

VALORISATION D'UN MATERIAU COMPOSITE (SCHISTE ET LAITIER CRISTALLISE) DANS LA CONSTRUCTION ROUTIERE

VALORIZATION OF A COMPOSITE OF (SHALE AND BLAST FURNACE SLAG) IN ROAD CONSTRUCTION

Omar BOUDLAL¹, Yahia MESSANI², Ahmed BENAMAR³

¹Laboratoire de recherche en Géomatériaux, Environnement et Aménagement (L.G.E.A), Département de Génie Civil, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO), Tizi-Ouzou, Algérie. Email : boudlal_geniecivil@yahoo.fr

²Département de Génie Civil, Faculté du génie de la construction, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO), Tizi-Ouzou, Algérie.

³Laboratoire Ondes et Milieux Complexe (LOMC), Université du Havre, France.

RÉSUMÉ – La présente étude fait partie d'un projet de recherche initié sur le recyclage et la valorisation des matériaux. Elle a pour objectif principal la mise au point d'un mélange de schiste et de laitier cristallisé dans la construction routière. Les résultats obtenus peuvent ouvrir un large éventail d'exploitation des matériaux étudiés et présenter une alternative durable écologiquement et rentable dans le domaine des travaux publics.

ABSTRACT – This study is part of a research project initiated on recycling and valorization of raw materials. It aims mainly to use mixtures of shale and blast furnace slag waste in road construction. The obtained results can open a wide range of benefit reuse of studied materials and present a beneficial and sustainable alternative in the field of public works.

1. Introduction

L'Algérie comme plusieurs pays en voie de développement produit de plus en plus de déchets qui s'accumulent et affectent l'environnement des villes et des campagnes. Ces résidus sont issus des différentes activités industrielles, ils sont donc de différentes natures (plastique, verre, laitier du haut fourneau...). Malheureusement, ces milliers de tonnes de déchets sont souvent abandonnés et jetés dans des décharges inappropriées et anarchiques (sauvages) qui menacent directement la santé publique. En effet, les dépôts sauvages entraînent une pollution visuelle, mais surtout une pollution des sols et des eaux souterraines (nappe phréatique) via l'infiltration de substances polluantes.

Apporter une solution à ce problème devient une nécessité, et d'ailleurs la gestion des déchets a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche (Braymand et al 2014 ; Ahmed, 1994 ; Halstead, 1992 ;...), notamment en étudiant leur réutilisation dans d'autres domaines, particulièrement le génie civil et les travaux publics (Boudlal et Melbouci, 2009).

Le travail réalisé rentre dans cette perspective ; il consiste à reconstituer un matériau composite de schiste et de laitier cristallisé (déchet des hauts fourneaux) pour une utilisation dans la construction routière en remblai. Il peut constituer une contribution précieuse (solution durable) présentant une alternative propre, voire économique, sachant que des quantités énormes de granulats (Daho, 2012) sont réclamées en rapport avec le développement du pays et du nombre important de projets lancés dans le domaine de la construction.

2. Matériaux et méthodes

La partie expérimentale de cette étude est initiée par un ensemble d'essais d'identification et de caractérisation des matériaux utilisés. Ces essais permettent par la suite une meilleure compréhension et interprétation des résultats mécaniques obtenus.

2.1. Caractérisation et identification des matériaux

Les matériaux utilisés dans cette étude (schiste et laitier cristallisé) sont des matériaux locaux disponibles en Algérie. Néanmoins, l'exploitation de tels matériaux (composites) dans le domaine routier n'est encore pas maîtrisée et concrétisée.

2.1.1. Matériau naturel (schiste)

Du point de vue géologique, le territoire de la Grande Kabylie s'inscrit dans l'orogénèse alpine périméditerranéenne de la chaîne littorale de l'Afrique du nord. Les principales formations qui affleurent sur ce territoire montrent l'existence du schiste en fortes proportions notamment dans le socle Kabyle et l'oligo-miocène Kabyle (Raymond, 1976). Les études de Peron (1867) sur la géologie de la Grande Kabylie ont montré également des détails importants sur les formations de schistes cristallins dans les massifs montagneux de la région.

Les échantillons de schiste sont prélevés dans le massif du Belloua (Tizi-ouzou, Algérie) au niveau du projet de la liaison RN12 Bouaid-Oued Falli situé à environ 05 km du chef-lieu de la wilaya de Tizi-Ouzou (figure 1). Ils sont extraits sous forme de blocs (roche) sur site, ensuite concassés au laboratoire par des moyens mécaniques selon la granulométrie désirée.

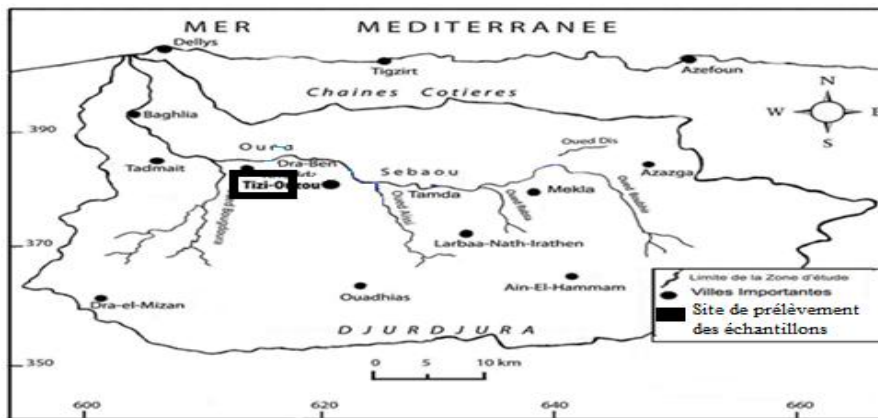


Figure 1. Site de prélèvement des échantillons de schiste.

Les résultats d'essais d'identification physico-chimique réalisés ont montré que le matériau étudié est un schiste satiné de caractéristiques suivantes :

Tableau 1. Caractéristiques physiques du schiste étudié.

w (%)	ps (g/cm ³)	ph (g/cm ³)	e (%)	Sr (%)	Wl (%)	Wp (%)	Ip (%)
2,05	2,55	2,14	21,0	24,42	19,48	16,19	3,29

2.1.2. Matériau industriel (laitier cristallisé)

Le laitier utilisé dans cette étude est récupéré du complexe sidérurgique d'EL Hadjar à Annaba (à environ 500 km à l'est de la capitale Alger). Les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques du laitier déterminées par Cherfa et Ait Mokhtar (2009) sont résumées dans le tableau 2.

Tableau 2. Caractéristiques physico-chimiques et mécaniques du laitier cristallisé.

Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,8
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,2
Porosité (%)	50
Coefficient de réactivité	39
Coefficient Micro-Deval (%)	16
Coefficient Los Angeles (%)	26
Coefficient d'aplatissement	18

D'après les recherches trouvées dans la littérature et les informations évoquées par wikipedia, le laitier utilisé ne présente pas de nuisances environnementales (pollution) notables, vu qu'il présente une bonne stabilité chimique. D'ailleurs il est destiné parfois aux travaux publics, notamment, sous forme de ballaste.

2.2. Préparation des échantillons

Les blocs de schiste et de laitier sont concassés séparément au moyen d'un concasseur mécanique, de manière à présenter approximativement une distribution dimensionnelle des grains permettant ensuite de reconstituer les échantillons sous la classe granulaire 0/20 mm. Les échantillons reconstitués sont composés de schiste avec les proportions de laitier suivantes : 30%, 40% et 50% de telle sorte à garder la même classe granulaire 0/20 mm. Cette dernière est caractérisée par la courbe granulométrique délimitée par le fuseau de courbes préconisé par la norme NF EN 13-285, correspondant aux graves non traitées (mélanges de granulats naturels, artificiels ou recyclés) destinés à la construction des assises de chaussées (figure 2).

Les échantillons préparés se présentent sous forme dimensionnelle d'une grave propre bien graduée, de granulométrie étalée.

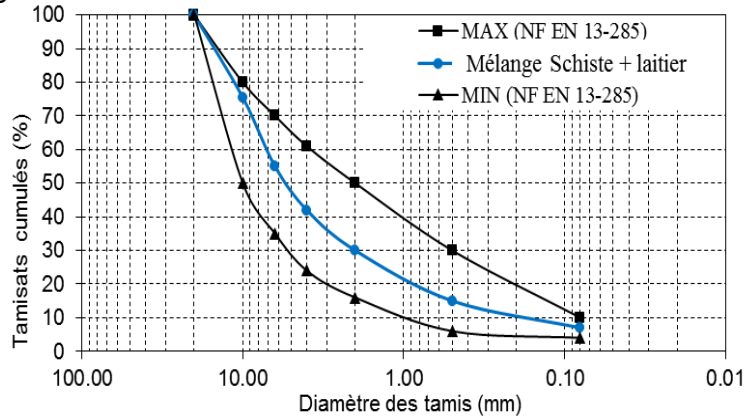


Figure 2. Granulométrie du matériau étudié (schiste + laitier).

2.3. Essais réalisés

Les échantillons préparés sont soumis à plusieurs séries d'essais mécaniques au laboratoire et qui sont :

- L'essai de compactage Proctor modifié (NF P 94-093), afin d'étudier l'aptitude des mélanges au compactage et de déterminer leurs caractéristiques mécaniques à l'optimum (w_{OPM} et ρ_{dOPM}) ;
- Les essais de poinçonnement IPI et CBR à la presse avant et après immersion (NF P 94-078), afin d'évaluer respectivement la portance des mélanges sous la circulation des engins du chantier (IPI) et après mise en service sous les plus mauvaises conditions hygrométriques (CBR_{imm}) ;

- L'essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande (NF P 94-071), afin d'étudier la résistance des mélanges face aux efforts tangentiels générés par le trafic, notamment les poids lourds et de déterminer les caractéristiques mécaniques au cisaillement, (la cohésion c et l'angle de frottement interne φ) ;
- Les essais de fragmentabilité (NF P 94-066), dégradabilité (NF P 94-067), Los Angeles (NF P 18-573) et Micro-Deval (NF P 18-572) afin d'étudier l'évolution de la granularité des matériaux étudiés sous différents types de sollicitations routières et climatiques après leur mise en service.

3. Résultats et discussions

3.1. Essais de compactage au Proctor modifié

La figure 3 montre que les courbes Proctor obtenues au compactage présentent une allure en forme de cloche moyennement bombée (à l'exception du schiste seul). Elles présentent généralement un maximum plus ou moins apparent correspondant à l'optimum Proctor.

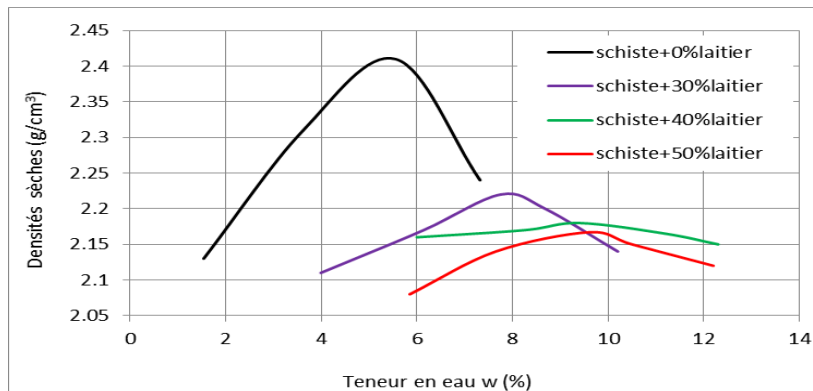


Figure 3. Compactage des échantillons (mélanges).

Ces courbes permettent de constater que les densités sèches diminuent au fur et à mesure que la quantité de laitier augmente dans l'échantillon. Ceci est dû au fait que les grains de laitier sont très poreux et que la structure des granulats du schiste sous forme de feuillets est perturbée par les granulats du laitier de formes volumineuses, ce qui crée plus de vides entre les grains schiste-laitier. Par conséquent, la teneur en eau optimale augmente de plus en plus avec l'ajout du laitier et les courbes s'aplatissent indiquant une faible sensibilité du matériau à l'eau mais une densité optimale de mise en place plus faible.

Toutefois, les densités obtenues sont supérieures à 2,00, ce qui vérifie amplement les seuils de référence fixés par les normes. Ces résultats permettent ainsi, de dire que les mélanges étudiés présentent une bonne aptitude au compactage et peuvent être très intéressants pour les corps de chaussées.

Les caractéristiques obtenues au compactage ($\rho > 2 \text{ g/m}^3$ et $w = 8 \text{ à } 10\%$) sont très satisfaisantes relativement à celles développées par les matériaux naturels présentées par Robitaille et Tremblay (1997). Elles permettent ainsi de qualifier les mélanges présentés du point de vue compactage comme matériaux très intéressants pour les corps de chaussées, notamment en couches de forme (Setra-Lcpc, 2000).

3.1. Essais de portance CBR avant et après immersion

Les échantillons sont humidifiés aux teneurs en eau optimales de compactage reproduisant leur état réel de mise en œuvre, et sont soumis ensuite aux essais CBR avant et après immersion (NF P 94-078) permettant d'étudier respectivement leur

portance sous la circulation des engins du chantier pendant leur mise en œuvre (IPI) et leur portance après immersion (CBR_{imm}) reproduisant les plus mauvaises conditions hygrométriques auxquelles ils seront soumis en pratique (figure 4).

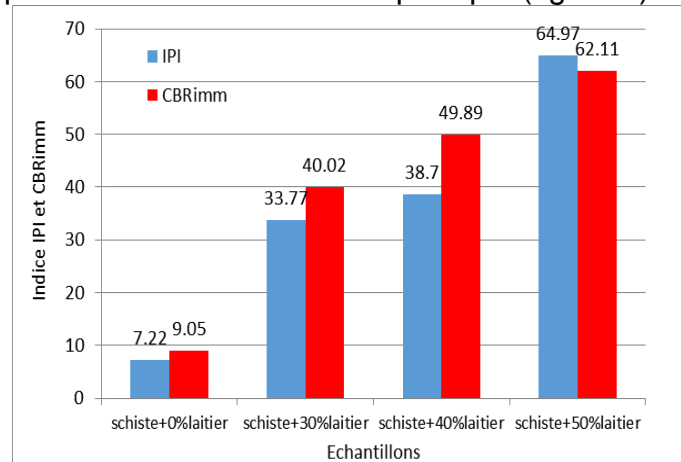


Figure 4. Portance des échantillons avant et après immersion.

La figure 4 permet de constater que la portance des mélanges avant et après immersion s'améliore de plus en plus avec l'ajout du laitier. En effet, elle passe de 7.22 pour le schiste seul à 64.97 pour le mélange contenant 50% de laitier (avant immersion) et de 9,05 à 62,11 (après immersion). Ceci peut être expliqué par le fait que les grains de laitier sont plus résistants que ceux du schiste (comportement constaté durant l'opération du concassage), ainsi le mélange comportant le plus de laitier est moins déformable et présente de meilleures portances et de meilleures résistances au poinçonnement même après immersion (le laitier est pratiquement insensible à l'eau).

En se référant aux seuils de portances des sols et des matériaux cités dans la littérature (DRCRM, 1995 et GMTR, 2001), nous constatons que les échantillons étudiés peuvent être insérés dans les classes des matériaux de portances moyennes à élevées, destinés pour la construction routière. Par conséquent leur réemploi en couches de chaussées est fortement envisageable. Toutefois, les mélanges à fortes teneurs en laitier (50%) présentent une meilleure stabilité en présence d'eau (l'écart de portance avant et après immersion est très faible et ne dépasse pas 3%).

3.1. Essais de cisaillement direct à la boîte

Les granulats routiers, doivent résister aux efforts tangentiels répétés produits par le trafic. Ces efforts sont fortement accentués lors des différentes manœuvres d'accélération, de freinage et de changement de direction (Hamlat, 2007). Ils engendrent par la suite des déformations de la chaussée et des arrachements des granulats en surface. Une meilleure résistance au cisaillement permet donc d'assurer la stabilité et la durabilité de la chaussée et par conséquent, la sécurité et le confort des passagers.

Les résultats obtenus aux essais de cisaillement (figure 5) montrent que le schiste étudié est caractérisé par un angle de frottement de $37,23^\circ$. Ce résultat est sensiblement amélioré par l'ajout du laitier pour atteindre la valeur maximale de $43,53^\circ$ (50% de laitier). Cette amélioration peut être expliquée par l'état de surface rugueux et anguleux des grains de laitier après concassage permettant un meilleur frottement et enchevêtrement des grains au cours du cisaillement.

Par contre, les cohésions d'une manière générale sont relativement faibles (< 45 kPa). Toutefois, elles diminuent davantage avec l'ajout des grains de laitier qui créent des discontinuités dans la matrice du matériau naturel.

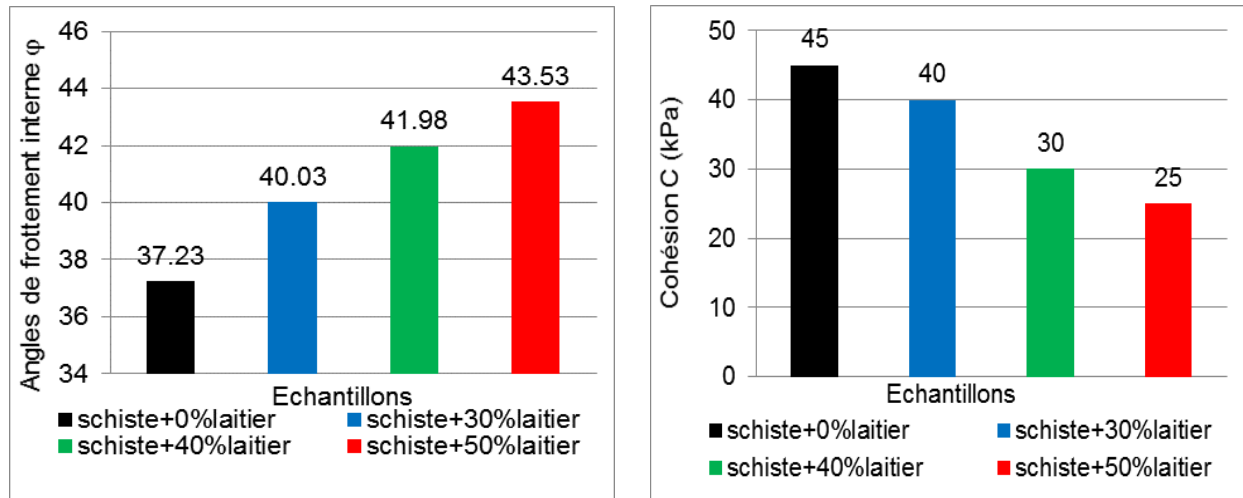


Figure 5. Caractéristiques mécaniques au cisaillement des différents échantillons.

Nous pouvons conclure que la résistance au cisaillement des matériaux présentés dépend essentiellement de la proportion de laitier, du frottement et de l'enchevêtrement des grains, ainsi, elle dépendra évidemment de la contrainte normale appliquée. Le matériau est granulaire et le frottement est plus déterminant que la cohésion dans la résistance au cisaillement.

3.2. Essais routiers

Les essais routiers réalisés (fragmentabilité, dégradabilité, Los Angeles et Micro-Deval) permettent de caractériser l'évolution de la granularité des matériaux étudiés sous les sollicitations du trafic et sous sollicitations hydriques. Par conséquent, elle permet d'avoir une idée sur la durée de vie et éventuellement sur le confort de la chaussée en question.

Tableau 3. Essais routiers (fragmentabilité, dégradabilité, Los Angeles et Micro-Deval).

Echantillons	FR	DR	MDE	LA	LA+MDE	Catégorie
Schiste seul	2,1	≈ 1	63	24,5	87,5	F
Schiste + 30% de laitier	2,1		49,8	31,7	81,5	F
Schiste + 40% de laitier	1,57		47,4	33,2	80,6	F
Schiste + 50% de laitier	1,31		42	34,2	76,2	E

Les résultats présentés dans le tableau 3 montrent que les échantillons étudiés n'ont subi pratiquement aucune dégradabilité (DR ≈ 1). Ainsi, ils sont considérés comme matériaux rocheux très peu dégradables. En outre, l'ajout de laitier réduit sensiblement la fragmentabilité des mélanges, ce qui permet de les classer dans la catégorie des roches peu fragmentables (FR < 7).

Selon les recommandations de la norme NF P 11-300, les mélanges étudiés sont peu fragmentables sous pilonnage (FR < 7) et peu dégradables face aux cycles alternés d'humidification-séchage (DR < 5). Leur utilisation est possible en couche de forme et en couche de fondations.

Le coefficient Los Angeles augmente au fur et à mesure que la teneur en laitier augmente, il passe de 24,5 pour les échantillons de schiste seul à 34,2 pour les échantillons contenant 50 % de laitier. Par contre, le coefficient M_{DE} diminue en fonction de l'ajout de laitier, il passe de 63 à 42 respectivement.

Le laitier améliore considérablement la résistance à l'usure des mélanges en présence d'eau. Tandis que leur résistance aux chocs reste à reconsidérer. Ainsi, les grains de laitier cristallisé, malgré leur dureté considérable à l'état granulaire, résistent mal aux chocs et à l'attrition vue leur microporosité importante. Cependant, les échantillons de

schiste seuls, ainsi que les mélanges dont la teneur en laitier ne dépasse pas 40% se placent dans la catégorie F. Par contre, les échantillons de schiste + 50% de laitier sont reclassés dans la catégorie E, ils présentent de ce fait un meilleur comportement. Ce type de matériau (E) est employé dans les couches de chaussées, avec ou sans traitement, à définir selon le trafic.

4. Conclusions

Les résultats obtenus à l'issue des essais réalisés sur des échantillons reconstitués en mélanges à base de schiste et de laitier cristallisé permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Les mélanges étudiés développent des densités sèches importantes (supérieures à 2) et satisfaisantes comparativement aux seuils fixés par les normes dans le cas d'un matériau routier.
- L'ajout du laitier cristallisé améliore sensiblement la portance des mélanges même en présence d'eau (après immersion), tout en présentant des gonflements négligeables.
- Les mélanges étudiés présentent des résistances très intéressantes au cisaillement direct à la boîte, traduite particulièrement par des angles de frottement interne très importants.
- La résistance aux chocs des échantillons est faible à moyenne, comparativement aux matériaux modèles de référence, par contre, leur résistance à l'usure s'améliore de plus en plus avec l'ajout du laitier.
- Les matériaux schiste et laitier cristallisé sont peu dégradables sous sollicitations hydriques et peu fragmentables sous sollicitations mécaniques.

Les mélanges étudiés présentent ainsi des comportements et des propriétés mécaniques très intéressantes, notamment pour de fortes teneurs en laitier (50 %). Ils peuvent faire objet d'utilisation dans les corps de chaussées de faible à moyen trafic, notamment en couches de forme et en couches de fondations. Toutefois, leur mise en œuvre réelle sur un tronçon de route (planche d'essai) est indispensable pour avoir une confirmation concrète de leur comportement sous sollicitations réelles (mécaniques et climatiques).

L'exploitation et la valorisation de nouveaux matériaux locaux, naturels (schiste) et recyclés (laitier du haut fourneau) dans les corps de chaussées peut présenter plusieurs avantages sur le plan économique et sur le plan environnemental notamment en géotechnique routière, entre autres :

- La préservation des gisements alluvionnaires et l'exploitation de nouvelles sources de granulats permettant d'assurer la continuité d'approvisionnement des projets, et par conséquent à réaliser des économies et un gain de temps sur les chantiers.
- Pour les acteurs de l'environnement, l'élimination des laitiers contribue fortement à la préservation des ressources naturelles et à la limitation des risques de pollution liés à ces laitiers, et à d'autres matériaux toxiques.
- La contribution au développement de la filière du recyclage qui est un domaine ouvert à l'innovation en associant les universitaires et les entreprises, notamment dans les pays en voie de développement tels que l'Algérie. Ces derniers offrent un champ fertile de matériaux à recycler (béton, plastique, verre, laitier ...) dont l'utilisation peut être élargie à plusieurs domaines de génie civil, ce qui offre de nouvelles opportunités d'emploi.

Ainsi, la valorisation des déchets sidérurgiques en génie civil est une action prometteuse, vu les avantages qu'elle présente et qu'elle pourra présenter dans l'avenir. Pour cela, la participation des centres de recherche et des centres de formation au développement et à la recherche de nouvelles possibilités de valorisation des laitiers est vivement recommandée.

5. Références bibliographiques

- Ahmed I. (1992). Use of Waste Materials in Highway Construction. Department of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Boudlal O., Melbouci B. (2009). Study of the demolition aggregates behavior by the Proctor and CBR tests. Material, Design, Construction, Maintenance, and Testing of pavement. *Geotechnical special publication (ASCE)*; 193, pp. 75-80.
- Braymand S., Roux S., Kuwufine D., Constantin C M., Feugeas F and Fond C. (2014). Les granulats recyclés de bétons: Un matériau à fort potentiel de valorisation dans les bétons. Conférence Matériaux 2014 - Colloque Ecomatériau, Montpellier, 24-28 Novembre, France. pp 01-09.
- Cherfa, K. Ait Mokhtar (2009). Valorisation des déchets industriels pour la stabilisation des couches de chaussées : cas des laitiers des hauts fourneaux. Séminaire international «Innovation et Valorisation dans le Génie Civil». Les 5 -7 février à Hammamet, Tunisie. pp 79-89.
- Daho E. (2012). Etude du potentiel local en granulats, pour une utilisation optimale. Mémoire de magister, université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, Algérie, 161 pages.
- DRCRM. (1995). Direction des routes et de la circulation routière du Maroc, Catalogue des structures types des chaussées neuves. Ministère de l'équipement, Maroc.
- GMTR. (2001). Direction des routes et de la circulation routière du Maroc, Guide marocain pour les terrassements routiers " GMTR", fascicule I: principes généraux.
- Halstead W.J. (1993). Use of waste glass in highway construction. Technical assistance report, Virginia transportation research council. P 23.
- Hamlat S. (2007). Etude de la résistance des revêtements routiers aux sollicitations tangentielles. Thèse de doctorat délivrée par l'école centrale de Nantes et l'université de Nantes. Spécialité : mécanique des matériaux.
- NF EN 13-285. (2010) Norme française, Graves non traitées, Spécifications.
- NF P 11-300. (1992). Norme française, Exécution des terrassements, Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routière.
- NF P 94-066. (1992). Norme française, Sols, reconnaissance et essais. Coefficient de fragmentabilité des matériaux rocheux.
- NF P 94-067. (1992). Norme française, Sols, reconnaissance et essais. Coefficient de dégradabilité des matériaux rocheux.
- NF P 94-071. (1994). Norme française, Sols, reconnaissance et essais. Essai de cisaillement rectiligne à la boîte. Cisaillement direct.
- NF P 94-078. (1997). Norme française, Sols, reconnaissance et essais. Indice CBR après immersion-Indice CBR immédiat - Indice portant immédiat. Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR.
- NF P 94-093. (2014). Norme française, Sols, reconnaissance et essais. Détermination des références de compactage d'un matériau. Essai Proctor normal- Proctor modifié.
- Peron A, (1883). Essai d'une description géologique de l'Algérie. Masson éditeur.
- Raymond D. (1976). Evolution sédimentaire et tectonique du Nord-Ouest de la Grande Kabylie (Algérie), au cours du cycle alpin. Thèse de doctorat d'Etat, Département des sciences naturelles, Université Pierre et Marie Curie, France.
- Robitaille V, Tremblay D. (1997). Mécanique des sols, théorie et pratique. Modulo éditeur, Québec, 652 pages.
- SETRA-LCPC. (2000). Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes- Laboratoire Central des Ponts et chaussées. Guide technique, Réalisation des remblais et des couches de forme. Fascicule I, Principes généraux. 2eme édition.
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Laitier_\(métallurgie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Laitier_(métallurgie)).