
Contribution à l'amélioration du comportement des routes par l'utilisation de laitier

Hocine HADIDANE¹, Hocine OUCIEF², Mouloud MERZOUZ², Zina DJEBBARI³

¹Laboratoire MGE, Université Badji Mokhtar-Annaba, BP 12 Annaba 23000, Algérie
hocinehadidane@gmail.com

²Laboratoire MGE, Université Badji Mokhtar-Annaba, BP 12 Annaba 23000, Algérie
oucief@yahoo.fr

²Laboratoire MGE, Université Badji Mokhtar-Annaba, BP 12 Annaba 23000, Algérie
merzoud_mouloud@yahoo.fr

³Laboratoire MGE, Université Badji Mokhtar-Annaba, BP 12 Annaba 23000, Algérie
zinadjebbari@gmail.com

RÉSUMÉ. L'accumulation des déchets industriels issus de la sidérurgie influence d'une façon négative l'état environnemental, la politique adoptée avait pour mission d'éliminer ces déchets indésirables en les recyclant par leur utilisation dans les domaines adéquats.

L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement mécanique d'une grave laitier à base de laitier cristallisé et granulé activé par la chaux. On s'intéressera à l'étude de la résistance au poinçonnement et de la portance de cette grave par le biais des essais Proctor et CBR, et par les essais de compression et traction par fendage, en vue de son utilisation dans les couches de chaussée (couches de fondation et de base).

Les résultats obtenus sont extrêmement encourageants pour l'incorporation de ce matériau recyclés dans le corps de chaussées.

ABSTRACT. The accumulation of wastes industrial stemming of the iron and steel industry has influenced negatively the environment, the adopted policy had for mission to eliminate these undesirable wastes by recycling them by their utilization in adequate areas.

The objective of this work is to study the mechanical behavior of a gravel-slag based by slag crystallized and granulated, activated by lime. One will be interested in the study of resistance to punching and the bearing ratio of this slag through Proctor tests, CBR and by compression tests, tensile, for use in the layers of pavement (Foundation and base layers).

The primary results obtained are extremely encouraging for maximum incorporation of recycled materials, in the body roads.

MOTS-CLÉS: Matériau , route , chaussée , Grave laitier, formulation .

KEY WORDS: Material , road , pavement , gravel slag ,formulation.

1. Introduction

En technique routière, on se préoccupe de l'utilisation des déchets et sous-produits d'origines diverses (mines et carrières, industrie métallurgique, matériaux de démolition ...) d'une part pour des questions d'ordre environnementale, d'autre part pour palier au déficit enregistré dans le domaine des granulats routiers de bonnes qualités qui se font de plus en plus rares mais aussi du fait du prix élevé du liant hydrocarboné qu'est le bitume. Les laitiers de haut fourneau constituent un exemple de ces déchets puisque qu'ils sont des coproduits de la fabrication de la fonte qui se présentent sous deux formes : granulée et cristallisée. Ces produits existent en quantité importante sous forme de terrils qui sont venus modifier les paysages et déranger l'environnement.

2. Matériaux utilisés

2.1. Grave laitier (GL)

C'est un mélange composé d'une grave naturelle reconstituée 0/20, d'un laitier concassé 0/20, d'un laitier granulé 0/5 et d'un activant basique (la chaux) avec une teneur en eau proche de celle de l'optimum. [NGT 09]

2.2. Grave concassé (GC) 0/20

La grave concassée 0/20 provient de l'exploitation de la carrière de l'entreprise ALTRO (Es-sabt) à Guelma, le mode d'exploitation utilisé est celui de l'abattage du massif stratifié à l'aide d'explosifs.

2.3. Laitier cristallisé (LC) 0/20

Le laitier cristallisé, chimiquement stable, est destiné à être concassé pour obtenir des granulats.

2.4. Laitier granulé (LG) 0/5

Le laitier provient du complexe sidérurgique d'El-Hadjar (Annaba). Il s'agit d'un laitier granulé de granularité 0/5mm avec une teneur en inertes égale à 0,29 %, de fraîche production, d'une couleur grise verdoyante, il présente des propriétés hydrauliques intéressantes.

2.5. Laitier granulé broyé (LGB)

Ce produit résulte du passage dans un broyeur à boulet, il est utilisé pour corriger le manque d'éléments fins du mélange, pour mieux positionner notre granulométrie dans le fuseau de référence, et pour son pouvoir hydraulique qui active la prise du laitier granulé. [NGT 09]

2.6. La chaux

La chaux vive possède une masse volumique de l'ordre de 0,9 t/m³,

- La teneur en CAO est supérieure à 95 %
- La teneur en S est inférieure à 0,05%
- Réactivité (ASTM) à 2 minutes.

3. Méthodologies expérimentales

L'étude se déroule en plusieurs étapes. La caractérisation physique et chimique est réalisée. Les constituants nécessaires pour la formulation de la grave routière sont identifiés, ensuite en cherchant les performances mécaniques à travers des essais mécaniques.

3.1. Propriétés physiques des matériaux utilisés

Conformément aux normes (NF EN 1097-6) et (NF EN 933-8) [NFJ 14, NFM 12], les propriétés physiques essentielles sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1. *Propriétés physiques des matériaux.*

Matériaux	M _{vapp Moy} [g/cm ³]	M _{vabs Moy} [g/cm ³]	E. S _{MOY} (%)	Spécification
LC 0/20	1,54	2,69	92,76	ES ≥76%
GC 0/20	1,81	2,55	78,18	
LG0/5	0,73	2,71	97,91	
LGB 0/0.08	1,32	2,94	89,76	

3.2. Composition chimique du laitier utilisé [NFF 14]

Les valeurs de l'indice de basicité du laitier sont supérieures à l'unité, ceci montre qu'ils sont de nature basique. Celui d'El – Hadjar, utilisé dans notre étude, est de l'ordre de 1,12. Les compositions chimiques sont présentées dans le Tableau2.

Tableau 2. *Composition chimique des matériaux utilisés.*

Oxyde%	CaO	SO ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaCO ₃	Mn ₂ O ₃	KO	PO ₅	TiO ₂	P.AF.
GC	42.10	-	4.32	1.63	-	95,69	-	-	-	-	41,35
LG	45.78	0.38	34.99	9.79	3.92	-	2.47	0.86	0.01	0.34	0.50
LC	41,6	5,1	-	0,35	40,33	-	0,29	0,07	0,21	0,05	1,02

3.3. Essais mécaniques

Conformément aux normes (NF EN1097-2 §5) et (NF EN 1097-1) [NFE 10, NFE 11], les résultats sont présentés dans le Tableau3.

Tableau 3. *Essais Los – Angeles, Fragmentation dynamique et Micro – Deval.*

Matériaux	Los Angeles (LA%)	Fragmentation dynamique (FD %)	Micro Deval sec (MDS %)	Micro Deval Humide (MDE%)	Spécification
Grave concassé GC	23	25	5	17	LA≤25% FD≤25% MDE≤20%
Laitier cristallisé LC	24	22	4,4	20	

4. Composition de la grave-laitier

Les mélanges utilisés dans cette étude regroupent trois formulations de différents pourcentages. Ces formules nécessitent un laitier granulé broyé catalysé à la chaux pour corriger et améliorer les performances du mélange qui est constitué de : grave concassée GC (naturelle) 0/20, laitier concassé LC 0/20, laitier granulé LG 0/5; laitier granulé broyé LGB et la chaux.

Le choix de ces formules a été établi de manière à entrer dans le fuseau de référence conformément aux dispositions du C.T.T.P (Guide de réhabilitation des routes: Fascicule 02) [BOU 09].

Les graves-laitiers, objet de cette étude doivent avoir une granularité continue caractérisée par deux facteurs :

-La dimension maximale des éléments D = 20 mm permet d'obtenir une grande homogénéité en facilitant le malaxage et réduisant la ségrégation.

-Le fuseau de référence de la grave-laitier 0/20, définit la zone dans laquelle doit être situé le fuseau de régularité du mélange, dont les courbes granulométriques moyennes des matériaux apparaissent sur la figure 1, [NFT 12].

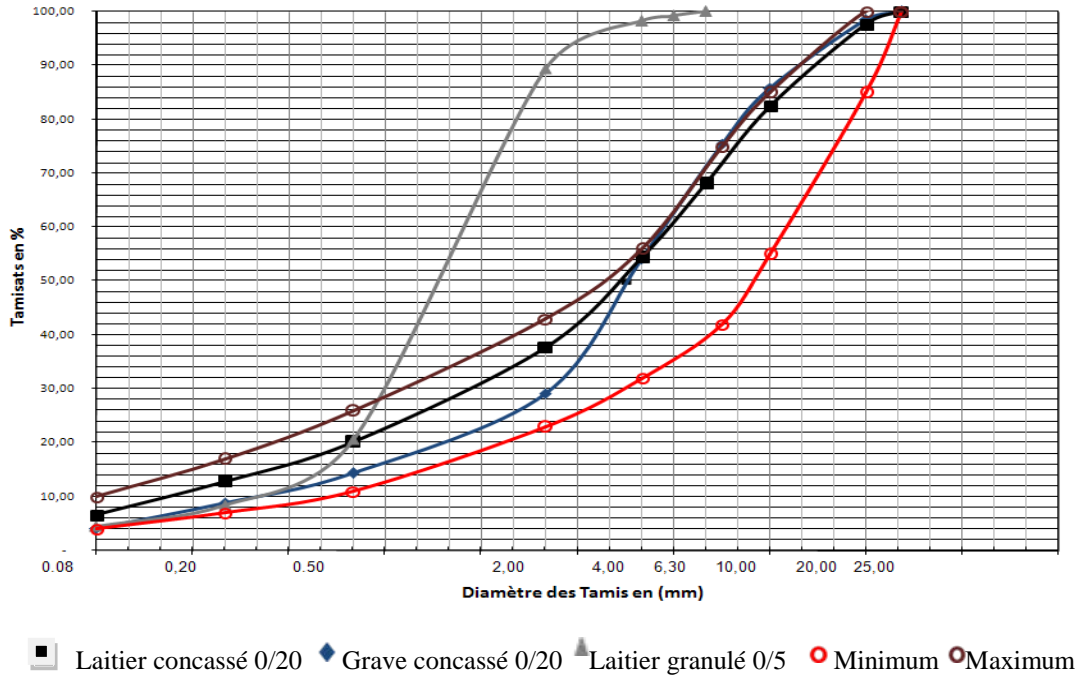


Figure 1. Courbes granulométriques des matériaux et fuseau de régularité du mélange.

Les solutions retenues au niveau de la grave-concassée et des laitiers sont:

1^{er} Formule: 10% - grave concassée (G-C): 0/20.

75% -laitier concassé (L-C) : 0/20.

15% - laitier granulé (L-G) : 0/5.

2^{ème} Formule: 20% - grave concassée (G-C): 0/20.

70% - laitier concassé (L-C) : 0/20.

10% - laitier granulé (L-G) : 0/5.

3^{ème} Formule: 40%- grave concassée (G-C): 0/20.

55% -laitier concassé (L-C) : 0/20.

05% - laitier granulé (L-G) : 0/5.

Les compositions granulométriques de ces formules nécessitent l'ajout de 03% de laitier granulé broyé catalysé à 1,5 % de chaux vive, pour corriger le manque des fines (0,08-0,2), ce traitement permet une activation plus rapide du mélange et conduisant à une courbe s'inscrivant parfaitement dans le fuseau spécifique de référence (figure 2).

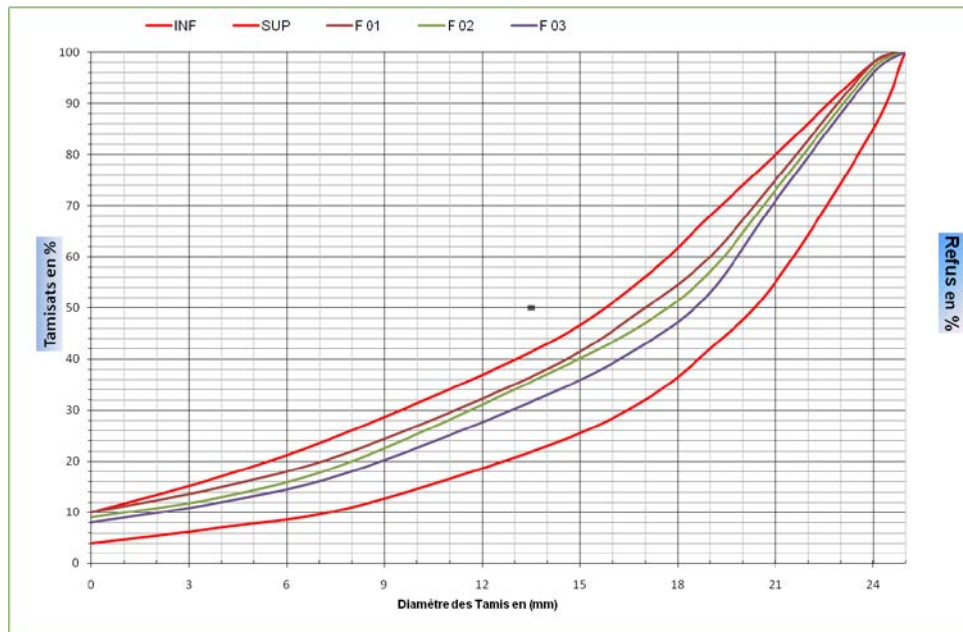


Figure 2. Courbes granulométriques des 03 formules avec 03% de LGB.

5. Comportement mécanique des mélanges retenues

5.1. Essai Proctor [NFO 14]

Pour la réalisation des éprouvettes, l'essai principal consiste à la détermination de la teneur en eau optimale de compactage des formulations retenues. La figure 3 représente la variation de la densité sèche des trois formulations en fonction de la teneur en eau.

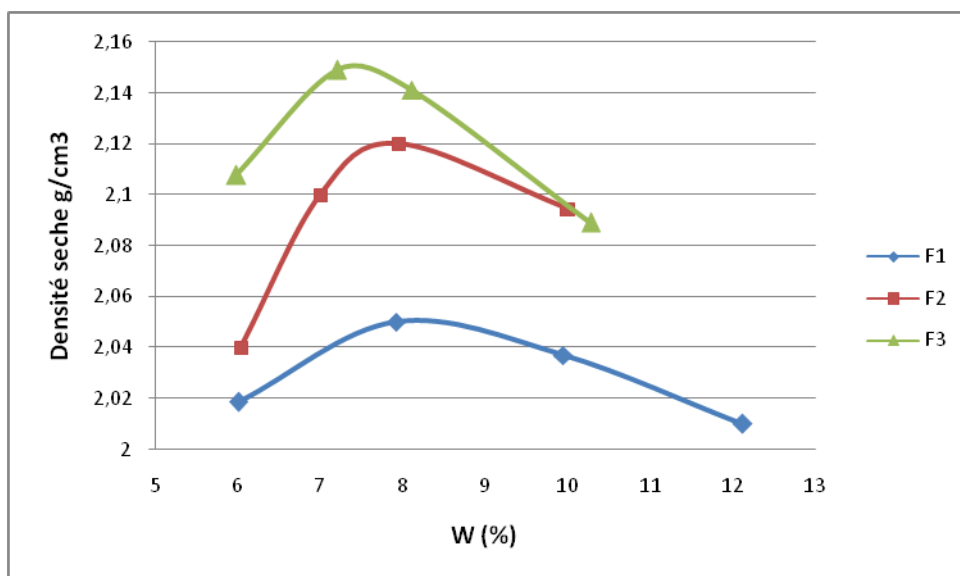


Figure 3. Courbes Proctor F1, F2, F3.

5.2. Essai de compression [NFA 12]

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression de l'éprouvette. On prépare les matériaux à des teneurs en eau optimales obtenues par le Proctor modifié (P.M) chacune correspond à une formulation donnée (à étudier).

La 1^{ère} Formulation malaxée a une teneur en eau $W1 = 8 \%$

La 2^{ème} Formulation malaxée a une teneur en eau $W2 = 7,75 \%$

La 3^{ème} Formulation malaxée a une teneur en eau $W3 = 7,2\%$

Les éprouvettes sont réalisées avec le moule C.B.R, le matériau est compacté en cinq couches recevant chacune 56 coups par la dame du Proctor modifié.

Les éprouvettes fabriquées, sont conservées dans leur moule pendant 24 heures, afin que la prise se manifeste, permettant le démoulage de l'éprouvette pour la conservation.

La machine d'essai de compression est une presse hydraulique de force et de dimension appropriées à l'éprouvette à tester et répondant aux prescriptions des normes NFP 18-411 et NFP 18-412.

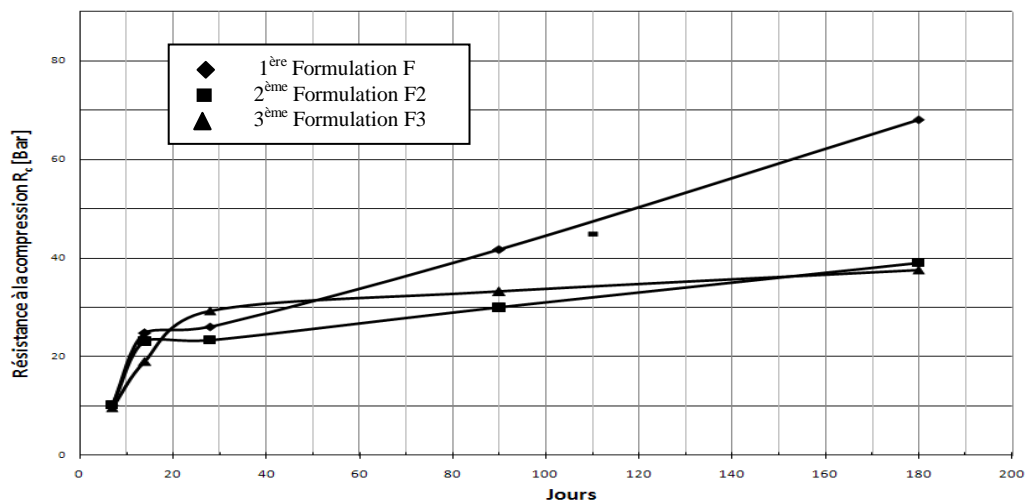


Figure 4. Résistances à la compression en fonction du temps.

D'après les courbes représentées dans la figure 4, une première hydratation des laitiers a révélé une bonne évolution des trois formulations de 7 à 14 jours. Au delà de 14 jours, on assiste à une deuxième hydratation plus lente, après 28 jours l'évolution des résistances est considérable pour la 1^{ère} formulation et tout à fait modeste pour les deux autres. La 1^{ère} composition admet une bonne hydratation à long terme avec un saut de résistance très net, par contre l'hydratation reste lente pour la 2^{ème} et la 3^{ème} formulation au dessus de 90 jours.

5.3. Essai de traction par fendage [NFF 12]

L'essai a pour but de connaître la résistance à la traction de l'éprouvette. On procède généralement par l'essai de fendage dit "essai Brésilien" sur éprouvette cylindrique identiques à celles utilisés en compression.

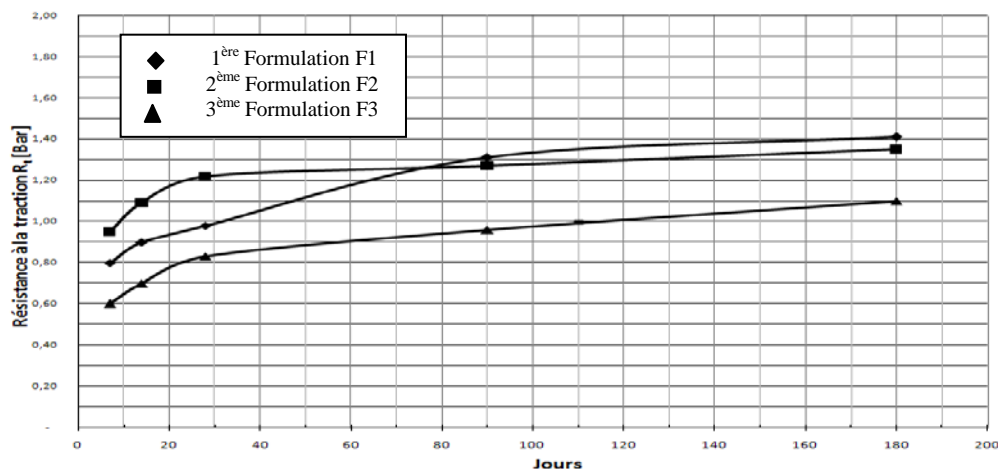


Figure 5. Résistances à la traction en fonction du temps.

D'après les courbes représentées sur la figure 5, les essais en traction montrent que les résistances au delà de 90 jours sont voisines pour la 1^{ère} et la 2^{ème} formulation. Cette remarque est très importante et spécifique par une bonne stabilisation de l'hydratation des laitiers pour un temps de cure de 7 à 180 jours. Le graphe montre aussi une faible résistance de la 3^{ème} formulation par rapport aux deux autres. Il est important de remarquer que le comportement est meilleur pour la 2^{ème} formule de 7 à 90 jours. L'évolution de la première formule est proche à la deuxième pour un temps de cure varie entre 90 et 180 jours.

6. Conclusion

Les résultats obtenus montrent que le traitement au laitier granulé dans des techniques de la grave laitier est très intéressant techniquement pour la valorisation des matériaux locaux et la construction des couches d'assises des chaussées. L'amélioration de la portance CBR des couches traitées au laitier témoigne d'une amélioration de leur résistance au poinçonnement ce qui leur permet de mieux résister aux charges induites par le trafic.

Ces résultats confirment le rôle physique du laitier granulé qui consiste à remplir les vides entre les grains du mélange. Ce remplissage fait augmenter la compacité du mélange et par conséquent sa résistance mécanique.

La réussite des techniques de grave-laitier est liée à son hydraulité et au temps de cure en fonction du pourcentage du laitier -concassée et granulé. Selon les formulations obtenues, elle admet une bonne hydratation à long terme ce qui facilite le durcissement et l'arrangement du mélange utilisé en corps de chaussée par le compactage sous circulation et l'exploitation immédiate, chose favorable vis-à-vis de la fissuration qui ne peut se produire qu'avec des réactions exothermiques brutales.

En outre les résistances obtenues sont bénéfiques pour une structure de chaussée performante aussi bien en trafic intense que modéré.

Ces formulations vont conduire à concevoir des chaussées de moindre épaisseur induisant une économie considérable des matériaux.

Ces travaux élaborés ouvrent une voie sur la recherche des performances des chaussées en grandeur réelles sur des planches expérimentales par essais de plaques, pour la détermination des modules de déformations en surface d'un sol in-situ, et conduisent à connaître les mécanismes de l'évolution de la cinétique des réactions à fort taux de laitier-granulé et concassé, et mettre en évidence les effets à plus long terme qui restent désormais inconnues. Une auscultation, vis-à-vis les fissurations transversales et longitudinales doivent être suivies pour la maîtrise de ces nouvelles formulations.

7. Bibliographie

- [BOU 09] BOUDJEMIA F., MELBOUCI B., « Etude des déformations permanentes sous chargements répétés des matériaux granulaires non traités », Premier Symposium Méditerranéen de Géoengineering SMGE09, Alger, 20-21 juin 2009, Algérie , p. 334-341.
- [NFA 12] NF EN 12390-3., Résistance à la compression, Essai de compression, avril 2012.
- [NFE 10] NF EN1097-2 §5., Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, Partie 2, Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation ,Los Angeles, 2010.
- [NFE 11] NF EN 1097-1., Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, Partie 1, Détermination de la résistance à l'usure, micro-Deval, 2011.
- [NFF 12] NF EN 12390-6., Résistance à la traction par fendage, Essai de fendage, avril 2012.
- [NFF 14] NF EN 1744-1+A1., Essais visant à déterminer les propriétés chimiques des granulats, Partie 1, analyse chimique, Essais visant à déterminer les propriétés chimiques des granulats, Partie 1, analyse chimique, Février 2014.
- [NFJ 14] NF EN 1097-6., Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, Partie 6, détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau, Janvier 2014.
- [NFM 12] NF EN 933-8., Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats, Partie 8, évaluation des fines, Équivalent de sable, Mars 2012.
- [NFO 14] NF P94-093., Sols., reconnaissance et essais, Détermination des références de compactage d'un matériau, Essai Proctor Normal, Essai Proctor modifié, Octobre 2014.
- [NFT 12] NF EN 933-1., Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats, Partie 1, détermination de la granularité, Analyse granulométrique par tamisage, Mai 2012.
- [NGT 09] NGUYEN V., H., Effects of laboratory mixing methods and RAP materials on performance of hot recycled asphalt mixtures, 2009, Nottingham.