

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

Augias Anagonou^{1,2}, Thierry Godjo^{2*}, Victor Songmene¹, Yvette Tankpinou²

(1) École de Technologie Supérieure (ÉTS), 1100 NOTRE DAME ouest, Montréal QC, Canada

(2) Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques d'Abomey, B.P.2282 Goho, Abomey, Bénin

* Auteur correspondant : thierrygodjo@hotmail.com

RÉSUMÉ

L'utilisation de déchets comme ressources alternatives est une approche permettant de réduire les pressions sur les ressources naturelles ainsi que les impacts environnementaux liés à l'élimination des déchets, si le recyclage est conduit dans des conditions respectueuses de l'environnement. 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.

MOTS-CLÉS : béton hydraulique, conductivité hydraulique, nanodéchets, résistance à la compression, résistance à la traction, valorisation des cendres, coques d'anacarde

ABSTRACT

The use of waste as an alternative resource is an approach to reduce pressure on natural resources, as well as the environmental impacts associated with waste disposal, if recycling is conducted under environmentally friendly conditions. The objective of this study is to determine the conditions for incorporating pyrolysis ash from cashew nuts shells into concrete as a partial replacement for cement. The ashes used were collected from Afonkanta Benin Cashew, one of the plants that processes cashew nuts into almonds. The various ash additions replace the amount of cement added to the concrete, gradually in proportions of 5 %, 10 %, 15 %, 15 %, 20 % and 25 % ash. The related physico-mechanical characteristics, namely compressive strength, tensile strength, hydraulic conductivity and subsidence of the concrete over time, have been determined. The physico-mechanical results show that the best characteristics of the hydraulic mixture were obtained with the proportion of 15 % of ash. Indeed, a hydraulic concrete mixture of 15 % ash at 28 days of maturity gives a compressive strength of 51.83 N/mm², a tensile strength of 13.65 N/mm², a low hydraulic conductivity value of 3.48 10⁻¹⁷ m/s. There is also an average subsidence of 3 mm.

KEYWORDS: hydraulic concrete, hydraulic conductivity, nano-waste, compressive strength, tensile strength, ash recovery, cashew nut shells

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

Augias Anagonou, Thierry Godjo, Victor Songmene, Yvette Tankpinou

Introduction

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 1 ci-dessous présente les différents types de traitements des déchets, leurs procédés de conversion et les produits générés.

Les traitements thermochimiques transforment les déchets soit en cendre et mâchefer 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

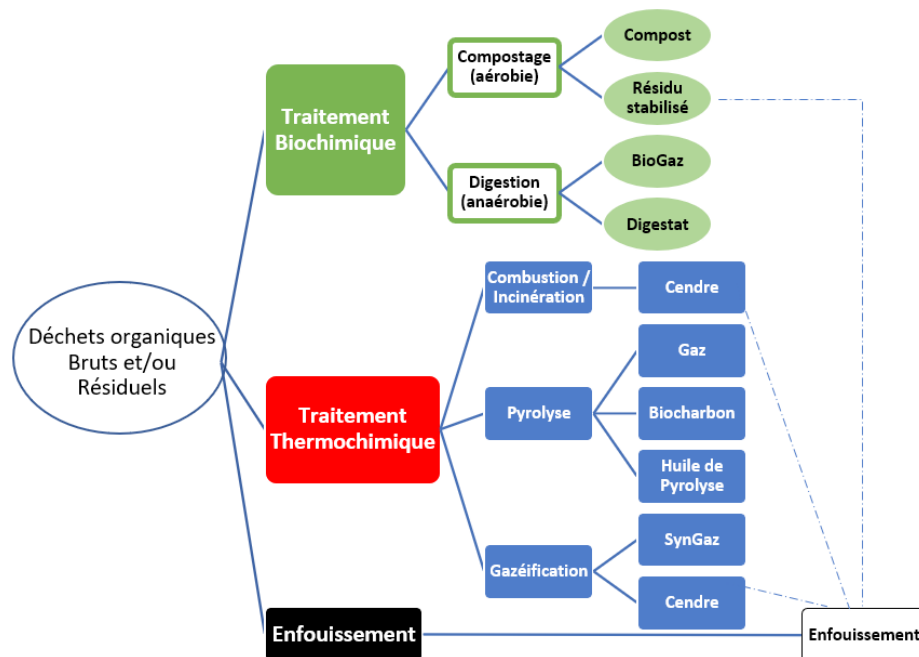


Figure 1. Filières de traitement envisageables pour les déchets organiques

s'infiltrer dans le sous-sol avec des iMPacts environnementaux potentiellement élevés (Lemoine et Picon, 1982).

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 (Adégbola et Crinot, 2016), 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 8 usines pour une capacité de 31 500 tonnes et plusieurs unités artisanales. Le fonctionnement de ces usines entraîne une production abondante de coques (10 959 tonnes en 2013), déchets 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 (Tagutchou et Naquin, 2012). 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 ne le sont pas. Ils 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 anaérobie pendant la phase de diminution de la température (fin de libération de gaz et finalisation de la génération de biochar), 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 et Fernández-Jiménez, 2006 ; Wiles, 1987). 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 (Lam et al., 2010). Elle a pour but d'amener les contaminants sous une forme moins soluble ou moins toxique. Pour Mulligan et al. (2001), 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 (Gu et al., 2016 ; 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.

I. Matériels et Méthodes

I.1 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 réalisée 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 2).

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.

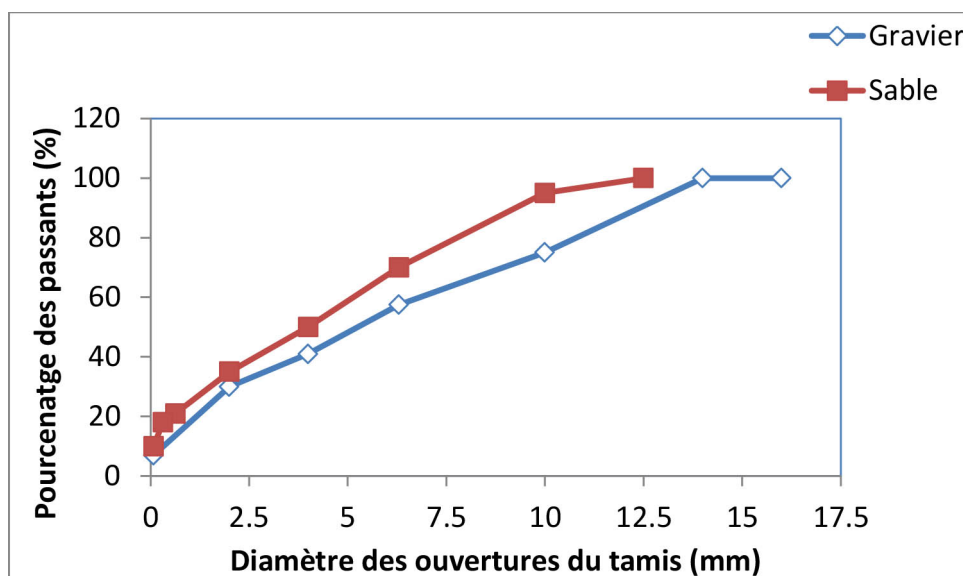


Figure 2. Analyse granulométrique du sable et du gravier utilisé

Comme le montre la figure 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 d'Anowai *et al.* (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 1.

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 des cendres utilisées, 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 5).

L'analyse par diffraction au rayons-X (tableau 1) révèle que ces cendres sont constituées, entre autres composés, d'oxydes

tels que SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 . Pour Anowai *et al.* (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 : leurs pourcentages 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 %).

1.2 Matériels et méthodes

Les bétons ont été analysés pour déterminer leur résistance à la compression, à la traction, à la conductivité hydraulique et leurs propriétés rhéologiques. 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 *et al.*, 2017). L'essai de traction consiste à déterminer la résistance en traction du béton. L'essai de conductivité hydraulique permet de mesurer la capacité de l'eau à traverser le béton en mesurant la vitesse d'écoulement (Kalinski et Yerra, 2006). Lorsque les valeurs sont moins élevées, le béton a une meilleure résistance à l'eau. L'essai d'affaissement est réalisé sur le béton de ciment frais pour déterminer sa

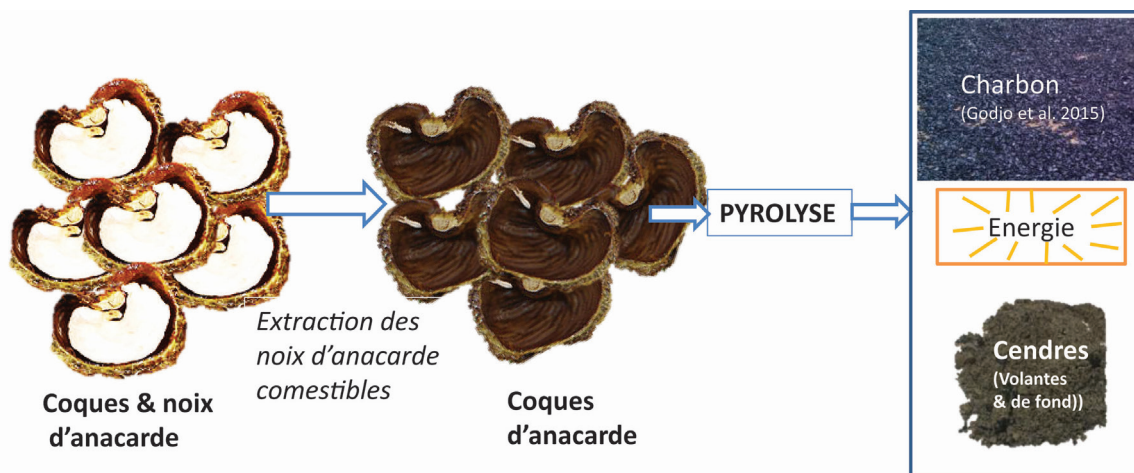


Figure 3. Représentation du traitement thermochimique des coques d'anacarde

Tableau 1. Composition générale des cendres de coques d'anacarde utilisées

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 4. Image des cendres expérimentales de coques d'anacarde

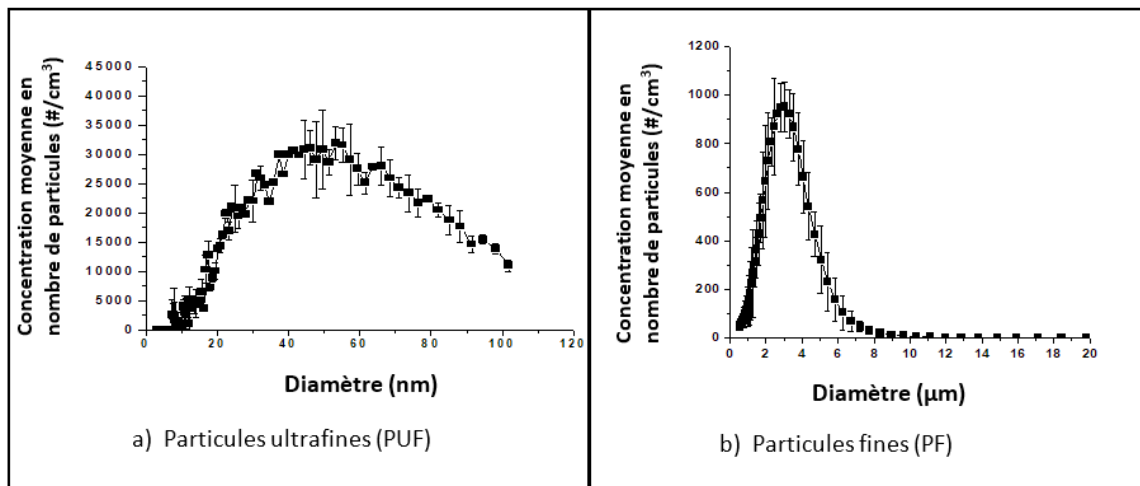


Figure 5. Distribution granulométrique des cendres expérimentales de coques d'anacarde - a) particules ultrafines- b) Particules fines

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 comme adjuvant de cendres de coques d'anacarde, à 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 % et 25 % de cendre suivant la méthode de Vijayalakshmi *et al.* (2012). Dans cette approche, la cendre se substitue graduellement au ciment. L'ajout d'une quantité massique X de cendre 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 cendre** : ce type de béton donne des valeurs de référence ;
- le Béton hydraulique contenant **5 % de cendre** ;
- le Béton hydraulique contenant **10 % de cendre** ;
- le Béton hydraulique contenant **15 % de cendre** ;
- le Béton hydraulique contenant **20 % de cendre** ;
- le Béton hydraulique contenant **25 % de cendre**.

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.

2. Résultats

2.1 Résistances à la compression et à la traction

Les résultats des essais de compression et de traction sont présentés à la figure 6. Ces résultats montrent une amélioration des résistances à la compression et à la traction avec la durée de prise hydraulique pour tous les bétons réalisés. Pour chaque type de mélange de béton, les proportions 0 % et 15 % présentent majoritairement les meilleures performances : respectivement, 26 MPa et 24 MPa pour les bétons de 3 jours, 41 MPa et 36 MPa pour les bétons de 7 jours et 54 MPa et 52 MPa pour les bétons de 28 jours pour ce qui concerne les résistances à la compression d'une part, 10 MPa et 08 MPa pour les bétons de 3 jours, 12 MPa et 13 MPa pour les bétons de 7 jours et 17 MPa et 14 MPa pour les bétons de 28 jours pour les résistances à la traction d'autre part. Par ailleurs, les résistances à la compression et à la traction croissent au fil des jours pour tous les types de formulations de bétons expérimentés. 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 connaît une augmentation. En effet, l'ajout de cendre entraîne une diminution progressive du ciment, ce qui explique la régression de la résistance suite à 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. A 15 % d'ajout de cendre dans le béton, la cendre de coques d'anacarde se comporte presque comme le ciment. Il acquiert les caractéristiques d'un parfait liant. Par contre en deçà ou au-delà de 15 %, il est un liant de qualité moindre.

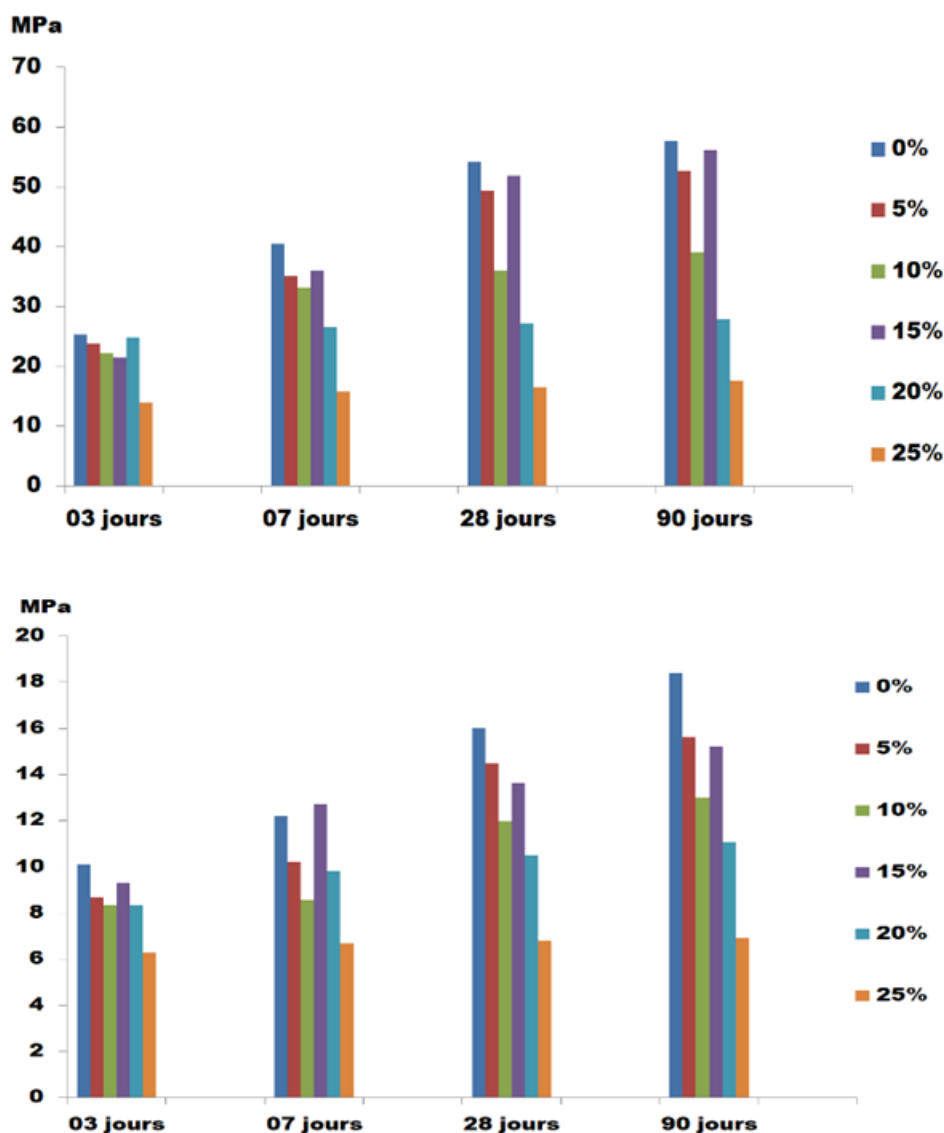


Figure 6. Résistances à la compression (en haut) et à la traction (en bas) mesurées à différents temps de prises sur les bétons réalisés avec des taux de cendres croissants en substitution au ciment.

2.2 Essai de conductivité hydraulique du béton (valeur de la perméabilité en $10^{-17}m/s$)

Les résultats obtenus des essais de conductivité hydraulique du béton sont présentés à la figure 7.

Ces 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 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

impermeable à l'eau que le béton ordinaire (sans ajout de cendre).

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

Le tableau 2 montre que les affaissements mesurés varient entre 3 mm et 8 mm environs. On remarque que les bétons sans apport de cendres (0 %) et avec 15 % de cendres présentent les mêmes résultats. 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. Par contre, 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.

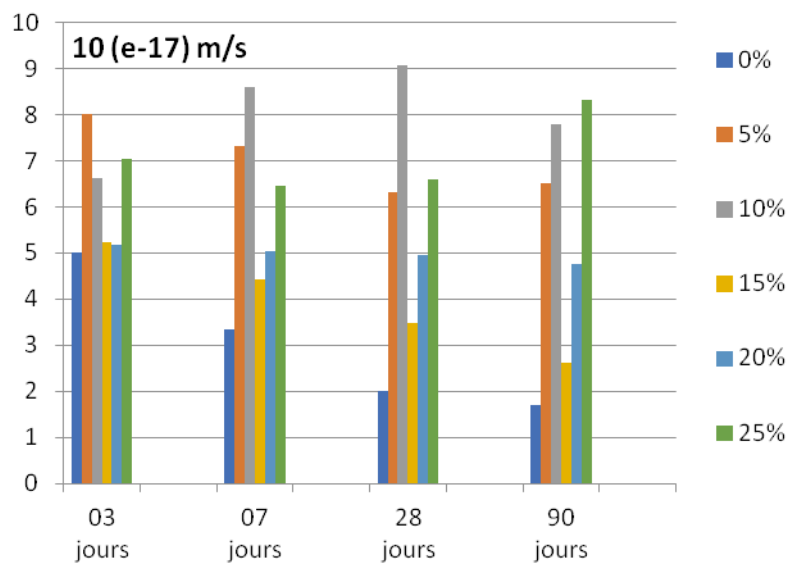


Figure 7. Diagramme exprimant la conductivité hydraulique du béton

Tableau 2. Diagramme exprimant la hauteur d'affaissement 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

3. Discussion

De très nombreux travaux ont été publiés sur les effets de l'apport d'adjuvants au béton. Thomas (2007) a montré que les cendres volantes permettent d'augmenter les capacités physico-mécaniques du béton jusqu'à un pourcentage de substitution de 40 % du ciment. Shi et Zheng (2007) et Bertolini *et al.* (2004) ont montré que l'utilisation de cendres de brique de verre comme remplacement du ciment dans le béton est potentiellement intéressante. Nos résultats ont montré que l'ajout de cendres de coques de noix d'anacarde dans le béton en substitution du ciment à 15 % donne de bonnes performances de résistance du béton. Mais la porosité du béton augmente ce qui entraîne l'augmentation de la conductivité hydraulique.

Les résultats obtenus peuvent être discutés sous deux angles. Au premier abord on pourrait dire que les coques d'anacardes possèdent certaines propriétés chimiques qui ne nuisent pas au ciment. A un certain pourcentage, 15 % de cendre, le béton obtenu présente les meilleures caractéristiques. Au-delà de 15 %, on assiste à une baisse des propriétés du béton. La granulométrie très fine des cendres leur permet d'occuper les fins pores du béton, ce qui augmente la résistance du béton jusqu'à un certain pourcentage. Au-delà de 15 %, une baisse

probable de l'adhérence granulats-liant entraîne une diminution graduelle des résistances physico-mécaniques du béton.

D'autres auteurs ont rapporté des résultats analogues. Ainsi, Thirumurugan *et al.* (2018) rapportent que l'incorporation dans le béton des cendres obtenues après combustion des coques d'anacarde dans les chaudières des usines de transformation d'anacarde, augmente la résistance globale du béton lorsqu'elles sont utilisées à moins de 20 % de substitution du ciment. Oruc *et al.* (2006) rapportent que l'apport de ces cendres dans le béton améliore considérablement ses caractéristiques physico-mécaniques. Cheah et Ramli (2011) ont étudié plusieurs types de cendres végétales et conclu que la fine granulométrie des cendres ainsi que leurs compositions chimiques améliorent les performances du béton jusqu'à un taux de substitution de 15 % du ciment. Randriamalala *et al.* (2014) ont également montré que la résistance du béton préparé avec 10 % de cendres volantes est plus élevée que sans apport de cendres à partir de 28 jours de prise hydraulique. Ils indiquent d'autre part que la cendre volante est un bon adjuvant fluidifiant du béton qui diminue son retrait et améliore sa maniabilité et sa résistance à 28 jours grâce à leurs phases minérales tels que l'oxyde ferrique, l'oxyde d'alumine, l'oxyde de silice qui sont aussi présents dans le ciment. Les cendres de coques de noix d'anacarde utilisées

dans notre recherche ont les mêmes caractéristiques. Sachant que le sable contient aussi beaucoup de silice, les cendres peuvent donc remplacer en petites portions le sable fin.

Conclusion

Dans le but d'envisager leur valorisation, des cendres issues de la pyrolyse des coques d'anacarde ont été utilisées comme substituant au ciment dans la réalisation de bétons à l'échelle du laboratoire. Les échantillons de bétons préparés avec des taux de substitution croissants ont été soumis à plusieurs essais de caractérisation physico-mécaniques. Il en ressort que les meilleures caractéristiques physico-mécaniques ont été obtenues avec un taux de substitution de 15 % de cendres. En premier lieu, la granulométrie très fine des cendres (taille inférieure à 10 μm) permet à la cendre d'occuper les micropores du béton hydraulique. Ceci diminue la porosité et par conséquent augmente la résistance mécanique du mélange. En second lieu, les caractéristiques chimiques de la cendre de coques d'anacarde sont proches de celles du ciment. A cela s'ajoute la forte quantité de silice présente dans la cendre. Le taux de 15 % de cendres dans le béton contribue à une diminution de la quantité de ciment utilisée, ce qui contribue à réduire les impacts environnementaux associés à la production de ciment (Akinola, 2016). Par ailleurs, la matrice cimentaire du béton réduit la dispersion éventuelle des traces de polluants contenus dans la cendre. L'évaluation environnementale globale de cette démarche est une perspective de nos travaux dans le domaine.

Références bibliographiques

- Ackerman James L., Proffit William R., Sarver David M. (1999). The emerging soft tissue paradigm in orthodontic diagnosis and treatment planning. *Clinical Orthodontics and Research*, 2(2), pp. 49-52. <https://doi.org/10.1111/ocr.1999.2.2.49>
- Anowai Solomon Ikechukwu, Olorunmeye Fredrick Job (2017). Durability properties of banana fibre reinforced fly ash concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology* 4(11), pp. 1168-1174 <https://irjet.net/archives/V4/i11/IRJET-V4I11208.pdf>
- Cheah Chee Ban, Ramli Mahyuddin (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(7), pp. 669-685. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.02.002>
- Bertolini Luca, Carsana Maddalena, Cassago Davide, Curzio Alessandro Quadrio, Collepari Mario (2004). MSWI ashes as mineral additions in concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(10), pp. 1899-1906. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.001>
- Blaisi Nawalf I. (2018). Environmental assessment of utilizing date palm ash as partial replacement of cement in mortar. *Journal of Hazardous Materials*, 357, pp. 175-179. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.06.013>
- Dermont Gérald (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, Université de Québec, Institut national de la recherche scientifique, 435 p.
- 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*, 414 (BETON-214).
- Fapohunda Christopher, Akinbile Bolatito, Shittu Ahmed (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), pp. 675-692. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2017.07.004>
- Godjo Thierry, Tagutchou Jean-Philippe, Naquin Pascale, Gourdon Rémy (2015). Valorisation des coques d'anacarde par pyrolyse au Bénin. *Déchets Sciences et Techniques*, 70, pp. 11-18. <https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.3282>
- Göransson Kristina, Söderlind Ulf, He Jie, Zhang Wennan (2011). Review of syngas production via biomass DFBGs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), pp. 482-492. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.032>
- Gu Lei, Ozbakkaloglu Togay (2016). Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Management*, 51, pp. 19-42. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.005>
- Horsakulthai Veera, Phiuvanna Santi, Kaenbud Watcharase (2011). Investigation on the corrosion resistance of bagasse-rice husk-wood ash blended cement concrete by impressed voltage. *Construction and Building Materials*, 25(1), pp. 54-60. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.057>
- Kalinski Michael E., Yerra Praveen K. (2006). Hydraulic conductivity of compacted cement-stabilized fly ash. *Fuel*, 85(16), pp. 2330-2336. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.04.030>
- Lemoine C., Picon M. (1982). La fixation du phosphore par les céramiques lors de leur enfouissement et ses incidences analytiques. *ArchéoSciences, revue d'Archéométrie*, 6(1), pp. 101-112. <https://doi.org/10.3406/arsci.1982.1196>
- Mulligan Catherine N., Yong Raymond N., Gibbs Bernard F. (2001). An evaluation of technologies for the heavy metal remediation of dredged sediments. *Journal of Hazardous Materials*, 45(1-2), pp. 143-165. [https://doi.org/10.1016/s0304-3894\(01\)00226-6](https://doi.org/10.1016/s0304-3894(01)00226-6)
- Oruc Seref, Celik Fazil, Akpinar M. Vefa (2006). Effect of Cement on Emulsified Asphalt Mixtures. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 16(5), pp. 578-583. <https://doi.org/10.1007/s11665-007-9095-2>
- Ottosen Lisbeth M., Hansen Esben Ø., Jensen Pernille E., Kirkelund Gunvor M., Goltermann Per (2016). Wood ash used as partly sand and/or cement

replacement in mortar: *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 11(5), pp. 781-791. <https://doi.org/10.2495/sdp-v11-n5-781-791>

Randriamalala Tiana Richard, Tianasoa Ramamonjy Manoelson, Raharison Mandimby Tiandray (2014). Développement de l'écologie industrielle à Madagascar : valorisation de cendre volante dans la construction du béton. *Déchets Sciences et Techniques*, 67, pp. 28-34. <https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.316>

Sahmaran Mustafa, Li Victor C. (2009). Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash. *Cement and Concrete Research*, 39(11), pp. 1033-1043. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.07.009>

Siddique Rafat, Khatib Jamal, Kaur Inderpreet (2008). Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste management*, 28(10), pp. 1835-1852. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.011>

Shi Caijun, Fernandez-Jimenez A. (2006). Stabilization/solidification of hazardous and radioactive wastes with alkali-activated cements. *Journal of hazardous materials*, 137(3), pp. 1656-1663. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.008>

Shi Caijun, Zheng Keren (2007). A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(2), pp. 234-247. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.01.013>

Tagutchou Jean-Philippe, Naquin Pascale (2012). Caractérisation et traitement thermochimique des coques d'anacarde en vue de leur valorisation énergétique dans les procédés de transformation artisanale de noix de cajou. *Déchets Sciences et Techniques*, 62, pp. 28-35. <https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.2722>

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, pp. 49-61. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.330.49>

Wiles Carlton C. (1987). A review of solidification/stabilization technology. *Journal of Hazardous Materials*, 14(1), pp. 5-21. [https://doi.org/10.1016/0304-3894\(87\)87002-4](https://doi.org/10.1016/0304-3894(87)87002-4)