



Journal of Materials and Engineering Structures

Research Paper

Modélisation des Propriétés Mécaniques de Bétons Contenant des Déchets en Polyéthylène Haute Densité

Modeling the Mechanical Properties of Concrete Containing High Density Polyethylene Wastes

Houria Taibi^{a,}, Bachir Nasser^a, Amel Aattache^b, Zohra Draoua^c*

^aLaboratoire LM2SC. Université des sciences et de la technologie Mohamed Boudiaf Oran, Algérie.

^bLaboratoire LMST. Université des sciences et de la technologie Mohamed Boudiaf Oran, Algérie.

^cLaboratoire de Chimie des Polymères. Université d'Oran 1, Ahmed Benbella. Algérie.

ARTICLE INFO

Historique de l'article :

Reçu : 15 Septembre 2020

Révisé 10 Février 2021

Accepté 10 Février 2021

Mots clés:

Modélisation

Béton

polyéthylène haute densité

Déchets

Keywords :

Modeling

Concrete

high-density polyethylene

Wastes

RESUME

L'article traite de la modélisation linéaire des propriétés mécaniques de bétons contenant des déchets en polyéthylène haute densité. La méthode des régressions linéaires a été utilisée pour l'analyse de ces caractéristiques. La validité de la méthode a été vérifiée en traitant deux cent dix sept valeurs d'essais référenciés. A l'issu de l'analyse, il a été démontré que le modèle linéaire proposé est parfaitement pertinent. En outre, Il a été montré, que ces conclusions peuvent s'appliquer à des bétons contenant d'autres types de déchets plastiques.

ABSTRACT

The article deals with the linear modelling of the mechanical properties of concrete containing high-density polyethylene waste. The linear regression method was used for the analysis of these characteristics. The validity of the method was verified by processing two hundred and seventeen referenced test values. At the end of the analysis, it has been shown that the proposed linear model is perfectly pertinent. In addition, it has been shown that these conclusions can be applied to concrete containing other types of plastic waste.

* Corresponding author. Tel.: +213771797656.

E-mail address: houria.taibi@univ-usto.dz

1 Introduction

Le monde est confronté à la problématique de la récupération et du recyclage des déchets plastiques. Ces déchets plastiques, quels que soit leurs origines, ne sont pas biodégradables et contribuent aujourd'hui à une pollution qui s'avère dangereuse. En parallèle, la demande sur le béton est de plus en plus importante. Cette sollicitation sur le béton induit à une surconsommation des granulats naturels. Ce qui peut entraîner, à brefs ou moyen terme, une rareté des gisements naturels locaux. La solution à cette double problématique pourrait être la substitution d'une partie des granulats naturels par des déchets plastiques dans la fabrication des bétons.

Dans cette logique, plusieurs chercheurs se sont donc penchés sur la question en démontrant la pertinence de remplacer une partie des agrégats naturels par des déchets plastiques dans la composition des bétons. Ainsi, Abdulrahman et *al.* [1], ont étudié les propriétés mécaniques du béton et du mortier contenant des particules de déchets en polyéthylène à basse densité, sous forme d'agrégats fins. Ils ont conclu que l'utilisation de ces particules dans le mortier ou le béton permet d'économiser l'agrégat naturel, de réduire l'élimination des déchets, et d'obtenir une densité moindre et une résistance à la compression et à la traction adaptée aux applications structurelles.

Belmokaddem et *al.* [2] ont présenté une étude expérimentale évaluant et comparant l'impact de la substitution des agrégats fins et grossiers par trois déchets plastiques dans le mélange du béton. Les déchets étaient les suivants : polypropylène, polyéthylène haute densité et polychlorure de vinyle. Différentes quantités (25, 50 et 75%) d'agrégats naturels ont été remplacées par le même volume de déchets plastiques. Leurs résultats ont montré que l'incorporation de 75 % de déchets de polychlorure de vinyle dans le béton a entraîné une diminution de la conductivité thermique jusqu'à 0,61 W/m-k. Tandis que, Boucedra et *al.* [3], ont développé un nouveau béton de sable dont les agrégats sont uniquement constitués de sable de rivière ou de dune et de déchets de plastiques. Différentes compositions ont été étudiées en remplaçant (en volume) le sable minéral par les déchets plastiques. Les proportions envisagées ont été les suivantes : 0%, 25%, 50% et 75%. Ils ont étudié les propriétés thermomécaniques, la microstructure et les propriétés acoustiques des bétons produits. Ils ont montré que, l'isolation thermique et l'absorption acoustique de ces nouveaux bétons se sont nettement améliorées.

Aldahdooh et *al.* [4] ont étudié la possibilité de remplacer une partie des granulats naturels par des déchets plastiques dans la fabrication du béton. Leurs résultats ont confirmé que les déchets plastiques peuvent être utilisés comme agrégats pour la production de béton avec des propriétés techniques acceptables. Par contre, Sheelan M. et *al.* [5], ont étudié la possibilité d'utiliser des déchets plastiques comme remplacement partiel d'agrégats fins sur les caractéristiques fraîches du béton autoplaçant. A cet effet, différents mélanges de béton autoplaçant ont été conçus avec un rapport eau-liant constant de 0,32 de liant. Différentes tailles de déchets plastiques ont été considérés comme des paramètres expérimentaux. Les résultats expérimentaux de leurs travaux ont montré que les déchets plastiques ayant les dimensions et le contenu utilisés dans leurs recherches peuvent être utilisés avec succès comme agrégats fins dans le béton auto plaçant, ce qui pourrait être une bonne solution de récupération de ce type de déchets.

Quant à, Bhogayata et *al.* [6], ils ont présenté les résultats d'études expérimentales sur les propriétés de résistance aux chocs et de durabilité du béton renforcé avec des déchets plastiques métallisés générés à partir des plastiques d'emballage alimentaire mis au rebut. Ils ont pris des films de déchets déchiquetés sous forme de fibres de longueurs variables de 5 mm, 10 mm et 20 mm, qu'ils ont mélangés au béton témoin. Les résultats des tests ont démontré une amélioration de la résistance à la traction de fendage et de la ductilité du béton grâce à l'ajout de fibres de déchets plastiques métallisés. Ils ont également constaté que le béton produit soumis à une compression axiale avait présenté de grandes déformations à des charges plus élevées que le béton conventionnel, cependant, l'ouvrabilité, la résistance à la compression et la résistance à la flexion ont montré une réduction négligeable à un dosage de 1 % de fibres déchets plastiques métallisés.

Olofinnade et *al.* [7], ont examiné la pertinence de l'utilisation des déchets plastiques recyclés de polystyrène à haute résistance aux chocs et de polyéthylène à basse densité, pour la production de béton léger à haute résistance. Les déchets plastiques ont été recyclés en granulés de plastique d'une taille de particules d'environ 2 mm. Ils ont été utilisés pour remplacer partiellement le sable dans les mélanges de béton à des niveaux de pourcentage variables de 0, 10, 30 et 50 % en poids. Les caractéristiques des matériaux ont été définies, et des échantillons de cubes de béton de 100 mm ont été coulés et testés à l'état frais et durcis. Les résultats des tests ont indiqué une diminution de la maniabilité, de la densité et de la résistance à la compression à mesure que les quantités de déchets de granulés de plastique recyclés augmentaient.

Saikia et *al.* [8] ont évalué les effets de la taille et de la forme des granulats de polyéthylène téréphtalate recyclés sur les propriétés fraîches et durcies, y compris la résistance à l'abrasion du béton. 5%, 10% et 15% en volume d'agrégats naturels

dans les mélanges de béton ont été remplacés par un volume égal pour les trois types d'agrégats de polyéthylène téréphtalate de forme et de tailles différentes. Leurs résultats indiquaient que l'affaissement du béton frais augmente légèrement avec l'incorporation d'agrégats de polyéthylène téréphtalate en forme de granulés. Les granulats plastiques plus floconneux réduisent fortement l'affaissement du béton frais et celui-ci diminue encore si la teneur et la taille de ce type de granulats de polyéthylène téréphtalate augmentent. La résistance à la compression, la résistance à la traction, le module d'élasticité et la résistance à la flexion du béton se détériorent en raison de l'incorporation d'agrégats de polyéthylène téréphtalate et la détérioration de ces propriétés s'intensifie avec l'augmentation de la teneur de ces agrégats. Les différences de taille, de forme et de texture des agrégats de polyéthylène téréphtalate modifient le rapport eau/ciment ainsi que l'affaissement des mélanges de béton frais, ce qui modifie en fin de compte le comportement mécanique. Ils ont indiqué que la résistance à l'abrasion du béton avec divers types et contenus d'agrégats de polyéthylène téréphtalate peut être liée à sa résistance à la compression. En effet, les auteurs ont mis en évidence la relation entre la résistance à la compression et la profondeur de l'usure pour les différents bétons qu'ils ont présentée sous forme de courbe. Ils ont alors conclu qu'il existe un certain niveau de résistance à la compression pour les bétons contenant des granulats de polyéthylène téréphtalate à partir duquel la résistance à l'abrasion se détériore.

Faraj et al. [9], ont étudié les caractéristiques mécaniques, de rupture et de durabilité du béton autoplaçant à haute résistance contenant des déchets de polypropylène recyclé avec et sans fumée de silice. Pour produire les bétons, des agrégats de taille moyenne ont été remplacés par les déchets plastiques à cinq pourcentages désignés de 0 %, 10 %, 20 %, 30 % et 40 % en volume dans les deux séries de bétons. Au total, 10 mélanges ont été produits et testés pour leurs propriétés mécaniques, de rupture et de durabilité. Leurs résultats ont montré que l'utilisation des déchets de polypropylène recyclé améliorerait considérablement les propriétés de fracture et de ductilité, alors qu'elle aggravait d'autres propriétés. Cependant, avec l'ajout de la fumée de silice, toutes les caractéristiques mécaniques et de durabilité ont été remarquablement améliorées.

Chunchu et al. [10], ont présenté une étude sur du béton auto plaçant dans lequel ils ont remplacé le sable par des déchets de polystyrène à haute résistance aux chocs et des matériaux cimentaires contenant des cendres volantes. Le béton produit a été conçu avec une teneur en liant optimisée de 497 kg/m³ en utilisant des cendres volantes (30% en poids de ciment) et un rapport eau/liant de 0,36 pour tous les mélanges. Les déchets de polystyrène à haute résistance aux chocs, ont remplacé le sable jusqu'à 40 % (en volume) à un intervalle régulier de 10 %. Le comportement de la résistance a été étudié en effectuant des tests de résistance à la traction et à la compression après une période de 7, 28 et 90 jours. Ils ont observé que l'incorporation des cendres volantes et les déchets plastiques a amélioré les performances des bétons produits, en termes de maniabilité. Ils ont conclu que l'incorporation des cendres volantes et des déchets plastiques jusqu'à 30 % dans le béton est une technique viable et écologique, avec un impact économique bénéfique sur l'industrie de la construction.

Sadromtazi et al. [11], ont évalué les effets combinés des déchets de polyéthylène téréphtalate et des matériaux pouzzolaniques sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et de durabilité du béton auto plaçant. Les taux de remplacement des agrégats fins par les déchets plastiques de même poids étaient de 5, 10 et 15 % en poids. En outre, le taux de remplacement du ciment avec le même poids de fumée de silice et de cendres volantes était de 10 et 30 % en poids, respectivement. Les propriétés mécaniques, rhéologiques et de durabilité étaient estimées. Ils ont conclu les déchets de polyéthylène téréphtalate diminuaient la fragilité des bétons produit et la charge statique des bâtiments grâce à son faible poids unitaire.

Azdapour et al. [12], ont présenté une étude sur les effets de l'ajout de déchets polyéthylène téréphtalate sur les propriétés techniques du béton. À cette fin, une conception de béton mélangé a été adoptée, dans laquelle des quantités prédéfinies, basées sur le poids des agrégats fins du béton, ont été remplacées par des déchets équivalents. Les résultats des essais en laboratoire ont montré que les déchets de plastique ajoutés ont modifié les propriétés physiques et de résistance des bétons nouvellement produits. Les résultats ont également indiqué que les substitutions supérieures à 10 % entraînent une baisse de tous les paramètres liés à la résistance des bétons.

Abbas et al. [13], ont étudié l'influence de l'utilisation des déchets de polyéthylène téréphtalate en remplacement partiel du sable naturel afin de déterminer les propriétés mécaniques et physiques du béton produit. Les résultats des tests ont montré que la présence de déchets plastiques modifie les propriétés physiques et mécaniques des bétons produits. Les propriétés physiques avaient progressivement diminué au fur et à mesure de l'augmentation des ratios de déchets plastiques, tandis qu'une augmentation du taux d'absorption a été observée.

Ghernouti et al. [14], ont présenté les propriétés fraîches et durcies d'un béton autoplaçant contenant des fibres de déchets de sacs plastiques. Douze mélanges de bétons ont été préparés avec des fibres de déchets de sacs plastiques en faisant varier la longueur des fibres (2, 4 et 6 cm) avec différents niveaux d'incorporation (1, 3, 5 et 7 kg/m³) et deux autres mélanges, l'un

avec 1 kg/m^3 de fibres de polypropylène et l'autre sans fibre comme référence. Leurs résultats des tests avaient montré que les mélanges à base de déchets de sacs de plastiques d'une longueur de 2 cm , ont satisfait aux critères d'auto compactibilité quelle que soit la teneur en fibres. Les auteurs ont, également, observé, que l'utilisation des déchets de sacs de plastiques avait un effet important sur la valeur de la résistance à la traction à 28 jours. L'amélioration variait entre 4% et 74%, en fonction de la quantité de fibres et n'était pas affectée par la longueur des fibres de déchets sacs de plastiques.

Benimame *et al.* [15] ont ajouté trois types de déchets plastiques dans le béton. Les propriétés à l'état frais et à l'état durci des différents bétons réalisés ont été analysées et comparés par rapport à leurs témoins respectifs. D'après les résultats expérimentaux, ils ont conclu que le renforcement de la matrice cimentaire avec des fibres plastiques ondulées montrent une nette amélioration de la résistance à la traction du béton ainsi qu'une diminution remarquable de sa capacité d'absorption de l'eau lorsque des grains plastiques sont utilisés.

Ali *et al.* [16], ont étudié le béton léger à isolation thermique pour les applications structurelles. L'utilisation des billes de polyéthylène comme remplacement total ou partiel des agrégats grossiers a permis la fabrication de bétons légers à isolation thermique très élevée. Ce qui indique leur utilité pour la conservation de l'énergie. De même, Shah *et al.* [17], ont montré l'efficacité des déchets plastiques tels que le polyéthylène téréphtalate et le chlorure de polyvinyle sur les performances de la conductivité des bétons produits.

Alperen *et al.* [18], ont présenté une recherche sur les effets des déchets plastiques électroniques sur les propriétés mécaniques du béton polymère. Ces déchets ont été utilisés comme une partie des matériaux en substitution du sable de quartz et du gravier pour obtenir du béton polymère dans leur étude. Le matériau de résine polyester insaturé a été choisi comme matériau polymère et utilisé comme liant dans la production de béton polymère. Les valeurs de résistance à la traction, de flexion et de rupture axiale des échantillons d'essai ont été évaluées à 28 jours. Ils ont observé que l'augmentation du rapport de la résine polyester insaturé, augmente la résistance à la compression alors qu'elle ne provoque pas une augmentation ou une diminution significative de la résistance à la traction par flexion et à la rupture. En revanche, ils ont remarqué que les valeurs des résistances à la traction, à la compression et à la traction par flexion diminuent à mesure que le rapport du déchet plastique augmente. Par ailleurs, ils ont démontré que les déchets plastiques électroniques augmentent la ductilité du béton polymère.

Nursyamsi *et al.* [19], ont utilisé des déchets plastiques de polyéthylène téréphtalate comme agrégats grossiers dans le béton. Ils ont calculés les modules de finesse des déchets plastiques de polyéthylène téréphtalate, après leurs passages à travers une série normalisées de tamis. Ils ont remarqué que les essais avec différents modules de finesse produisent divers résultats. Ils ont conclu que la résistance maximale à la compression est atteinte sur l'échantillon en utilisant le module de finesse maximal des granulats plastiques de polyéthylène téréphtalate. Leur conclusion finale a montré que la granulométrie grossière des déchets de plastique de polyéthylène téréphtalate, peut avoir une incidence sur la résistance à la compression du béton léger.

Gesoglu *et al.* [20], ont étudié les propriétés mécaniques et de rupture des bétons autoplaçants contenant des déchets plastiques en quantités variables utilisées comme matériau de remplacement du ciment. Ils ont remplacé une quantité partielle de ciment par de la poudre de déchets plastiques à différents pourcentages en poids afin de concevoir six mélanges avec des caractéristiques bien définies. Ils ont testé les caractéristiques mécaniques des bétons obtenus. Ils ont conclu que les propriétés mécaniques des bétons produits diminuent et deviennent moins cassants.

Pereira *et al.* [21], ont résolu les problèmes structurels tels que les fissures provoquées par la rétraction et le séchage plastique ou hydraulique, la modification des propriétés du béton par l'ajout de fibres polymères. Pour cela, ils ont évalué l'utilisation de fibres de bouteilles en polyéthylène téréphtalate dans le processus de fabrication du béton, en cherchant à optimiser les propriétés mécaniques de compression et de traction. Leurs résultats ont montré que le pourcentage de fibres ajoutées au béton a une influence directe sur la résistance à la compression du béton et que la longueur des fibres a une influence directe sur la résistance à la traction du béton.

Alqahtani *et al.* [22], ont proposé un nouveau béton léger à base de granulats plastiques manufacturés. Les agrégats légers volcaniques ont été remplacés par des agrégats de plastiques transformés à raison de 25, 50, 75 et 100% de taux de substitution. L'influence du niveau de remplacement sur les propriétés fraîches, durcies du béton a été étudiée. L'affaissement, la résistance à la compression, la résistance à la flexion, la résistance à la traction de rupture et le module d'élasticité ont diminué avec l'augmentation du niveau de remplacement. Ils ont remarqué que la ductilité du béton a augmenté avec l'augmentation du niveau de remplacement. En conclusion, ils ont soutenu que leurs résultats avaient démontré que le mélange

de béton contenant des agrégats de plastiques transformés à un niveau de remplacement de 25%, répond aux exigences des normes ASTM C330/C330 M [23] ; ce qui permet de suggérer son potentiel d'utilisation comme mélange de béton structurel léger durable.

Zaleski *et al.* [24] ont utilisé trois différents types de déchets plastiques remplaçant jusqu'à 50 % des agrégats naturels dans la conception des mélanges de béton. Ils ont observé que la conductivité thermique est jusqu'à sept fois plus faible, par rapport au matériau de référence, témoignant d'une amélioration considérable des capacités d'isolation thermique de ce type de béton. Tandis que, Khalid *et al.* [25], ont utilisé des fibres provenant de bouteilles en forme d'anneau avec des largeurs de 5 et 10 mm. Des bouteilles en polyéthylène téréphtalate de forme irrégulière avec une taille de 10-15 mm, des fils usagés mesurant 55 mm de longueur et des macro-fibres synthétiques fabriquées ont également été utilisées dans l'analyse comparative. Ils ont indiqué qu'une augmentation du volume de fibres améliore la résistance à la traction du béton. Ils ont déduit qu'en comparaison avec les fibres de polyéthylène téréphtalate et de fil de rebut de forme irrégulière, les fibres en forme d'anneau se sont mieux comportées. Quant à, Alani *et al.* [26], ils ont présenté une étude sur l'effet de l'incorporation de cendres combustibles d'huile de palme ultrafines et des déchets de polyéthylène téréphtalate sur les propriétés techniques du béton à ultra-haute performance. Leurs résultats ont indiqué que les déchets de polyéthylène téréphtalate renforcée avec des cendres combustibles d'huile de palme ultrafines peuvent produire un béton avec des améliorations prometteuses des propriétés d'ingénierie et de durabilité. Alors que, Vijayag *et al.* [27], ont étudié la résistance au chlorure du béton autoplaçant renforcé par des fibres plastiques. A partir des résultats d'essai, il a été observé que la résistance à la compression maximale et la résistance à la traction à la rupture ont été atteintes pour 1% de fibres plastiques. Le pourcentage de perte de poids, la perte de résistance à la compression et la pénétration du chlorure ont diminué à mesure que le pourcentage de fibres augmentait.

En parallèle des auteurs ont fait un état des lieux concernant les bétons contenant des déchets plastiques. Ainsi, Bahij *et al.* [28] ont présenté un aperçu des travaux de recherche publiés, qui étudiaient l'utilisation de différents types de déchets plastiques dans les mélanges de béton. Tandis que, Li *et al.* [29] ont examiné de manière comparative les fonctions et les impacts des déchets de plastique et de caoutchouc utilisés comme agrégats sur les propriétés du béton. Ils ont confirmé que l'incorporation des déchets plastiques dans les bétons améliore sa ductilité, diminue sa conductivité thermique, acoustique et électrique. Sharma *et al.* [30] ont passé en revue des recherches publiées concernant l'utilisation des déchets plastiques dans le béton. Ils ont présenté les effets de l'ajout de déchets plastiques sur les propriétés fraîches, mécaniques et thermiques du béton. Alors que, Faraj *et al.* [31] ont examiné les travaux qui ont étudié la réutilisation du plastique recyclé dans les mélanges de béton auto plaçant. Ils ont exposé les propriétés de ce type de béton formulés par les déchets plastiques recyclés. Quant à, Hazha *et al.* [32], ils ont proposé une analyse des avantages et des inconvénients d'incorporer les déchets plastique dans le béton. Ils ont suggéré que la faible capacité d'adhérence et la teneur en air plus élevée due à l'inclusion des déchets plastiques dans le béton sont les facteurs qui réduisent les propriétés mécaniques des bétons formulés par des déchets plastiques.

Après cet état des connaissances non exhaustif, il s'avère évident que le remplacement partiel des agrégats naturels par des déchets plastiques dans la composition du béton est une proposition pertinente et viable. Mais si les propriétés de ces nouveaux bétons sont bien définies, il n'en demeure pas moins que leurs modélisations numériques font cruellement défaut. En effet, la conception de n'importe quel élément de structure dépend d'équations de calcul découlant des propriétés mécaniques. En conséquence, les propriétés mécaniques doivent impérativement être modélisées pour pouvoir être utilisées dans la conception structurelle et l'analyse des éléments en béton fabriqués à partir de déchets de plastiques.

Pour parer à cette lacune, Azad [33] a recueilli et analysé les données disponibles sur les propriétés mécaniques du béton contenant des déchets de polyéthylène téréphtalate. Il a ensuite élaboré des équations pour calculer le module d'élasticité, la résistance à la fissuration et à la traction en flexion. Après avoir fait une synthèse approfondie, il a conclu que les résultats de l'analyse indiquent qu'en général, il existe une bonne corrélation entre les trois propriétés et la résistance à la compression du béton contenant des déchets polyéthylène téréphtalate. Puis il a montré que les équations pouvaient s'appliquer au béton recyclé contenant différents types de déchets plastiques autres que les déchets de polyéthylène téréphtalate.

Dans cet ordre d'idée, et vu le déficit constaté dans ce domaine, l'objectif de cette étude est de modéliser les propriétés mécaniques de bétons formulés par des déchets de polyéthylène haute densité. Le choix du type de déchets a été motivé par la rareté des études concernant les déchets de polyéthylène haute densité. Pourtant, et d'après Siddique *et al.* [34], les déchets de polyéthylène haute densité, représentent 17,3 % de l'ensemble des déchets plastiques mondiaux. Alors, si l'objectif de tous ces travaux, est de valoriser les déchets plastiques dans la fabrication d'un béton qui serait écologiquement pertinent, il serait temps d'explorer tous les types de déchets plastiques. En effet, Kamaruddin *et al.* [35], ont souligné que la production

de déchets plastique a été estimée à 335 millions de tonnes dans le monde 2016. Et, d'après les données statistiques mentionnées par Mrowiec [36], 31,1 % de ces déchets ont été recyclés, 41,6 % ont été utilisés pour la valorisation énergétique et 27,3 % ont été mis en décharge. En outre, Lebreton et al, [37], estiment que la production de plastique doublera d'ici 2035 et quadruplera d'ici 2050.

En conséquence, cette étude a une double visée, d'abord étudier le comportement à l'état frais (affaissement et densité) et à l'état durci (résistance à la compression et à la traction à 28 jours) d'un béton formulé par des déchets de polyéthylène haute densité, ensuite modéliser les propriétés ainsi déterminées. Et pour parfaire cette modélisation, les mesures référencées, du module d'élasticité d'un béton formulé par des déchets de polyéthylène haute densité [2], ont été recueillies et analysées également.

L'étude s'est déroulée donc en deux phases. La première phase concerne la détermination des propriétés à l'état frais et à l'état durci d'un béton contenant des déchets de polyéthylène haute densité. Pour cela, des formulations de bétons à base de déchets de polyéthylène haute densité, en remplacement partiel des granulats naturels, ont été réalisées. Les déchets sont simplement déchiquetés, de formes planes, irrégulière, et angulaires. Le taux de substitution des déchets varie entre 0% et 50% avec un pas de 10%. Dans tous les mélanges des bétons, les composants, eau, ciment et graviers 8/25, restent constants tandis que les composants, sables 0/4, graviers 4/8 et les déchets de polyéthylène haute densité, varient en fonction du taux de substitution. Le comportement des bétons ainsi produits ont été analysés.

La deuxième phase consiste en l'analyse des propriétés des bétons produits, par la méthode des régressions linéaires. Pour compléter l'analyse des propriétés mécaniques des bétons formulés par les déchets de polyéthylène haute densité, les valeurs du module élastique tirées des résultats de Belmokaddem et al. [31], ont été considérées.

La validité de la méthode a été obtenue en analysant deux cent dix-sept valeurs d'essais référencés.

A l'issue de l'analyse, il a été démontré que les modèles linéaires proposés sont parfaitement pertinents. En outre, Il a été montré, que ces conclusions peuvent s'appliquer à des bétons contenant d'autres types de déchets plastiques.

2 Détermination des propriétés à l'état frais et à l'état durci des bétons contenant des déchets de polyéthylène haute densité

2.1 Programme expérimental

2.1.1 Caractéristiques des matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans la présente étude pour produire un mélange de béton sont l'eau de gâchage, le ciment, le sable, les graviers et les déchets de déchets de polyéthylène haute densité en remplacement partiel des granulats (sable + gravier).

Tableau 1 – Caractéristiques du ciment CPJ-CEM II/A 42.5

| Caractéristiques Chimiques (%) | Caractéristiques Physiques (mm) | Constituants Principaux (%) | Constituants secondaires (%) | Masse volumique absolue (g/cm^3) |
|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| Sulfates $SO_3 \leq 2.0$ | Début de prise > 60 | Clinker Portland 80 à 94 | Sulfate de calcium 0 à 5 | 3.1 |
| Chlorures $Cl \leq 0.08$ | Stabilité à chaud < 7 | Calcaire pure 6 à 20 | | |

Le ciment utilisé est un ciment Portland composé CPJ-CEM II/A 42.5. Il provient de la cimenterie LAFARGE à Oggaz dans la Wilaya (Province) de Mascara au nord-ouest de l'Algérie. Il répond aux exigences de la norme algérienne NA 442-2000 [38]. Ses caractéristiques techniques sont présentées sur le tableau 1. Sa résistance mécanique à la compression mesurée sur éprouvettes de mortier normal à 28 jours conformément à la norme algérienne NA 234 [38] est comprise entre 42.5 et 62.5 MPa.

Le sable utilisé est un sable grossier de mer, dont le module de finesse est de 3.12, l'équivalent de sable est de 76.3 %, la masse volumique réelle est de 2.65 g/cm³, et le coefficient d'absorption est de 3.5 %.

Les graviers utilisés sont en provenance de carrière. Ils sont de deux classes granulométriques, la classe 4/8 et la classe 8/25. Leur masse volumique réelle est de 2.65 g/cm³. Leur propreté superficielle est de 2.62. Leur coefficient d'absorption est de 2 %. Leur coefficient Los Angeles est de 23.85% et leur coefficient Micro Deval est de 20.9%.

Les deux granulats naturels ont été sélectionnés et caractérisés selon la norme AFNOR 12620 [39]. Leur distribution granulométrique est représentée sur la figure 1.

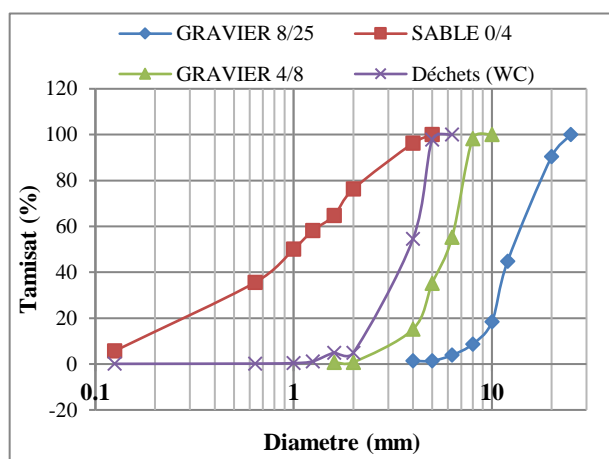


Fig. 1 – Courbes granulométriques des granulats



Fig. 2 - Les déchets de polyéthylène à haute densité

Les déchets de plastiques utilisés sont en polyéthylène à haute densité. Les déchets ont été traités mécaniquement. A l'usine, les déchets ont été simplement broyés et déchetés sous forme de paillettes. Leurs formes planes, irrégulière et angulaires sont illustrées sur la Figure 2. Leurs dimensions sont inférieures à 6 mm comme l'indique leur distribution granulométrique sur la figure 1. Ils proviennent de l'usine JOKTAL, située à Oued Tlelat dans la wilaya (province) d'Oran, au nord-ouest de l'Algérie. Ces déchets sont désignés par le terme (WC). La densité de ces déchets est égale à 0.93.

2.1.2 Caractérisation des déchets de polyéthylène à haute densité par FTIR

La caractérisation des déchets de polyéthylène à haute densité (WC), a été effectuée au niveau du laboratoire de chimie des polymères, de l'université d'Oran. Ainsi, l'analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR= Fourier Transform Infra Red), a permis la définition des fonctions des déchets polyéthylène à haute densité. Les spectres infrarouges de ces déchets ont été tirés sur un spectrophotomètre Nicolet OMNIC FTIR utilisant des pastilles en KBr, dans la gamme 400- 4000 cm⁻¹. Le spectre infra rouge du déchet polyéthylène à haute densité (WC) a permis d'observer qu'ils possèdent les bandes de 2830, 2867, 2916 et 2949 cm⁻¹, caractéristiques des vibrations C-H, et des vibrations du carbonyle (C=O) vers 1730 cm⁻¹. Le tableau 2 résume les pics infra rouges caractéristiques des granulats (WC). Le spectre infrarouge du déchet polyéthylène à haute densité (WC) a permis d'observer qu'il contient la fonction d'ester, de l'alcool et du C-H aromatique ainsi que les fonctions d'acides et de l'aldéhyde.

2.2 Programme d'essais

Le programme des essais a été organisé pour étudier les propriétés du béton à l'état frais (l'affaissement et la densité) et à l'état durci (résistance à la traction et à la compression à 28 jours) formulés par des déchets de polyéthylène à haute densité, en remplacement du sable 0/4 et du gravier 4/8. Les caractéristiques du béton de référence avec 0 % de déchets polyéthylène à haute densité ont également été mesurées. À cette fin, un programme d'essais a été réalisé en laboratoire. Pour les échantillons de béton, six mélanges ont été réalisés, dans lesquels les agrégats naturels ont été remplacés par des déchets de polyéthylène à haute densité, de 0, 10, 20, 30, 40 et 50 %. En conséquence, un total dix-huit cubes de béton de 150 × 150 × 150 mm³ ont été coulés pour des essais de résistance à la compression, et dix-huit cylindres de 160 × 320 mm² ont été coulés pour des expériences de résistance à la traction par fendage. Les bétons produits sont désignés par le symbole CC et le

nombre à côté des symboles mentionnés est le volume de déchets de polyéthylène à haute densité. Par exemple, CC20 est un échantillon de béton avec un volume de polyéthylène à haute densité, de 20%.

Tableau 2 - Les pics FTIR caractéristiques attribués aux déchets de polyéthylène à haute densité

| Liaison | Nombre d'ondes (cm ⁻¹) | Vibration | Intensité | Groupement |
|---------|------------------------------------|------------|------------|---------------------------------------|
| -C-H | 2867 | élongation | Faible | C-H- (aliphatique) |
| -C-H | 2916 et 2949 | élongation | Forte | -CH ₂ - (alcane) |
| O-H | 3307 | élongation | Très large | Acide |
| C=O | 1730 | élongation | Forte | Aldéhyde aliphatique |
| O-H | 1303-1454 | / | Moyenne | Liaison O-H alcool |
| -C-H | 681 | / | Faible | C-H aromatique monosubstitué, benzène |
| C-O | 1166-1046 | / | Faible | C-O-C ester |

2.3 Formulation des bétons

La préparation des matériaux consistait à s'assurer que les différents composants sont ajoutés avec les proportions voulues. La phase de malaxage a été nécessaire pour que les constituants soient mélangés correctement, afin de produire un béton frais avec des proportions uniformes, permettant d'enrober toute la surface des granulats utilisés dans les bétons. Afin d'étudier les comportements à l'état frais et durci, plusieurs essais ont été réalisés. L'affaissement et la densité ont été déterminés immédiatement après la préparation des mélanges. Ils ont ensuite été coulés dans des moules prédéfinis et leur teneur en air a été réduite à l'aide d'un vibreur. Les spécimens ont été conservés dans des moules à la température ambiante pendant environ 24 heures, avant d'être démoulés, puis transférés dans une chambre humide afin de les faire mûrir pendant 28 jours. Les éprouvettes cubiques (150x150x150) mm³, ont été préparées pour la détermination de la résistance à la compression. Les éprouvettes cylindriques de (160mm×320mm) ont été préparées pour la détermination de la résistance à la traction. À l'état frais, l'affaissement a été réalisé selon la norme (NF EN 12350-2) [40]. La mesure de la consistance a été réalisée à l'aide du cône d'Abrams. Les essais de densité ont été réalisés selon la norme AFNOR NF EN 12350-6 [41]. À l'état durci, les essais de compression ont été réalisés après 28 jours de murissement, selon la norme NF EN 12390-3 [42]. Les essais de traction par fendage ont été réalisés après 28 jours de murissement selon la norme NF EN 12390-6 [43]. La presse utilisée avait une capacité de 1500 KN, avec un système de surfacage en néoprène. Pour chaque essai, trois mesures ont été réalisées. A chaque étape, la moyenne des trois lectures a été considérée et l'écart type déterminé. Le béton de référence, formulé uniquement par des granulats naturels et de 0% de déchets polyéthylène à haute densité, est noté (CC0). Le mélange du béton de référence a été obtenu en utilisant le ciment Portland composé CPJ-CEM II/A 42.5, les granulats naturels dont les caractéristiques ont été définies précédemment, et l'eau de gâchage. La formulation adéquate du béton de référence a été déterminée par la méthode « Dreux-Gorisse ». Pour une résistance à la compression désirée à 28 jours de 25 MPa, une dimension maximale des granulats D = 25 mm, le rapport pondéral (Ciment/ Eau) a été estimé à 1.82 qui correspond à un rapport (Eau /Ciment) de 0.55. Après plusieurs essais de mélanges, une formulation du béton qui satisfait les caractéristiques désirées a été retenue. Cette composition est rapportée sur le tableau 3 où il est indiqué respectivement, les pourcentages en volumes absolus et le poids des matériaux composants un mètre cube de béton référence.

Tableau 3 - Distribution des matériaux composants 1(m³) du béton de référence (CC0)

| Matériaux | Volume (%) | Poids (kg) |
|-------------|------------|------------|
| Eau | 21.1% | 211 |
| Ciment | 10.1% | 325 |
| Sable0/4 | 23.3% | 617 |
| Gravier4/8 | 24.6% | 652 |
| Gravier8/25 | 20.5% | 545 |

Les bétons (CC) sont des bétons dont une fraction volumique des agrégats naturels a été remplacée par les déchets de polyéthylène à haute densité. La substitution a été réalisée en respectant les classes granulométriques des différents agrégats. Le taux de substitution des déchets de polyéthylène à haute densité, est de 10%, 20%, 30%, 40%, et 50%. Une moitié des granulats de déchets a servi à remplacer le sable 0/4 et l'autre moitié a servi à remplacer le gravier 4/8.

La composition d'un mètre cube de bétons (CC), contenant les déchets de polyéthylène à haute densité est rapportée sur le tableau 4, où les formulations CC0, CC10, CC20, CC30, CC40 et CC50 représentent les bétons (CC) dont les taux de substitution sont de 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, et 50% de déchets de polyéthylène à haute densité.

Tableau 4 – Poids des matériaux composants 1 (m³) des bétons contenant les déchets de polyéthylène à haute densité

| Matériaux | Eau (kg) | Ciment (kg) | Sable 0/4 (kg) | Gravier 4/8 (kg) | Gravier 8/25 (kg) | Déchets de polyéthylène à haute densité (kg) |
|-----------|----------|-------------|----------------|------------------|-------------------|--|
| CC0 | 221 | 325 | 617 | 652 | 652 | 0 |
| CC10 | 221 | 325 | 586 | 617 | 652 | 22 |
| CC20 | 221 | 325 | 556 | 587 | 545 | 45 |
| CC30 | 221 | 325 | 525 | 555 | 545 | 67 |
| CC40 | 221 | 325 | 494 | 522 | 545 | 89 |
| CC50 | 221 | 325 | 462 | 490 | 545 | 111 |

3 Résultats des essais

3.1 Propriétés des bétons frais

Les paramètres de formulation fixés au départ ont permis de finaliser la composition définitive des bétons. La phase de malaxage a été nécessaire pour que les constituants soient mélangés correctement afin de produire un béton frais avec des proportions uniformes permettant d'enrober toute la surface des granulats utilisés dans les bétons.

Afin d'étudier le comportement à l'état frais, plusieurs essais ont été réalisés. L'affaissement et la densité ont été déterminés immédiatement après la préparation des mélanges. Les essais d'affaissement ont été réalisés selon la norme AFNOR NF EN 12350-2 [40]. La mesure de la consistance a été réalisée à l'aide du cône d'Abrams. Les essais de densité ont été réalisés selon la norme AFNOR NF EN 12350-6 [41]. Pour chaque essai, trois mesures ont été prises et on détermine la moyenne et l'écart type. (Voir tableau 5).

De visu, les mélanges des bétons contenant des déchets de polyéthylène à haute densité, deviennent de plus en plus ferme à fur et à mesure que la substitution des granulats naturels par les déchets augmente. Ces observations ont été confirmées par les tests d'affaissement présentés sur le tableau 5. L'affaissement des bétons contenant des déchets de polyéthylène à haute densité, décroît avec l'augmentation du ratio, des déchets. En effet la valeur de l'affaissement du béton de référence est de 9 cm, celle des bétons contenant des déchets de polyéthylène à haute densité décroît jusqu'à aboutir à une valeur minimale de 5 cm au fur et à mesure que le taux de substitution des déchets augmente. La courbe des valeurs des affaissements est décroissante (Figure 5). Cette allure de la courbe s'explique par l'augmentation du pourcentage de substitution des déchets de polyéthylène à haute densité, qui ont la particularité d'une surface plane anguleuse. Cette géométrie des déchets empêche le tassement de la pâte. Ce qui diminue la maniabilité mais augmente l'aptitude au compactage. Cette observation est confirmée par Saikia et al. [8] qui ont constaté une diminution de demande en eau lorsqu'il ya substitution par des granulats de déchets de forme angulaire.

La densité du béton frais baisse au fur et à mesure que les déchets de polyéthylène à haute densité sont substitués aux agrégats naturels. La densité des bétons frais est donc inversement proportionnelle aux taux de substitutions des déchets plastiques. Cette tendance est clairement perceptible sur la figure 6 où la courbe des densités des bétons contenant des déchets de polyéthylène à haute densité est décroissante. Autrement dit, la densité des bétons contenant des déchets est inférieure à celle du béton de référence. Ainsi, la densité du béton de référence est de 2.32 tandis qu'à 50% de substitution, la densité du béton est de 2.05. Donc, une diminution de 12%. Ces résultats s'expliquent par le fait que la densité des déchets de polyéthylène à haute densité soit plus faible que celle des agrégats naturels. Cette réduction de la densité a aussi été

constatée par Alperen et al. [18] et Nursyamsi et al. [19] qui ont fait la corrélation entre la densité des différents agrégats et la densité des bétons résultants.

Tableau 5 – Caractéristiques des bétons (CC) à l'état frais

| Bétons | Affaissement (cm) | Ecart Type affaissement | Densité | Ecart Type densité |
|--------|-------------------|-------------------------|---------|--------------------|
| CC0 | 9 | 0.213 | 2.320 | 0.177 |
| CC10 | 8 | 0.197 | 2.200 | 0.168 |
| CC20 | 7.5 | 0.224 | 2.080 | 0.174 |
| CC30 | 7 | 0.198 | 2.030 | 0.181 |
| CC40 | 6 | 0.193 | 1.950 | 0.157 |
| CC50 | 5 | 0.217 | 1.880 | 0.163 |

3.2 Propriétés des bétons durcis

Les éprouvettes cubiques (150 mm x150 mmx150 mm) ont été préparées pour la détermination de la résistance à la compression. Les éprouvettes cylindriques de (160 mmx320 mm) ont été préparées pour la détermination de la résistance à la traction. Pour chaque formulation, six éprouvettes ont été confectionnées. À l'état durci, les essais de compression ont été réalisés après 28 jours de cure, selon la norme AFNOR NF EN 12390-3 [42]. Les essais de traction par fendage ont été réalisés après 28 jours de cure selon la norme AFNOR NF EN 12390-6 [43]. La presse utilisée a une capacité de 1500 kN, avec un système de surfacage en néoprène. Pour chaque essai, trois mesures ont été réalisées. A chaque étape, la moyenne des trois lectures a été considérée et l'écart type déterminé comme c'est indiqué sur le tableau 6.

Les résultats portés sur le tableau 6, montrent que, les résistances à la compression et à la traction diminuent à mesure que la teneur en déchets de polyéthylène à haute densité, augmente. Pour des taux de substitution de 10%, 20%, 30%, 40% et 50%, les pourcentages des chutes de la résistance à la compression des bétons (CC) sont respectivement de 11.1%, 14.8%, 25.9%, 33.3% et 40.7% par rapport à la résistance de compression du béton de référence (CC0).

Les pourcentages des chutes de la résistance à la traction des bétons (CC) sont respectivement de 4.8%, 12.8%, 20.2%, 25.9% et 31.7% par rapport à la résistance de traction du béton de référence (CC0). Cette tendance décroissante des résistances à la compression et la traction est perceptible sur les figures 7 et 8. Cette perte de performance a été également observée par Saikia et al. [8], qui ont conclu à une diminution de la résistance des bétons avec incorporation de déchets plastiques par rapport à un béton de référence.

Tableau 6 – Caractéristiques des bétons contenant des déchets de polyéthylène à haute densité à l'état durci

| Bétons | Résistance à la compression (MPa) | Ecart Type compression | Résistance à la traction (MPa) | Ecart Type traction |
|--------|-----------------------------------|------------------------|--------------------------------|---------------------|
| CC0 | 27 | 0.165 | 2.27 | 0.162 |
| CC10 | 24 | 0.154 | 2.16 | 0.156 |
| CC20 | 23 | 0.143 | 1.98 | 0.148 |
| CC30 | 20 | 0.145 | 1.81 | 0.147 |
| CC40 | 18 | 0.156 | 1.61 | 0.154 |
| CC50 | 16 | 0.134 | 1.55 | 0.157 |

Cette perte de performance peut être analysée par l'étude de la microstructure des bétons contenant des déchets de polyéthylène à haute densité, observée par le microscope électronique à balayage (MEB). Les photos de la microstructure ont été prises par le microscope électronique à balayage QUANTA 250, au Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyses Physico- Chimiques (CRAPC) de Bou Ismail. Alger, Algérie.

Pour les bétons contenant des déchets de polyéthylène à haute densité, la figure 3, illustre clairement un déchet de polyéthylène à haute densité, entouré par la matrice cimentaire. La morphologie irrégulière du déchet plastique a permis d’obtenir une assez bonne adhérence entre ce dernier et le béton. Mais l’existence de micro fissures à proximité des déchets permet d’expliquer la chute des résistances de ces bétons. La baisse des résistances des bétons contenant des déchets de polyéthylène à haute densité, est expliquée par la formation des pores visualisées par figure 4. Les déchets plastiques en général reprennent difficilement la résistance par rapport aux granulats naturels et tendent à formuler des bétons poreux et légers. Belmokaddem *et al.* [2] et Alqahtani *et al* [22], ont rapporté que la réduction des résistances des bétons formulés par des déchets plastiques est due à la présence de ces pores à la mauvaise adhérence entre les déchets de plastique et la matrice de ciment.

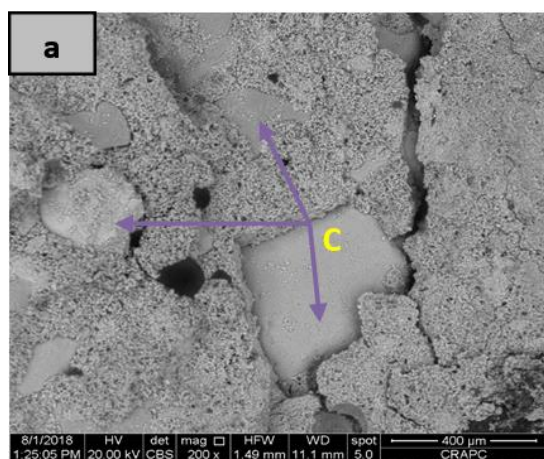


Fig. 3 - Les déchets dans la matrice cimentaire du béton (CC)

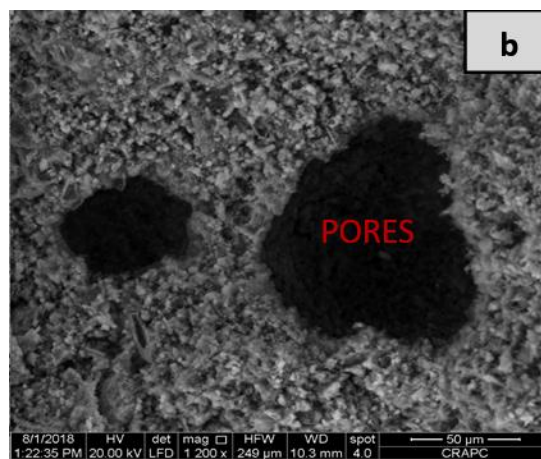


Fig. 4 - Les pores dans la matrice cimentaire du béton (CC)

4 Modélisation linéaire des propriétés mécaniques des bétons contenant les déchets de polyéthylène à haute densité, par la méthode des régressions linéaires

Les propriétés des bétons à l’état frais et à l’état durci, produits au cours de cette recherche, sont analysées par la méthode des régressions linéaires. Pour compléter l’analyse des propriétés mécaniques des bétons formulés par les déchets de polyéthylène haute densité, les valeurs du module élastique tirées des résultats de Belmokaddem *et al.* [2], ont été considérée. La validité de la méthode a été obtenue en analysant deux cent dix-sept valeurs d’essais référenciés.

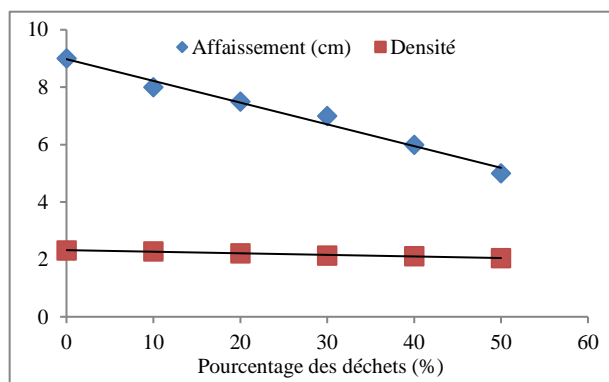


Fig. 5 – Variation des affaissements et des densités

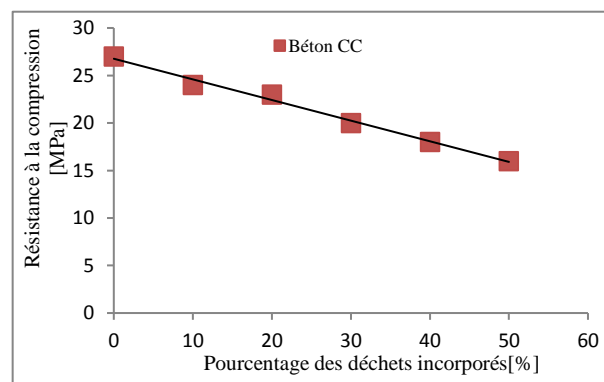


Fig. 6 – Variation des résistances de compression

Dans cette analyse, les propriétés des bétons sont considérées comme les variables dépendantes et le pourcentage des déchets de polyéthylène haute densité incorporés, sont considérés comme les variables explicatives. En effet, Azad [33] a montré dans son étude, que l’ouvrabilité, la densité, la résistance à la compression et la résistance à la traction dépendent du

taux de substitution des déchets de polyéthylène téréphtalate. Les propriétés des bétons produits, ont été considérées alors comme les variables dépendantes et les pourcentages de déchets polyéthylène téréphtalate incorporés, comme les variables indépendantes. Il a, en outre indiqué que la taille, la forme et la granulométrie des déchets de polyéthylène téréphtalate, ont plutôt une influence sur la maniabilité des bétons produits.

Les mesures des propriétés des bétons indiqués sur les tableaux 5 et 6, sont reproduites sur les figures 5 à 7, et analysées.

La droite de régression de l'affaissement pour les bétons (CC), (voir figure 5), est une droite d'équation :

$$Y(x) = -0.075x + 8.976 \quad (1)$$

L'équation (1) est l'équation d'une droite décroissante qui donne l'affaissement pour un pourcentage volumique (x) de déchets de polyéthylène à haute densité (WC). Dans ce cas, le béton devient de plus en plus ferme à mesure que le pourcentage de déchets incorporé augmente. L'affaissement est donc, inversement proportionnel, au pourcentage de déchets incorporé. L'affaissement diminue à mesure que le taux de substitution augmente. Le coefficient de détermination R^2 est égal à 0,982. Il est très élevé. Il tend vers le nombre 1. Le modèle linéaire est donc parfaitement pertinent.

La droite de régression de la densité pour les bétons (CC), (voir figure 5), est une droite d'équation :

$$D(x) = -0.005x + 2.322 \quad (2)$$

L'équation (2) est une droite décroissante qui donne la densité pour un pourcentage volumique (x) de déchets de polyéthylène à haute densité (WC). Dans ce cas, le béton devient moins dense à mesure que le pourcentage de déchets incorporé augmente. La densité est donc, inversement proportionnel, au pourcentage de déchets incorporé. La densité diminue à mesure que le taux de substitution augmente. Le coefficient de détermination R^2 est égal à 0,99. Il est très élevé. Il tend vers le nombre 1. Le modèle linéaire est donc parfaitement pertinent.

La droite de régression de la résistance à la compression à 28 jours, pour les bétons (CC), (voir figure 6), est une droite d'équation :

$$f_{c28}(x) = -0.217x + 26.76 \quad (3)$$

L'équation (3) est une droite décroissante qui donne la résistance de compression à 28 jours, pour un pourcentage volumique (x) de déchets de polyéthylène à haute densité (WC). Dans ce cas, le béton devient moins performant à mesure que le pourcentage de déchets incorporé augmente.

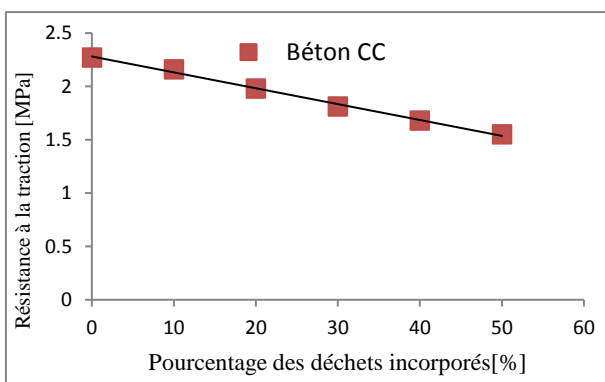


Fig. 7- Variation des résistances de traction

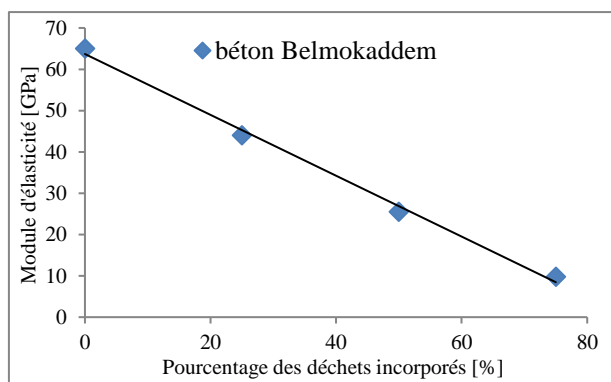


Fig. 8- Variation des modules d'élasticités

La résistance de compression à 28 jours, est donc, inversement proportionnel, au pourcentage de déchets incorporé. La résistance de compression à 28 jours, diminue à mesure que le taux de substitution augmente. Le coefficient de détermination R^2 est égal à 0,99. Il est très élevé. Il tend vers le nombre 1. Le modèle linéaire est donc parfaitement pertinent.

La droite de régression de la résistance de traction à 28 jours pour les bétons (CC), (voir figure 7), est une droite d'équation :

$$f_{t28}(x) = -0.014x + 2.28 \quad (4)$$

L'équation (4) est une droite décroissante qui donne la résistance de traction à 28 jours, pour un pourcentage volumique (x) de déchets de polyéthylène à haute densité (WC). Dans ce cas, le béton devient moins performant à mesure que le pourcentage de déchets incorporé augmente. La résistance de traction à 28 jours, est donc, inversement proportionnel, au pourcentage de déchets incorporé. La résistance de traction à 28 jours, diminue à mesure que le taux de substitution augmente. Le coefficient de détermination R^2 est égal à 0,995. Il est très élevé. Il tend vers le nombre 1. Le modèle linéaire est donc parfaitement pertinent.

Pour parfaire la modélisation linéaire des propriétés mécaniques, les valeurs documentées du module d'élasticité d'un béton contenant des déchets de polyéthylène à haute densité, ont été recueillis et traités à partir des travaux de Belmokadem et al. [2]. Il s'agit de bétons où 25, 50, et 75 % de granulats naturels ont été remplacés par le même pourcentage de déchets de polyéthylène à haute densité. Les déchets avaient une morphologie irrégulière, angulaires et de dimensions inférieures à 8 mm. Pour chaque formulation, des éprouvettes cubiques de dimensions (10x 10x 10) cm³ ont été coulés. Trois spécimens ont été préparés à partir de chaque mélange. Après durcissement, le test de vitesse d'impulsion ultrasonore (UPV) a été appliqué aux différents bétons durcis, conformément à la norme ASTM C597-16. Après avoir mesuré la vitesse de l'impulsion ultrasonore (UPV), le module d'élasticité (E) a été calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$E = \left(\frac{V^2 \rho}{g} \right) / 100 \quad (5)$$

Où, E est le module d'élasticité (GPa), V est la vitesse d'impulsion (km/s), ρ la densité réelle (kg/m³) et g est l'accélération gravitationnelle (9,81 m/s²). Les valeurs documentées du module d'élasticité sont reportées sur la figure 8.

La droite de régression de la résistance de traction à 28 jours pour les bétons (CC), (voir figure 8), est une droite d'équation :

La droite de régression du module d'élasticité pour les bétons (Belmokadem, (voir figure 9), est une droite d'équation :

$$E(x) = -0.736x + 63.69 \quad (6)$$

L'équation (6) est une droite décroissante qui donne le module d'élasticité, pour un pourcentage volumique (x) de déchets de polyéthylène à haute densité. Le module d'élasticité, est donc, inversement proportionnel, au pourcentage de déchets incorporé. Le module d'élasticité, diminue à mesure que le taux de substitution augmente. Le coefficient de détermination R^2 est égal à 0,995. Il est très élevé. Il tend vers le nombre 1. Le modèle linéaire est donc parfaitement pertinent.

4.1 Validation du modèle linéaire

Pour valider la pertinence de l'utilisation du modèle linéaire pour définir le comportement des bétons contenant des déchets en polyéthylène haute densité, des données d'essais référenciés ont été traités. Deux cents dix-sept mesures d'essais provenant de recherches publiés ont été recueillies et utilisées pour une analyse de régression linéaire. Quarante-quatre valeurs d'essais documentées ont été collectées et analysées pour l'affaissement. Trente-neuf valeurs d'essais documentées ont été collectées et analysées pour la densité. Cinquante-sept valeurs d'essais documentées ont été collectées et analysées pour la résistance à la compression à 28 jours. Trente-quatre valeurs d'essais documentées ont été collectées et analysées pour la résistance à la traction à 28 jours, et quarante-trois valeurs d'essais documentées ont été collectées et analysées pour le module d'élasticité.

Les caractéristiques des déchets de plastiques, correspondant aux essais référenciés, sont répertoriées sur le tableau 7. Les natures des déchets y sont mentionnés, à savoir : (HDPE) pour le polyéthylène haute densité, (LDPE) pour le polyéthylène basse densité, (PET) pour le polyéthylène téréphtalate, (PVC) pour le polychlorure de vinyle, (PP) pour le polypropylène, (WFSCC) pour les fibres de déchets de sacs plastiques, (N.I) non identifié, (MPW) pour les fibres de

polypropylène métallisés, et (HDPI) pour le polystyrène à haute résistance aux chocs. Les dimensions des déchets y sont également citées. Pour chaque essai, la forme des déchets y est indiqué, soit régulière (R), soit irrégulière (I). Le pourcentage de substitution des déchets incorporés et les références des essais analysés, y sont également listés.

Tableau 7 – Caractéristiques et es pourcentages des déchets utilisés pour les essais référenciés recueillis

| Essais | Nature des déchets plastiques | Dimensions Déchets (mm) | Forme des déchets | Pourcentage volumique de déchets plastiques incorporés (%) | | | | | | | |
|----------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------|--|-----|----|-----|----|------|----|--------|
| | | | | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | [Réf.] |
| Abdulrahman | LDPE | ≤ 5 mm | R | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | [1] |
| Belmokaddem(a) | HDPE | ≤ 8 mm | I | 0 | 25 | 50 | 75 | - | - | - | [2] |
| Belmokaddem(b) | PVC | ≤ 8 mm | I | 0 | 25 | 50 | 75 | - | - | - | [2] |
| Belmokaddem(c) | PP | ≤ 8 mm | I | 0 | 25 | 50 | 75 | - | - | - | [2] |
| Boucedra(a) | WFSCC | ≤ 4 mm | R | 0 | 25 | 50 | 75 | - | - | - | [3] |
| Boucedra(b) | WFSCC | ≤ 4 mm | R | 0 | 25 | 50 | 75 | - | - | - | [3] |
| Aldahdooh | LDPE | ≤ 5 mm | R | 0 | 15 | 30 | 45 | - | - | - | [4] |
| Sheelan(a) | LDPE | ≤ 4 mm | I | 0 | 2.5 | 5 | 7.5 | 10 | 12.5 | - | |
| Sheelan(b) | N.I | ≤ 1 mm | I | 0 | 2.5 | 5 | 7.5 | 10 | 12.5 | - | [44] |
| Bhogayata(a) | MPW | ≤ 5 mm | I | 0 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | - | - | [6] |
| Bhogayata(b) | MPW | ≤ 10 mm | I | 0 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | - | - | [6] |
| Bhogayata(c) | MPW | ≤ 20 mm | I | 0 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | - | - | [6] |
| Olofinnade(a) | HDPI | ≤ 2 mm | R | 0 | 10 | 30 | 50 | - | - | - | [7] |
| Olofinnade(b) | LDPE | ≤ 2 mm | R | 0 | 10 | 30 | 50 | - | - | - | [7] |
| Saikia(a) | PET | ≤ 6 mm | I | 0 | 5 | 10 | 15 | - | - | - | [8] |
| Saikia(b) | PET | ≤ 2 mm | I | 0 | 5 | 10 | 15 | - | - | - | [8] |
| Saikia(c) | PET | ≤ 4 mm | R | 0 | 5 | 10 | 15 | - | - | - | [8] |
| Faraj(a) | pp | ≤ 8 mm | R | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | - | - | [9] |
| Faraj(b) | pp | ≤ 8 mm | R | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | - | - | [9] |
| Chunchu | HDPI | ≤ 3 mm | R | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | - | - | [10] |
| Sadrmomtazi | PET | ≤ 5 mm | I | 0 | 5 | 10 | 15 | - | - | - | [11] |
| Azdapour | PET | ≤ 5 mm | I | 0 | 10 | 20 | 30 | - | - | - | [12] |
| Abbas | PET | ≤ 5 mm | I | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | - | - | [13] |

Les droites de régression et les coefficients de détermination pour chaque essai référencié, ont été déterminés. Ainsi, la figure 9 comporte les variations des affaissements des essais référenciés. Il s'agit de quarante-quatre valeurs d'essais documentées. Le coefficient de détermination R^2 de l'essai de Bhogayata (a), est égal à l'unité, ce qui signifie qu'il existe une adéquation parfaite entre les prédictions de l'équation de la droite de régression et la distribution des valeurs expérimentales. Pour les autres coefficients de détermination, ils sont égaux respectivement à 0.946, 0.968, 0.959, 0.892, 0.817, 0.996, 0.972, 0.98, pour les essais de Aldahdooh, Sheelan(a), Sheelan(b), Bhogayata(b), Bhogayata(c), Olofinnade(a), Olofinnade(b), Ramsden. Dans ces cas, les coefficients de détermination R^2 varient entre 1 et 0,817. Le modèle numérique est pertinent puisque 100% des valeurs expérimentales de l'essai de Bhogayata (a) sont concordantes aux prédictions de la droite de régressions et au minimum à 81.7% des valeurs expérimentales de l'essai Bhogayata(c) sont concordantes aux prédictions de la droite de régressions.

La figure 10 comporte les variations des densités des essais référenciés. Il s'agit de trente-neuf valeurs d'essais documentées. Le coefficient de détermination R^2 de l'essai de Saikia(b), est égal à l'unité, ce qui signifie qu'il existe une correspondance parfaite entre l'équation de la droite de régression et la distribution des valeurs expérimentales. Pour les autres coefficients de détermination, ils sont égaux respectivement à 0.822, 0.997, 0.997, 0.998, 0.921, 0.962, 0.964, 0.993,

pour les essais de Abdulrahmane, Saikia(a), Saikia(b), Olofinnade(a), Olofinnade(b), Belmokaddem(a), Belmokaddem(b), Belmokaddem(c). Pour les essais de densité, les coefficients de détermination R^2 varient entre 1 et 0,822. Le modèle numérique est, pertinent puisque 100% des valeurs expérimentales de l'essai de Saikia(b) sont concordantes aux prédictions de la droite de régressions et au minimum à 82.2% des valeurs expérimentales de l'essai Abdulrahmane correspondent aux prédictions de la droite de régressions.

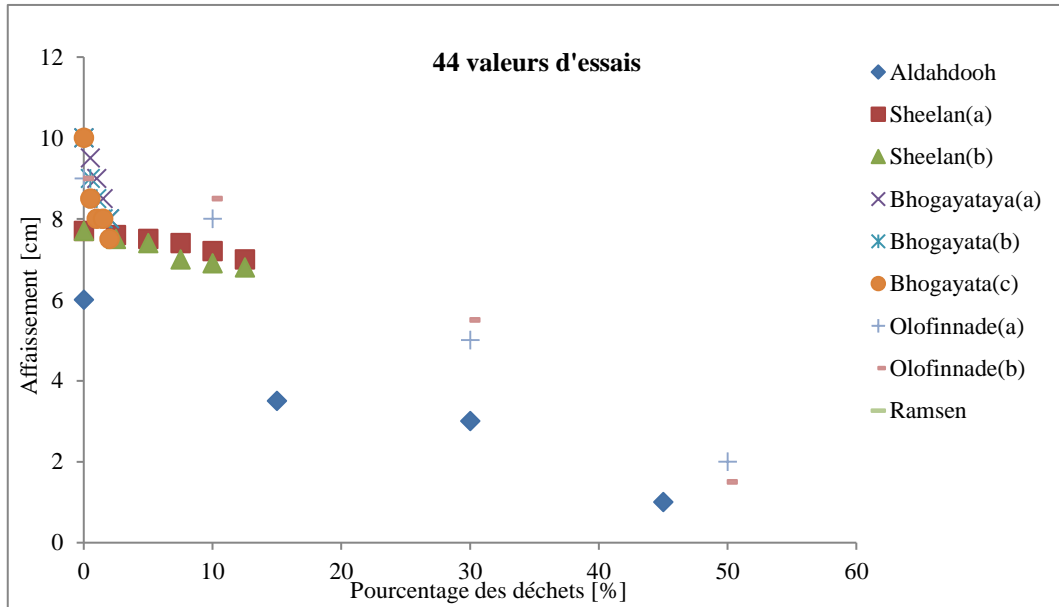


Fig. 9 – Variation des affaissements des essais référenciés

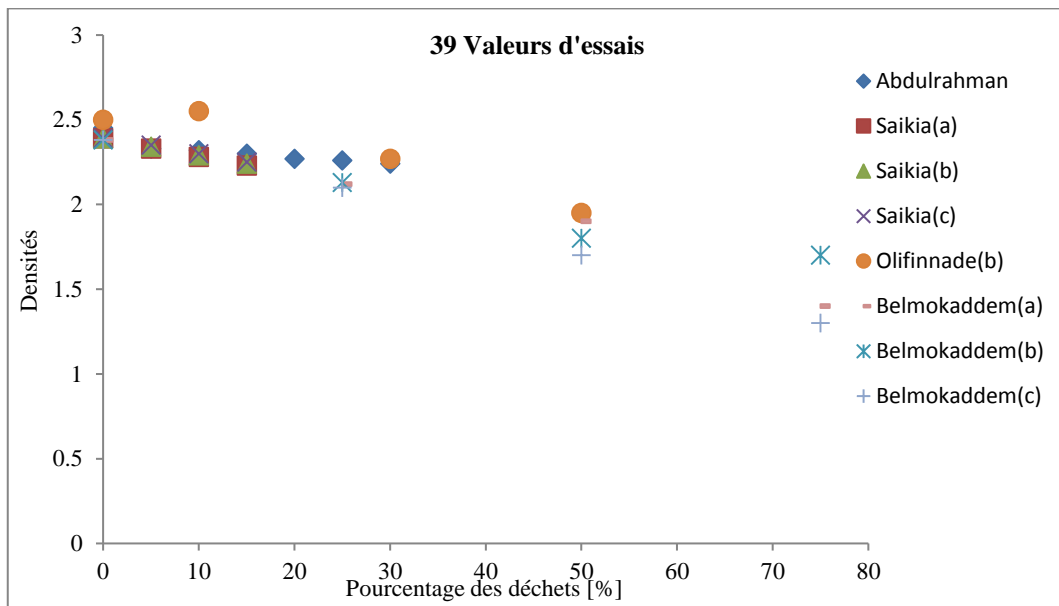


Fig. 10 – Variation des densités des essais référenciés

La figure 11 comporte les variations des résistances à la compression à 28 jours, des essais référenciés. Il s'agit de cinquante-sept valeurs d'essais documentées. Les coefficients de détermination R^2 des droites de régression correspondant, respectivement, aux essais de Sheelen(b), Olofinnade(a), Belmokaddem(b) et Belmokaddem(c), sont égaux à 0,991, 0,999, 0,996, 0,999. Ils sont presque égaux à l'unité, ce qui signifie qu'il existe une correspondance parfaite entre l'équation de la droite de régression et la distribution des valeurs expérimentales. Les autres coefficients de détermination, sont égaux respectivement à 0,960, 0,986, 0,880, 0,925, 0,987, 0,968, 0,973 et 0,957 pour les essais de Abdulrahmane, Sheelen(a), , Bhogayata(a), Bhogayata(b), Saikia(a), Saikia(b), Olofinnade(b) et Belmokaddem(a).

Pour les essais de la résistance à la compression à 28 jours, les coefficients de détermination R^2 varient entre 0.999 et 0,880. Le modèle numérique est pertinent puisque 99.9% des valeurs expérimentales des essais de, Olofinnade(a) et Belmokaddem(c) sont parfaitement concordantes aux prédictions de la droite de régressions et au minimum à 88% des valeurs expérimentales de l'essai Bhogayata(a), correspondent aux prédictions de la droite de régressions.

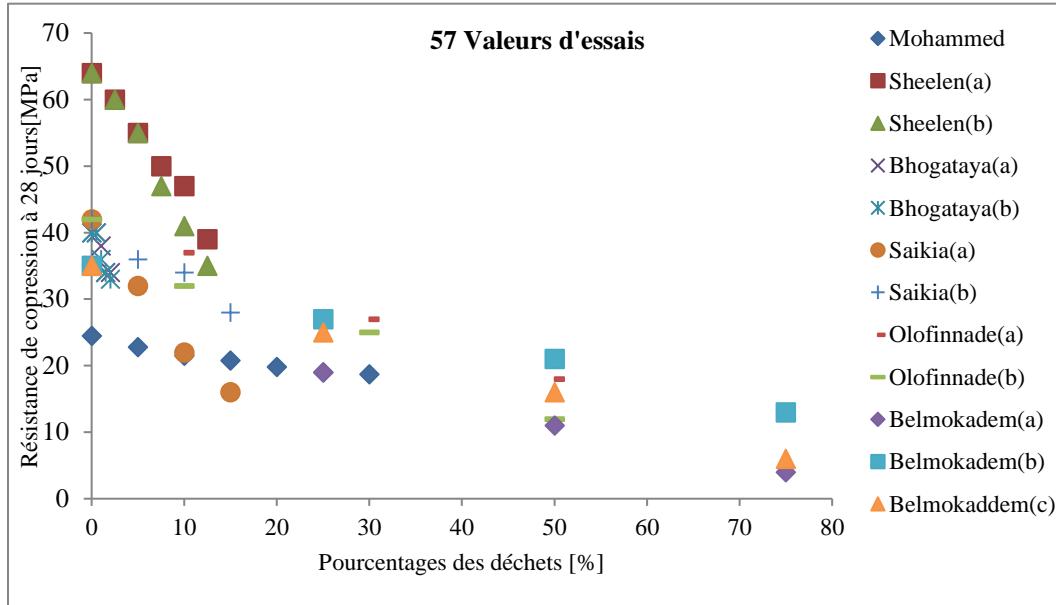


Fig. 11 – Variation des résistances à la compression à 28 jours, des essais référenciés

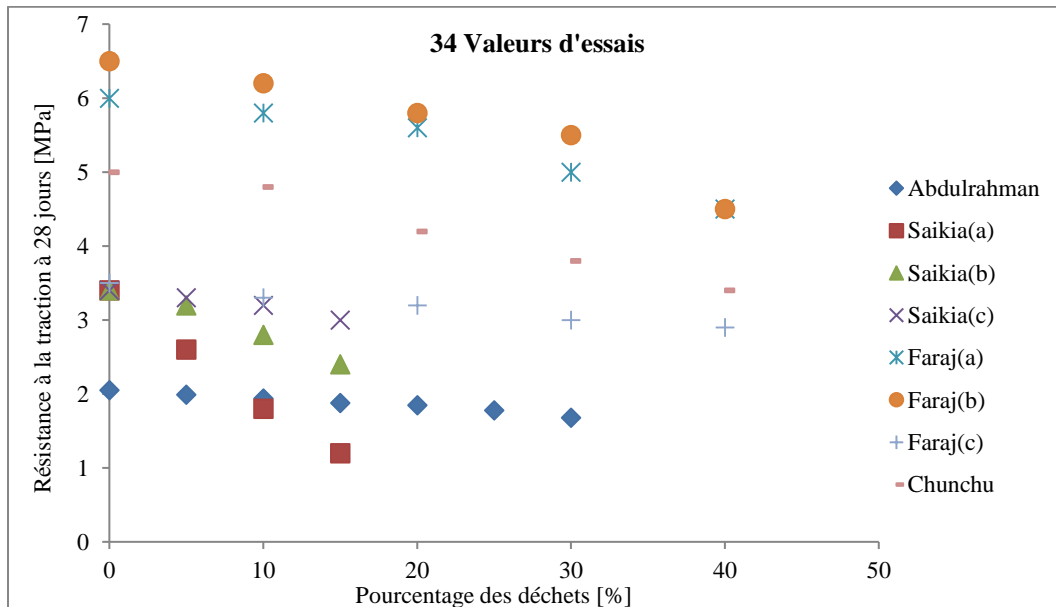


Fig. 12 – Variation des résistances à la traction à 28 jours, des essais référenciés

La figure 12 comporte les variations des résistances à la traction à 28 jours, des essais référenciés. Il s'agit de trente-quatre valeurs d'essais documentées. Le coefficient de détermination R^2 de la droite de régression correspondant, aux essais de Saikia(a) est égal à 0.9995. Il est presque égal à l'unité, ce qui signifie qu'il existe une correspondance parfaite entre l'équation de la droite de régression et la distribution des valeurs expérimentales. Les autres coefficients de détermination, sont égaux respectivement à 0.981, 0.979, 0.965, 0.945, 0.928 et 0.986 pour les essais de Abdulrahman, Saikia(b), Saikia(c), Faraj(a), Faraj(b) et Chunchu.

Pour les essais de la résistance à la traction à 28 jours, les coefficients de détermination R^2 varient entre 0,995 et 0,928. Le modèle numérique est pertinent puisque 99,5% des valeurs expérimentales des essais de Saikia(a) sont parfaitement concordantes aux prédictions de la droite de régressions et au minimum à 92,8% des valeurs expérimentales de l'essai, Faraj(b) correspondent aux prédictions de la droite de régressions.

La figure 13 comporte les variations des modules d'élasticité, des essais référenciés. Il s'agit de quarante-trois valeurs d'essais documentées. Le coefficient de détermination R^2 de l'essai de Saikia(b), est égal à l'unité, ce qui signifie qu'il existe une correspondance parfaite entre les prédictions par régression linéaire et la distribution des valeurs expérimentales. Le coefficient de détermination R^2 de la droite de régression correspondant, aux essais de Belmokaddem(b) est égal à 0,993. Il est presque égal à l'unité, ce qui signifie qu'il existe une correspondance parfaite entre l'équation de la droite de régression et la distribution des valeurs expérimentales. Les autres coefficients de détermination, sont égaux respectivement à 0,981, 0,925, 0,943, 0,959, 0,943, 0,962, 0,953 et 0,955 pour les essais de Faraj(a), Faraj(b), Sadrmtomtazi, Belmokaddem(a), Belmokaddem(b), Saikia(a), Saikia(c), Azhdarpour et Abbas.

Pour les essais des modules d'élasticité, les coefficients de détermination R^2 varient entre 1 et 0,943. Le modèle numérique est pertinent puisque 100% des valeurs expérimentales des essais de Saikia(b) sont parfaitement concordantes aux prédictions de la droite de régressions et au minimum à 94,3% des valeurs expérimentales des essais Sadrmtomtazi et ceux de Belmokaddem(b), correspondent aux prédictions de la droite de régressions.

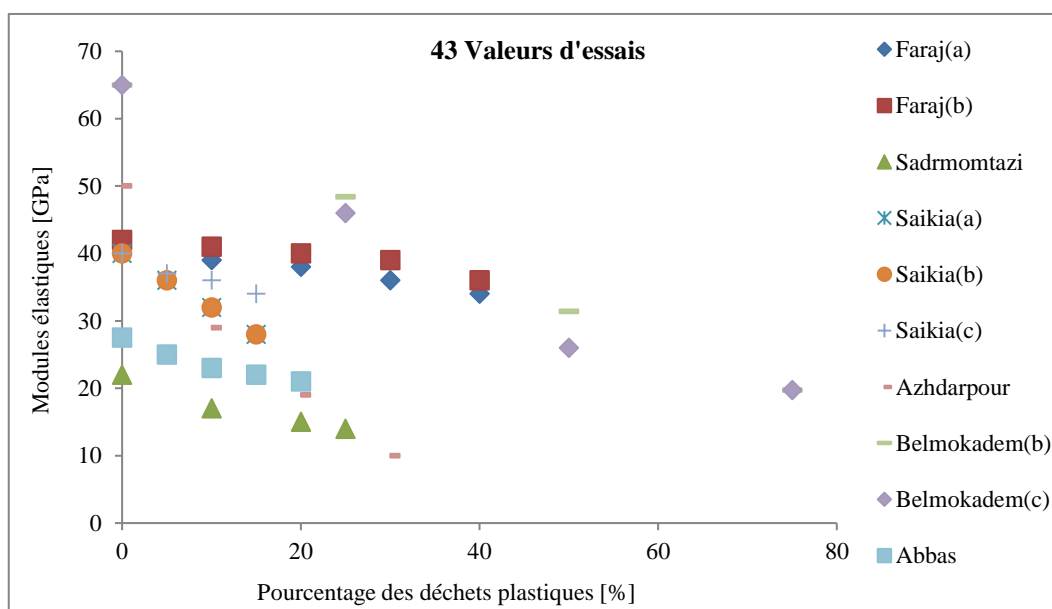


Fig. 13 – Variation des modules élastiques, des essais référenciés

Au regard des valeurs obtenues des coefficients de détermination R^2 des valeurs des droites de régressions correspondant aux essais des propriétés mécaniques des bétons formulés par des déchets de polyéthylène haute densité, il est permis de déduire que le modèle linéaire est bien adaptée pour décrire le comportement de ce type de béton. En effet, le coefficient de détermination R^2 pour la résistance à la compression à 28 jours est égal 0,99. Il est presque égal à l'unité, cela indique qu'il existe une correspondance parfaite entre les prédictions par régression linéaire et la distribution des valeurs expérimentales. Cette valeur signifie que 99% des valeurs expérimentales des essais concordent avec les prédictions de la droite de régressions. Le coefficient de détermination R^2 pour la résistance à la traction à 28 jours est égal 0,995. Il est presque égal à l'unité, cela indique qu'il existe une correspondance parfaite entre les prédictions par régression linéaire et la distribution des valeurs expérimentales. Cette valeur signifie que 99,5% des valeurs expérimentales des essais concordent avec prédictions de la droite de régressions. Le coefficient de détermination R^2 pour le module d'élasticité est égal 0,995. Il est très proche de l'unité, cela indique qu'il existe une correspondance parfaite entre les prédictions par régression linéaire et la distribution des valeurs expérimentales. Cette valeur signifie que 99,5% des valeurs expérimentales des essais concordent avec prédictions de la droite de régressions.

La validité de la méthode a permis de déduire que cette observation peut s'appliquer à des bétons formulés avec des d'autres types de déchets plastiques. En effet, parmi les essais analysés, il s'est trouvé des coefficients de détermination égaux ou très proche de l'unité. C'est le cas, des essais de Sheelen(b), Olofinnade(a), Belmokaddem(b) et Belmokaddem(c) pour la résistance à la compression à 28 jours ; des essais de Saikia(a), pour la résistance à la traction à 28 jours ; et des essais de Saikia(b), pour le module d'élasticité. D'une manière générale, et dans tous les cas de vérification, le coefficient de détermination a dépassé la valeur de 0.88. Cette valeur indique, qu'au minimum, 88% des valeurs mesurées suivent les prédictions de la droite de régression.

5 Conclusion

La modélisation linéaire des propriétés mécaniques des bétons formulés par des déchets de polyéthylène haute densité a été possible grâce à l'utilisation de la méthode des régressions linéaires. Cette approche a été menée en deux étapes :

La première phase a concerné la détermination des propriétés à l'état frais et à l'état durci d'un béton contenant des déchets de polyéthylène haute densité. Pour cela, des formulations de bétons à base de déchets de polyéthylène haute densité, en remplacement partiel des granulats naturels, ont été réalisés. Les déchets étaient simplement déchiquetés, de formes planes, irrégulière, et angulaires. Le taux de substitution des déchets variait entre 0% et 50% avec un pas de 10%. Le comportement des bétons ainsi produits ont été analysés.

La deuxième phase consistait en l'analyse des propriétés des bétons produits, par la méthode des régressions linéaires. Pour compléter l'analyse des propriétés mécaniques des bétons formulés par les déchets de polyéthylène haute densité, les valeurs du module élastique tirées des résultats de Belmokaddem et al. [2], ont été considérée. La validité de la méthode a été obtenue en analysant deux cent dix-sept valeurs d'essais référenciés.

La méthode des régressions linéaire a montré que les variations des propriétés mécaniques de ce type de béton par rapport au pourcentage de déchets de polyéthylène haute densité incorporés, est parfaitement linéaire.

L'analyse des résultats des deux cent dix-sept valeurs d'essais, a permis de déduire la linéarité des propriétés mécaniques de bétons formulés par d'autres types de déchets plastiques.

Remerciements

Nous exprimons notre gratitude au Département de génie civil de l'Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF (USTO-MB), pour avoir mis à notre disposition le laboratoire pédagogique pour effectuer les différents essais expérimentaux.

Nous sommes reconnaissants à la société JOKTAL, d'avoir gracieusement mis à notre disposition les déchets plastiques de polyéthylène haute densité.

REFERENCES

- [1]- A. Mohammed, T.K.M. Ali, N. Rajab, N. Hilal, Mechanical properties of concrete and mortar containing low density polyethylene waste particles as fine aggregate. *J. Mater. Eng. Struct.* 7(1) (2020) 57-72.
- [2]- M. Belmokaddem, A. Mahi, Y. Senhadji, B.Y. Pekmezci, Mechanical and physical properties and morphology of concrete containing plastic waste as aggregate. *Constr. Build. Mater.* 257 (2020) 119559. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119559.
- [3]- A. Boucedra, M. Bederina, Y. Ghernouti, Study of the acoustical and thermo-mechanical properties of dune and river sand concretes containing recycled plastic aggregates. *Constr. Build. Mater.* 256 (2020) 119447. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119447.
- [4]- M.A.A. Aldahdooh, A. Jamrah, A. Alnuaimi, M.I. Martini, M.S.R. Ahmed, A.S.R. Ahmed, Influence of various plastics-waste aggregates on properties of normal concrete. *J. Build. Eng.* 17 (2018) 13-22. doi:10.1016/j.jobbe.2018.01.014.
- [5]- S.M. Hama, N.N. Hilal, Fresh properties of self-compacting concrete with plastic waste as partial replacement of sand. *Int. J. Sustain. Built Environ.* 6(2) (2017) 299-308. doi:10.1016/j.ijbsbe.2017.01.001.
- [6]- A.C. Bhogayata, N.K. Arora, Fresh and strength properties of concrete reinforced with metalized plastic waste fibers. *Constr. Build. Mater.* 146 (2017) 455-463. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.095.

- [7]- O. Olofinnade, S. Chandra, P. Chakraborty, Recycling of high impact polystyrene and low-density polyethylene plastic wastes in lightweight based concrete for sustainable construction. *Mater. Today: Proceedings*, 38 (2021) 2151-2156. doi:10.1016/j.matpr.2020.05.176.
- [8]- N. Saikia, J. de Brito, Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Constr. Build. Mater.* 52 (2014) 236-244. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049.
- [9]- R.H. Faraj, A.F.H. Sherwani, A. Daraei, Mechanical, fracture and durability properties of self-compacting high strength concrete containing recycled polypropylene plastic particles. *J. Build. Eng.* 25 (2019) 100808. doi:10.1016/j.jobbe.2019.100808.
- [10]- B.R.K. Chunchu, J. Putta, Rheological and Strength Behavior of Binary Blended SCC Replacing Partial Fine Aggregate with Plastic E-Waste as High Impact Polyst. *Build.* 9(2) (2019) 50. doi:10.3390/buildings9020050.
- [11]- A. Sadrumontazi, S. Dolati-Milehsara, O. Lotfi-Omran, A. Sadeghi-Nik, The combined effects of waste Polyethylene Terephthalate (PET) particles and pozzolanic materials on the properties of self-compacting concrete. *J. Clean. Prod.* 112 (2016) 2363-2373. doi:10.1016/j.jclepro.2015.09.107.
- [12]- A.M. Azhdarpour, M.R. Nikoudeh, M. Taheri, The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; a laboratory evaluation. *Constr. Build. Mater.* 109 (2016) 55-62. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.01.056.
- [13]- A.O. Dawood, H. Al-Khazraji, R.S. Falih, Physical and mechanical properties of concrete containing PET wastes as a partial replacement for fine aggregates. *Case Stud. Constr. Mater.* 14 (2021) e00482. doi:10.1016/j.cscm.2020.e00482.
- [14]- Y. Ghernouti, B. Rabehi, T. Bouziani, H. Ghezraoui, A. Makhloufi, Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing plastic bag waste fibers (WFSCC). *Constr. Build. Mater.* 82 (2015) 89-100. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.02.059.
- [15]- S. Benimam, F. Debieb, M. Bentchikou, M. Guendouz, Valorisation et Recyclage des Déchets Plastiques dans le Béton. *MATEC Web of Conferences*, 11 (2014) 01033. doi:10.1051/mateconf/20141101033
- [16]- M.R. Ali, M. Maslehuddin, M. Shameem, M.S. Barry, Thermal-resistant lightweight concrete with polyethylene beads as coarse aggregates. *Constr. Build. Mater.* 164 (2018) 739-749. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.01.012.
- [17]- S.F.A. Shah, A. Naseer, A.A. Shah, M. Ashraf, Evaluation of Thermal and Structural Behavior of Concrete Containing Rubber Aggregate. *Arab. J. Sci. Eng.* 39(10) (2014) 6919-6926. doi:10.1007/s13369-014-1294-1.
- [18]- H.A. Bulut, R. Şahin, A study on mechanical properties of polymer concrete containing electronic plastic waste. *Compos. Struct.* 178 (2017) 50-62. doi:10.1016/j.compstruct.2017.06.058.
- [19]- Nursyamsi, W.S.B. Zebua, The Influence of Pet Plastic Waste Gradations as Coarse Aggregate Towards Compressive Strength of Light Concrete. *Procedia Eng.* 171 (2017) 614-619. doi:10.1016/j.proeng.2017.01.394.
- [20]- M. Gesoglu, E. Güneysi, O. Hansu, S. Etli, M. Alhassan, Mechanical and fracture characteristics of self-compacting concretes containing different percentage of plastic waste powder. *Constr. Build. Mater.* 140 (2017) 562-569. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.02.139.
- [21]- E.L. Pereira, A.L. de Oliveira Junior, A.G. Fineza, Optimization of mechanical properties in concrete reinforced with fibers from solid urban wastes (PET bottles) for the production of ecological concrete. *Constr. Build. Mater.* 149 (2017) 837-848. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.05.148.
- [22]- F.K. Alqahtani, G. Ghataora, M.I. Khan, S. Dirar, Novel lightweight concrete containing manufactured plastic aggregate. *Constr. Build. Mater.* 148 (2017) 386-397. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.05.011.
- [23]- ASTM C330 / C330M-14, Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete, ASTM International West Conshohocken, PA. (2014).
- [24]- M. Záleská, M. Pavlíková, J. Pokorný, O. Jankovský, Z. Pavlík, R. Černý, Structural, mechanical and hygrothermal properties of lightweight concrete based on the application of waste plastics. *Constr. Build. Mater.* 180 (2018) 1-11. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.250.
- [25]- F.S. Khalid, J.M. Irwan, M.H. Wan Ibrahim, N. Othman, S. Shahidan, Splitting tensile and pullout behavior of synthetic wastes as fiber-reinforced concrete. *Constr. Build. Mater.* 171 (2018) 54-64. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.03.122.
- [26]- A.H. Alani, N.M. Bunnori, A.T. Noaman, T.A. Majid, Durability performance of a novel ultra-high-performance PET green concrete (UHPPGC). *Constr. Build. Mater.* 209 (2019) 395-405. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.088.

- [27]- V. G. S, V.G. Ghorpade, H. Sudarsana Rao, The Behaviour of Self Compacting Concrete With Waste Plastic Fibers When Subjected To Chloride Attack. *Mater. Today: Proceedings*, 5(1, Part 1) (2018) 1501-1508. doi:10.1016/j.matpr.2017.11.239.
- [28]- S. Bahij, S. Omary, F. Feugeas, A. Faqiri, Fresh and hardened properties of concrete containing different forms of plastic waste – A review. *Waste Manage. (Oxford)*, 113 (2020) 157-175. doi:10.1016/j.wasman.2020.05.048.
- [29]- X. Li, T.-C. Ling, K. Hung Mo, Functions and impacts of plastic/rubber wastes as eco-friendly aggregate in concrete – A review. *Constr. Build. Mater.* 240 (2020) 117869. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117869.
- [30]- R. Sharma, P.P. Bansal, Use of different forms of waste plastic in concrete – a review. *J. Clean. Prod.* 112 (2016) 473-482. doi:10.1016/j.jclepro.2015.08.042.
- [31]- R.H. Faraj, H.F. Hama Ali, A.F.H. Sherwani, B.R. Hassan, H. Karim, Use of recycled plastic in self-compacting concrete: A comprehensive review on fresh and mechanical properties. *J. Build. Eng.* 30 (2020) 101283. doi:10.1016/j.jobe.2020.101283.
- [32]- H. Mohammed, M. Sadique, A. Shaw, A. Bras, The influence of incorporating plastic within concrete and the potential use of microwave curing; A review. *J. Build. Eng.* 32 (2020) 101824. doi:10.1016/j.jobe.2020.101824.
- [33]- A.A. Mohammed, Modelling the mechanical properties of concrete containing PET waste aggregate. *Constr. Build. Mater.* 150 (2017) 595-605. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.05.154.
- [34]- R. Siddique, J. Khatib, I. Kaur, Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste Manage. (Oxford)*, 28(10) (2008) 1835-1852. doi:10.1016/j.wasman.2007.09.011.
- [35]- M.A. Kamaruddin, M.M.A. Abdullah, M.H. Zawawi, M.R.R.A. Zainol, Potential use of Plastic Waste as Construction Materials: Recent Progress and Future Prospect. *IOP Conference Series: Mater. Sci. Eng.* 267(2017) 012011. doi:10.1088/1757-899x/267/1/012011.
- [36]- B. Mrowiec, Plastics in the circular economy (CE). *The Journal of Institute of Environmental Protection-National Research Institute*, 29 (2018) 16-19. doi:10.2478/oszn-2018-0017.
- [37]- L.C.M. Lebreton, S.D. Greer, J.C. Borrero, Numerical modelling of floating debris in the world's oceans. *Mar. Pollut. Bull.* 64(3) (2012) 653-661. doi:10.1016/j.marpolbul.2011.10.027.
- [38]- IANOR, Recueil des normes algériennes. Sous direction de la normalisation, Direction de la recherche et de la prospective sous-direction de la normalisation. Ministère algérien des travaux publics. Alger (2010).
- [39]- AFNOR, Granulats - Spécifications et textes réglementaires - Tome 1, Paris, France. (2015).
- [40]- AFNOR, NF EN 12350-2. Essais pour béton frais. Partie 2, Essai d'affaissement, Paris, France. (2012).
- [41]- AFNOR, NF EN 12350-6. Essais pour béton frais - Partie 6 : masse volumique, Paris, France. (2012).
- [42]- AFNOR, NF EN 12390-3. Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes, Paris, France. (2012).
- [43]- AFNOR, NF EN 12390-6. Essais pour béton durci - Partie 6 : détermination de la résistance en traction par fendage d'éprouvettes, Paris, France. (2012).
- [44]- ASTM C597-16, Standard test method for pulse velocity through concrete, annual book of ASTM standards, vol. 04, ASTM International West Conshohocken, PA. (2002).