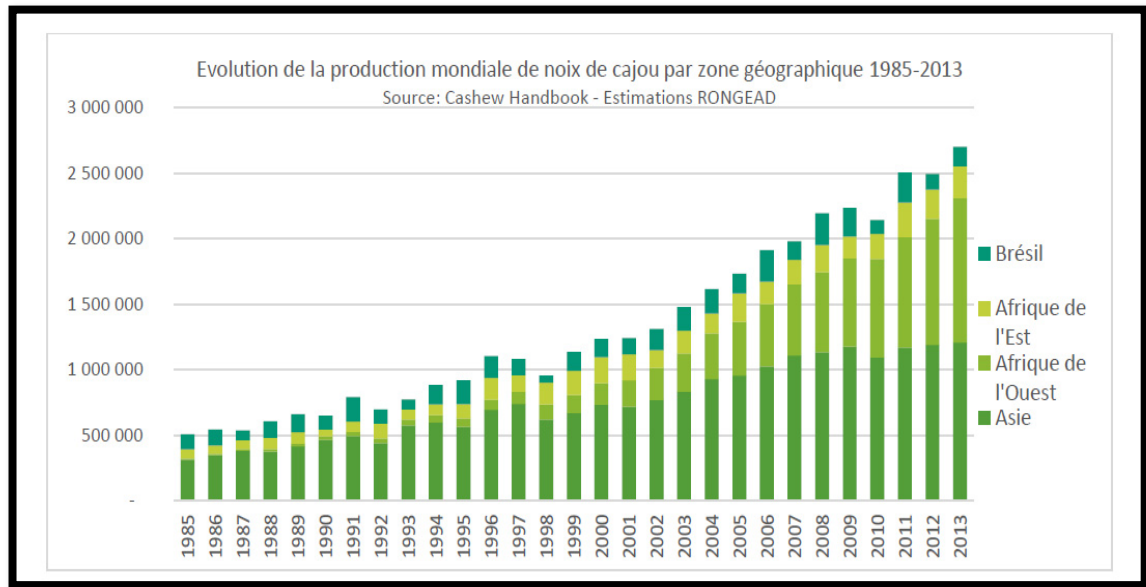


Figure 0-3 Évolution de la quantité de noix d’anacarde produites dans le monde 1905-2013
(Cashew Handbook, estimations Rongead)

Cette thèse est structurée comme suit : l’introduction est suivie par le chapitre 1 qui est consacré à la revue de littérature sur la gestion des matières résiduelles, l’incorporation des résidus végétaux et non végétaux dans les bétons. Le chapitre 2 présente les différentes méthodes expérimentales (matériaux; équipements procédures) qui ont été utilisé pour ce travail. Le chapitre 3 présente l’étude des propriétés physico-mécaniques du béton hydraulique contenant des cendres de coques d'anacardes de tailles micrométriques et nanométriques substituant partiellement le ciment. Le chapitre 4 présente la valorisation des cendres issues de la pyrolyse des coques déchets de noix d’anacardes dans le béton bitumineux. Enfin le chapitre 5 aborde l’analyse et la discussion de la thèse. Nous finissons la thèse par une conclusion et une recommandation.

Des extraits des chapitres 3 et 4 ont été publiés dans les revues *Déchets sciences et techniques* (Anagonou et al., 2020a) et *International Journal of Advanced Research and Publications* (Anagonou et al. 2020b).

CHAPITRE 1

REVUE DE DE LITTÉRATURE

1.1 Introduction

Les découvertes technologiques ont permis une grande amélioration de notre mode de vie. Ainsi, celles du XXI^e siècle se sont fait ressentir dans presque tous les domaines à savoir la médecine, l'industrie etc... Toutefois, ce développement technologique n'a pas été sans conséquence pour l'environnement. Par exemple les exploits de la médecine ont permis la croissance de la population et qui ont eu des conséquences sur l'industrie par l'invention de plusieurs engins à moteur (voiture, vélomoteur, moto et autres).

Cette croissance a engendré d'énormes quantités de déchets domestiques à traiter et qui ne peuvent se dégrader naturellement. Mis à part la production de déchets domestiques, on assiste aussi à une importante production de déchets industriels avec tout ce que cela comporte comme problème sur la santé humaine. On pourra conclure, qu'au fil du temps, les matières résiduelles (déchets domestiques et déchets industriels) produites, augmentent considérablement.

Le but de notre projet sera d'étudier les différents modes de réutilisations des matières résiduelles, en amont et à l'aval, de telles sortes qu'ils deviennent inoffensives pour l'environnement. Il faudra aussi étudier les différents modes de traitement des matières résiduelles, leurs avantages et leurs inconvénients sans oublier de décrire la méthodologie de notre méthode.

1.2 Revue critique des méthodes de traitement de déchets

Les différentes méthodes de traitement de déchets ont été par le passé efficaces. Aujourd'hui elles sont presque toutes obsolètes.

Prenons l'exemple des traitements biologiques. La biométhanisation est une méthode continue, et est la suite de celle dite biologique. En effet, la méthode biologique est celle qui permet d'apporter des nutriments et de procéder à une dégradation progressive des déchets organiques.

Avec celle-ci, seuls les déchets organiques pourraient être dégradés dans un délai raisonnable. C'est une méthode qui est limitée car la dégradation biologique d'une cannette par exemple est de plus de 250 ans, celle du plastique de plus de 150 ans : ce qui n'encourage pas aujourd'hui son utilisation. Toutefois, l'utilisation de celle de la biométhanisation n'en demeure pas moins problématique. Cette technique qui est d'abord biologique, permet néanmoins de récupérer le gaz issu lors de la dégradation des déchets organiques. Notons cependant qu'elle est limitée car elle n'est possible que sur les déchets organiques. Alors que le traitement que nous proposons pour notre thèse est applicable à n'importe quelle matière résiduelle.

La méthode de stabilisation qui est utilisée présentement a des limites. Certes elle est bonne, mais ne serait efficace qu'au niveau de la stabilisation. Elle est par conséquent incomplète. Une méthode complète doit pouvoir agir sur la stabilisation et la solidification. Ce qui n'est pas stabilisée, peut avec le temps désolidariser ses particules et dans ce cas les particules nuisibles se retrouveraient dans la nature. D'autres travaux ont montrés qu'il est possible de stabiliser les plastiques dans le ciment. C'est une excellente méthode, mais qui a des lacunes. Tout d'abord, mélanger des particules de plastique directement aux particules de ciment n'est pas souhaitable. Les plastiques contiennent du carbone, et le mélange carbone-ciment abaisse le pouvoir collant du ciment d'une part. D'autre part, et ça c'est important, les plastiques sont très inflammables, et il n'est pas souhaitable de faire la structure porteuse d'une maison avec des matériaux dont le ciment est inflammable. Ces travaux sont applicables aux pavés, travaux routiers (vérifier l'adhérence du liant) ainsi qu'à d'autres domaines du génie civil nécessitant moins de résistance à la compression.

Le taux de recyclage est médiocre au Québec. Il était de 35% à l'an 2000 (**Galvez, 2012**). On ne peut pas tout recycler au Québec. Les particules toxiques comme le plomb, le mercure et l'ozone ne peuvent pas être recyclées. Le recyclage doit toujours être mis en évidence et ne doit plus être considéré comme une solution de traitement de déchets mais plutôt comme celle de revalorisation de nos matières premières.

L'incinération fait partie des plus vieilles techniques de traitement des déchets solides et aussi plus archaïque. Il consiste à brûler les sols pollués dans un four à des températures extrêmement

élevées (870 à 1200⁰ C). Les polluants (principalement organiques) sont ainsi détruits ou volatilisés.

Notons au passage, que la température élevée des incinérateurs convertie les polluants en dioxyde et en vapeur d'eau, ainsi qu'en résidus variés de combustion. Toutefois, la transformation des contaminants en molécules non agressives permet de classer cette méthode parmi les plus efficaces. L'incinération aérobie des déchets est l'une des pires méthodes antiques utilisées pour le traitement des déchets. Avec peu d'insouciance pour l'échappement des gaz, on peut dire que c'est un désastre écologique. On ne doit même plus penser à ce mode de traitement thermique. Ce mode de traitement est de loin meilleur à la stabilisation solidification.

La gazéification et la pyrolyse sont aussi des procédés thermiques, mais c'est une technique qui se déroule en milieu anaérobie. Ces types de procédés seront détaillés dans le prochain chapitre. Toutefois, retenons que la gazéification et la pyrolyse à elles seules, ne sont ni écologiques, ni économiques. Ni écologiques, car les cendres constituent un magasin de déchets toxiques, et ni économiques car les cendres finiront dans un site d'enfouissement. La méthode de solidification et de stabilisation des déchets que nous proposons, est non seulement écologique, mais aussi très économique. On aura plus besoin d'un site d'enfouissement.

1.3 Les réacteurs thermiques

Les différents types de réacteurs thermiques

Les réacteurs sont généralement des appareils capables de produire une grande quantité de chaleur permettant de transformer n'importe quel objet en cendre. Ainsi, il existe plusieurs recteurs thermiques à savoir entre autres: Les gazéificateurs, les pyrolyses et les incinérateurs pour ne citer que ceux-là. En revanche, seul le premier fera l'objet de notre étude.

La gazéification des déchets

- **Processus de gazéification**

La gazéification est un procédé chimique qui permet de convertir la portion organique des matières résiduelles comme, entre autres, des résidus de nourriture, de papier, de carton et de plastique en un gaz combustible, dénommé syngas ou gaz de synthèse. Les composants principaux du syngas sont l'hydrogène (H_2) et le monoxyde de carbone (CO). Le pouvoir calorifique du syngas dépend du type de déchets traités. La gazéification permet d'obtenir des rendements élevés à partir de biomasse. La performance électrique obtenue en génératrices entraînées par un moteur alimenté d'un gaz de synthèse peut atteindre jusqu'à 30-32% (IDEA, 2007). Dans le procédé de gazéification, la quasi-totalité des matières résiduelles est traitée. Le résidu du procédé est de la cendre blanche. La température élevée appliquée lors de l'oxydation secondaire contribue à réduire les émissions atmosphériques.

- **Les grands types de procédés**

Il existe deux grands types de procédés de gazéification : les procédés à lit fixe et les procédés à lit fluidisé. Le choix d'un type de procédé est guidé par différents paramètres tels que la taille de l'installation, le combustible utilisé, l'usage du gaz produit ou parfois la maturité des technologies.

Les procédés à lit fixe : Ils sont en général de construction simple et robuste. Dans ces procédés, le combustible (biomasse) forme un lit dense au sein du réacteur et se déplace verticalement.

Les procédés à lit fluidisé : Dans un procédé à lit fluidisé, les particules sont en "suspension" dans le réacteur. Cela favorise les échanges thermiques et massiques entre le gaz et le solide. Les conditions opératoires sont bien maîtrisées et les vitesses de réaction beaucoup plus importantes que dans les procédés à lit fixe. Cependant, la fluidisation n'est possible qu'avec des particules de petites tailles (2 à 5 mm), ce qui nécessite généralement un broyage préalable de la biomasse. D'autre part, le gaz produit est fortement chargé en particules, exigeant la mise en œuvre de traitements avant sa valorisation.

Dans ce type de réacteur, les différents mécanismes de séchage, pyrolyse, oxydation homogène et hétérogène ont lieu dans une seule et même zone du réacteur.

- **Les avantages d'un gazéificateur**

- Procédé auto thermique (autosuffisant sur le plan énergétique) ;
- Meilleur rendement en gaz (comparativement aux autres types de réacteurs thermiques);
- Meilleur rendement électrique que l'incinération si le syngaz est injecté dans un groupe électrogène (comparativement à la turbine à vapeur moins performante) ;
- Le syngaz est une source d'énergie durable qui a l'avantage d'être stockable et transportable si nécessaire (contrairement à la vapeur aux usines d'incinération).

- **Les inconvénients d'un gazéificateur**

- La technologie très complexe requérant du personnel qualifié
- Nécessaire de faire un prétraitement efficace (tri, broyage, etc.) des matières résiduelles afin d'accomplir un rendement acceptable sans problèmes opératoires
- La perte de contrôle du processus de gazéification peut entraîner une mise à l'arrêt
- La gazéification des matières résiduelles produit un syngaz qui nécessite un post
- Le traitement poussé afin d'éviter des problèmes avec le groupe électrogène.

La pyrolyse

La pyrolyse est un traitement thermique basé sur l'action de la chaleur en atmosphère inerte (pas d'oxydation ou addition d'autres réactifs) permettant d'obtenir un solide carboné, une huile et un gaz. Elle débute à un niveau de température relativement bas (300 °C) et se poursuit jusqu'à 800 °C environ. La variation de température permet de modifier en proportion les trois composés résultants. L'intérêt majeur de cette technique est que ses produits sont valorisables. Par exemple, la pyrolyse d'un pneumatique décompose ce produit en parties métalliques, huile, gaz et char.

- **Avantage de la pyrolyse**

La pyrolyse rapide présente deux avantages principaux par rapport aux autres voies de conversions thermochimiques de la biomasse. Le premier, le plus important, concerne le découplage possible entre la production et l'utilisation. En effet, il est possible d'implanter une

unité de production d'huile dans une zone où la ressource est abondante afin de minimiser les coûts de transport de la matière première et de bénéficier de Pellet d'échelle sur les investissements. Les huiles sont ensuite transportées aisément vers les lieux d'utilisation.

Le deuxième avantage concerne le gaz produit qui est un mélange de CO, H₂, CH₄ et d'hydrocarbures lourds plus ou moins dilués avec de la vapeur d'eau et de l'azote. Son pouvoir calorifique (PCI) est variant selon la composition du gaz. Selon ses caractéristiques (PCI, composition) il peut être utilisé de façon forte différente. Ne seront retenues ci-après que les options relatives à la production d'électricité même si les applications thermiques sont assez largement éprouvées.

Les réacteurs thermiques ne se limitent pas qu'aux gazéificateurs et aux pyrolyseurs. Il y a aussi les incinérateurs qui sont des réacteurs de combustion largement utilisés.

1.4 Les cendres végétales

Composition des cendres végétales

Les déchets sont introduits dans les réacteurs thermiques et il en ressort par la suite des cendres et d'autres composés organiques. En général deux types de cendres en résultent : cendres de fond et cendres volantes.

Les principaux constituants du bois, pris en considération, sont généralement la cellulose, les lignines, les hémicelluloses et les extraits de solvants naturels. Ces constituants interviennent directement dans les réactions thermochimiques lors de la combustion des déchets. Ainsi le tableau 1-1 présente les différents composants de la cendre végétale.

L'analyse élémentaire permet de déterminer principalement la quantité de carbone, d'hydrogène, d'oxygène, d'azote et de matières minérales sans tenir compte de la manière dont les éléments sont combinés entre eux. Cette composition, à l'exception des matières minérales, est relativement constante pour les produits lignocellulosiques. Le bois est composé essentiellement de carbone (50 %), d'hydrogène (inférieur à 10%) et d'oxygène (environ 40%). (Fanny, 2013). L'azote y est présent à une proportion inférieure à 1%. Ces composés sont consommés lors de la combustion. En général, les matières lignocellulosiques ont une faible

teneur en matières minérales (>1%). Cependant, certains résidus agricoles ou agro-industriels peuvent dépasser 20% (balles de riz).

Le bois contient à l'état de trace des 55 minéraux tels que des macroéléments (calcium, silicium, potassium...) et des microéléments (zinc, bore, cuivre) dont certains de ces derniers sont toxiques (plomb, arsenic, nickel...) nommés aussi Éléments Traces Métalliques (ETM). Le taux de silice est également un paramètre important à contrôler, car il est relié à la production de mâchefer. Des matériaux trop riches en silice sont synonymes de corrosion élevée du dispositif, imposant parfois des choix de technologies plus rustiques mais souvent avec un rendement énergétique un peu moins intéressant.

Le taux de cendres d'un 'combustible' est d'une très grande importance technologique (formation de mâchefer). La nature et la richesse en cendres influencera les choix technologiques.

Tableau 1-1: Composition chimique des cendres végétales
(Fanny, 2013)

Taux de matières minérales	Taux de cendres %	1,0
Composition minérale des cendres	Taux de silice : SiO₂ %	0,30
	P %	0,005
	K %	0,093
	Ca %	0,154
	Mg %	0,032
	Na %	0,030
	S%	0,035
	Cu ppm	0,94
	Zn ppm	2,86
	Fe ppm	15,49
	Mn ppm	15,33
	Cl ppm	342
Composition élémentaire	N %	0,2
	C %	49,8
	H %	6,1
	O %	42,8
Pouvoir calorifique	PCI (MJ/Kg)	18,8

Les propriétés physico-mécaniques des cendres végétales

- **Le temps de prise**

En général, les cendres montrent un certain retard sur le durcissement du ciment, mais leur influence est inférieure à l'influence de la finesse du ciment, la teneur en eau de la pâte et la température ambiante. Ce type de cendres serait idéal pour des endroits où on a l'habitude d'utiliser un retardateur de prise. Souvent en climat tropical ou climat chaud.

- **Ouvrabilité**

L'utilisation des cendres volantes bitumineuses dans le béton réduit généralement la quantité d'eau nécessaire pour un degré d'ouvrabilité donné par rapport à celui requis pour la pâte équivalente sans cendres volantes. Avec l'utilisation d'agents entraîneurs d'air, la granulométrie très fine des cendres végétales, permet d'accroître la maniabilité du béton.

- **La température**

L'ajout des cendres végétales dans le béton, permet de diminuer la température brusque du béton. Habituellement l'hydratation du ciment et de l'eau fait augmenter la température du béton et son refroidissement entraîne parfois des fissures sur l'ouvrage. Les cendres, une fois dans le béton, empêchent une forte augmentation de la température, ce qui finit par progressivement se refroidir et du coup limite les risques de fissurations.

- **La résistance à la compression, à la traction et la perméabilité et le PH du béton**

À un certain taux dans le béton, les cendres végétales permettent l'obtention de meilleurs propriétés physiques du béton.

Méthode de captation des cendres

La captation des cendres est un processus très complexe. Notons tout d'abord que le produit issu des réacteurs thermiques, comporte en plus des cendres, de la fumée. Cette fumée est de la même nature que ces cendres. Cette captation des cendres va donc être divisée en deux :

- Les différentes techniques de captation des poussières, associées aux traitements de neutralisation. **(Bicocchi, 2009)**
 - Dépoussiéreurs mécaniques : les cyclones
 - Les laveurs
 - Les électrofiltres
 - Les dépoussiéreurs à média filtrants

- Pour la captation des cendres proprement dite, l'une des cinq méthodes suivantes peuvent être utilisées (**Bicocchi, 2009**) :
 - Les procédés par adsorption
 - L'épuration par oxydation thermique
 - L'épuration par condensation
 - Le traitement du dioxyde de carbone
 - Les Bioprocédés

Les aspects de valorisation des cendres

Grâce à ses propriétés physiques et chimiques, les cendres sont utilisées en construction et dans la fabrication de matériaux industriels. Au Canada, les cendres servent surtout :

- À fabriquer du ciment,
- De liant hydraulique dans les remblais miniers (en remplacement du ciment),
- À stabiliser les déchets liquides,
- À la composition de matériaux de remplissage de fluides (utilisés dans les remblais, les excavations, sous les fondations, dans les assises routières, etc.)
- Dans le béton,
- Comme apport minéral

• La vitrification

La vitrification est un processus de fusion lors duquel la fraction inorganique des matières résiduelles est emprisonnée dans une matrice de verre. La roche qui en résulte, aussi appelée vitrifiât, est complètement stable et peut être utilisée comme agrégat dans des bétons. Le procédé de vitrification permet d'encapsuler les métaux lourds qui pourraient être présents dans les matières résiduelles en les emprisonnant dans une matrice de verre.

• La solidification et stabilisation au niveau des ouvrages en béton

On peut procéder à la fabrication d'un béton capable d'encapsuler les cendres et de s'y mélanger de façon homogène. Toutefois, il faudra :

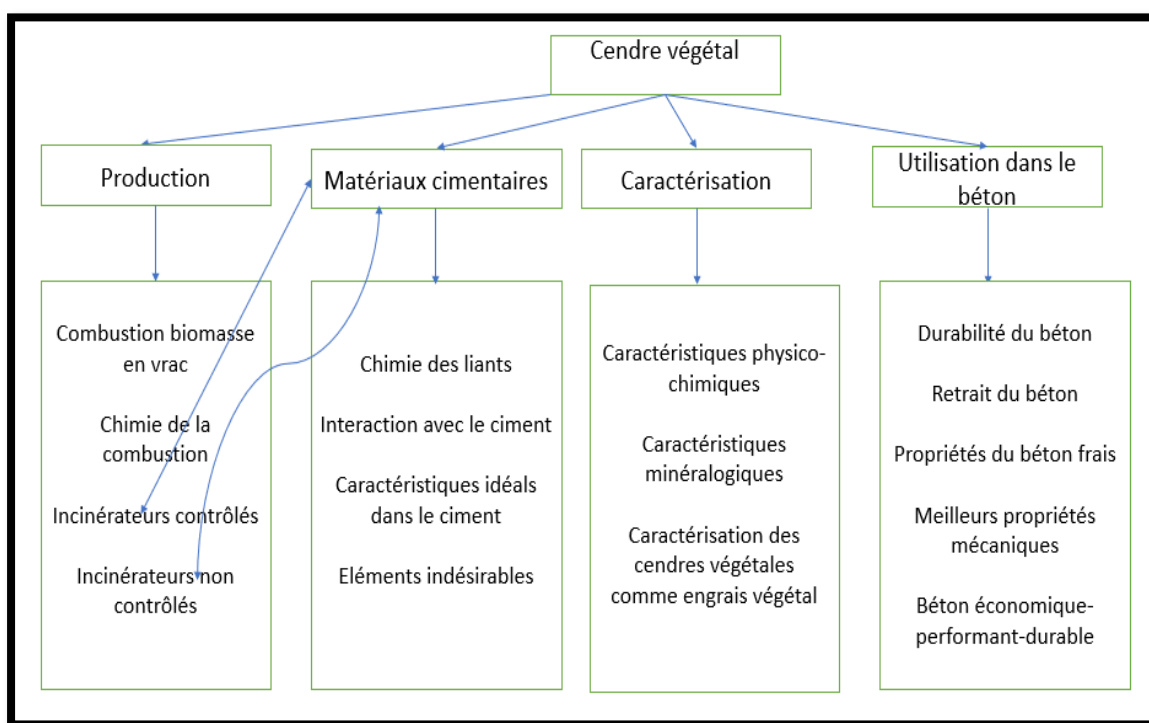
- Vérifier la résistance du béton à la compression,

- Vérifier la conductivité hydraulique du monolithe,
- Vérifier la perméabilité du monolithe,
- Identifier les types de déchets qui seraient nuisibles au monolithe.

Le tableau 1-2 qui présente la valorisation des cendres végétales, est à titre indicatif, sinon dans notre cas il s'agit des coques d'anacardes.

Tableau 1-2: valorisation des cendres végétales (exemple sur les cendres du riz)

(Adapté de Fanny, 2013)



1.5 La stabilisation solidification

L'objectif principal de ce travail est l'étude et la valorisation des matières résiduelles issues des réacteurs thermiques. Cette étude est faite en trois étapes : En tout premier lieu, nous avons abordé le problème de la récupération et de la gestion des matières résiduelles à l'amont. Ces matières résiduelles sont transformées en cendres grâce aux procédés thermiques (la

gazéification ou la pyrogazéification). Ceci permettra de réduire considérablement le volume des matières premières en plus de récupérer de l'énergie. Compte tenu du fait que la manipulation de cendres contaminées pose un véritable problème de santé et sécurité pour les techniciens, une méthode efficace de stabilisation de celles-ci dans un solvant sera étudiée dans le but d'éviter la pollution de l'air par elles et ainsi d'éviter que les particules fines et ultrafines qui en sont issues ne se déposent dans les poumons de ceux qui le manipulent.

En deuxième partie nous étudierons le traitement de ces déchets à l'aval par la méthode de stabilisation-solidification. A ce jour, la méthode de stabilisation-solidification est utilisée pour le traitement des sols contaminés. Nous comptons l'adapter pour les déchets contaminés ou non par les métaux lourds. Ainsi, nous comptons procéder à plusieurs formulations de béton, par approches successives pour obtenir le mélange d'une grande quantité de cendres avec du béton. Chacune des formulations que nous réaliserons sera destinée à l'étude d'une partie d'ouvrage en génie civil. Une étude par approche successive nous permettra de :

- i) Élaborer des modèles de l'influence des cendres (volantes ou de fond) sur le béton ;
- ii) De connaître le comportement mécanique du béton selon les dosages avec différents mélanges de cendres. Les cendres contiennent du carbone, et ce dernier a une réaction négative avec le ciment. Il sera vérifié, au cours de cette thèse l'évolution du murissement du béton confectionné avec les cendres à 3, 7, 21 et 90 jours. Ceci permettra de prévoir la charge maximale que peut supporter un béton comportant des cendres à un temps de sa vie. Les propriétés physiques et mécaniques du monolithe traité seront rigoureusement vérifiées pour démontrer de l'efficacité du traitement.

La troisième partie sera une étude économique des méthodes que nous aurions proposées et dont l'efficacité aurait été démontrée. Nous estimons que les méthodes que nous proposons, seront meilleures en rapport qualité – prix et nous comptons le démontrer.

Le traitement des sols pollués par les matières résiduelles est un véritable problème environnemental au Québec. Pour éviter d'avoir des sols contaminés par des déchets, certaines villes ont recours aux procédés de gazéification ou de pyrogazéification qui consistent à brûler les déchets. Le but de notre projet est de traiter les déchets pour en extraire de l'énergie et

valoriser les cendres qui en découlent : transformer les matières dangereuses en matières inoffensifs, utilisables par l'industrie.

Au Bénin, depuis quelques années, des travaux sur la valorisation des déchets biomasses sont en cours, travail pour lequel l'utilisation des co-produits de second niveau comme les cendres n'est pas encore exploitée. Un réacteur de pyrolyse est construit et exploité et permet de transformer des déchets biomasses comme les coques d'anacardes, de noix de coco, de noix de palmiste, les balles de riz, les épluchures d'ananas et de manioc qui polluent les environnements de travail des industries de transformation de ces chaînes de valeur en gaz, biocharbon et biocarburant. Les résultats obtenus par rapport au gaz et biocharbon sont très intéressants : 70 à 83% de gaz par rapport à la masse de la biomasse, 18 à 20% de biochar et 5 à 20% de cendres selon le pouvoir calorifique, le taux de cendres initial de la biomasse, etc... Par ailleurs, ces résultats améliorent l'empreinte environnementale et réduisent les difficultés d'accès à l'énergie dans le pays. Trois grandes industries de transformation agroalimentaire (Kaké-5 à Savalou, Nad & Co à Tchaourou et le Centre Songhaï à Porto-Novo) utilisent déjà les technologies de valorisation énergétiques mises au point. Malheureusement, les cendres obtenues de la pyrolyse et de la pyro-gazéification de ces biomasses ne sont pas exploitées.

1.6 La Solution proposée : le traitement des déchets par solidification stabilisation (s/s)

Étude des différentes étapes de traitements des déchets par la (s/s)

Le traitement des déchets par solidification stabilisation est nouveau. Pour le moment peu de chercheurs l'ont étudié. Toutefois, les rares scientifiques qui se sont penchés sur les problèmes, ont donné très peu ou presque pas d'information sur les essais expérimentaux réalisés. La stabilisation solidification des sols est en mode au Québec depuis un certain nombre d'années. Le traitement des déchets par stabilisation solidification est subdivisé en 3 grandes phases à savoir :

* Le choix de la méthode réductrice en cendres : la pyrolyse ou la gazéification

- * L'étape de l'incorporation des déchets dans le béton (la solidification stabilisation)
- * La vérification du monolithe obtenu à l'aide d'essais géotechniques.

Définition de la méthode de Stabilisation Solidification (S/S)

Le traitement des déchets, n'est pas une chose aisée, surtout s'il s'agit d'une contamination par des métaux lourds. Notons que la méthode (s/s) n'enlève pas les polluants ou les contaminants du résidu de cendres. La s/s est un traitement qui prend en compte tout le mélange réactifs, liants et agrégats. Ainsi il immobilise par des *changements physiques (solidification) et chimiques (stabilisation)* la matrice traitée (**Rémillard, 2012**).

Le principe même de la s/s, est de faire en sorte que les polluants de la matrice contaminée, se retrouvent piégés sous une forme immobile.

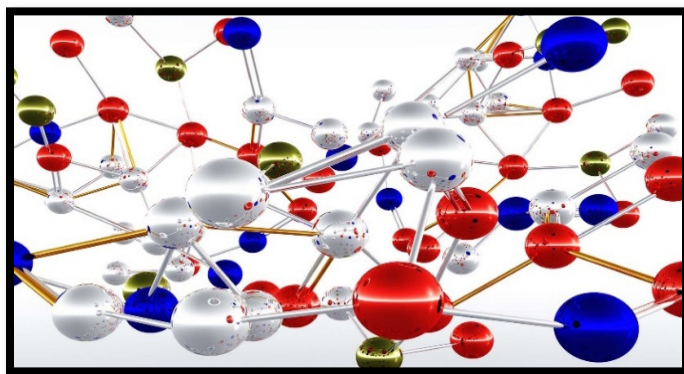


Figure 1-1 : Principe de base des procédés de stabilisation solidification

Comme le montre la figure 1-1, le principe de la stabilisation solidification est un processus qui permet de rendre inactif les molécules dangereuses. Ainsi les molécules du béton se collent aux particules dangereuses de manière à les rendre inactifs. Cela se produit grâce aux liaisons chimiques.

On peut aussi définir la stabilisation et solidification comme un processus de traitement des déchets, au cours duquel les contaminants sont rendus immobiles, par des réactions grâce à l'utilisation de certains additifs ou des procédés. Au cours de ce processus, également appelé

immobilisation, fixation ou encapsulation, les contaminants peuvent être chimiquement liés ou encapsulés dans une matrice. L'EPA (environmental protection agency) aux USA, décrit la stabilisation et la solidification comme un processus qui accomplit un ou plusieurs tâches ou résout plusieurs problèmes à la fois. Comme problèmes résolus, on peut citer :

- L'amélioration de la manipulation et les caractéristiques physiques des déchets,
- Réduction de la superficie de la masse des déchets à travers laquelle des fuites de transfert / contaminant peuvent se produire
- Limitation de la solubilité des constituants dangereux dans les déchets
- L'augmentation de la résistance en compression de cette masse encapsulée

En effet, la stabilisation solidification au ciment est une méthode choisie et souvent utilisée pour gérer, et réutiliser en toute sécurité les déchets contaminés. Il a été mis au point dans les années 1950 et est aujourd'hui largement utilisé à travers le monde sur presque tous les continents. Certains pays utilisent déjà la s/s pour le traitement de leurs sols contaminés. La différence, est que nous allons l'utiliser pour le traitement des déchets contaminés et non les sols contaminés. Parmi les pays qui l'utilisent, on peut citer :

La Belgique, le Canada, la France, l'Italie, le Japon, la Corée du sud, la Norvège, l'Angleterre et les USA. Notons, qu'il existe en général deux types de s/s à savoir : la s/s in-situ et la s/s ex-situ (la plus utilisée).

En 2016 certains auteurs décrivent la s/s comme une technologie de nettoyage qui consiste à mélanger le sol contaminé avec des additifs, tels que le ciment Portland, la chaux, les cendres volantes afin d'immobiliser les contaminants qui sont dans le sol et les empêcher de contaminer la nappe phréatique. Selon ses deux auteurs, la s/s permet surtout de traiter les sols contaminés en métaux lourds et les polluants organiques volatiles. Selon eux, la stabilisation désigne les techniques qui réduisent le potentiel de danger, en modifiant les contaminants du sol afin qu'ils deviennent moins nocifs ou moins mobiles. Quant à la solidification, elle désigne les techniques qui favorisent l'encapsulation des déchets dans un solide monolithique, d'une grande intégrité structurale. A tout ceci s'ajoute le fait que la solidification modifie les

propriétés physiques d'une substance contaminée, telle que la résistance à la compression, la perméabilité et l'encapsulation des constituants dangereux.

La stabilisation solidification a pour objectif d'immobiliser les contaminants. Ce traitement implique la fixation chimique et l'encapsulation physique des contaminants. Elle, en réalité minimise la quantité de polluants. Son bût est d'empêcher la migration des polluants dans l'environnement et de contribuer ainsi à la réduction de la toxicité de l'environnement. Le processus de stabilisation solidification conduit à l'obtention d'un monolithe traité ayant les caractéristiques suivantes (Kogbara, 2013) :

- Augmentation de la résistance du sol traité,
- Diminution de la lixivabilité,
- Diminution de la conductivité hydraulique du matériau traité,
- Augmentation de la résistance à la compression de la couche traitée,
- Transformation des déchets en un solide plus facile à transporter et à stocker,
- Diminution de la surface d'exposition des contaminants à l'environnement,
- Limitation de la solubilité des contaminants en cas de contact avec un fluide de lixiviation

La technologie s/s présente assez d'avantages à savoir :

- Le faible coût des produits de la s/s, car les réactifs sont largement disponibles et aussi peu coûteux,
- On peut l'utiliser sur une grande variété de contaminants (L'EPA a identifié à cet effet 27 types de polluants),
- On peut l'appliquer à une grande diversité de sol,
- Une grande disponibilité des personnes techniques et des matériels techniques,

Cependant cette technologie présente aussi quelques inconvénients à savoir :

- Les contaminants sont toujours non détruits ou non enlevés dans le sol,
- On remarque une augmentation des volumes de déchets,
- Difficulté à homogénéiser de la même manière tout le mélange traité. Il peut apparaître des points moins mélangés qui deviennent des points de faiblesse du monolithe traité,
- Plusieurs points d'ombres apparaissent quant à sa durabilité dans le temps.

La vérification du monolithe obtenu à l'aide d'essais géotechniques (les essais expérimentaux sur la s/s)

Méthode d'évaluation de la s/s : Dans le but d'évaluer l'efficacité du traitement du sol par la s/s, un ensemble d'essais est suggéré. Ils sont subdivisés en trois grandes catégories à savoir :

- Les analyses physiques et chimiques,
- La mobilité des contaminants,
- L'évaluation de la qualité de la matrice.

A ce jour les données qui permettent d'avoir un comportement précis et à long terme sur la s/s sont encore limitées, C'est pour cela qu'on réalise des tests en simulant un vieillissement accéléré.

Les essais sont proposés par la ligne directrice sur la gestion des matières résiduelles et des sols contaminés traités par la méthode s/s.

Les retombées immédiates

Les études prévues permettront d'obtenir des données nécessaires pour la caractérisation et l'utilisation du matériau composé à proposer, ce qui aura des retombées industrielles, en plus de protéger l'environnement. Nous pensons à :

- L'étude du comportement mécanique du béton comportant des cendres contaminées à 3, 7, 21 et 90 jours ;
- L'étude de la réaction des cendres avec le ciment ;
- L'établissement des courbes qui permettent de prévoir la capacité maximale d'un béton contenant des cendres par partie d'ouvrage ;
- Au développement d'un modèle de formulation du béton avec les cendres de déchets contaminés.

Les paramètres à prendre en compte

Le mélange des cendres (originaires du réacteur thermique) et du béton sera soumis à une multitude d'essais géotechniques, dans le but de déterminer, d'évaluer et de prévoir sa

résistance dans le présent et dans le futur. La méthode de formulation du béton utilisée, qu'est la stabilisation solidification existe au Québec et est régie par un ensemble de lois.

Au Québec l'étude du monolithe stabilisé, solidifié, est subdivisé en trois grandes catégories à savoir :

- Les analyses physiques et chimiques,
- La mobilité des contaminants,
- L'évaluation de la qualité de la matrice.

A ce jour les données qui permettent d'avoir un comportement précis et à long terme sur la s/s sont encore limitées. C'est pour cela qu'on réalise des tests en simulant un vieillissement accéléré. La ligne directrice sur la gestion des matières résiduelles et des sols contaminés traités par la méthode s/s donne le tableau 1-3 qui est un récapitulatif des essais à réaliser sur un béton s/s.

Tableau 1-3: Répartition des différents essais réalisables sur la s/s.

Groupe	Matière résiduelle ou sol testé	Indicateur de rendement	Expression	Protocoles d'essais (choisir l'édition courante) ¹
A	Brut (avant traitement) et traité	Variation de volume	Rapport (V/V)	Brut et excavé Détermination de la masse volumique, méthode d'essai LC 21-060 de Transports Québec ² Traité: Des protocoles de mesure de la conductivité hydraulique ou de la résistance physique prévoient aussi la mesure de la masse volumique.
	Traité	Porosité/saturation	(%)	Détermination de la teneur en eau par séchage à 60 °C dans une étuve. L'échantillon est broyé à moins de 56 mm de diamètre. Adaptez la norme CAN/BNQ ³ 2501-170. Densité relative des grains solides – méthode sèche (specific gravity – dry method) ⁴ . L'échantillon est broyé à moins de 2 mm. Des protocoles de mesure de la conductivité hydraulique prévoient aussi la mesure de la porosité et de la saturation.
	Brut	Granulométrie		Analyse granulométrique Méthode MA. 100 - Gran. 1.0 du CEAEQ ⁵ ou Méthode d'essai LC 21-040 de Transports Québec
	Brut	pH		Méthode MA. 100 – pH 1.1 du CEAEQ
	Brut	Teneur en carbone organique total	(%)	Carbone organique total Méthode MA. 405 – C 1.0 du CEAEQ
	Brut	Analyse du contenu total	(mg/kg, base sèche),	Digestion/extraction et analyse Méthode MA. 200-mét. 1.2 du CEAEQ (pour les métaux totaux extractibles)
B	Traité	Capacité de neutralisation des acides	(eq/kg de monolithe)	Méthode MA. 110 – C. neu 1.0 du CEAEQ
	Brut et traité	Quantité de contaminants lixiviables à l'eau	(mg/L), dans le lixiviat	Méthode MA.100-Lix.com.1.0 du CEAEQ
	Matière résiduelle brute	Quantité de contaminants susceptible d'être lixiviée en milieu acide acétique	(mg/L), dans le lixiviat	Méthode MA.100-Lix.com.1.0 du CEAEQ

Groupe	Matière résiduelle ou sol testé	Indicateur de rendement	Expression	Protocoles d'essais (choisir l'édition courante) ¹
	Matière résiduelle ou sol traité	Quantité de contaminants susceptible d'être lixiviée en milieu acide acétique	(mg/L), dans le lixiviat	Méthode MA.100-Lix.com.1.0 du CEAeq Utilisez la méthode modifiée si la capacité de neutralisation est supérieure à 3 eq/kg à pH 9.
	Brut et traité	Quantité de contaminants susceptible d'être lixiviée par des pluies acides	(mg/L), dans le lixiviat	Méthode MA.100-Lix.com.1.0 du CEAeq
	Traité (si requis)	Potentiel de génération d'acide	(positif/négatif)	Méthode MA. 110-ACISOL 1.0 du CEAeq
C	Traité	Mobilité des contaminants dans le monolithe Mesurer également le pH de l'eau	Indice de diffusivité	Essai de lixiviation dynamique (dynamic leach test) ⁴ ou American Nuclear Society, méthode ANSI/ANS-16.1-2003
	Traité	Conductivité hydraulique	(m/s)	Perméabilité à pression décroissante (falling-head hydraulic conductivity) ⁴ ou Méthode CRD-C 48-92 de l'USACE ⁶ (standard test method for water permeability of concrete)
	Traité	Résistance physique (après immersion). Quatre répétitions	(kPa)	Compressive strength of cylindrical concrete specimens, méthode ASTM ⁷ C39/C 39M (prévoit également la mesure de la masse volumique)
	Traité	Altération	(perte de poids, %)	Cycles de mouillage/séchage ⁴ ou Méthode ASTM D4843 (mouillage/séchage)
	Traité (si requis)	Biodégradabilité	(réussite/échec)	Développement de matières biologiques Adaptez les méthodes ASTM G 21 et G22

Groupe A : analyses physiques ou chimiques.
Groupe B : évaluation de la stabilisation.
Groupe C : évaluation de la solidification.

L'étude expérimentale sera réalisée sur les propriétés physico-mécaniques du mélange (béton + cendres). Au cours de ce projet, nous n'allons pas tenir compte *des propriétés chimiques*. Ainsi, indépendamment de nos objectifs et des résultats attendus, nous avons identifiés des essais pour vérifier *les propriétés physico-mécaniques de notre monolithe*. Nous avons pris certains essais de la ligne directrice. Cependant on a dû la compléter par d'autres essais jugés pertinents.

1.7 Conclusion

La pollution environnementale est un véritable danger pour la survie de notre espèce. De nos jours, la gestion et le traitement des déchets fait partie d'un suivi plus rigoureux. C'est dans l'optique de contribuer à l'épanouissement de l'homme, à rendre notre environnement plus sain, que nous avons choisis ce thème pour notre projet de thèse.

Pour pallier différents problèmes environnementaux nous avons pensé utiliser le béton. Il est un matériau imprévisible et ses caractéristiques et propriétés peuvent être utilisées à notre avantage. Cette étude sera le début d'une nouvelle méthode de traitement de déchets.

Les coques d'anacardes auront été utilisées à cause de leur disponibilité en quantité importante en Afrique de l'ouest. A cet effet, ils sont qualifiés de déchets non valorisables. Toutefois, l'objectif de ce travail est de démontrer l'incorporation des matières ou déchets résiduels dans le béton, d'où la valorisation des matières résiduelles plus précisément les coques d'anacarde.

CHAPITRE 2

DESCRIPTION DE LA MÉTHODOLOGIE

2.1 Introduction

Le travail expérimental a été réalisé pour caractériser aussi bien les matériaux que les bétons hydraulique et bitumineux. Ainsi les matériaux utilisés au cours de ces travaux expérimentales sont notamment le sable, le gravier, le bitume, les cendres et le ciment. D'autres travaux expérimentaux ont été réalisés sur différents matériaux confectionnés en laboratoire. Le présent chapitre ne couvre que les méthodes et procédures expérimentales. Les matériaux sont présentés aux chapitres 3 et 4.

2.2 Cadre d'étude

Pour la bonne marche du travail et dans le souci de gagner en temps pour les essais expérimentaux, quatre laboratoires ont été utilisés. Ainsi, on a :

- Le Laboratoire d'Étude et de Recherche en Génie Civil (LERG) de l'Université d'Abomey Calavi (BENIN), lieu où on a procédé à la préparation et la confection des éprouvettes de béton hydraulique frais,
- Le laboratoire d'enseignement de l'ENSTP de l'UNSTIM Benin, qui est le lieu de réalisation des différents tests d'écrasement du béton et de caractérisation des matériaux sable, ciment et gravier,
- Le laboratoire de l'entreprise ADEOTIE Sarl au Benin, grâce à qui tous les essais sur le béton bitumineux ont pu être réalisés,
- Le laboratoire d'Ingénierie des Produits, Procédés et Systèmes (LIPPS) de l'École de Technologie Supérieure (ETS) de Montréal au Canada, qui nous a permis de faire la caractérisation des cendres de coques d'anacardes.

Au total, les différentes expérimentations se porteront sur deux types de béton à savoir : le béton hydraulique et le béton bitumineux.

Analyse granulométrique

*** But de l'essai analyse granulométrique**

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des filets. A noter qu'il faut éviter de faire la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des graines d'un granulat.

*** Principe de l'essai d'analyse granulométrique**

L'essai d'analyse granulométrique consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série des tamis, emboîtées les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé sur la partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de sa colonne.

*** Description de l'essai d'analyse granulométrique**

Le matériau séché, de masse M , est versé sur une série de tamis choisis de telle manière que la progression des ouvertures soit croissante du bas de la colonne vers haut. En sa partie inférieure, on dispose d'un tamis de 0.08 mm surmontant un fond étanche afin de récupérer les éléments fins qui passent au travers.

On considère que le tamisage est terminé lorsque les refus ne varient pas de plus de 1% entre deux séquences de variations de la tamiseuse.

La somme R_1+R_2 représente le refus cumulé sur le deuxième tamis. Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulés R_n aux différents niveaux de la colonne du tamis. Le tamis présent sur le fond de la colonne est également pesé. Soit P sa masse.

La somme de refus cumulés mesurés sur les différents tamis et du tamis sur le fond (filets) doit coïncider avec le poids de l'échantillon introduit en tête de colonne. La perte éventuelle

de matériaux pendant l'opération de tamisage ne doit pas excéder plus de 2% du poids total de l'échantillon de départ.

La réalisation de cet essai nécessite les matériels ci-après : Une louche, des gamelles, une balance ayant une précision de 0.1 g, une série de tamis (Figure 2-1).

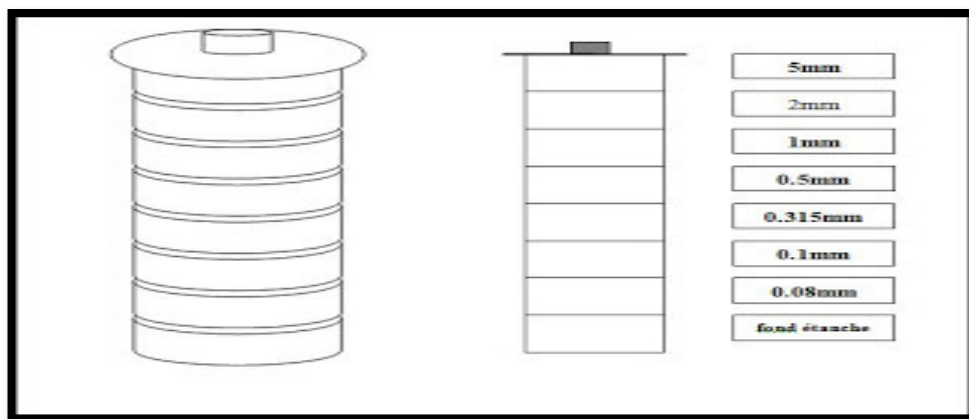


Figure 2-1: Série de tamis pour analyse granulométrique

Équivalence de sable (ES)

● Définition

L'essai d'équivalence de sable est spécifique aux sols grenus. Il nous permet de mettre en évidence la proportion relative de poussières fines nuisibles, argileuses dans les sols ou les agrégats fins. Il est effectué sur des éléments de diamètre 5 mm ou moins. Son importance est capitale car la présence des éléments fins peut modifier le comportement rhéologique du matériau. Pour pouvoir interpréter correctement les résultats, il est indispensable de répéter l'essai au moins deux fois.

● Principe et but de l'essai équivalent de sable

L'essai équivalent de sable s'effectue sur la fraction des sols passant au tamis de 5 mm ; il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments les plus fins contenus dans cette fraction, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les éléments plus fins (argileux par exemple).

Cet essai qui s'effectue sur la fraction des sols ou de granulat passant, au tamis à mailles carrés de 5 mm, est réalisé pour déterminer le degré de pollution d'un sol ou d'un sable.

Cet essai s'applique dans des nombreux domaines, notamment :

- Le choix et le contrôle des sols utilisables en stabilisation mécanique,
- Le contrôle des sols utilisés en stabilisation chimique,
- Le choix et le contrôle des granulats pour les enrobés hydrocarbonés.

● **Appareillage**

L'appareil est constitué :

- D'un tamis de 5 mm d'ouverture de mailles avec fond,
- D'un échantillon de 5 mm d'ouverture,
- D'une spatule et d'une cuillère,
- D'un entonnoir à large ouverture pour faire passer l'échantillon dans l'éprouvette cylindrique,
- De 6 récipients de pesée en alliage léger pouvant recevoir environ 200 cm³,
- D'une balance précise au gramme, de portée au moins égale à 250g,
- D'un thermomètre gradué en °C,
- D'une règle de 500 mm, gradué en mm,
- D'un goupillon à pal doux pour le nettoyage des éprouvettes et des bacs pour tamisage des éprouvettes cylindriques,
- D'un tube laveur,
- D'un tube de caoutchouc,
- D'un piston lare,
- D'une machine d'agitation.

● **Mode opératoire**

On verse dans une cylindrique jusqu'au trait repère inférieur, une solution lavante.

- Introduire dans l'éprouvette une masse sèche de 120g de matériau à l'aide de l'entonnoir,

- Frapper fortement à plusieurs reprises la base de l'éprouvette sur la paume de la main par déloger les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon
- Laisser reposer 10 mn,
- Boucher l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchouc,
- Fixer l'éprouvette sur la machine d'agitation,
- Faire subir à l'éprouvette 90 cycles en 30 s,
- Remettre l'éprouvette en position verticale sur la table d'essais,
- Oter le bouchon de caoutchouc et le rincer au-dessus de l'éprouvette avec la solution lavante,

* En descendant le tube laveur dans l'éprouvette

- Rincer les parois de l'éprouvette avec la solution lavante,
- Puis enfoncer le tube jusqu'au fond de l'éprouvette,
- Puis laver le sable pour faire remonter les éléments argileux tout en maintenant l'éprouvette en position verticale,

* L'éprouvette étant soumise à un lent mouvement de rotation, remonter lentement et régulièrement le tube laveur. Lorsque le niveau du liquide atteint le trait repère supérieur

* Relever le tube laveur de façon que le niveau du liquide se maintienne à hauteur de trait repère.

* Arrêter l'écoulement dès la sortie du tube laveur.

- Laisser reposer sans perturbation pendant $20 \text{ mn} \pm 10\text{s}$
Au bout de 20 mn
- Mesurer à l'aide du réglet la hauteur h_1 au niveau supérieur du floculat par rapport au fond de l'éprouvette
- Mesurer également, si possible, la hauteur h_2 du niveau supérieur de la partie sédimentée par rapport au fond de l'éprouvette. Les hauteurs h_1 et h_2 sont arrondies au millimètre le plus voisin

* Descendre doucement le piston taré dans l'éprouvette jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. Pendant cette opération, le manchon coulissant prend appuie sur l'éprouvette

- * Lorsque l'embase du piston repose sur le sédiment, bloquer le manchon coulissant sur la tige du piston. Introduire le réglet dans l'encoche du manchon, faire venir buter le zéro contre la face inférieure de la tête du piston.
- * Lire la hauteur du sédiment h_2 au niveau de la face supérieure du manchon. Arrondir la hauteur h_2 au millimètre le plus voisin. Noter la température du contenu de l'éprouvette au degré le plus voisin
- * Refaire une 2eme fois la même procédure

L'équivalent de sable, E_s , d'une prise d'essai d'un échantillon est par définition mesuré au piston et donné par la formule 2.1

$$E_s = 100 \frac{h_1}{h_2} \quad (1-1)$$

Avec E_s : équivalent sable

h_1 : niveau supérieur du flocculat par rapport au fond de l'éprouvette

h_2 : niveau supérieur de la partie sédimentée par rapport au fond de l'éprouvette

La détermination portant sur deux prises d'essais par échantillon, l'équivalent de sable E_s ou E_{sv} d'un échantillon est la moyenne des équivalents de sable déterminés sur les deux prises d'essais. La valeur de la moyenne est arrondie à l'entier le plus voisin.

Essais sur l'affaissement du béton frais

● Définition

Le cône d'Abrams est un test utilisé dans le béton. Il mesure la consistance d'un béton.

Il existe différents tests plus ou moins faciles à réaliser afin de connaître certaines caractéristiques du béton. Il consiste à remplir en 3 fois un cône de dimensions normalisées.

A chaque tiers rempli, il faut frapper 25 coups de barre. Une fois le cône rempli en entier, on nettoie le support et à l'aide d'une truelle, on essaye d'obtenir une surface lisse de béton sur

le dessus du cône. Enfin, nous pouvons retirer le cône et par la suite mesurer l'affaissement du cône de ciment par rapport au cône initial. Des tables d'interprétation permettent de caractériser le béton entre 3 types de consistance : plastique, molle et fluide. En cas de consistance fluide, il peut être préférable d'effectuer le test d'étalement ou Flow Test. Il est assez intuitif de penser que l'affaissement sera d'autant moins important que le béton a un rapport eau/ciment (e/c) faible. Et de la même manière, un rapport eau/ciment important, provoque un affaissement plus important. Ce test permet de caractériser en partie l'ouvrabilité.

- **Appareillage**

Moule stable en forme de tronc de cône de 300 mm de haut, avec diamètre inférieur à 200 mm et diamètre supérieur de 100 mm, main écope carrée ou circulaire, une tige de piquage métallique de 600 mm de long et 16 mm de diamètre, arrondie aux extrémités, de surface de base rigide, plate et non absorbante (par ex. une tôle).

- **Mode opératoire**

L'essai doit être réalisé sur une surface horizontale

L'essai complet doit être exécuté sans interruption en moins de deux minutes et demie.

Démouler verticalement (sans mouvement de torsion) en 5 à 10 secondes.

Mesurer l'affaissement du béton à 10 mm près

Béton durci

Essai de compression simple et de traction simple

- **Définition**

L'essai de traction simple ou de compression simple consiste à comprimer un échantillon de roche de forme cylindrique entre deux plateaux parallèles d'une presse rigide. Les essais se font généralement par lots de 3 échantillons par roche homogène pour obtenir une bonne moyenne.

L'essai de traction consiste à placer une petite barre du matériau et à l'étudier entre les mâchoires d'une machine de traction qui tire sur la barre jusqu'à sa rupture. On enregistre l'allongement et la force appliquée, que l'on convertit ensuite en déformation et contrainte.

Le béton est considéré comme un solide après achèvement de la prise, mais il s'agit en fait d'un matériau en perpétuelle évolution :

*La poursuite des réactions d'hydratation du ciment dure plusieurs années.

*Les variations du milieu ambiant amènent des changements lents dans la structure du béton.

Nous allons étudier les essais qui permettent de mesurer les caractéristiques de résistance du béton en compression et en traction ainsi que ses déformations sous contraintes.

● **Appareillage**

- Presse hydraulique avec cadence mètre
- Appareil de surfaçage au soufre + accessoires
- Appareil de fendage
- Scléromètre
- Balance

● **Mode opératoire**

- Le surfaçage se fait soit en rectifiant les faces des éprouvettes soit avec un matériau d'apport
- Plus résistant que le béton de l'éprouvette mais moulable, le matériau d'apport est constitué de soufre.
- Chauffer le mélange dans un récipient approprié sous la hotte aspirant,
- Enduire la coupelle d'une pellicule d'huile de démoulage,
- Piquer doucement l'éprouvette pour préparer l'adhérence du soufre,
- Essuyer proprement la face à surfacer,
- Verser une louche du mélange fondu (120°) dans la coupelle,
- Nettoyer les plateaux de la presse,
- Mettre en place l'éprouvette verticalement et la centrer sur le plateau,
- Amener le plateau supérieur au contact de l'éprouvette,
- Remettre les capteurs à zéro,
- Mettre en charge jusqu'à appliquer une contrainte de 0,5 MPa et effectuer des mesures avec le scléromètre,

2.3 Essai sur le béton bitumineux

Essai de pénétration à l'aiguille VICAT

● Définition

L'essai de pénétrabilité à l'aiguille, permet de déterminer la consistance des bitumes. Cet essai permet aussi de suivre dans le temps la façon dont évolue le bitume sous l'effet du vieillissement ou de l'influence des facteurs ambiants. Tous les bitumes ne donnent pas les mêmes résultats à l'essai de pénétrabilité. Pour pouvoir comparer les différents bitumes, il est nécessaire de normaliser l'essai. Aussi, pour chaque bitume testé, on réalise l'essai dans les mêmes conditions, avec le même matériel et la même méthode. Le principe de l'essai de pénétrabilité est simple. On porte le bitume à une température normalisée pour le ramollir, puis on pose à sa surface une aiguille qui va s'enfoncer lentement sous l'effet de son propre poids pendant une durée également précisée dans la norme. Une fois le temps écoulé, on mesure l'enfoncement de l'aiguille.

● Appareillage

- Un pénétromètre: appareil permettant à un porte-aiguille de coulisser verticalement sans frottement, sous un poids total de 100 g (Aiguille + porte aiguille + masse additionnelle).
- Une aiguille de pénétration en acier inoxydable, dans l'idéal certifiée, pour être compatible avec la norme EN 1426.
- Un godet pour d'échantillon de bitume. La profondeur du godet doit être supérieure d'au moins 10 mm à la pénétration attendue, et dans tous les cas supérieurs à 35 mm. Le diamètre intérieur du godet doit être compris entre 55 mm et 70 mm
- Un bain-marie d'au moins 10 l, capable de produire une température constante.
- Un chronomètre.
- Un thermomètre.

● **Mode opératoire**

- Chauffer l'échantillon jusqu'à ce qu'il soit fluide.
- Verser l'échantillon dans le gobelet préchauffé. La hauteur de l'échantillon doit être supérieure ou égale à 10 mm de la profondeur à laquelle l'aiguille est susceptible de pénétrer.
- Protéger le gobelet son contenu de la poussière par un couvercle et le laisser à la température 200 °C – 300 °C pendant 1h30 - 2h00.
- Placer ensuite le gobelet dans un bain d'eau à 250 °C pendant 1h30 - 2h00.
- Placer la prise d'essai dans le récipient de transfert et le mettre sur le plateau du Pénétromètre.
- Déplacer l'aiguille chargée (100 g) pour qu'elle affleure la surface de la prise d'essais.
- Ramener à l'aiguille du cadran.
- Libérer l'aiguille pendant la durée spécifiée de 5 s et la bloquer aussitôt et mesurer la profondeur.
- Effectuer 3 mesures avec la même aiguille.
- A chaque mesure, remplacer la prise d'essai et le récipient de transfert dans le bain d'eau.

Essai Bille-Anneau

● **Définition**

L'essai Bille-Anneau sert à déterminer la température à partir de laquelle un bitume commence à devenir élastique. Cette température est appelée "point de ramollissement du bitume". Tous les bitumes, en fonction de leur composition chimique, n'ont pas le même point de ramollissement. Pour pouvoir comparer les différents bitumes, il est nécessaire de normaliser l'essai. C'est à dire, pour chaque bitume, de réaliser l'essai dans les mêmes conditions, avec le même matériel et la même méthode. Le principe de l'essai Bille-Anneau est très simple. On remplit deux petits anneaux de métal avec le bitume à tester. Sur chaque anneau on place une bille de métal lourd qui va peser sur le bitume. On place les anneaux et les billes dans une eau

à 5°C. A cette température le bitume est dur. On augmente alors progressivement la température de l'eau de 5°C par minute. Petit à petit le bitume va se ramollir et la bille lourde, par son poids, va le déformer et tomber vers le bas. Lorsque la bille enrobée de bitume plastique touche le fond du bécher, on relève la température. On effectue ce test avec 2 billes et on fait la moyenne des températures relevées. La moyenne trouvée correspond au point de ramollissement du bitume testé.

● **Appareillage :** Un bécher, un système bille-anneau (anneaux, billes, support) et un système "agitateur magnétique chauffant.

● **Mode opératoire**

- Remplir les anneaux en cuivre avec le bitume à tester.
- Enlever le surplus avec une spatule
- Placer les anneaux et les billes sur le support
- Plonger le support dans une eau à 5°C.
- Agiter et augmenter la température de 5°C/min, tout en surveillant
- Relever le temps où la première bille enrobée de bitume touche le fond du bécher
- Relever la température de la première bille;
- Relever le temps où la deuxième bille enrobée de bitume touche le fond du bécher, et relever la température de la deuxième bille
- Calculer la moyenne des deux températures trouvées. Cette valeur est le point de ramollissement du bitume
-

Essai Marshall

- Objet

Ces essais et déterminations sont effectués d'une part en vue de l'étude préalable de recherche de la meilleure composition à adopter pour la confection d'un enrobé ou béton hydrocarboné d'une part et d'autre part, en vue du contrôle de la constante du produit en cours de fabrication.

-Principe et définition :

L'essai de stabilité Marshall est un essai de composition exercé suivant la génératrice d'une éprouvette cylindrique semi-frettée. Cette compression est appliquée sur l'éprouvette après une $\frac{1}{2}$ h d'immersion dans l'eau à 60 °C, et à la vitesse de 0,846 mm/s. On appelle stabilité Marshall, la charge en kg, atteinte au moment de la rupture de l'éprouvette.

En même temps que l'on applique l'effort de compression, on mesure la déformation à l'aide d'un appareil se composant d'un manchon de guidage et d'un indicateur de fluage.

On appelle déformation Marshall, la diminution du diamètre vertical qui est atteinte au moment de la rupture de l'éprouvette. Cette déformation est exprimée en 1/10 de mm. Par les mesures de dimensions et de poids de l'éprouvette après confection, on détermine la densité apparente et, connaissant la densité du liant et des agrégats, on calcule le pourcentage de vides occupées par le liant.

On appelle proportion de vides occupés par le liant, le pourcentage volumique de vides des agrégats comblé par le liant.

- Le domaine de l'application

Les essais Marshall peuvent être effectués pour tous les enrobés hydrocarbonés. Il y a cependant une restriction en ce qui concerne la dimension maximum des agrégats, ceux qui doivent tous passer au module 45 (tamis de 25 mm ou passoire 31,5 mm).

Il y a lieu aussi de tenir compte de la nature du liant pour la confection des éprouvettes, le mode opératoire n'étant décrit que pour un matériau enrobé à chaud au bitume pur.

Appareillage

- 1 Presse développant 2 tonnes, sensible au kg, équipée d'un dispositif d'application de la compression à la vitesse de 0,846 mm/s ;

- 1 appareillage Marshall ou mieux, 2 modules de compactage, 2 dames, 1 piston extracteur, 2 appareils de stabilité, d'un appareil pour mesurer la déformation (indicateur de fluage).
- Le comptage est réalisé par les coups répétés du marteau pesant 4,5 kg et tombant verticalement d'une hauteur de 45 cm. Chaque coup porte sur la presque totalité de la surface de l'éprouvette.
- 1 appareil de stabilité Marshall.
- La mâchoire semi-cylindrique supérieure coulisse librement sur les 2 tiges de guidage.
- Lorsqu'une éprouvette est placée entre les mâchoires, les extrémités en regard de ces dernières doivent être à 19,1 mm l'une de l'autre.
- 1 indicateur de fluage, petit appareil à vernier coulissant, gradué en 0,5 mm, qui s'adapte lors de la mesure à une des tiges de guidage.
- Bain d'eau thermostatique réglé à 60 °C, et pouvant contenir simultanément sur un support perforé au moins 4 éprouvettes complètement immergées et 2 appareils de stabilité Marshall.
- **Mode opératoire :** En raison de la dispersion de l'essai, on confectionnera au moins quatre éprouvettes pour chaque formule étudiée.

* Préparation des éprouvettes

- Dans un récipient métallique de 2 000 cm³ de capacité environ, placé sur le plateau d'une balance, on pèse successivement les quantités fixées des différents agrégats, filler compris. On mélange énergiquement et on porte le récipient et son contenu dans une étuve réglée à 175-190 °C où ils séjourneront pendant une heure.
- Dans le dernier quart d'heure du chauffage des agrégats, on porte dans une étuve réglée à 140 °C les modules à confection (base, cylindre et hausse montés), la dame de compactage, le piston extracteur.
- Dans un second récipient, de 2 000 cm³, on pèse la quantité prévue de liant, et on chauffe celui-ci par exemple dans l'étuve réglée à 140 °C, de manière à lui conférer la fluidité nécessaire à l'enrobage, sans qu'il atteigne la température où la vaporisation des huiles devient excessive (le bitume ne doit pas émettre de vapeurs).

- On retire d'abord de son étuve, le récipient contenant le liant, puis les agrégats, et l'on verse ceux-ci dans le récipient du liant. On mélange la totalité à la cuillère. La température du mélange ne doit pas être en-dessous de 150 °C à la fin du malaxage. Si elle est en-dessous de cette valeur, on ne doit en aucun cas réchauffer le mélange. Qui doit être rebuté.
- Le mélange pourra être effectué dans un malaxeur mécanique convenable par exemple du type à axe vertical et à contre-courant. Le malaxeur devra être tel que la ségrégation des matériaux soit réduite au minimum. Dans ce cas, on confectionnera 6 éprouvettes pour chaque mesure, au lieu de 4. On portera dans le malaxeur les agrégats chauffés à 175-190 °C, comme il a été indiqué, puis la quantité voulue de bitume. On vérifiera que la température ne soit en-dessous de 125 °C à la fin du remplissage du dernier moule. On pourra utiliser un malaxeur chauffant, mais dans ce cas, on doit vérifier avec le plus grand soin qu'il ne se produit de surchauffe au sein du matériau durant le malaxage, et le chauffage du malaxeur devra être aussi modéré que possible.
- Dans le cas où on utilise un malaxeur mécanique, on devra avoir un jeu complet de 6 moules, bases et pistons.
- Dans ce cas, pour éviter un refroidissement excessif du mélange on pourra réintroduire celui-ci dans l'étuve à 140 °C, après malaxage pour une durée de 15 min au maximum.
- On sort de l'étuve le moule à confection. On l'enduit intérieurement d'une légère couche d'oléate de soude de glycérine, puis on place dans le fond 2 disques de papier filtre.
- On verse plusieurs fois la gâchée, en tassant à chaque fois avec la cuillère.
- On égalise la surface avec celle de l'extracteur, auquel on communique un léger mouvement de rotation. On place un disque de papier filtre sur le mélange et on dame à raison de 50 coups sur chaque 2 bases de l'éprouvette. Pour cela, il est préférable de placer le moule sur un support de fixation, à 50 cm au-dessus du sol. On maintient fermement à la verticale la tige de fer, la dame et on laisse tomber 50 fois sur le marteau. On démonte et remonte le moule en intervertissant la base et la hausse. On répète à nouveau le damage.

- On enlève la base.
- On place l'éprouvette toujours dans son moule sous un robinet d'eau pendant 5 min afin d'accélérer le refroidissement (L'éprouvette est couchée de l'eau coule sous le moule).
- Pour démouler, on fait passer l'éprouvette dans la hausse, dont le diamètre est légèrement plus grand que celui du moule proprement dit, en s'aidant du piston extracteur et de la presse. L'éprouvette, qui doit être manipulée avec soin, est numérotée et laissée pendant 1 h au moins à l'air libre afin qu'elle soit à la température ambiante. Elle doit avoir une hauteur de 63,5 mm à 5 mm près. Si on utilise des gâchées de 1150 à 1175 g, les hauteurs des éprouvettes sont presque toujours dans ces limites.
- Si cette tolérance n'est pas respectée, on doit modifier en conséquence le poids de la gâchée à placer dans le moule. Les disques de papier filtres qui restent collés sur les bases ne sont pas retirés.
- Pendant ce temps, on passe à la confection d'autres éprouvettes. Il est pratique d'avoir 2 dames et 2 moules à confection.
- Un jeu peut alors être placé en étuve pendant que l'autre est utilisé. Le bitume et les agrégats sont, bien entendu, laissés en étuve durant les temps morts de confection des éprouvettes. Le nettoyage de la base et de l'intérieur des moules se fait au moyen d'un chiffon imbibé de pétrole.

*** Détermination de la densité apparente**

Après refroidissement, on mesure au 1/10 de mm près les dimensions des éprouvettes (au moins 6 hauteurs et 3 diamètres) et on pèse à 5 dg près. Le rapport poids sur volume donne la densité apparente. Dans le cas où la surface est irrégulière, il est recommandé de déterminer la densité apparente de la balance hydrostatique (pesées dans l'air et dans l'eau, mais sans paraffinage de l'éprouvette). Cette méthode peut cependant ne pas marcher si la surface est poreuse.

*** Essai de stabilité et de déformation**

- Après confection des éprouvettes, celles-ci sont conservées pendant 5 h à la température ambiante puis on les immerge dans le bain thermostatique réglé à 60 °C avec l'appareil d'essai, pour une durée de 30 min.
- Pendant ce temps, on donne, entre le plateau et l'appui à bille de la presse C.B.R. l'écartement juste nécessaire pour placer l'appareil Marshall. On installe également le dispositif contrôleur de cadence réglé pour une vitesse de 0,846 mm/s. On retire de l'eau l'appareil Marshall.
- On lubrifie à la glycérine les tiges de guidage et la mâchoire supérieure devra pouvoir glisser sans heurts sur les tiges de guidage. On enlève cette dernière.
- Ces préparatifs préliminaires sont indispensables car le temps écoulé entre l'instant où l'éprouvette est retirée du bain d'eau et celui de la mesure de la stabilité doit être inférieur à 30 s.
- L'éprouvette retirée de l'eau est placée immédiatement dans la mâchoire inférieure de l'appareil d'essai, couchée et bien centrée. On adapte la mâchoire supérieure et on place le tout sur la presse C.B.R en veillant à ce que l'appui à bille soit juste en regard de son point d'appui sur la mâchoire (petite concavité). On met en contact la bille et la mâchoire ; le comparateur de l'anneau dynamométrique permet d'apprécier ce contact.
- On met le comparateur à zéro. Ensuite on adapte l'indicateur de fluage sur l'une des tiges de guidage, en s'assurant de son contact avec la mâchoire supérieure. On note la division indiquée. Deux opérateurs sont nécessaires pour cette phase d'essai ; l'un manœuvrant la presse à la cadence imposée et l'autre surveillant le comparateur de l'anneau dynamométrique et maintenant appuyé l'appareil de mesure de déformation.
- Quand tout est prêt, on manœuvre le volant de la presse pour suivre la cadence. La rupture se produit au moment où le comparateur de l'anneau dynamométrique indique un maximum. En lisant ce maximum, il faut libérer en même temps l'appareil de mesure de déformation.

- La courbe d'étalonnage de l'anneau dynamométrie permet de convertir la valeur maximale relevée sur le comparateur en charge exprimée en kg.
- Pour tenir compte du volume de l'éprouvette pour cette valeur, il suffit de multiplier cette dernière par un coefficient de corrélation correspondant à la hauteur de l'éprouvette.

- **Compacité Cr**

$$C_r = \frac{100 \times \rho_b}{\rho_r} \quad (2-2)$$

AVEC :

C_r = degré de compaction à 0,1% près

ρ_b = Masse volumique apparente en kg/m³

ρ_r = Masse volumique de référence en kg/m³

- **La déflexion de la route**

$$D_n = \left(\frac{D_a}{F_a} \right) \times F_n \quad (2-3)$$

AVEC :

D_n = la déflexion normalisée

D_a = la déflexion auscultée

F_a = la force appliquée

F_n = la force de référence

- **Détermination de la masse volumique réelle de l'éprouvette**

$$\rho_{mv} = \frac{M_5 - M_4}{1000 \times V_p - \left(\frac{M_6 - M_5}{\rho_w} \right)} \quad (2-4)$$

AVEC :

V_p = Volume du pycnomètre (m³)

M_4 = tare du pycnomètre (g) bouchon compris

M_5 = masse du pycnomètre contenant l'échantillon (g) bouchon compris

M_6 = masse du pycnomètre contenant l'échantillon et l'eau à la température choisie (g), bouchon compris;

ρ_w = masse volumique de l'eau en kg/m^3

- **Détermination de la masse volumique apparente de l'éprouvette**

$$\rho_b = \frac{M_1 \times \rho_w}{M_3 - M_2} \quad (2- 5)$$

AVEC :

$\rho_b = m_1 \times \rho_w / (m_3 - m_2)$

ρ_b = masse volumique apparente à 1 kg/m^3 près

ρ_w = masse volumique de l'eau en kg/m^3

M_1 = masse sèche de l'éprouvette

M_2 = masse sous eau de l'éprouvette

M_3 = masse saturée surface sèche de l'éprouvette

- **Le quotient Marshall**

On calcule pour chaque éprouvette le quotient Marshall Q_m , en N/mm, avec une précision de 10 N/mm:

$$Q_m = \frac{P_m}{F_m} \quad (2- 6)$$

F_m est la valeur du fluage de l'échantillon en mm

P_m est la valeur de la stabilité de l'échantillon en KN

Ce quotient Marshall nous permet de déterminer le pourcentage de vide dans le mélange bitumineux

La lecture de la valeur de la stabilité et du fluage se fait grâce au cadran du fluo mètre sur l'appareil Marshall. Un exemple type de ce fluo mètre se présente comme suit :



Figure 2-2: Image du fluo mètre

2.4 Conclusion

Le chapitre 2 aborde principalement les notions sur les méthodes de détermination des caractéristiques des matériaux. Cela veut dire que les matériaux n'ont pas été caractérisés dans ce chapitre, cependant, on a bien défini leur méthodologie. Les différentes méthodologies sont énumérées pour le béton frais, le béton durci et le mélange bitumineux.

Concernant les caractéristiques des matériaux, les essais tels que l'analyse granulométrique, l'essai d'équivalence de sable, le coefficient de forme, la pénétration à l'aiguille VICAT etc... ont été développés.

Concernant, le béton hydraulique, il a été divisé en deux parties. Une partie pour le béton frais ou on a étudié le Slump Test et la seconde partie pour le béton durci. Concernant le béton durci, on a détaillé les différentes procédures de détermination des différentes résistances caractéristiques du béton hydraulique. Aussi, pour le béton bitumineux, il a été procédé au développement de la méthodologie de l'essai Marshall.

CHAPITRE 3

ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS PHYSICO-MÉCANIQUES DU BÉTON HYDRAULIQUE CONTENANT DES CENDRES DE COQUES D'ANACARDES DE TAILLES MICROMÉTRIQUES ET NANOMÉTRIQUES SUBSTITUANT PARTIELLEMENT LE CIMENT

3.1 Introduction

Le contenu de ce chapitre recoupe un article publié dans la revue Déchets, Sciences et Techniques, numéro 83, de mars 2020. Les déchets générés par les activités humaines sont à la fois des sources potentielles de nuisances et d'impacts notamment environnementaux, mais également représentent des ressources alternatives de matière et d'énergie dont la récupération permet de réduire la pression sur les ressources naturelles. Il existe de nombreuses techniques de traitement des déchets permettant leur valorisation, parmi lesquelles figurent les traitements biologiques (Bayard et Gourdon, 2010) et les traitements thermochimiques (pyrolyse, gazéification et combustion). Ces derniers convertissent la biomasse en intermédiaires énergétiques pouvant être, à leur tour, transformés en énergie ou en d'autres combustibles liquides et en produits chimiques (Liu et al., 2017). Si les traitements biologiques et thermochimiques permettent la valorisation des déchets, les produits et sous-produits issus des procédés thermochimiques nécessitent des post-traitements avant d'être valorisés : c'est le cas des cendres de combustion et de gazéification, du gaz de pyrolyse et du syngaz. La figure ci-dessous présente les différents types de traitements des déchets, leurs procédés de conversion et les produits générés.

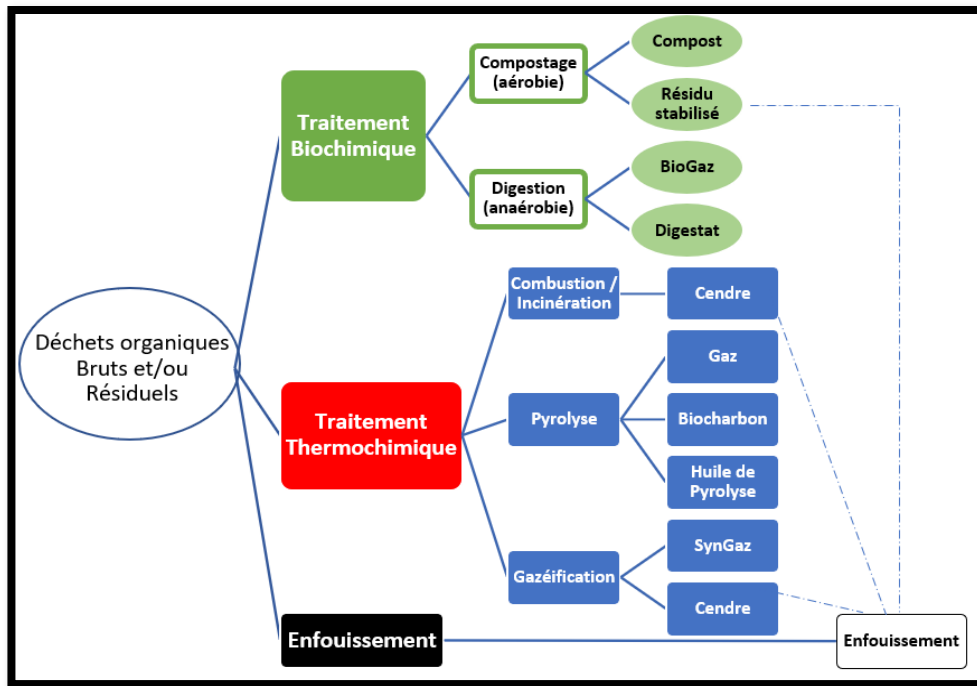


Figure 3-1 Filières de traitement envisageables pour les déchets organiques

Les traitements thermochimiques transforment les déchets soit en cendres et mâchefers pour la combustion, soit en gaz, charbon et huile pour le procédé de pyrolyse, soit enfin en syngaz et cendre pour la gazéification. Ces procédés, comme tout traitement, sont susceptibles de générer des impacts environnementaux et sanitaires s'ils ne sont pas réalisés dans les conditions opératoires appropriées. Le gaz de pyrolyse doit être ainsi brûlé afin de réduire les émissions de particules imbrûlées dans l'atmosphère. Le syngaz, composé majoritairement de monoxyde et dioxyde de carbone et de dihydrogène, contient des contaminants qui doivent être épurés avant valorisation du syngaz (**Göransson et al., 2011**). Par ailleurs, les cendres issues des traitements thermochimiques sont souvent enfouies dans un site d'enfouissement. Si le site est mal conçu ou géré comme c'est malheureusement le cas au Bénin et dans la plupart des pays en voie de développement (entrées d'eau excessives, étanchéité de fond mauvaise ou inexistante), les lixiviats formés peuvent entraîner les métaux présents en teneurs élevées dans les cendres (**Dermont, 2008**) et s'infiltrer dans le sous-sol avec des impacts environnementaux potentiellement élevés.

Pour réduire ces risques, nous avons étudié la valorisation des cendres issues de la pyrolyse des coques d'anacarde. En effet, l'anacarde est une culture de grande importance au Bénin. Avec une production annuelle de près de 150 000 tonnes, depuis les trois dernières années, elle représente la 2^{ème} production d'exportation du pays avec une contribution au PIB agricole de 7%. En termes de production de noix brutes, parmi les 33 pays producteurs de noix de cajou au monde, dont 16 pays en Afrique, le Bénin occupe la 8^{ème} position (en Afrique). Pour éviter l'exportation majoritaire des noix brutes (95%) qui fait perdre une part importante de la valeur ajoutée tirée de la transformation locale, plusieurs usines ont été installées parmi lesquelles on peut compter aujourd'hui 08 usines pour une capacité de 31 500 tonnes et plusieurs unités artisanales. Le fonctionnement de ces usines entraîne une production abondante de coques déchets (10 959 tonnes en 2013) difficiles à gérer car les coques d'anacarde représentent environ 73 % de la masse des noix brutes et constituent des déchets polluants, corrosifs, nocifs et toxiques difficiles à gérer par les unités de transformation. Pour aider les industriels à mieux gérer les déchets issus de la transformation des noix d'anacarde et aussi les aider à résoudre les difficultés d'accès à l'énergie, une expérience de valorisation des coques d'anacarde par pyrolyse avait été menée avec l'appui technique du CEFREPADE et du RONGEAD en 2013 pour produire du gaz et des biocharbons à partir des coques d'anacarde (**Godjo et al., 2015**). Le pyrolyseur utilisé est conçu suivant une approche intégrée qui prend en compte la fabrication locale (matériaux locaux, compétences locales, etc.), la maintenance locale mais aussi la dimension économique (l'effort financier des industriels). Suivant cette approche, tous les matériaux utilisés lors de la fabrication sont des matériaux disponibles localement. Si les matériaux pouvant permettre d'assumer les fonctions de combustion (tôle d'acier) et d'isolation thermique (argile) sont localement disponibles, ceux pouvant permettre une meilleure étanchéité au niveau des trappes qui servent à isoler de façon étanche la trémie, le brûleur et la porte du réacteur de pyrolyse qui constituent des ouvertures pouvant rendre le milieu non anaérobique pendant la phase de diminution de la température (fin de libération de gaz et finalisation de la génération de biochar), n'ont pas été localement disponibles. Ceci fait qu'après la libération du gaz, bien que le pyrolyseur soit fermé, l'air pénètre à l'intérieur du pyrolyseur, ce qui explique l'apparition des cendres. Ces dernières se retrouvent comme produits de pyrolyse parce qu'il n'est pas possible de retrouver des joints

pouvant permettre une étanchéité pour des températures de l'ordre de 600°C. Le rendement en cendre des pyrolyseurs développés au Bénin est d'environ 2% contre environ 82 % de gaz et environ 16 % de charbon de la masse de coques traitées. La présente valorisation étudiée consiste en l'incorporation des cendres obtenues dans du béton.

Des travaux antérieurs ont investigué la valorisation de cendres dans le béton (**Ottosen et al., 2016 ; Horsakulthai et al., 2011 ; Blaisi, 2018**). **Randriamalala et al. (2014)** ont montré que la valorisation de cendres volantes (avec 10% de substitution du ciment) dans la production de béton permet d'avoir une meilleure résistance mécanique que n'offre le ciment à partir de 28 jours de prise. **Sahmaran et Li (2009)** ont montré que l'utilisation de cendres volantes dans les bétons permet de réduire la consommation des matières premières et d'énergie mais aussi à améliorer les propriétés physico-chimiques et mécaniques du béton ainsi que sa durabilité. D'autres travaux ont été menés concernant les déchets dangereux. Des cendres issues de ces déchets sont valorisées dans le béton par la méthode de stabilisation solidification (**Shi & Fernández-Jiménez, 2006**). La stabilisation des polluants dans le béton est liée à la fois à la forme chimique que prennent les métaux dans cette matrice alcaline (stabilisation chimique) et à la barrière physique constituée par la structure solide monolithique obtenue. Elle permet de réduire le niveau de risque associé à chacun des contaminants en limitant leur mobilité. Elle a pour but d'amener les contaminants sous une forme moins soluble ou moins toxique. Pour d'autres auteurs, elle fait référence à un processus par lequel un déchet est converti en une forme plus stable chimiquement. Cependant, on ne saurait s'arrêter juste sur la stabilisation. En effet, pour être efficace, il faut que la méthode utilisée permette d'assurer la barrière chimique de la stabilisation mais aussi la barrière physique complémentaire qu'est la solidification. D'autres travaux ont étudié la réutilisation de déchets plastiques recyclés dans le mélange de béton comme matériau de construction (**Siddique et al., 2008**). La technique a été testée pour des pavés, les travaux routiers ainsi que d'autres travaux en génie civil nécessitant moins de résistance à la compression. Cependant, cette technique a des lacunes. Tout d'abord, intégrer des particules de plastique directement aux particules de ciment n'est pas souhaitable car les plastiques contiennent du carbone, et le mélange carbone-ciment abaisse le pouvoir collant du ciment.

Dans le cadre de notre étude, les déchets de coques d'anacarde utilisés sont pyrolysés et les résidus de cendres obtenus sont mélangés avec les agrégats du béton.

L'objectif de cette étude vise à incorporer dans le béton dosé à 350 kg de ciment par /m³ de béton, différents pourcentages de cendres issues des coques d'anacarde et d'évaluer le comportement physico-mécanique du mélange béton et cendre de déchets en vue de la réduction de l'utilisation du ciment portland. L'évaluation environnementale reste à faire. L'objectif de la présente étude est de déterminer les conditions d'incorporation de cendres de coques d'anacarde en substitution partielle du ciment dans le béton. Les cendres utilisées sont issues des coques d'anacarde collectées à Afonkanta Benin Cashew, une des usines de transformation des noix d'anacarde en amande. Les différents ajouts de cendre se substituent graduellement, à la quantité de ciment additionné au béton, à des proportions de 5%, 10%, 15%, 20% et 25% de cendres. Les caractéristiques physico-mécaniques y afférant, à savoir la résistance à la compression, la résistance à la traction, la conductivité hydraulique et l'affaissement du béton dans le temps, ont été déterminées. Les résultats physico-mécaniques montrent que les meilleures caractéristiques du mélange hydraulique ont été obtenues à la proportion de 15% de cendre. En effet, un mélange de béton hydraulique de 15% de cendre à 28 jours de maturité donne une résistance à la compression de 51.83 N/mm², une résistance à la traction de 13.65 N/mm² et une faible valeur de conductivité hydraulique de 3.48×10^{-17} m/s. Il est aussi observé un affaissement moyen de 3 mm

3.2 Matériaux et Méthodes

Matériels et matériaux étudiés Le béton est composé de sable, gravier, ciment et éventuellement des cendres (provenance coques d'anacardes). Ce béton expérimental a été réalisé dans le Laboratoire d'Étude et de Recherche en Génie Civil (LERG) de l'Université d'Abomey Calavi. C'est un béton dosé à 350 kg de ciment par m³ de béton et réalisé suivant les règles établies par la norme AFNOR. La méthode utilisée pour la formulation du béton est celle de **Dreux et al. (1983)** et **Makhloufi et al. (2013)**. Certains matériels ont été utilisés pour la production du béton : une bétonnière, une balance, des éprouvettes de béton, le cône d'Abrahams, le vibreur, une louche, des bassines et des bols. Les matériaux utilisés pour la

production du béton sont les suivants : sable marin, gravier, ciment et adjuvant (cendres des coques d'anacarde).

Le sable marin du Sud du Bénin, dans le département du Mono, a été utilisé. L'analyse granulométrique (AG) de ce sable réalisé suivant la norme NFP 18-540 montre que 50% des grains ont un diamètre inférieur à 4 mm et le reste compris entre 4 mm et 12 mm (Figure 3-2).

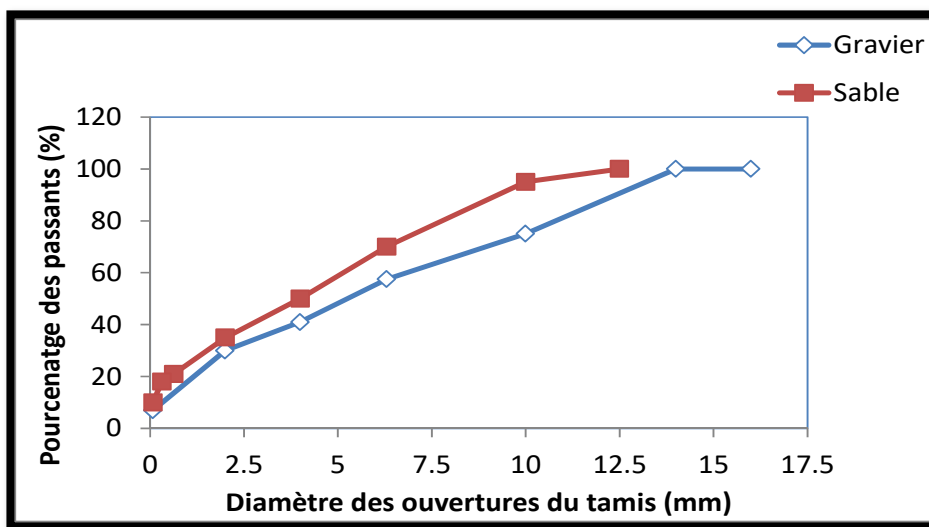


Figure 3-2 Analyse granulométrique du sable et du gravier utilisé

L'essai d'équivalence de sable permettant la détermination du pourcentage de propreté du sable a aussi été réalisé suivant la norme NF EN 933-8. Le mode opératoire de l'essai a été réalisé selon **Ackerman et al. (1999)**. Au terme de cet essai, nous avons obtenu une moyenne de pureté de sable de 72.65 %.

Le gravier utilisé est celui du Sud-Bénin dans l'arrondissement de Sèto situé dans la commune de Bohicon dans le département du Zou. Ce gravier est du 5/15. Son analyse granulométrique a été réalisée suivant les règles de la norme française NFP 18-540 et les essais de caractérisation ont été aussi réalisés. La figure 2 montre la distribution granulométrique du gravier dont la grande proportion a un diamètre inférieur à 14 mm. Moins de 10% des particules du gravier ont un diamètre inférieur à 0.08 mm. La masse volumique des particules solides du

gravier a été évaluée à 2,73 t/m³. L'essai de coefficient de forme a été aussi réalisé sur le gravier. Cet essai a été fait simultanément avec des tamis à mailles circulaires et des tamis à mailles rectangulaires. Il permet de déterminer le pourcentage de gravier plat. Moins le gravier est plat, meilleure est la résistance du béton. Le coefficient d'aplatissement et le coefficient de forme ont été estimés respectivement à 8.5 et 91.5.

Les cendres utilisées sont des cendres de fond, issues de la pyrolyse des coques déchets de noix d'anacarde réalisée au sein de l'unité de pyrolyse de la Plateforme scientifique et technologique de valorisation des déchets de l'Institut National Supérieur de Technologie Industrielle (INSTI) de Lokossa. Les conditions opératoires n'étant pas parfaitement étanches, de l'air pénètre dans le réacteur et la réaction globale est de la pyro-gazéification plutôt que strictement de la pyrolyse. La figure 4 montre une photo des cendres. Les coques déchets ont été collectées à Afonkanta Benin Cashew, une des usines de transformation des noix d'anacarde en amande.

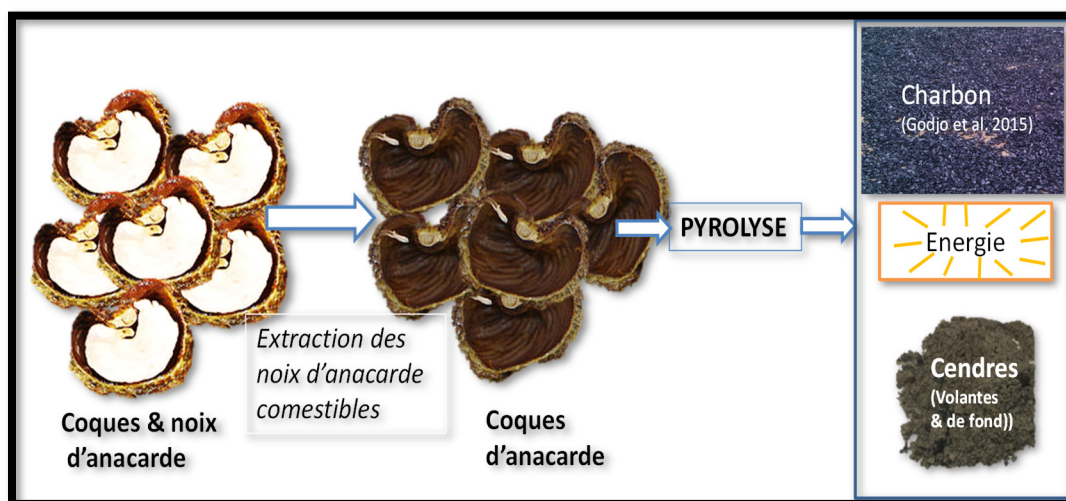


Figure 3-3 Processus de transformation des coques d'anacarde en cendre

Comme le montre la Figure 3-3, la pyrolyse dans nos conditions opératoires permet de valoriser sous forme de gaz environ 82 % de la masse de coques traitées (Godjo et al. 2015), et produit environ 16 % de biocharbon (Godjo, 2017) et 2% de cendres. La proportion élevée de gaz provient des entrées d'air dans le réacteur utilisé, qui induisent une gazéification.

Les cendres végétales, comme les cendres des coques de noix d'anacarde, ont généralement des compositions chimiques assez semblables. Les travaux de **Anowai et Job (2017)** montrent que la composition des cendres de fond est proche de celles des cendres volantes. Elles contiennent plusieurs oxydes, dont le quartz (SiO_2). La composition des cendres utilisées est présentée dans le Tableau 3-1.

Tableau 3-1: Composition chimiques des cendres de coque d'anacarde
Source (Anowai et Job, 2017)

Oxydes	Teneurs (en % des matières sèches)
SiO_2	34
Al_2O_3	32
Fe_2O_3	12
CaO	10
MgO	8
K_2O	4



Figure 3-4 Image des cendres expérimentales de coques d'anacarde

Les analyses réalisées au laboratoire d'Ingénierie des Produits, Procédés et Systèmes (LIPPS) de l'École de Technologie Supérieure (ETS) à Montréal au Canada sur la composition et la distribution granulométrique de ces cendres ont montré qu'elles sont constituées de particules ultrafines (diamètre inférieur à 100 nm) et de particules fines de diamètre inférieur à 10 µm (Figure 3-5).

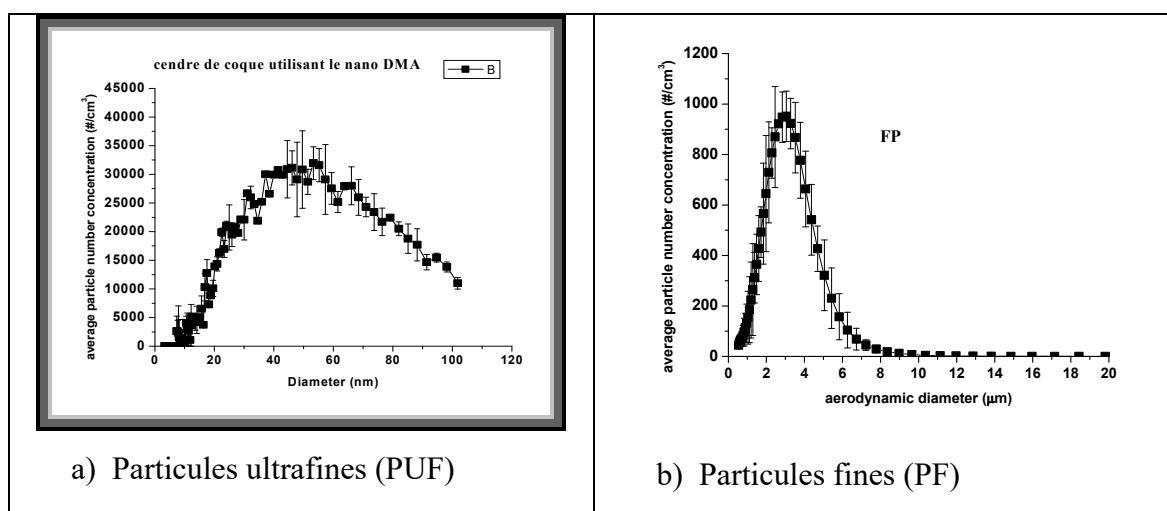


Figure 3-5 Distribution granulométrique des cendres expérimentales de coques d'anacarde - a) particules ultrafines- b) Particules fines

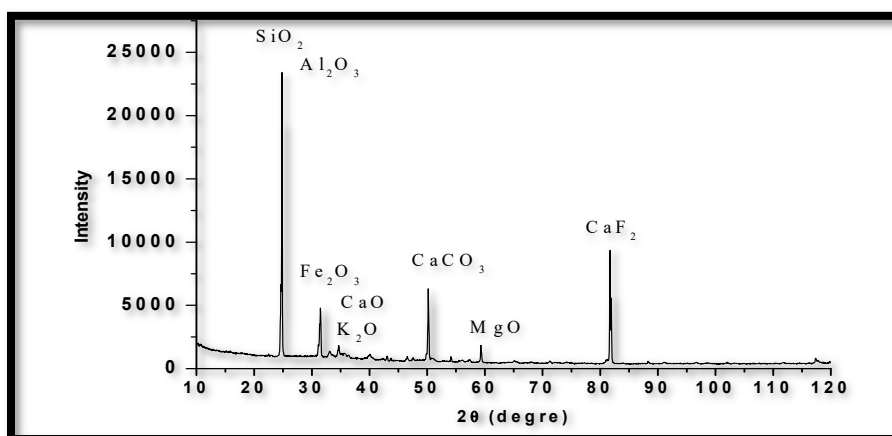


Figure 3-6 Composition des cendres de coque d'anacarde utilisées

L'analyse par diffraction au rayons-X révèle que ces cendres sont constituées, entre autres composés, des oxydes tels que SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 , (Figure 3-6). Pour **Anowai et Job (2017)**, ces trois oxydes comptent pour près de 88% de la composition des cendres végétales. **Thirumurugan et al. (2018)** ont montré que les cendres de coques de noix d'anacarde contiennent la plupart des composés connus pour avoir les propriétés de liaison nécessaires au bétonnage et peuvent partiellement remplacer le ciment : leur pourcentage en SiO_2 et Fe_2O_3 (respectivement 54,85 et 4,20%) sont plus élevés que ceux du ciment PPC (20,98 et 3,92%).

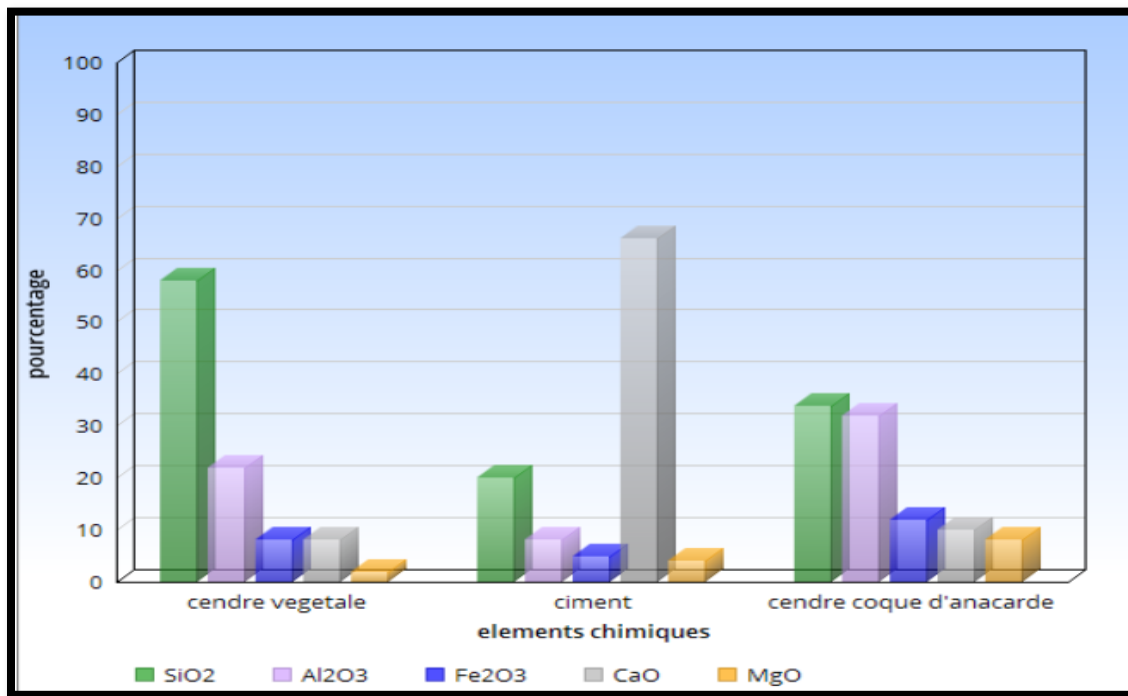


Figure 3-7 Étude comparative des principales compositions des cendres végétales et du ciment.

Adapté de (Anowai et Job, 2017).

La méthode de stabilisation-solidification utilisée a pour but de stabiliser le comportement physico-mécanique de la cendre dans le béton et dans le même temps de solidifier (rendre inactif les particules dangereuses du cendre en les liant aux molécules constituant le béton) (**Inoue, 2000**). Ainsi, on obtient un mélange homogène constitué du béton et de la cendre similaire au produit élaboré et étudié par (**Anowai et Job, 2017**). Les propriétés physico-

mécaniques du mélange à savoir la résistance à la compression, la résistance à la traction, la conductivité hydraulique et l'affaissement du béton frais sont soigneusement étudiés. L'essai de compression simple du béton (Contrainte de compression du béton en N/mm^2) permet de mesurer la résistance à la compression du béton. (Fapohunda, Akinbile, & Shittu, 2017).

L'essai de traction consiste à déterminer la résistance en traction des éprouvettes de béton. Par ailleurs, le béton résiste moins à la traction. L'essai de conductivité hydraulique permet de mesurer la capacité de l'eau à traverser notre béton hydraulique. En d'autres termes, moins il est élevé et plus le béton est de meilleure qualité. Cet essai permet de mesurer la vitesse que possède un solvant à traverser un matériau. Il est indispensable, car il donne une idée du matériau, de son pouvoir à laisser passer certains fluides (Kalinski & Yerra, 2006). L'essai d'affaissement est réalisé sur le béton de ciment frais pour déterminer sa consistance. Il s'effectue avec le cône d'Abrahams et permet d'évaluer l'affaissement du béton dans le temps.

L'étude des propriétés physico-mécaniques du mélange est faite graduellement suivant l'ajout de l'adjuvant (Cendre de coque d'anacarde) à 0, 5, 10, 15, 20 et 25% de cendres (Vijayalakshmi et al., 2012). Par ailleurs, les cendres se substituent graduellement au ciment. Cela implique que l'ajout d'une quantité massique **X** de cendres entraîne la soustraction de cette même quantité **X** de ciment dans le mélange. La méthode utilisée pour la formulation du béton hydraulique est celle de (Dreux et al., 1983).

Les travaux expérimentaux ont été réalisés sur différents types de mélange à savoir :

- Le béton hydraulique contenant **0% de cendres** : ce type de béton donne des valeurs de référence.
- Le béton hydraulique contenant **05% de cendres** ;
- Le béton hydraulique contenant **10% de cendres** ;
- Le béton hydraulique contenant **15% de cendres** ;
- Le béton hydraulique contenant **20% de cendres** ;
- Le béton hydraulique contenant **25% de cendres**.

Les prélèvements et les essais sur le mélange hydraulique ont été faits conformément à la norme Française AFNOR NF 12390. Les éprouvettes utilisées pour l'obtention des résultats expérimentaux ont une dimension de 15 cm de diamètre et 30 cm de hauteur. Ce sont des éprouvettes de forme cylindrique.



Figure 3-8 Image montrant la production du béton hydraulique

3.3 Résultats expérimentaux

La résistance à la compression

Les résultats des essais de compression simple du béton sont présentés à la Figure3.9.

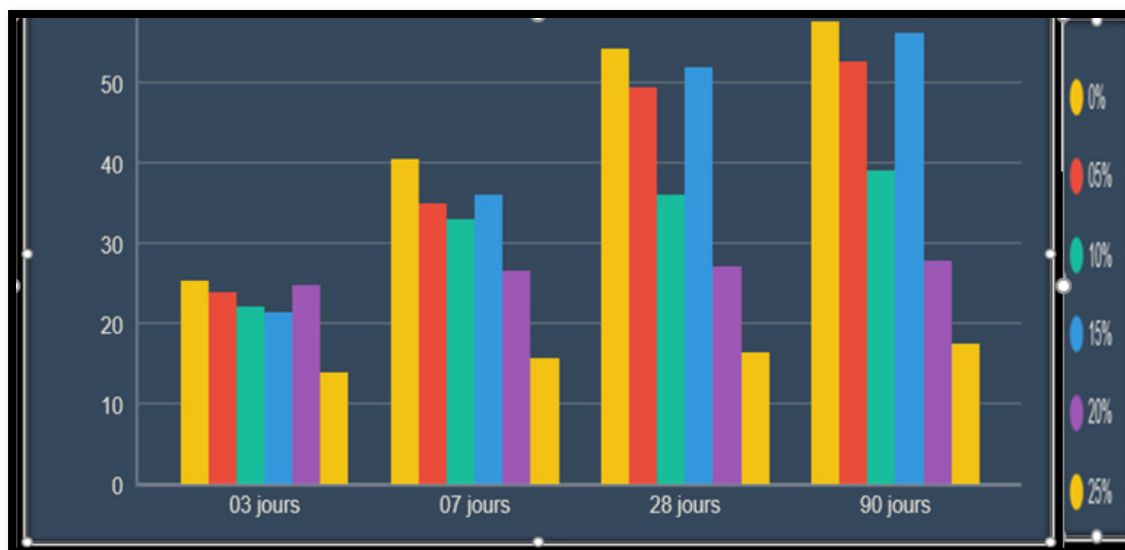


Figure 3-9 Diagramme exprimant la résistance à la compression (MPa) du béton en fonction des jours d'écrasement du béton

Ces résultats montrent une évolution des résistances à la compression au fil des jours pour tous les types de mélange. Aussi, pour chaque type de mélange de béton, les proportions 0% et 15% présentent majoritairement les meilleures performances. Par ailleurs, la résistance à la compression croît au fil des jours pour tous les types de formulation de béton expérimenté. Cependant, pour un même type de jours de béton, on observe globalement une régression des résistances à l'exception du béton dosé à 15% qui lui connaît une augmentation. En effet, l'ajout de cendre entraîne une diminution progressive du ciment, ce qui explique la régression de la résistance à la suite de la substitution du ciment de 5% et de 10%. Le pic observé à 15% implique qu'à 15% d'ajout de cendre, ce dernier présente dans le béton des propriétés similaires au ciment dans le béton. La cendre de coque d'anacarde se comporte presque comme le ciment. Il acquiert les caractéristiques d'un parfait liant. Cependant en deçà ou au-delà de 15%, il est un liant de qualité moindre.

La résistance à la traction

Les résultats obtenus des essais de traction sont présentés à la Figure 3-10:

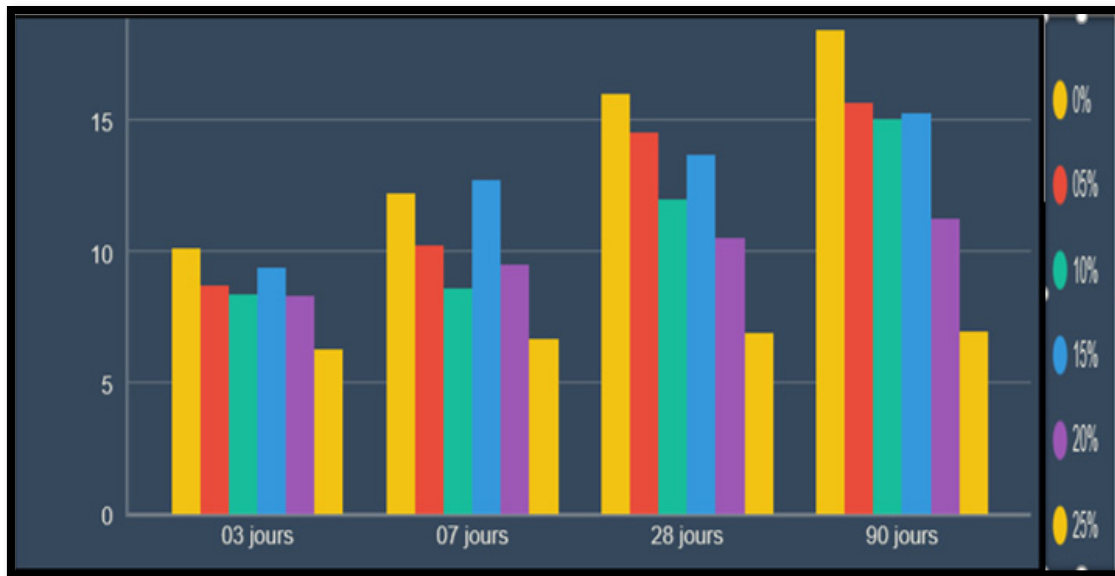


Figure 3-10 Diagramme exprimant la résistance à la traction du béton (Mpa) en fonction des jours d'écrasement du béton

Les résultats montrent une évolution des résistances à la traction au fil des jours pour tous les types de mélange. Aussi, pour chaque type de mélange de béton, les proportions 0, 10 et 15% présentent respectivement les meilleures performances. Aussi, pour chaque type de mélange de béton, les proportions de 0 et 15% présentent les meilleures performances. Par ailleurs, la résistance à la traction croît au fil des jours pour tous les types de formulation de béton expérimenté. Cependant, pour un même type de jours de béton, on observe globalement une régression des résistances à l'exception du béton dosé à 15% qui lui connaît une augmentation. En effet, l'ajout de cendre entraîne une diminution progressive du ciment, ce qui explique la régression de la résistance à la suite de la substitution du ciment de 5 et de 10%. Le pic observé à 15% implique qu'à ce pourcentage d'ajout de cendres, ce dernier présente dans le béton des propriétés similaires au ciment dans le béton, à savoir qu'à cette valeur, les cendres de coque d'anacardes se comportent presque comme le ciment. Il acquiert les caractéristiques d'un parfait liant. Cependant en deçà ou au-delà de 15%, il est un liant de qualité moindre.

Essai de conductivité hydraulique du béton

Les résultats obtenus des essais de conductivité hydraulique du béton (Valeur de la perméabilité en 10-17m/s du béton MPa) sont présentés à la Figure 3 11.

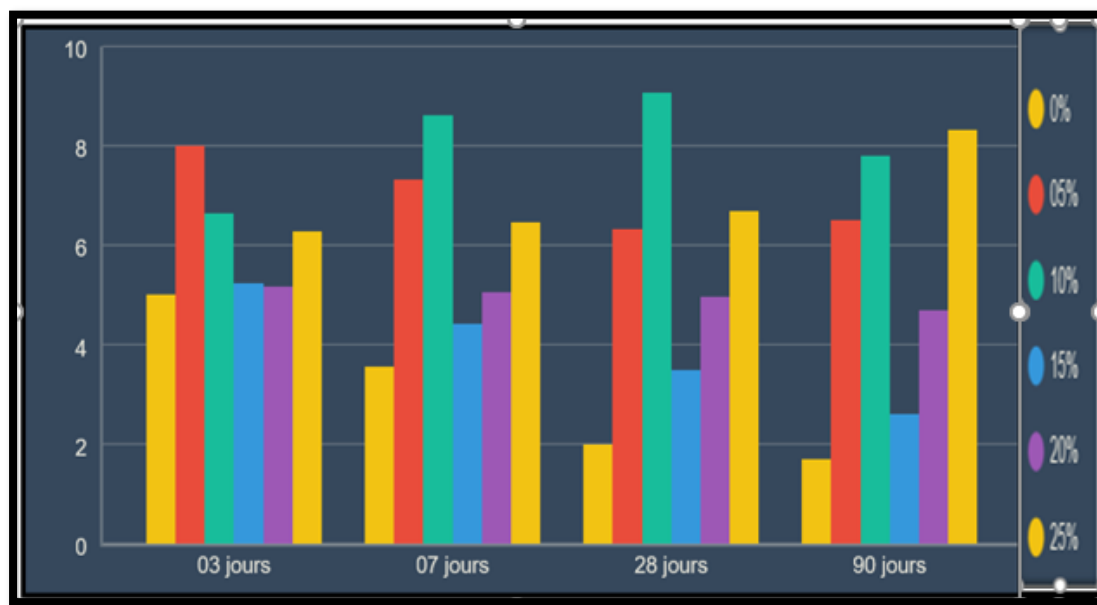


Figure 3-11 Diagramme exprimant la conductivité hydraulique du béton en fonction des jours d'écrasement du béton

L'essai de conductivité hydraulique permet de mesurer la capacité de l'eau à traverser le béton. Lorsque les valeurs sont moins élevées, le béton a une meilleure résistance à l'eau. Les résultats montrent que les proportions de 0 et 15% présentent les meilleurs résultats. Par ailleurs, la conductivité hydraulique du béton diminue au fil des jours. Cela s'explique qu'avec le murissement du béton, on remarquera moins d'espace poreux. Aussi, à 15% les essais de conductivité hydraulique semblent avoir les mêmes résultats que ceux du béton témoin (0%). Ceci explique qu'à 15%, le couple cendre-ciment agrégat produit des réactions chimiques qui favorisent la consolidation du béton. Cela veut dire qu'à 15% d'ajout de cendre, le béton expérimental est autant imperméable à l'eau que le béton ordinaire (sans ajout de cendre).

Mesure de l'affaissement du béton frais (Hauteur d'affaissement en mm)

Les résultats obtenus des mesures de l'affaissement moyen du béton frais sont présentés dans le Tableau 3-2

Tableau 3-2: Diagramme exprimant la hauteur d'affaissement du béton en fonction des jours d'écrasement du béton

Durée de la cure du béton	Pourcentage de cendre ajouté au béton					
	0%	5%	10%	15%	20%	25%
03 jours	03	04	04.33	03	07.07	08.33
07 jours	03	04	04.33	03	07.07	08.33
28 jours	03	04	04.33	03	07.07	08.33
90 jours	03	04	04.33	03	07.07	08.33

Les affaissements sont tous dans une marge raisonnable. Ils varient tous entre 03 mm et 08.33 mm (marge raisonnable). Cependant, on remarque que les proportions 0% et 15% présentent les mêmes résultats. En effet, l'affaissement ne dépend pas du nombre de jours. Tous les bétons sont produits le même jour et l'affaissement est mesuré le jour de la production et non dans le temps. C'est pour cela que les résultats sont les mêmes par rapport à la cure du béton. Cependant, la hauteur d'affaissement est influencée par le taux de cendre ajouté à cause de la finesse et de la texture des cendres qui sont différentes de celles du ciment. Plus le taux de cendre substituant le ciment augmente, plus la hauteur d'affaissement du béton augmente.

3.4 Analyse et discussion des résultats

Le béton est un matériau très complexe. Au fil des années, divers adjuvants lui ont été ajouté dans le but d'améliorer son comportement physico-mécanique. C'est le cas de l'ajout de la cendre des coques de noix d'anacardes dans notre recherche. Toutefois, soulignons que

d'autres chercheurs avant nous, ont travaillé sur les ajouts au béton hydraulique. C'est le cas de **Thomas (2007)** qui a montré que les cendres volantes permettent d'augmenter les capacités physico-mécaniques du béton jusqu'à 40 % de cendres. Aussi, il a indiqué que la température de la cure a une influence sur le béton. De même que les cendres de briques de verre utilisées comme remplacement du ciment dans le béton (**Shi et al., 2007**) sont potentiellement intéressantes en tant qu'addition de minéraux pour la production de béton (**Bertolini et al., 2004**), l'ajout des cendres de coques de noix d'anacardes a amélioré la résistance du béton. Mais sa porosité a été augmentée, ce qui a entraîné du coup l'augmentation de la conductivité hydraulique. Il est démontré que tous les adjuvants de fine granulométrie participent à la résistance physique du béton.

Les résultats que nous avons obtenus peuvent être vus sur deux angles. Au premier abord on pourrait dire que les coques d'anacardes possèdent certaines propriétés chimiques qui ne nuisent pas au ciment. Le fait de ne pas nuire au ciment à certains pourcentages favorise l'homogénéité du couple granulats-liant. A 15% de cendres, le béton est parfaitement homogène et possède de meilleures caractéristiques. Au-delà de cette valeur, on assiste à une baisse des résistances physiques du béton. Sur un deuxième angle, il faut souligner que les cendres sont d'une granulométrie extrêmement faible, et permettent d'occuper les fins pores du béton, ce qui augmenterait la résistance du béton jusqu'à un certain pourcentage. Mais par contre au-delà de 15% on les trouve en très grande quantité. Cela occasionne une baisse de l'adhérence granulats-liant et une diminution graduelle des résistances physico mécaniques du béton.

Les résultats physico-mécaniques que nous avons obtenus en valorisant les cendres dans la construction du béton hydraulique sont semblables à ceux antérieurement obtenus par certains auteurs. Ainsi, (**Oruc et al. 2006**) avaient démontré que l'ajout du ciment dans le béton hydraulique améliore considérablement ses caractéristiques physico-mécaniques. Aussi, (**Randriamalala et al. 2014**) avaient montré que la résistance du béton en substitution avec 10% de cendres est plus élevée qu'avec du ciment CPA à partir de 28 jours d'une part et que d'autre part, les cendres volantes deviennent un bon adjuvant fluidifiant du béton par ajout sans aucun retrait et avec une amélioration de la maniabilité et la résistance à 28 jours. En

effet, les cendres végétales renferment certaines molécules du ciment tels que l'oxyde ferrique, l'oxyde d'alumine, l'oxyde de silice qui sont aussi présents dans le ciment. Les cendres issues de la coque de noix d'anacardes utilisées dans nos travaux ne dérobent pas à ses règles et renferment aussi ces molécules. On arrive à la conclusion selon laquelle ces éléments chimiques sont responsables du pouvoir collant du ciment et le fait qu'ils sont présents dans les cendres améliorent le béton hydraulique. Cependant leurs concentrations sont faibles dans les cendres et c'est la raison pour laquelle leurs effets positifs sont mineurs sur le mélange tel que dans l'article précité. Remarquons que les cendres végétales contiennent plus de silice que de ciment. Sachant que le sable contient aussi plus de silice, les cendres peuvent donc remplacer en petites portions le sable fin. Notons aussi que les cendres des coques d'anacardes sont constituées en majorité de particules ultrafines (diamètre inférieur à 100 nm), dont plus fin que le sable fin utilisé dans le béton hydraulique, ce qui ne peut qu'être plus favorable lorsqu'on substitue une portion du sable fin par les cendres des coques d'anacardes. Aussi, (**Ban et Ramli 2011**) et (**Naik 1999**) ont étudié plus de 5 types de cendres végétales. Ils sont tous venus à la conclusion selon laquelle le faible diamètre des cendres, ainsi que leurs compositions chimiques améliorent la qualité du béton hydraulique. Au delà de 15 %, le béton hydraulique perd progressivement son adhérence. Ce qui conduit à une diminution progressive des caractéristiques physico-mécaniques du béton.

3.5 Conclusion

Le béton est l'un des matériaux de construction, dont le comportement est difficile à prévoir. Cependant, dans le but de concevoir un béton renfermant des cendres issues de matières résiduelles, une série de bétons a dû être confectionnée. Elle a été entièrement soumise à plusieurs tests physico-mécaniques. Il en ressort qu'un béton renfermant une plus grande quantité de cendres doit idéalement contenir **15%**. A cette proportion, le béton hydraulique présente de meilleures caractéristiques physico-mécaniques. En effet les cendres, vue leurs petites granulométries et leurs compositions chimiques, améliorent la qualité d'un béton dosé à 350 kg/m³. D'une part, la granulométrie fine (plus fine que le sable) permet aux cendres d'occuper les petits vides microscopiques du béton hydraulique, ce qui diminue la porosité et

par conséquent augmente la résistance mécanique du mélange. Et d'autre part, les caractéristiques chimiques des cendres de coque d'anacardes sont proches de celles du ciment. A cela s'ajoute la forte quantité de silice présente dans les cendres. La silice reste en très grand pourcentage dans le sable, ce qui fait que mettre les cendres de coque de noix d'anacardes dans du béton hydraulique, revient à mettre du sable contenant une fine quantité de ciment dans le béton hydraulique. Ce qui ne pouvait qu'être bénéfique. Enfin, 15% de cendres dans le béton contribue à une diminution de la quantité de ciment utilisée, une diminution de la pollution environnementale (**Akinola, 2016**) et un pas de plus dans le développement de la méthode de la stabilisation-solidification.

CHAPITRE 4

VALORISATION DES CENDRES ISSUES DE LA PYROLYSE DES COQUES DÉCHETS DE NOIX D'ANACARDES DANS LE BÉTON BITUMINEUX : IMPACT SUR LES PROPRIÉTÉS PHYSICO-MÉCANIQUES DU BÉTON

4.1 Introduction

Le contenu de ce chapitre recoupe un article publié dans la revue International Journal of Advanced Research and Publications (volume 4 - No 2, édition de Février 2020).

La pollution de l'environnement par les matières résiduelles est un problème mondial, vu l'augmentation croissante de quantité déchets produits par habitant, et aussi l'augmentation de la population mondiale. Toutefois, il existe plusieurs procédés de gestion des déchets organiques et inorganiques, incluant le traitement thermique et le traitement biologique. Certaines matières jugées dangereuses, sont incinérés au Canada (**Carpentier 1977**). L'incinération des matières dangereuses tels que les métaux lourds, ne résout pas le problème. Les déchets enfouis s'infiltreront plus tard dans la nappe phréatique. L'enfouissement des déchets est nocif pour la santé humaine (**Quintus 2007**). Utiliser la méthode d'enfouissement pour traiter les déchets, c'est créer un autre problème plus complexe. En effet, après l'enfouissement des déchets, on assiste à la putréfaction des matières organiques qui finissent par produire une lixiviation riche en contaminant et un gaz. Ce lixiviat est nuisible pour la santé.

Des études ont été menées par des chercheurs dans le but d'ajouter des adjuvants au mélange bitumineux. On voulait non seulement améliorer le mélange bitumineux, mais aussi y faire disparaître des déchets dangereux pour la santé. En effet, déjà en 1979, (**Langlois 1979**) a réalisé un mélange bitumineux contenant une concentration élevée de caoutchouc. Il avait remarqué qu'à un certain pourcentage, le mélange bitumineux obtenu avait de meilleures caractéristiques physico-mécaniques. En gros, le couple (mélange bitumineux- caoutchouc) résiste plus au vieillissement, augmente la ténacité de la chaussée, résiste mieux aux déformations et à la fatigue de celle-ci. Dans le même contexte, (**Kakpo 2017**) a démontré dans son rapport de maîtrise à l'ETS de Montréal que certains adjuvants augmentent les

capacités mécaniques des mélanges bitumineux. Ainsi, il prouva à son tour qu'à certaines proportions les cendres de verre améliorent les caractéristiques du mélange bitumineux. De plus (**Horsakulthai et al. 2011**) ont remplacé graduellement dans du béton des cendres de riz par le ciment. Ils ont montré que pour jusqu'à 20 % de remplacement, les caractéristiques physico-mécaniques du béton variaient sensiblement. Les travaux de (**Ottosen et al. 2016**) démontrèrent que le béton réalisé avec les cendres est de très bonne qualité. Pour ce faire, ils l'ont fait en s'appuyant sur les travaux de (**Nawaf I. Blaisi 2018**) qui montrent que la réalisation de béton avec des cendres de bois contaminés par l'arsenic est sans danger sur la santé car celles-ci sont parfaitement homogènes dans le béton. Cependant, ces différents travaux présentent des insuffisances. Dans leur majorité, ils portent, ils portent sur le béton hydraulique alors que le ciment n'est pas le seul liant utilisé au monde. De plus, la conductivité hydraulique et la porosité n'ont pas été étudiées. Notre apport vient du changement du liant (bitume à place du ciment) et de l'étude d'un grand nombre de caractéristiques mécaniques.

Nos travaux permettent aussi de résoudre le problème d'enfouissement de cendres. La méthode de stabilisation-solidification sera utilisée dans nos études expérimentales (**Shi et Fernández-Jiménez 2006**). Les cendres expérimentales utilisées sont issues de la pyrolyse des coques d'anacardes collectées à Afonkanta Benin Cashew, une des usines de transformation des noix d'anacarde en amande au Bénin (**Godjo et al. 2015**). La figure 3-3 décrit l'obtention des cendres issues des coques d'anacarde.

En général, deux types de mélanges bitumineux sont produits à savoir :

- les graves bitumineux (GB), présente en une plus grande épaisseur et dont la composition est quasi essentiellement composée de gros gravier, sable et du bitume
- le béton bitumineux (BB), qui est la dernière couche de roulement, la dernière couche d'une chaussée routière et dont la composition granulométrique est : sable, gravier, filet (sable très fin dont le diamètre est inférieur à 80 μm) et du bitume.

Le travail réalisé ci-après permet de vérifier l'homogénéité et la résistance physico-mécanique des mélanges bitumineux contenant des cendres végétales. Certes, les cendres de coques d'anacardes ne sont pas contaminées, mais nos résultats ouvrent la voie pour les cendres végétales contaminées ayant des caractéristiques chimiques semblables.

Les travaux de recherches expérimentales de cet article se feront sur le béton bitumineux. En effet le BB renferme un pourcentage élevé de filet (sable très fin) difficile à obtenir. Il sera procédé à la substitution partielle dudit filet par les cendres de coque d'anacardes, à des pourcentages de 5, 10, 15, 20 et 25% comme dans les travaux de **(Randriamalala 2014)**.

Le laboratoire d'essai et de recherche en géotechnique de l'entreprise ADEOTIE Sarl a été utilisé pour la réalisation des essais Marshall sur le béton bitumineux. Les essais Marshall réalisés sur les éprouvettes ont été confectionnés conformément aux réglementations du gouvernement du Québec **(Nguyen 2009)**. Ces essais Marshall vont nous permettre de déterminer les caractéristiques physico-mécaniques du mélange bitumineux (contenant des cendres ou pas) à savoir :

- La stabilité : mesure de la résistance de l'éprouvette à la compression ;
- Le fluage : mesure de la variation dimensionnelle de la chaussée lors des trafics ;
- L'épaisseur : vérification de la conformité de l'éprouvette par rapport aux normes de calculs ;
- La compacité : pourcentage de serrage ou d'agencement des grains du mélange bitumineux.

La gestion des matières résiduelles constitue un véritable défi pour la planète et un souci important pour les industriels. Certes, il existe une multitude de traitements des déchets résiduels qui permettent de pallier la pollution environnementale. Parmi ces derniers, il existe, l'enfouissement, qui, loin d'assainir l'environnement, ne fait que déplacer le problème pour les générations futures. En effet, l'enfouissement des déchets contenant des métaux lourds, entraînera plus tard une infiltration de ses molécules dans la nappe phréatique. Force est de constater aujourd'hui, qu'il ne suffit plus de réduire les matières en cendres et d'aller juste les enfouir sur un site. Les coques d'anacardes font partie de ces déchets pour lesquels il nous faut apporter des solutions. Plus de 2 500 000 tonnes de noix d'anacardes sont produites annuellement dans le monde et cette production génère près de 1 825 000 tonnes de déchets (coques d'anacardes). Des traitements de pyrolyse sont utilisés pour transformer ces coques d'anacardes en charbon mais ce dernier processus génère des cendres volantes et de fond à disposer. L'objectif majeur de ce travail est l'étude et la valorisation des cendres d'anacardes

par leur incorporation dans des mélanges bitumineux. Nous désirons déterminer les compositions optimales des cendres et les lois de mélanges afin d'obtenir des mélanges bitumineux de qualité. Les cendres expérimentales proposées, sont issues de la pyrolyse des coques d'anacardes collectées à Afonkanta Benin Cashew, l'une des usines qui les transforment en amande. Les cendres expérimentales utilisées pour les essais ne sont pas contaminées, en revanche les résultats obtenus pourront être retenus pour les autres cendres végétales potentiellement contaminées. Les différents ajouts de cendres (de tailles micrométriques et nanométriques), se substituent à la quantité de filet (sable très fin), dans le béton bitumineux, graduellement à des proportions bien précises.

Le béton bitumineux (BB) a été utilisé car la mise en œuvre du mélange bitumineux, qui est la dernière couche des chaussées routières nécessitent beaucoup de sable très fin. L'idée est le remplacement graduel du sable très fin par les cendres de coque d'anacardes. Les essais géotechniques ont été réalisés sur ce mélange bitumineux dans le laboratoire de l'entreprise **ADEOTIE Sarl.**, au Bénin. Le principal essai réalisé est l'essai Marshall qui a permis de vérifier les caractéristiques physico-mécaniques (stabilité, fluage, épaisseur de la carotte et compacité). Les résultats démontrent que les meilleures caractéristiques du mélange bitumineux ont été obtenues avec 15% de cendres. Cette proportion a permis d'obtenir une stabilité de 3000 daN, un fluage de 4/10 de mm, une épaisseur équivalente à 6 cm et une compacité de 98,09 %.

4.2 Matériels et matériaux

Matériaux

Le béton bitumineux fabriqué est composé de sable, gravier, bitume et des cendres (provenance coques d'anacardes). Ce béton bitumineux expérimental a été réalisé dans le grand laboratoire de l'entreprise ADEOTIE Sarl, au Bénin. C'est un béton Bitumineux réalisé suivant les règles établies par la province Québécoise. Les matériaux utilisés pour la production du BB sont les suivants : sable, gravier, bitume et adjuvant (cendres des coques d'anacardes). Les sous-sections suivantes décrivent ces matériaux utilisés.

Le sable marin au Sud du Bénin, plus précisément dans le département du mono a été utilisé. Ce sable présente des caractéristiques qui lui sont propres. L'analyse granulométrique (AG) du sable fût réalisée suivant les règles la norme française de calcul qu'est **NFP 18-540**. Les essais de caractérisation du sable sont réalisés suivant les travaux de (**Drahtweber, 2000**). La figure 3-2 présente les résultats de l'analyse granulométrique de ce sable. La majorité des grains ont un diamètre inférieur à 12.5 mm (100%), alors que 50% ont un diamètre inférieur à 4 mm contre 20% dont le diamètre est inférieur à 0.63 mm.

L'essai d'équivalence de sable (pourcentage d'impureté du sable) a aussi été réalisé. Le but de cet essai est la détermination du pourcentage de propreté du sable. Cet essai est réalisé suivant la norme française **NF EN 933-8**. Les travaux de **Jl, Wr, et Dm (1999)** présente le mode opératoire de l'essai. En servant de cette méthode, nous avons obtenu une moyenne de pureté de sable de **72.65 %**.

Le gravier utilisé est celui du Sud-Benin à Seto dans la commune de BOHICON (département du ZOU). Ce gravier est du 5/15. Son analyse granulométrique a été réalisée suivant les règles la norme française **NFP 18-540** et les essais de caractérisation ont été réalisés suivant (**Drahtweber, 2000**). La figure 21 montre la distribution granulométrique du gravier dont la grande proportion avait un diamètre inférieur à 14 mm Moins de 10% de particules de gravier avait un diamètre inférieur à 0.080 mm

La masse volumique des particules solides du gravier a été évaluée à 2,733 t/m³.

L'essai de coefficient de forme a été aussi réalisé sur le gravier. Cet essai a été fait simultanément avec des tamis à mailles circulaires et des tamis à mailles rectangulaires. Il permet de déterminer le pourcentage de gravier plat. Pour mémoire, moins le gravier est plat, meilleure est la résistance du béton. Le coefficient d'aplatissement et le coefficient de forme ont été estimés à 8.5 et 91.5 respectivement.

Le bitume utilisé dans cet article est de la **classe 50/70**. Il est utilisé pour les travaux d'asphaltage dans le département du Zou (Benin).



Figure 4-1: Image du bitume utilisé

L'essai de pénétrabilité à l'aiguille de VICAT décrite par les travaux de **Jl, Wr, et Dm (1999)** donne une valeur comprise pour ce bitume entre 50 et 70 (dizaine de mm) .

L'essai de bille anneau décrite dans les travaux permet d'estimer le point de ramollissement du bitume. Les résultats de cet essai montrent que ce point se trouve entre **48 et 52 °C**.

L'essai de duriez décrite dans les travaux permet de mesurer la tenue à l'eau de l'enrobée qui est de **0,70**.

Les cendres sont issues de la pyrolyse des coques d'anacardes collectées à Afonkanta Benin Cashew, une des usines de transformation des noix d'anacarde en amande. L'unité de pyrolyse de l'Institut Universitaire de Technologie (IUT) de Lokossa a été utilisée pour réaliser cette transformation. Environ 82 % de la masse des coques traitées sont valorisées sous forme de gaz (**Godjo et al. 2015**) et 18 % sous forme de charbon.

Les cendres végétales, comme des cendres des coques d'anacarde, ont généralement des compositions chimiques assez semblables. Le tableau 7 nous présente la composition globale ou générale de cendres végétales de fonds (*Bottom ashes*) et des cendres volantes (*fly ashes*). Comme on peut bien le remarquer les compositions des cendres de fonds ne diffèrent pas de celles des cendres volantes. Elles contiennent plusieurs oxydes dont le quartz (SiO_2) qui peuvent être nuisibles à la santé. Voir tableau 3-1

La figure 3-4 présente une image des cendres utilisées. Ces cendres sont constituées des particules ultrafines (diamètre inférieur à 100 nm) et des particules fines de diamètre inférieur à 10 micromètres Figure 3-5. L'analyse par diffraction au rayons-X révèle que ces cendres

sont constituées, entre autres composés, des oxydes tels que SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 , Figure 3-6. Ces trois oxydes comptent pour près de 88% de la composition des cendres végétales (Anowai et Job, 2017).

Matériels

Une bétonnière, une balance numérique, des éprouvettes de carottages, une étuve, le vibreur, une louche, des bassines et des bols et surtout une bonne chambre froide. La dame Marshall et la presse Marshall, le tamis 0,080 mm pour les filets.

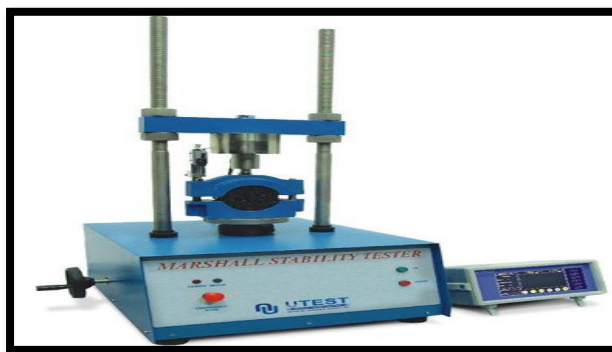


Figure 4-2: presse pour l'essai Marshall

4.3 Méthodes et résultats expérimentaux

Les travaux expérimentaux ont été réalisés sur chaque type de mélange à savoir :

- Béton bitumineux composé de 0% des cendres, Ce type de béton donne des valeurs de référence. Il s'agit théoriquement des meilleures valeurs au niveau de chaque expérience.
- Béton bitumineux composé de 05% des cendres ;
- Béton bitumineux composé de 10% des cendres ;
- Béton bitumineux composé de 15% des cendres ;
- Béton bitumineux composé de 20% des cendres ;
- Béton bitumineux composé de 25% des cendres.

Les prélèvements et essai sur le mélange bitumineux ont été faits conformément à la norme Québécoise (**Philippot, 2010**), Aussi, les éprouvettes utilisées pour l'obtention des résultats expérimentaux ont une dimension de 15 cm de diamètre et 6cm de hauteur. Ce sont des éprouvettes de forme cylindrique (**St-Jacques et Bertrand, 2002**) dont des exemples sont présentés à la figure 4-6 .



Figure 4-3: Exemples d'échantillons de béton bitumineux fabriqués et testés

Description de l'essai Marshall

C'est une méthode expérimentale de la détermination des caractéristiques physico-mécanique d'un mélange bitumineux. Mise au point par Bruce Marshall en 1939. L'essai consiste à compacter des éprouvettes par damage selon un processus déterminé, puis à les soumettre à un essai de compression.

Appareillage

- 3 moules de compactage comportant chacun une base, un corps de moule,
- Deux pistons extracteurs.

- Une presse équipée d'un dispositif permettant de mesurer l'effort au cours de l'essai
- Un bain thermostatique.

Préparation des éprouvettes et emplissage des moules

La température de préparation des éprouvettes de mélanges à base de bitume pur est de 160 degrés Celsius, y compris les moules. La masse de remplissage prévue est de 1200 g.

Peser la quantité de mélange hydrocarboné, après avoir placé un disque de papier au fond de moule et mis en place la hausse, introduire le mélange en une seule fois dans le moule. Un disque est mis en place à la surface du mélange hydrocarboné.

La dame est maintenue perpendiculairement au moule. Le mélange est compacté en appliquant 50 coups de marteau de la dame. La durée de compactage ne doit pas excéder 3 minutes, le moule est placé pendant au moins 15 minutes, sous un jet d'eau de telle façon à ne pas mouiller l'éprouvette. Le moule est conservé 1h au moins à la température ambiante avant démoulage. Le démoulage est effectué en faisant passer l'éprouvette du moule dans la hausse à l'aide d'un piston extracteur. Après démoulage les éprouvettes numérotées sont pesées. Les dimensions de l'éprouvette sont mesurées en 6 zones différentes pour la hauteur et 3 zones pour le diamètre. La masse volumique apparente est calculée à partir des mesures géométriques. La mesure de la masse volumique apparente par pesée hydrostatique. Les éprouvettes sont conservées 6h au moins à la température ambiante après leur compactage.

Définition des sigles

P1 (air) : La masse réelle de l'échantillon juste après démoulage (g)

P2 (eau) : La masse apparente par pesée hydrostatique (g)

P3 (air) : La masse de l'échantillon après immersion dans de l'eau (g)

TL : Teneur du liant (g)

K : Module de richesse

MVR : masse volumique réelle (g/cm^3)

MVRCr : masse volumique réelle des agrégats (g/cm^3)

VR : volume de vides résiduels (cm^3)

VO : volume des vides occupés par l'air (cm^3)

VI: pourcentage calculé de vides comblé par le bitume dans l'éprouvette (cm^3)

VB : Volume du bitume dans l'éprouvette (cm^3)

VA : volume des agrégats (gravier, sables et cendres) présents dans l'éprouvette (cm^3)

Stabilité de l'essai Marshall (daN)

L'éprouvette Marshall soumise à une charge de compression, dans une mâchoire d'écrasement après avoir séjourné, dans le bain d'eau de 60 degrés pendant 30 minutes. La lecture se fait sur le cadastrometre à la rupture et on retrouve sa correspondance sur l'abaque Marshall.

Fluage de l'essai Marshall (10^{-1} mm)

C'est la différence entre la lecture du cadastrometre de départ et celle à la fin de l'essai.

Compacité de l'essai Marshall (%)

C'est la lecture directe de la valeur sur le cadastrometre qui sert à réaliser l'essai Marshall.

- a) Quartage du béton bitumineux
- b) Remplissage des moules
- c) Etuvage
- d) Compactage du mélange
- e) démoulage
- f) Essai d'écrasement et lecture

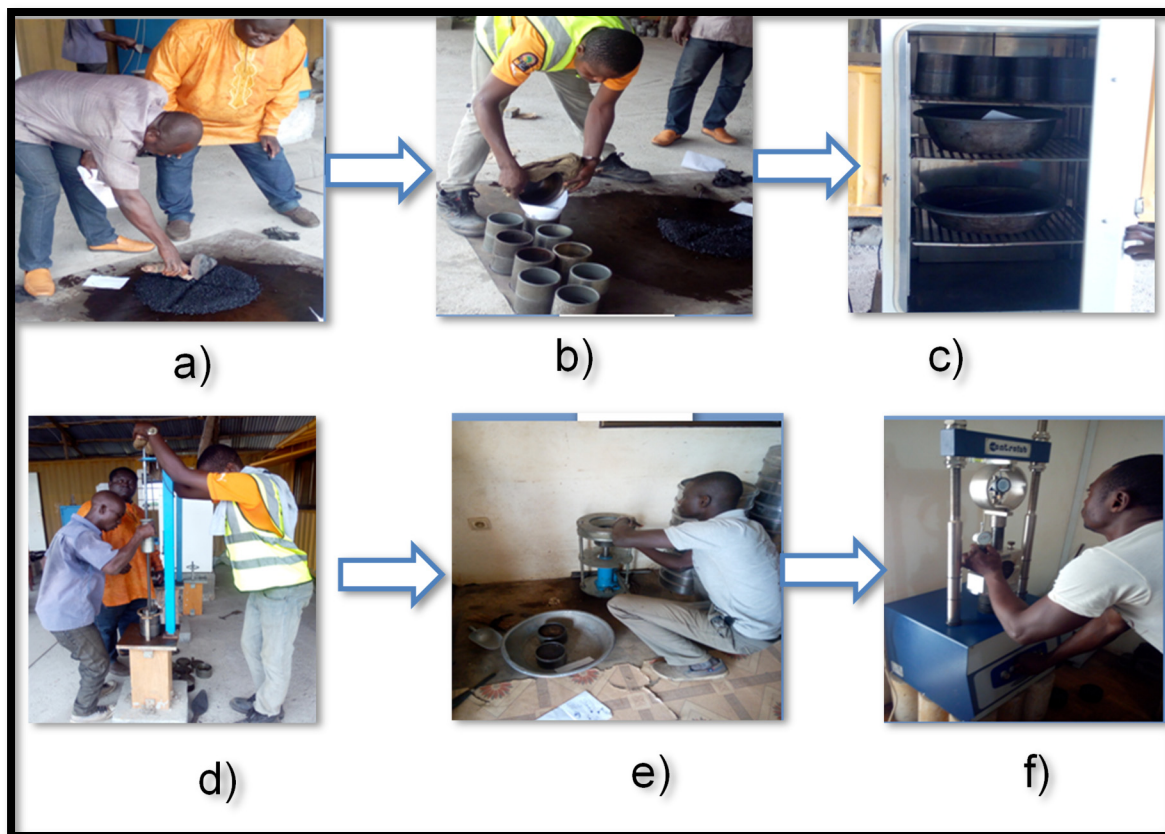


Figure 4-4: Processus de réalisation de l'essai Marshall

Les résultats expérimentaux bruts et les calculs découlant des essais Marshall sont présentés aux Tableaux 4-1 à 4-6.

Tableau 4-1: Résultats de l'essai Marshall à 00% de cendre

N° éprouvettes	A	B	C	Moyenne
N° éprouvettes	A	B	C	Moyenne
P1(air)	1196,6	1196,7	1196,8	1196,70
P2(eau)	716,1	717,6	717,5	717,07
P3(air)	1196,7	1196,9	1197	1196,87
Densité eau	0,99	0,99	0,99	1,00
TL	5,8	5,8	5,8	5,80
Vapp	482,40	481,10	481,30	481,60
(MVA)	2,480	2,487	2,487	2,48
(MVR)	2,523	2,523	2,523	2,52
(VR)	1,70	1,42	1,46	1,53
(MVAG)	2,345	2,351	2,350	2,35
(MVRG)	2,755	2,755	2,755	2,76
(VO)	14,90	14,66	14,69	14,75
(VL)	88,61	90,30	90,09	89,67
STABILITE	2968	3000	3000	2989,33
FLUAGE	3,55	3,28	3,33	3,39
EPAISSEUR (cm)	6,01	6,02	6,03	6,02
COMPACITE	98,30	98,58	98,54	98,47

Tableau 4-2: Résultats de l'essai Marshall à 05% de cendre

N° éprouvettes	A	B	C	Moyenne
P1(air)	1197,5	1198,6	1198,4	1198,17
P2(eau)	716,2	717	717	716,73
P3(air)	1197,6	1198,8	1198,5	1198,30
Densité eau	0,99	0,99	0,99	1,00
TL	5,8	5,8	5,8	5,80
Vapp	483,21	483,61	483,31	483,37
(MVA)	2,478	2,478	2,480	2,48
(MVR)	2,523	2,523	2,523	2,52
(VR)	1,79	1,78	1,73	1,77
(MVAG)	2,342	2,343	2,344	2,34
(MVRG)	2,755	2,755	2,755	2,76
(VO)	14,98	14,97	14,93	14,96
(VL)	88,07	88,12	88,39	88,19
STABILITE	2968	2924	2890	2927,00
FLUAGE	3,25	3	3,24	3,16
ÉPAISSEUR (cm)	6,01	6,01	6,03	6,02
COMPACITE	98,21	98,22	98,27	98,23

Tableau 4-3: Résultats de l'essai Marshall à 10% de cendre

N° Éprouvettes	A	B	C	Moyenne
P1(air)	1198,3	1198,9	1196	1197,73
P2(eau)	716,5	717,1	715,2	716,27
P3(air)	1198,4	1199,1	1196,1	1197,87
Densité eau	0,99	0,99	0,99	1,00
TL	5,8	5,8	5,8	5,80
Vapp	483,71	483,81	482,70	483,41
(MVA)	2,477	2,478	2,478	2,48
(MVR)	2,523	2,523	2,523	2,52
(VR)	1,82	1,79	1,81	1,81
(MVAG)	2,342	2,342	2,342	2,34
(MVRG)	2,755	2,755	2,755	2,76
(VO)	15,01	14,98	15,00	15,00
(VL)	87,85	88,02	87,94	87,94
STABILITE	2925	2936	2968	2943,00
FLUAGE	3,9	3,64	3,62	4,54
ÉPAISSEUR (cm)	6,03	6,04	6,03	6,03
COMPACITE	98,18	98,21	98,19	98,19

Tableau 4-4: Résultats de l'essai Marshall à 15% de cendre

N° éprouvettes	A	B	C	Moyenne
P1(air)	1198,2	1199	1198,9	1198,70
P2(eau)	716,2	716,9	717,2	716,77
P3(air)	1199,3	1199,3	1199,1	1199,23
Densité eau	0,99	0,99	0,99	1,00
TL	5,8	5,8	5,8	5,80
Vapp	484,91	484,21	483,71	484,28
(MVA)	2,471	2,476	2,479	2,48
(MVR)	2,523	2,523	2,523	2,52
(VR)	2,08	1,87	1,77	1,91
(MVAG)	2,336	2,340	2,343	2,34
(MVRG)	2,755	2,755	2,755	2,76
(VO)	15,23	15,05	14,97	15,08
(VL)	86,37	87,59	88,14	87,37
STABILITE	3000	3000	3000	3000,00
FLUAGE	4,73	4,35	4,87	4,65
ÉPAISSEUR (cm)	6,04	6,05	6,05	6,05
COMPACITE	97,92	98,13	98,23	98,09

Tableau 4-5: Résultats de l'essai Marshall à 20% de cendre

N° éprouvettes	A	B	C	Moyenne
P1(air)	1199,2	1199	1199,4	1199,20
P2(eau)	716,5	715,9	716,3	716,23
P3(air)	1199,4	1199,1	1199,6	1199,37
Densité eau	0,99	0,99	0,99	1,00
TL	5,8	5,8	5,8	5,80
Vapp	484,71	485,01	485,11	484,95
(MVA)	2,474	2,472	2,472	2,47
(MVR)	2,523	2,523	2,523	2,52
(VR)	1,95	2,03	2,02	2,00
(MVAG)	2,338	2,337	2,337	2,34
(MVRG)	2,755	2,755	2,755	2,76
(VO)	15,12	15,19	15,18	15,16
(VL)	87,08	86,63	86,70	86,81
STABILITE	2865	2867	2814	2848,00
FLUAGE	4,64	5,09	5,09	4,94
EPAISSEUR (cm)	6,06	6,06	6,06	6,06
COMPACITE	98,05	97,97	97,98	98,00

Tableau 4-6: Résultats de l'essai Marshall à 25% de cendre

N° éprouvettes	A	B	C	Moyenne
P1(air)	1200	1199,3	1199,9	1199,73
P2(eau)	715,3	715,2	715,1	715,20
P3(air)	1200,2	1199,4	1200	1199,87
Densité eau	0,99	0,99	0,99	1,00
TL	5,8	5,8	5,8	5,80
Vapp	486,72	486,02	486,72	486,49
(MVA)	2,465	2,468	2,465	2,47
(MVR)	2,523	2,523	2,523	2,52
(VR)	2,29	2,21	2,30	2,27
(MVAG)	2,330	2,332	2,330	2,33
(MVRG)	2,755	2,755	2,755	2,76
(VO)	15,41	15,34	15,42	15,39
(VL)	85,13	85,61	85,08	85,27
STABILITE	2768	2814	2735	2772,00
FLUAGE	4,95	5,24	5,2	5,13
EPAISSEUR (cm)	6,07	6,07	6,06	6,07
COMPACITE	97,71	97,79	97,70	97,73

4.4 Analyse et discussions des résultats

Le mélange bitumineux est un matériau assez complexe, dont la résistance dépend de beaucoup de paramètres : la température de production, l'interaction physico-chimique des différents constituants du mélange et aussi et surtout du type de mélange. En général, il existe deux types de mélange bitumineux, en décrit le schéma ci-après :

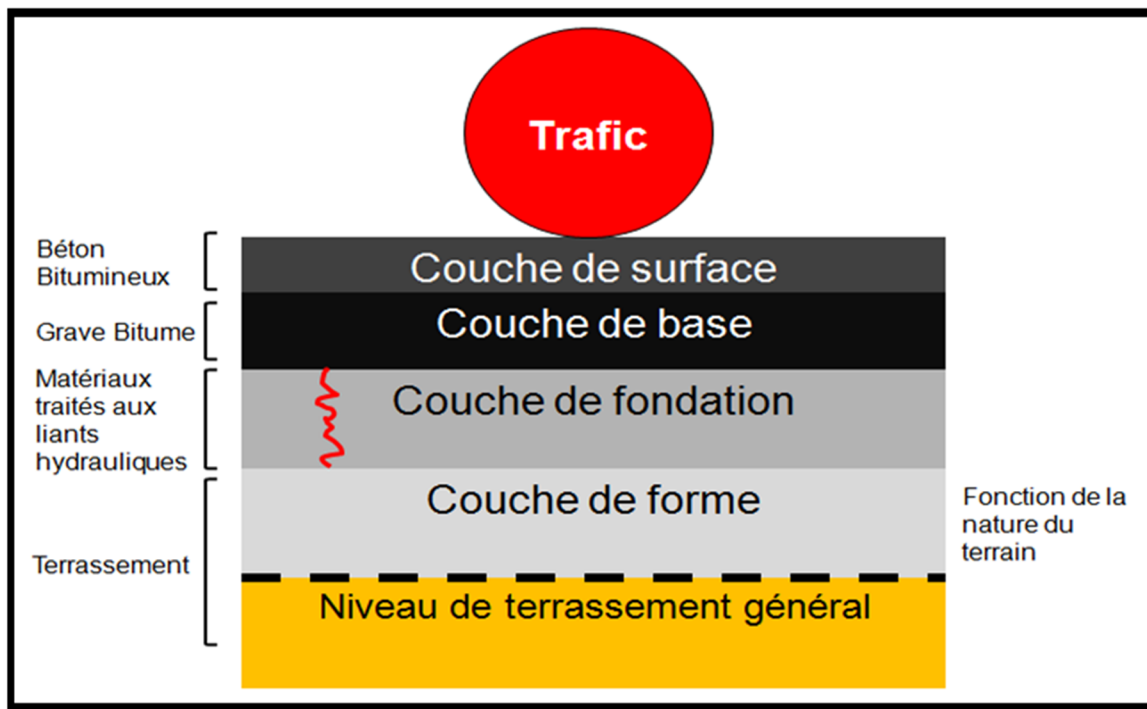


Figure 4-5: Coupe transversale d'une route (http://www.cours-genie-civil.com/wp-content/uploads/Cours_route_Module_C5_IUT.pdf consulté le 31-03-19)

Précisons que les deux mélanges bitumineux sont : le béton bitumineux et le grave bitumineux (Figure 4-8). Dans la pratique, le grave bitumineux renferme très peu de sables fins et le béton bitumineux qui constitue la couche de roulement renferme une grande quantité de sable très fins. C'est pour cela que le béton bitumineux a été choisi pour les travaux expérimentaux. Les propriétés physico-mécaniques du mélange bitumineux contenant différents pourcentage de cendre d'anacardes ont été présentées dans la section résultats. Il s'agit de la compacité

(Figure 4-14), de la résistance au fluage (Fig. 4-13), de la stabilité (Figure 4-12) et de l'épaisseur du mélange bitumineux (Figure 4-15).

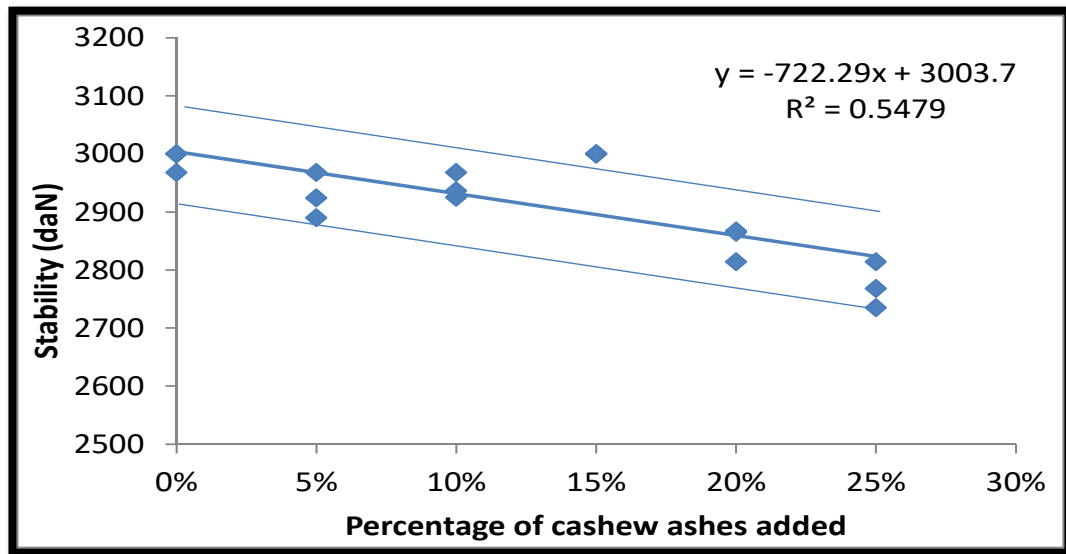


Figure 4-6: Stabilité du mélange bitumineux en fonction des pourcentages des cendres ajoutées

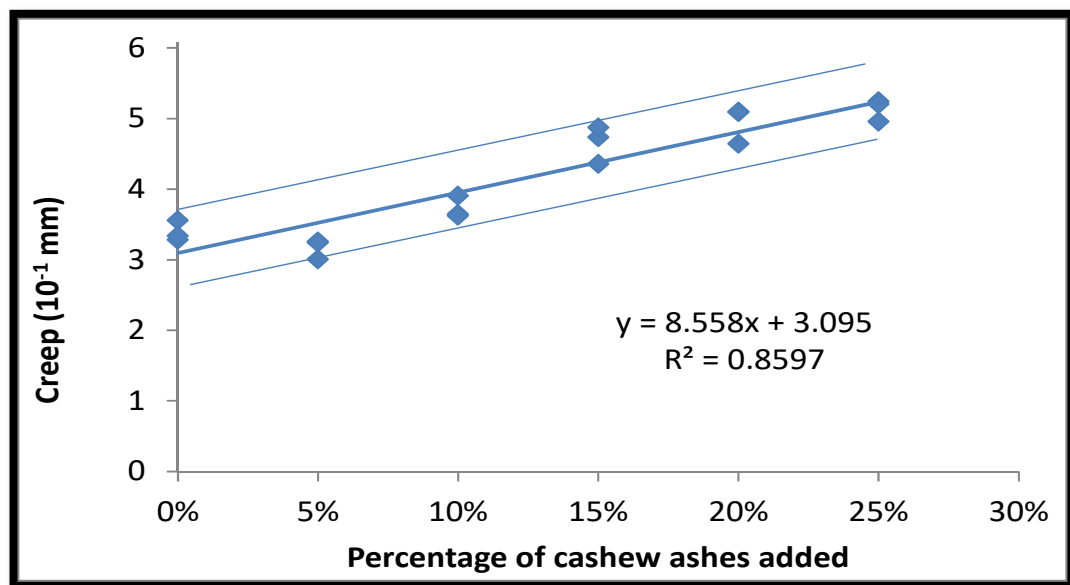


Figure 4-7: fluage du mélange bitumineux

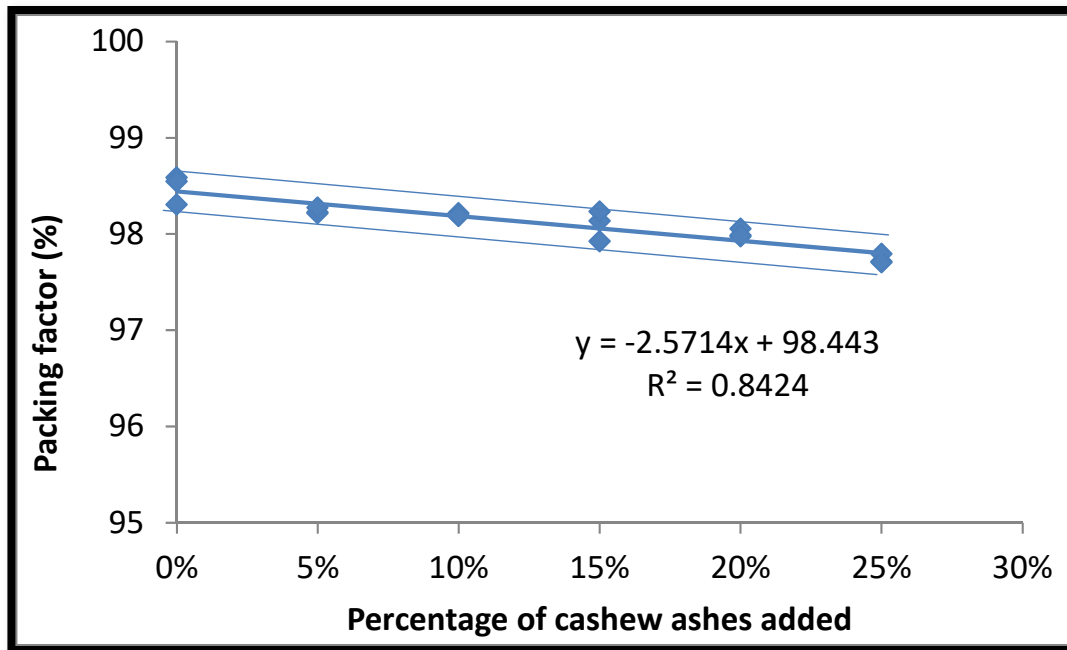


Figure 4-8: Compacité du mélange bitumineux

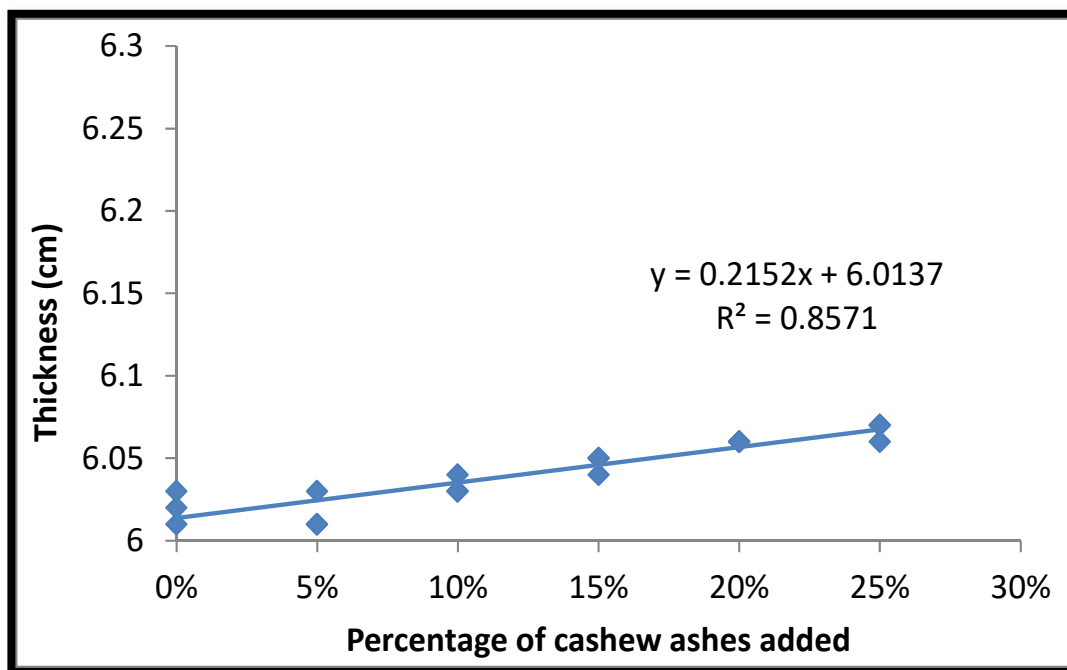


Figure 4-9: Figure montrant l'épaisseur des carottes

Pour que les tests soient validés, il était important de vérifier l'épaisseur des carottes bitumineux. Le test Marshall permet de mesurer plusieurs caractéristiques du mélange bitumineux dont son épaisseur. Le test nécessite généralement que les carottes aient une épaisseur comprise entre 6,00 et 6,30 cm pour la validation des résultats. Dans notre cas, tous nos tests sont dans cette gamme.

Les meilleurs résultats obtenus, en additionnant les cendres au béton bitumineux démontrent que les cendres influencent les comportements physico-mécaniques du mélange bitumineux. Les travaux de **(Oruc et al. 2006)** ont démontré que l'ajout du ciment dans le mélange bitumineux améliore considérablement ses caractéristiques physico-mécaniques. Il faut remarquer à ce niveau que les cendres végétales renferment certains oxydes tels que l'oxyde ferrique, l'oxyde d'alumine, l'oxyde de silice qui sont aussi présent dans le ciment (Figure 4-16). Notre cendre qui est issu de la coque d'anacarde ne déroge pas à ses règles et renferment aussi ses molécules (Cf Figure 4-16). Il est évident d'arriver à la conclusion que ces éléments chimiques sont responsables du pouvoir collant du ciment et le fait qu'ils sont présents dans les cendres améliorent nos mélanges bitumineux. Cependant, leurs concentrations sont faibles dans les cendres, c'est pour cela que leurs effets positifs sont mineurs sur le mélange bitumineux que dans l'article précité **(Oruc et al., 2006)**. Remarquons que les cendres végétales contiennent plus de la silice que le ciment. Sachant que le sable contient aussi beaucoup de silice, les cendres peuvent donc remplacer en petites portions le sable fin. Notons aussi que les cendres des coques d'anacarde sont constituées en majorité de particules ultrafines (diamètre inférieur à 100 nm), dont plus fin que le sable fin utilisé dans le bitume (0.08 mm), ce qui ne peut qu'être plus favorable lorsqu'on substitue une portion du sable fin par les cendres des coques d'anacardes. Aussi, **(Cheah Chee Ban et Mahyuddin Ramli 2010)** et **(Naik 1999)** ont étudiés plus de 5 types de cendres vegetales. Ils sont tous venus à la conclusion que le faible diametre des cendres , ainsi que leurs compositions chimiques ameliorent la qualité du béton hydraulique, ce qui devrait être autant pareille pour un melange bitumineux.

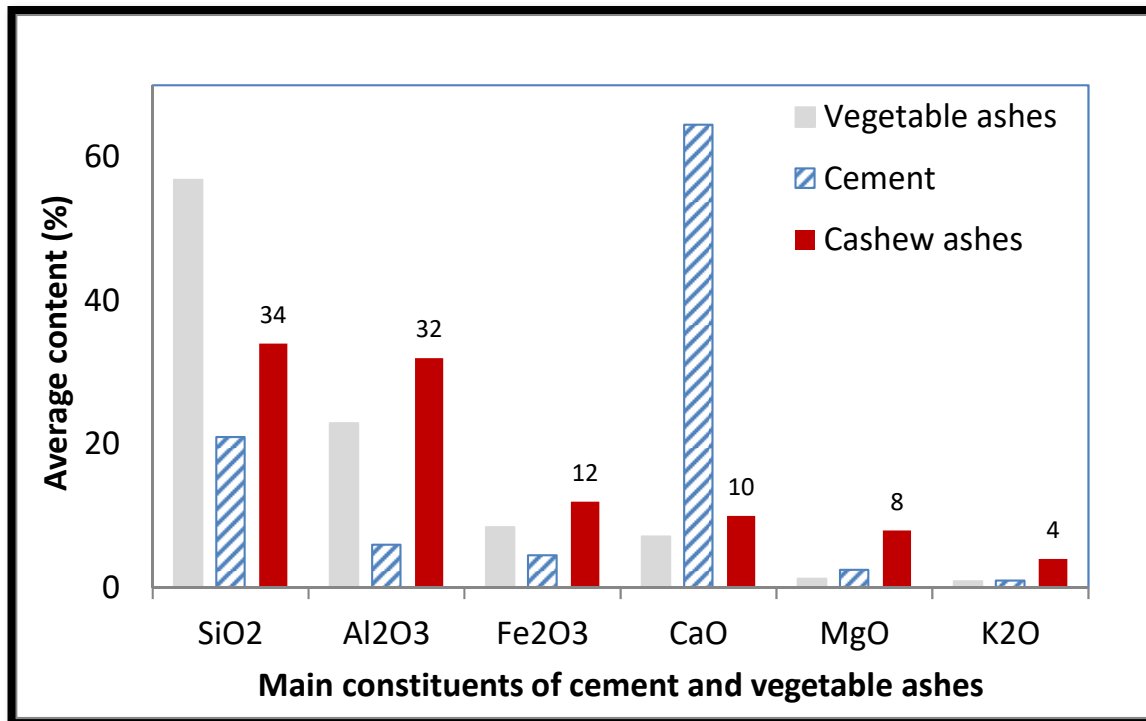


Figure 4-10: Étude comparative des principales compositions des cendres végétales et du ciment. Adapté de (Anowai et Job. 2017)

L'essai Marshall permet de mesurer la compacité (Cf. fig. 4-14), qui se trouve être le serrage des grains ; l'agencement des grains du mélange bitumineux. La valeur de la compacité doit se retrouver entre **95%** et **98%**. De ce fait, tous les différents types de mélange présentent une bonne compacité. Ces résultats démontrent que les cendres de coque d'anacarde ne détruisent pas le pouvoir collant du bitume. Les caractéristiques chimiques de la cendre ne nuisent pas au bitume dont le rôle est de contribuer à la soudure des différentes particules entre elles.

L'essai Marshall permet aussi de mesurer le fluage du mélange bitumineux (Mailloux, 2011). La mesure du fluage est la variation dimensionnelle de la chaussée lors des trafics. **Moins c'est élevé, plus c'est bon.** Des résultats expérimentaux obtenus, on déduit aisément que le mélange bitumineux obtenu, avec la plus grande quantité des cendres, est de meilleure qualité quand on est à la proportion des cendres de **15% (marge raisonnable).**

L'essai Marshall permet également de mesurer la stabilité du mélange bitumineux. La mesure de la stabilité est la résistance de l'éprouvette à la compression (**Eckmann, 2007**). *Plus la stabilité est élevée et meilleur est le mélange BB*. Des résultats expérimentaux obtenus, on déduit aisément que le mélange obtenu, avec la plus grande quantité de cendre est de meilleure qualité quand on est à la proportion de **15%**. Il est à penser que les cendres augmentent la résistance du béton à cette proportion. Les cendres possèdent des éléments chimiques qui augmenteraient la résistance en compression du béton à un certain dosage.

4.5 Conclusion

Ce travail a pour but la valorisation des cendres issues de la pyrolyse des coques d'anacardes. Il a été démontré qu'il est possible d'utiliser efficacement ces cendres, de tailles micrométriques et de mailles nanométriques, comme substitut partiel des sables très fins (diamètre inférieur 80 μm) dans le béton bitumineux. Aussi, selon **Telma Ramos et al (2013)**, l'industrie de production du ciment génère une très grande quantité de pollution environnementale. Alors l'idée de pouvoir entre autres le substituer partiellement à des cendres ne peut être que bénéfique.

Le béton bitumineux est l'un des matériaux de construction, dont le comportement est difficile à prévoir. Cependant, dans le but de concevoir un mélange bitumineux renfermant des cendres issues de matières résiduelles, une série de tests ont dû être faits. Des bétons bitumineux contenant des teneurs de cendre variant entre 0 à 25% ont été fabriqués et leurs performances évaluées par des essais Marshall qui ont permis de tester leur propriété physico-mécanique : compacité, fluage, stabilité ou résistance à la compression. Il en ressort qu'un mélange bitumineux renfermant des cendres, pour être de qualité acceptable, doit idéalement contenir au maximum **15%** des cendres pour avoir une bonne stabilité et une bonne résistance au fluage.

Pour l'ensemble des pourcentages des cendres testés (0 à 25%), les épaisseurs des bétons bitumineux obtenus étaient acceptables car comprises entre les valeurs requises qui doivent

être entre 6,00 et 6,30 cm pour que les résultats soient valides. De même les compacités obtenues étaient aussi acceptables car supérieures à 95%.

Il est judicieux d'étudier l'introduction des cendres dans le mélange bitumineux. De nos jours, l'incinération est la méthode la plus utilisée dans les villes urbaines pour la réduction des déchets organiques et inorganiques. A cet effet, **Caprai et al. (2019)** affirme que ce mode de traitement des déchets permet de les réduire de 90% en volume et de 80% en masse.

Soulignons que l'utilisation des cendres des coques d'anacardes dans le béton bitumineux contribue à une diminution de la quantité de sable très fin. Une réduction de la production du ciment, entraîne une diminution de la pollution environnementale. La valorisation des coques d'anacardes est un pas en avant dans le développement d'une méthode de la stabilisation – solidification des cendres d'anacardes.

CHAPITRE 5

ANALYSE ET DISCUSSION

5.1 Introduction

Les bétons hydrauliques ou bitumineux sont des matériaux complexes, qui interviennent dans la réalisation des ouvrages en génie civil. Il est impossible de prévoir ou de prédire leurs comportements physico-mécaniques, lorsqu'on leur ajoute des adjuvants. Du côté du béton bitumineux le liant utilisé est le bitume et du côté du béton hydraulique celui utilisé est le ciment. Le bitume et le ciment joue un rôle de collant entre les différentes particules du mélange. La modification de leur comportement chimique par un apport d'adjuvant nuirait à la qualité du béton. La stabilité de ce dernier peut être toutefois compromise s'il y a une incompatibilité entre les molécules du ciment ou du bitume et les molécules des cendres de coque d'anacardes. Ce chapitre permet de mettre en évidence le comportement des différentes molécules.

5.2 Le choix des pourcentages de cendres à mettre dans les mélanges

C'est un véritable défi de procéder à l'étude des propriétés physico-mécaniques du béton contenant les cendres. Pour réaliser ce travail, nous avons procédé par une étude, par ajout successives de cendres. Ainsi, on a fait des ajouts successifs par multiples de 5, de 00 à 25 % de cendres de coque d'anacardes. Ces différents ajouts, nous ont permis d'établir une série d'équations. Ces derniers ont permis de développer un modèle (programme informatique) capable de fournir des informations sur les propriétés physico-mécaniques du béton bitumineux et du béton hydraulique, en fonction des pourcentages de cendres qu'on y introduit. Ce modèle se base sur les résultats des mesures effectués. Il permettra à la communauté scientifique ou au professionnel du métier de pouvoir utiliser les résultats de ce travail sans avoir à faire toutes les mesures et de prendre une décision guidée en fonction des propriétés obtenus. La méthode de stabilisation-solidification utilisée a pour but de stabiliser le

comportement physico-mécanique de cendres dans le béton et de solidifier (rendre inactif les particules dangereuses des cendres en les liant aux molécules constituant le béton) (Inoue 2000). Ainsi, on obtient un mélange homogène constitué du béton et des cendres similaire au produit élaboré et étudié par (Anowai et Job., 2017). L'étude des propriétés physico-mécaniques du mélange est faite graduellement suivant l'ajout de l'adjuvant (cendres de coque d'anacardes) à 0, 5, 10, 15, 20 et 25% de cendres (Vijayalakshmi et al., 2012). Par ailleurs, les cendres se substituent graduellement au ciment. Cela implique que l'ajout d'une quantité massique **X** de cendres entraîne la soustraction de cette même quantité **X** de ciment dans le mélange. La méthode utilisée pour la formulation du béton hydraulique est celle de (Dreux 1983).

Il est supposé qu'entre chaque intervalle de mesures effectuées qu'il y a une linéarité. Par conséquent, pour des valeurs de pourcentage de cendres voulues hors de la séquence qui est respectivement de 0, 5, 10, 15, 20 et 25%, une interpolation deux valeurs consécutives qui encadre celle-ci est faite.

L'utilisation des cendres volantes dans le béton permet d'atteindre plusieurs objectifs :

- Réduire la quantité de ciment utilisée et donc diminuer les coûts
- Réduire la chaleur d'hydratation
- Améliorer la maniabilité du béton
- Améliorer l'acquisition des performances mécaniques à long terme
- Améliorer la performance du mélange bitumineux

5.3 Autres Facteurs pouvant affecter la performance du mélange

Maniabilité et rhéologie

En raison de leur sphéricité et de leur très petite taille, les cendres volantes influent sur la rhéologie des pâtes de ciment. L'ajout de celles-ci réduit le besoin en eau nécessaire à

l'obtention d'une maniabilité équivalente pour un ciment sans cendres volantes : les cendres peuvent donc jouer un rôle de plastifiant.

Retard de prise

Les cendres volantes retardent la prise du ciment, ce qui peut être un avantage par temps chaud. Leur ajout peut donc nécessiter l'emploi d'un accélérateur. Notons que seul le début de la prise est retardé car la période d'atteinte du durcissement final n'est pas modifiée.

Température d'hydratation

L'hydratation de la pâte de ciment s'accompagne d'une élévation de la température. Retardant et ralentissant l'hydratation du ciment, les cendres volantes ont une influence bénéfique sur l'évolution de la chaleur d'hydratation. Elles sont donc précieuses en modifiant les bétons de masse. Réduisant l'exotherme des réactions d'hydratation, elles permettent d'éviter la fissuration par retrait thermique des ouvrages massifs.

Resistance mécanique et durabilité

Compte tenu de leur finesse et de leur sphéricité, les cendres peuvent être utilisées pour corriger les sables dépourvus d'éléments fins. Contribuant alors à la compacité des mortiers, elles contribuent ainsi également à leur durabilité.

Du fait de leur activité pouzzolanique consommant la portlandite, les cendres augmentent les résistances mécaniques à long terme des bétons, améliorant de fait leurs résistances aux attaques chimiques et donc leur durabilité. Ces deux avantages proviennent également de la compacité que fournit au béton leur ajout (effet filler).

C'est la structure de pores de la matrice cimentaire qui détermine sa porosité et sa perméabilité et donc sa sensibilité aux processus de transport et de diffusion. La perméabilité du béton est une fonction du rapport eau/ciment. Le remplacement du ciment par des cendres volantes fait croître ce rapport. Pour cette raison la structure poreuse initiale d'un ciment aux cendres est

initialement plus grande que celle d'un béton classique de référence, ce qui se traduit par de moindres performances mécaniques de celle initiale.

Lorsque les cendres volantes, entre 7 et 28 jours, initient leur activité pouzzolanique, la porosité de la matrice commence à décroître. Compte tenu du délai de réaction des cendres, c'est avec le temps que le béton aux cendres deviendra plus imperméable qu'un béton classique.

L'ajout de cendres volantes réduit le coefficient de diffusion des ions chlorures non seulement par une diminution, à terme, de la porosité de la matrice cimentaire, mais également du fait de l'amélioration de la capacité de liaison des ions chlorures par la matrice, ceci pour plusieurs raisons :

Liaison chimique : l'élévation de la teneur en alumine qu'implique l'ajout de cendres améliore la capacité de liaison des ions chlorures par la formation de chloroaluminates.

Liaison physique : l'enrichissement en C-S-H (silicates de calcium hydrates) qu'implique la réaction pouzzolanique augmente d'autant les capacités d'adsorption des ions chlorure à la surface du gel de C-S-H.

5.4 Interaction entre les éléments chimiques des cendres et le béton

L'incorporation du dioxyde de silice dans les bétons conduit à des améliorations remarquables des caractéristiques rhéologiques et mécaniques des bétons. Pour les bétons frais, la fumée de silice complète le fuseau granulaire et supprime les tendances au ressuage ou à la ségrégation tout en réduisant les chaleurs d'hydratation.

Pour les bétons durcis, la finesse de la fumée de silice permet de créer une microstructure très dense qui conduit à des bétons extrêmement compacts, à caractéristiques mécaniques élevées en réduisant les teneurs en eau grâce à l'adjuvant.

Ces bétons ont ainsi une résistance nettement renforcée vis-à-vis des agents ou des phénomènes agressifs : attaques chimiques, acides, sulfates, abrasion gel/dégel, en réduisant significativement la porosité et la perméabilité, la carbonatation, les phénomènes d'alcali-réaction et de réaction sulfatique interne.

Le dioxyde de silice réagit avec la chaux durant l'hydratation du ciment et favorise la formation des silicates de calcium hydratés (C-S-H). Cette phase C-S-H lie les différents composants entre eux afin de créer une matrice cimentaire dense et compacte.

Sa finesse et ses propriétés pouzzolaniques confèrent au dioxyde de silice une forte réactivité avec les Ca(OH)_2 produits durant l'hydratation du béton : $\text{SiO}_2, 3\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CSH} + \text{Ca(OH)}_2$. $\text{SiO}_2 + \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CSH}$

Sa haute réactivité augmente l'homogénéité du mélange et réduit la porosité et la perméabilité du béton.

Les bétons formulés ont une rhéologie différente des bétons courants. Ils sont thixotropes et ont donc un comportement visqueux, compact au repos et deviennent fluides dès qu'on leur applique une pression. Cette particularité offre les avantages suivants :

- Moins de ségrégation (nids de cailloux et ressuage) ;
- Transfert par pompage sous pression possible sur de grandes distances ;
- Projection sur des parois sans perte de produit dans le cas de béton projeté.

Le béton obtenu permet d'optimiser l'empilement granulaire et ainsi d'améliorer l'adhésion de ses différents constituants, ce qui a un impact direct sur ses propriétés mécaniques, en particulier sur leurs résistances mécaniques en compression. Ces dernières sont directement liées à la quantité de fumées de silice ajoutée au ciment. L'utilisation de fumées de silice pour un béton de même qualité permet d'augmenter la proportion de granulats grossiers par rapport aux granulats fins.

L'utilisation de la silice limite la porosité des bétons en réduisant la taille des pores. Cette baisse de la porosité et de la perméabilité empêche la pénétration d'agents agressifs comme notamment les acides, les sulfates, le dioxyde de carbone et les chlorures marins.

L'utilisation de la silice est un atout pour prévenir la corrosion dans un environnement contraignant : ports, aéroports, plateformes industrielles, ouvrages en bord de mer.

L'utilisation d'oxyde de magnésium ou de chlorure de magnésium pour améliorer les caractéristiques du béton (principalement comme stabilisateur) est connue depuis de nombreuses années. Ce composé a même été identifié dans les murs de la Grande Muraille de Chine, et également dans du béton Romain.

5.5 Conséquence de la cendre de coque d'anacarde sur la santé humaine

La contamination de l'air dans les laboratoires peut causer des problèmes de santé respiratoire. Il existe des scientifiques qui ont mesurés la poussière respirable, les bactéries, les endotoxines et les moisissures (**Yvon Cormier 2010**) collectées dans 17 scieries de l'est du Canada. Au total, 1 205 travailleurs de scieries ont répondu à un questionnaire sur la santé respiratoire et ont tous participé à des mesures de la fonction pulmonaire, à des tests de piqure de la peau et à des prélèvements de sang veineux pour détecter des immunoglobulines spécifiques contre les moisissures trouvées dans les scieries. Les travailleurs avaient des fonctions pulmonaires normales, et la plupart des symptômes respiratoires pouvaient s'expliquer par des antécédents de tabagisme. Les travailleurs des scieries de pin avaient une plus grande prévalence de tests cutanés positifs pour le pin que les travailleurs des scieries où d'autres bois étaient utilisés. Des niveaux élevés d'anticorps spécifiques ont été observés chez certains travailleurs. La présence d'un test cutané positif et/ou d'anticorps spécifiques n'a eu aucun impact sur la ou les fonctions pulmonaires. Les travailleurs de ces scieries québécoises n'ont pas souffert de maladies respiratoires importantes ; cependant, certains d'entre eux pourraient être plus à risque de développer de l'asthme et une pneumonie d'hypersensibilité que les autres travailleurs.

L'asthme est l'un des risques les mieux décrits et il s'agit probablement du problème respiratoire le plus important associé. L'asthme du cèdre rouge est fréquemment observé chez les travailleurs des scieries où ce type de bois est manipulé. Dans une étude portant sur les travailleurs de scieries qui ont été exposés au cèdre blanc de l'Est, on a une prévalence de l'asthme professionnel similaire à celle des travailleurs du cèdre rouge. Parmi les autres maladies pulmonaires qui peuvent résulter de l'exposition aux scieries, citons la pneumonie d'hypersensibilité, la bronchite chronique, la bronchopneumopathie chronique obstructive et le syndrome toxique dû à la poussière organique (SOTO) ou la fièvre par inhalation. Les types de contaminants présents dans les scieries comprennent la poussière de bois, les bactéries et les moisissures. La poussière de bois est plus ou moins nocive, selon l'espèce de bois utilisée. Par exemple, l'acide plastique, l'agent qui réagit à la poussière de bois, est plus ou moins nocif selon l'espèce de bois utilisée.

5.6 La contribution du travail

L'objectif de ce travail était de démontrer qu'on pouvait introduire des déchets ou matières résiduels dans le béton. A cet effet le béton hydraulique et le béton bitumineux ont été nos cibles. Ainsi, nous avons eu à introduire progressivement des cendres de coque d'anacarde dans le béton hydraulique ou bitumineux.

Les résultats obtenus sont époustouffants car on a pu démontrer que la cendre de coque d'anacarde pourrait respecter le principe de stabilité solidification dans le béton.

Ceci d'une part, car on a absolument une parfaite adhérence des différentes molécules du mélange. On a remarqué que les molécules de cendres pouvaient facilement se coller aux molécules du béton d'où la stabilisation. Il n'y a pas eu de rejets. Ceci permet d'affirmer qu'on a une bonne stabilisation. Et de plus la bonne conductivité hydraulique du béton prouve que le matériau obtenu a une très bonne solidification.

En gros notre thèse a tout son sens car il démontre une fois de plus que les déchets résiduels peuvent être réutilisés dans la construction. Ce qui contribue à une protection de l'environnement, à un développement des matières recyclables.

5.7 Conclusion

Il est important, voire nécessaire d'étudier les relations physico-chimiques à l'intérieur des monolithes confectionnés, objet de ce chapitre. Envisager de mettre les cendres de coque d'anacardes dans du béton hydraulique ou bitumineux est un nouveau concept. C'est une idée originale qui se doit d'être étudiée sur tous les angles. Il faut reconnaître qu'à travers nos travaux, il a été constaté qu'à court terme, la stabilisation et la solidification des cendres dans le béton donne de bons résultats. Le but de ce chapitre est de prévoir si à long terme, le béton pourra toujours être stabilisé ou pas. Et cet état dépendra principalement des interactions chimiques entre les différentes molécules de cendres et du béton hydraulique ou du béton bitumineux.

Toutefois, après l'étude de l'interaction chimique entre les différentes molécules du béton et du ciment, il en ressort que celles des cendres participent ou améliorent la qualité du béton. Les molécules des cendres sont complémentaires au béton et ne nuisent pas à son bon fonctionnement.

5.8 Recommandation

Au cours de notre thèse beaucoup de choses ont été réalisés. De la réalisation de la méthodologie jusqu'aux travaux expérimentales. Il aurait été souhaitable de vieillir sur 10 ou 20 ans le bitume et de regarder d'un autre œil les dégradations qu'auraient subies la chaussée. Beaucoup d'auteurs ont travaillé sur les matières résiduelles. A notre niveau on aurait pu varier le dosage du béton hydraulique et de regarder l'incidence que cela pourrait avoir sur le mélange. Le véritable problème au niveau des travaux expérimentaux est qu'ils prennent plusieurs semaines voire plusieurs mois pour finir un jeu de tests. Ce qui nous obligeait à évoluer avec un seul dosage 350 kilogramme par mètre cube.

Les tests pratiques sur le chantier auraient pu être réalisés si on avait plus le temps. On pourrait citer l'essai la plaque. Mais pour faire cet essai on aurait besoin d'une grande quantité de cendre

et des engins lourds de l'entreprise. Une fois l'épandage et le compactage du béton bitumineux réalisé, on pourrait faire aussi le carottage et vérifier la teneur en liant. Mais tout ceci nécessiterait de gros moyens. Cela servirait juste à confirmer nos résultats expérimentaux.

CONCLUSION GENERALE

Les ingénieurs améliorent au fil des années la formulation du béton. Ils recherchent constamment une formulation du béton plus économique et respectueuse de l'environnement. Ainsi, depuis des lustres nous assistons fréquemment à l'ajout des adjuvants dans le béton. Le cas présent est l'incorporation des cendres de coque d'anacardes dans du béton hydraulique ou du béton bitumineux. Dans un premier temps l'utilisation de cendres issues de la pyrolyse équivaut à l'apprentissage de la réutilisation des déchets végétaux. C'est une manière de montrer que les déchets issus des végétaux pourront être réutilisés même si ces derniers étaient contaminés par de l'arsenic ou tout autres métaux lourds.

Dans un second temps, ces cendres ont été introduites graduellement dans la formulation du béton hydraulique ou du mélange bitumineux. Le but de cet ajout graduel est d'arriver à trouver le pourcentage de cendres à ajouter, et qui permet d'obtenir des caractéristiques physico-mécaniques optimales du mélange bitumineux et du béton hydraulique. Ainsi, après avoir défini les méthodologies expérimentales utilisées, nous remplaçons progressivement les cendres dans le béton hydraulique en les substituant au ciment, dans le béton bitumineux et au filet. Les résultats démontrent qu'à 15% d'ajout de cendres, le béton a de meilleures résistances. A supposer que ces cendres étaient contaminées, nous aurions participé à la protection de l'environnement. Ces cendres sont stabilisées et solidifiées dans le béton. Ce qui implique qu'elles sont toujours nocives, mais les molécules sont rendues inactives dans le monolithe. A court terme le béton obtenu est de très bonne qualité.

L'étude de l'interaction entre les molécules de cendres et le béton a été réalisée. Il en découle que le monolithe serait aussi de très bonne qualité au fil des années car les molécules des cendres participent à l'obtention d'une bonne qualité de béton.

BIBLIOGRAPHIE

- Anagonou. A, Godjo. T, Songmene. V et Tankpinou. Y (2020a) « Étude des propriétés physico-mécaniques d'un béton hydraulique contenant des cendres de coques d'anacarde de tailles micrométriques et nanométriques substituant partiellement le ciment », *Déchets sciences et techniques* [En ligne], N°83, mis à jour le : 25/03/2020, URL : <http://odel.irevues.inist.fr/dechets-sciences-techniques/index.php?id=4284>, <https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.4284>
- Anagonou. A, Godjo. T, Songmene.V et Kouam. J , (2020b) «Recycling Of West African Cashew Nut Shells Waste In Asphalt Concrete: Impact On The Physico-Mechanical Properties Of Asphalt Concrete », *International Journal of Advanced Research and Publications(IJARP)*, <http://www.ijarp.org/online,paperspublishing/feb2020.html>, Volume 4 - Issue 2, February 2020 Edition, 96-106 #ijarporg.
- Ackerman, J. L., Proffit, W. R., & Sarver, D. M. (1999). «The emerging soft tissue paradigm in orthodontic diagnosis and treatment planning» *Clinical orthodontics and research*, 2(2), 49-52.
- Anowai, S.I, Olorunmeye, et Job. F, (2017). « Durability Properties of Banana Fibre Reinforced Fly Ash Concrete » *Int. Research J. of Engineering and Technology* (IRJET) Vol: 04 Is: 11 | Nov -2017 www.irjet.net p-ISSN: 2395-007
- Ahmed Omran, Nancy Soliman, Ailing Xie, Tatyana Davidenko, Arezki Tagnit-Hamou 2018 «Field trials with concrete incorporating biomass-fly ash». *Construction and Building Materials* 186 (2018) 660–669
- Akinola Johnson Olarewaju. 2016 «Engineering Properties of concrete mixed with Varying Degrees of Fly Ash». *American Journal of Engineering Research* (AJER) e- ISSN: 2320-0847 p-ISSN: 2320-0936 Volume-5, Issue-9, (146-149)
- Amarante, J. A. L. (2010). « Université de Sherbrooke. Maîtrises-en environnement. «Bio méthanisation des déchets putrescibles municipaux- technologies disponibles et enjeux pour le QUÉBEC » Québec - Canada - Juillet 2010 P 99
- Ban C. C. et Ramli M. (2011). « The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview». *Resources, Conservation & Recycling* 55, 669–685
- Bayard, R., et Gourdon, R. (2010). «Traitement biologique des déchets». *Techniques de l'Ingénieur* (2010) 30(1) 22.
- Bertolini, L., Carsana, M., Cassago, D., Curzio, A. Q., & Collepari, M. (2004). « MSWI ashes as mineral additions in concrete». *Cement and concrete research*, 34(10), 1899-1906.
- Blaisi, N. I. (2018). «Environmental assessment of utilizing date palm ash as partial replacement of cement in mortar». *Journal of hazardous materials*, 357, 175-179.

- Branchu, P., Badin, A.-L., Bechet, B., Eisenlohr, L., Priol, T. Le, Marseille, F., & Trielli, E. (2013). «Pollution d'origine routière et environnement de proximité». *Vertigo- La Revue Électronique En Sciences de l'environnement*. <https://doi.org/10.4000/vertigo.12775>
- Cheah Chee Ban, Mahyuddin Ramli (2011). « The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview». *Resources, Conservation and Recycling* 55 (2011),669–685 pp17
- Colombano, S., Saada, A., Guerin, V., Bataillard, P., Bellenfant, G., Beranger, S. & Girardeau, I. (2010). «Quelles techniques pour quels traitements–Analyse coûts-bénéfices». Rapport final BRGM-RP-58609-FR , pp 403
- Carpentier, M. S. 1977. « Incinération des pneumatiques, des déchets radioactifs, des rebuts de l'industrie photographique ». Radioprotection, Dunod, 1977 Vol. 12, n 2, 95- pp107
- Drahtweber, D I E. 2007 « Analyse granulométrique » Normes québécoises d'analyse et du tracer des essais géotechniques». Tiré des rapports du ministère des transports. (https://www.haverparticleanalysis.com/fileadmin/02-b_Haver_Partikelanalyse/PA-Bilder/L_70_F_2016-10-21_Tarif2017_red_gesch.pdf consulté le 06-04-2019
- Dermont, G. 2008 «Sols pollués par les métaux lourds résultant de l'enfouissement de déchets industriels (Montréal, Canada): Géochimie, spéciation des métaux, et décontamination par flottation» thèse de doctorat, soutenu à l'INRS. pp 435
- Dreux, G., Gorisse, F., & Simonnet, J. (1983). «Composition des bétons : Méthode Dreux-Gorisse. Bilan de cinq années d'application en Côte d'Ivoire». *Annales ITBTP* no 414 (BETON-214). <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00054>
- Eckmann, Bernard.2007. «Sommaire performances mécaniques Dimensionnement». Colloque de formation retraitement à froid des chaussées souples, Montréal 4-6 décembre 2007 pp. 33
- Fapohunda, C., Akinbile, B., & Shittu, A. (2017). «Structure and properties of mortar and concrete with rice husk ash as partial replacement of ordinary Portland cement – A review». *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(2), 675–692. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2017.07.004>
- Glen Philippot, (2010). «Conséquences énergétiques et environnementales de l'utilisation des enrobés tièdes lors de la construction des routes». Mémoire de maîtrise électronique, Montréal, École de technologie supérieure.
- Godjo, T., Tagutchou, J., Naquin, P., & Gourdon, R. (2015). «Valorisation des coques d ' anacarde par pyrolyse au Bénin». *Déchets Sciences et Techniques*, 11–18. <https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.3282>
- Godjo, T. (2017). «Densification et analyse des propriétés physiques de biocharbon produit à partir des coques déchets d'anacarde au Bénin». *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 19 (3), 614.
- Gu, L., & Ozbakkaloglu, T. (2016). «Use of recycled plastics in concrete: A critical review». *Waste Management*. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.005>

<https://docplayer.fr/44608454-Controle-des-travaux-de-revetement-en-beton-bitumineux-a-module-eleve-cas-de-l-ouest-algerien.html> , Consulté le 1 avril 2019.

Houin. J, Tapsoba. (2012). « Étude de formulation et de mise en œuvre des enrobés : Cas des travaux de renforcement de la route Ouaga-Sakoinsé » Mémoire Master en Ingénierie De L'eau et de L'environnement, Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement, Ouagadougou, Burkina Faso.

Horsakulthai V, et al, (2011). «Investigation on the corrosion resistance of bagasse-rice husk-wood ash blended cement concrete by impressed voltage». *Construction and Building Materials*, 25(1):54–60

Inoue, A (2000) «Two-dimensional variations of exchangeable cation composition in terrigenous sediment, eastern flank of the Juan de Fuca Ridge». *Marine Geology*, 162(2-4), 501-528, [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(99\)00084-5](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(99)00084-5)

Jl, Ackerman, Proffit Wr, et Sarver Dm. (1999). «The emerging soft tissue paradigm in orthodontic diagnosis and treatment planning» *Clinical Orthodontics and Research* 2(2): 49-52.

Jonathan. R, (2012). «Influence de l'altération physique sur les caractéristiques physico-chimique de monolithe de sols contaminés, traités par SS au ciment», projet de maitrise, ETS de Montréal

Karam. F, Abdeldjalil Z (2015), « Contrôle des travaux de revêtement en béton bitumineux à module élevé : cas de l'Ouest Algérien». Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France. <hal-01167622>;

Kakpo. C, (2017). « Caractérisation d'un enrobé bitumineux haute Performance incorporant du verre recyclé et son impact sur les performances de cet enrobé». Mémoire de maitrise, génie de la construction, ÉTS, Montréal, 274 pages

Kalinski, M. E., & Yerra, P. K. (2006). «Hydraulic conductivity of compacted cement-stabilized fly ash». *Fuel*, 85(16 SPEC. ISS.), 2330–2336. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.04.030>

Kogbara, R. B. (2013). «A review of the mechanical and leaching performance of stabilized/solidified contaminated soils». *Environmental reviews*, 22(1), 66- 86.

Lemione, C., & Picon, M. (1982). «La fixation du phosphore par les ceramiques lors de leur enfouissement et ses incidences analytiques». *Revue d'Archeometrie*. <https://doi.org/10.3406/arsci.1982.1196>

Liu, Q., Chmely, S. C., & Abdoulmoumine, N. (2017). «Biomass treatment strategies for thermochemical conversion». *Energy & Fuels*, 31(4), 3525-3536.

Langlois Richard 1979. « Document sur les caoutchoucs dans les revêtements ». *J. Materials Engineering and Performance*, Volume 16(5) 26

Mailloux, Alexis. 2011. « Les essais qualitatifs réalisés sur les enrobés et leurs constituants ». Master 2IE, Memoire D E. 2017 : 2016-17.

- Mai Lan NGUYEN 2009 « Étude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux ». École Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Université de Lyon, Thèse de doctorat soutenue le 23-06-09
- Makhloufi, Z., Bederina, M., Bouziani, T., Kadri, E. H., & Bouhicha, M. (2013). «Formulation of superplasticized limestone concrete of Turonian». *Int Rev Mech Eng*, 7(6), 1103-1114.
- Naik, T. R. (1999). «Tests of wood ash as a potential source for construction materials». Report NoCBU-1999-09. Milwaukee: UWM Center for By-products utilization, Department of Civil Engineering and Mechanics, University of Wisconsin-Milwaukee, 61.
- Nina M, Gunvor M. Kirkelund, Pernille E. Jensen, Mette R. Geiker, Lisbeth M. (2019) «Impact of production parameters on physiochemical characteristics of wood ash for possible utilisation in cement-based materials». *Resources, Conservation & Recycling* 145) 230-240.
- Nawaf I. Blaisi 2018 « Environmental assessment of utilizing date palm ash as partial replacement of cement in mortar ». *J. Hazardous Materials* 357 (2018) 175–179.
- Ottosen, L. M., Hansen, E. Ø., Jensen, P. E., Kirkelund, G. M., & Goltermann, P. (2016). «Wood ash used as partly sand and/or cement replacement in mortar». *Int. J. Sustainable Development and Planning*, 11(5), 781-791. DOI: 10.2495/SDP-V11-N5-781-791
- Oruc S., Celik F., Akpınar M.V., 2006. «Effect of Cement on Emulsified Asphalt Mixtures ». *J. Materials Engineering & Performance*, Vol.16(5) Oct. 2006, 567—583
- Quintus Françoise, 2007. «Étude de cas de l'agrandissement du site d'enfouissement sanitaire argentai Deux-Montagnes » Université de Montréal, Québec, Canada. Mémoire de maîtrise en science de l'environnement. pp 139
- Randriamalala Tiana Richard 2014. « Comportement mécanique : durabilité des matériaux cimentaires avec ajouts de cendre et fumée de silice » Mémoire De Master II, option : génie des procédés organiques et macromoléculaires. Université Mohamed Bougara Boumerdes, Faculte sciences de l'ingénieur pp80
- Regourd, M. (1986). «Theme 3. Ciments speciaux et ciments avec additions sous theme 3.1. caracteristiques et activat ion des produits d'addition». In 8th International Congress on the Chemistry of Cement. Vol. 1. Cambridge University
- Rosa Galvez-Cloutier, 2012. Université Laval, département de génie civil et génie des eaux. « Gestion intégrée des déchets solides municipaux » Province du Québec pp126
- Randriamalala, T.R., Tianasoa, R. et Manoelson, R. (2014). «Développement de l'écologie industrielle à Madagascar : valorisation de cendre volante dans la construction du béton». *Déchets Sciences et Techniques* - N°67 - Juin 2014
- Seref Oruc, Fazil Celik, and M. Vefa Akpınar 2006. « Effect of Cement on Emulsified Asphalt Mixtures ». *J. Materials Engineering & Performance*, V.16(5), pp 583
- Sahmaran M et Li V. C., (2009). «Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash». *Cem. Concr. Res.* 2009, 39, pp : 1033–43.
- Siddique, R., Khatib, J., & Kaur, I. (2008). «Use of recycled plastic in concrete: A review».

Waste Management. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.011>

Shi, C., & Fernández-Jiménez, A. (2006). «Stabilization/solidification of hazardous and radioactive wastes with alkali-activated cements». *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.008>

Shi, C., & Zheng, K. (2007). «A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete». *Resources, Conservation and Recycling*, 52(2), 234-247.

M. St-Jacques, M. Bertrand 2002. «Formulation d'un enrobé coloré pour le Québec et Performance en laboratoire » actes, 2e Conf. Spécialisée en génie des matériaux de la Société canadienne de génie civil. Montréal, Québec, Canada 5-8 juin 2002, 28 pages.

V. Caprai , F. Gauvin, K. Schollbach, H.J.H. Brouwers, 2019 « MSWI bottom ash as binder replacement in wood cement composites». *Construction and Building Materials* 196 (2019) , 672–680.

C. M. A. Fontes · R. B. Silva · P. R. L. Lima, 2017 « Characterization and Effect of Using Bottom and Fly Ashes from Co-combustion of Cocoa Waste as Mineral Addition in Concrete». *Waste Biomass Valor* 10:223–233.

Telma Ramos , Ana Mafalda Matos , Joana Sousa-Coutinho 2013 « Mortar with wood waste ash: Mechanical strength carbonation resistance and ASR expansion » *Construction and Building Materials* 49 (2013) 343–351

Thirumurugan, V., Raj, S. G. V., & Dheenadhayalan, K. (2018). «Experimental Study on Strength of Concrete by Partial Replacement of Cement by Cashew Nut Shell Ash (CNSA) and Chicken Feather Fiber (CFF) as Fiber Reinforcement». *International Journal for Advance Research and Development*, 3(3), 238-242.

Thomas, M. D. A. (2007). «Optimizing the use of fly ash in concrete» (Vol. 5420). Skokie, IL: Portland Cement Association.

Yvon Cormier, Anne Mérlaux a & Caroline Duchaine. (2010). «Respiratory Health Impact of Working in Sawmills in Eastern Canada a Centre de Pneumologie», Hôpital and Université Laval , Sainte-Foy, Québec, Canada Published online: 05 Apr 2010.

Vijayalakshmi, M., Sekar, A. S. S., Sivabharathy, M., & Ganesh Prabhu, G. (2012). «Utilization of Granite Powder Waste in Concrete Production». *Defect and Diffusion Forum* 330,49–61. <https://doi.org/10.4028/www.scientificDDF.330.49>

William Wilson 2012. « Bétons durables à base de cendres d'écorces de riz » mémoire de maîtrise. Faculté de génie Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, pp175