

UTILISATION DES LAITIERS DE HAUTS FOURNEAUX DANS LA CONSTRUCTION DES ROUTES

Reçu le 03/06/2006 – Accepté le 15/04/2008

Résumé

Les structures des chaussées routières sont dimensionnées pour garantir l'écoulement du trafic dans des bonnes conditions de sécurité et de confort pour les usagers, et assurer son exploitation sur une période de service minimal fixée au stade de l'élaboration du projet.

Les enjeux économiques sont importants, tant au niveau du dimensionnement (couches de plus en plus minces, mise au points de produits innovants,...) que de l'entretien de la chaussée (investissements plus durables dans le temps). Il apparaît donc nécessaire d'approfondir les études menées sur les matériaux (les liants, granulats, etc....) et des différentes couches constituant la chaussée.

En Algérie, l'usine sidérurgique d'El – Hadjar (ANNABA), du fait de son activité, génère une production importante de déchets industriels (laitier) qui pose un problème de stockage et de pollution. A l'instar des pays industrialisés ce produit, présente une matière première abondante à coût bas. Qui doit être exploité à grande échelle dans les travaux publics.

L'étude porte sur l'influence de substitution du laitier cristallisé d'El- Hadjar, en proportions croissantes, sur les performances mécaniques :

- a) couche de forme
- b) couche de roulement

Les résultats des analyses chimiques, mécaniques et physiques du laitier d'el- Hadjar, comparés à ceux des granulats naturels, permettent de l'utiliser comme granulats dans la construction des routes .

Mots clés : Chaussée, couche de forme, enrobé bitumineux, essais mécaniques, laitier de haut fourneau.

Abstract

The structures of road way are calculate the dimensions to guarantee the follow traffic in maid condition security and comfort to user; and to provide their exploitation on minimal period fixed during elaboration the project.

The economic stacks are Imported for the dimensioning [thin pavements, new products] and also the maintenance of the road [investments]. It looks as it is needed to deepen the studies around the material of the pavements and in particular for bitumen and concrete bituminous.

In Algeria, the plant El Hadjar [Annaba] is generating important quantities of slag which is creaking a problem of storage and pollution. As in many industrial countries, the product is a raw material, cheap and abundant, should be used extensively in building works.

The study concerns the use of the crystallized slag from EL Hadjar, in increasing proportions on the mechanical performances of :

- a) the form layer
- b) the rolling layer

The results of the chemical, mechanical and physical analysis of the slag will be compared to the naturals granulats and can be eventually used in the construction of road pavements.

Keywords : Pavement, form layer, concrete bituminous, mechanical tests, slag.

K. ROUBAH
M.N. GUETTECHE
Département de Génie Civil
Faculté des Sciences de
l'Ingénieur - Université
Mentouri Constantine -
Algérie

ملخص

يتم تصميم هيكل التربة وتحديد أبعادها بهدف إعطاء سيولة آمنة للمرور وتوفير الراحة لمستعملها. أيضا ضمان استغلالها في مدة عمل دنيا محددة أثناء إنجازها.

الناحية الاقتصادية تعتبر مهمة أثناء تصميم الطرقات (طبقات رقيقة, استعمال مواد جديدة...) وصيانتها (استثمار دائم مع الوقت). فأصبح من الضروري تعميق الدراسات التطبيقية للمواد المستعملة في الطرقات وخاصة الزفت والخرسانة الزفتية.

في الجزائر ينتج مصنع الحجار للحديد والصلب كميات معتبرة من النفايات الصناعية (خبث الفرن العالي), ونظرا لعدم استغلاله, طرح مشكل التخزين والتلوث. فعلى غرار البلدان المصنعة فإن هذا الناتج يستعمل بشكل واسع في الأشغال العمومية.

الدراسة التي قمنا بها تبين مدى تأثير استعمال الخبث المبلور لمصنع الحجار, بنسب متزايدة, على الخصائص الميكانيكية:

- أ) طبقة التسوية
- ب) طبقة السير

التحليل الكيميائي والتجارب الميكانيكية لخبث الفرن العالي أثبت أنه يمكن استعماله في إنجاز الطرقات.

الكلمات المفتاحية : طريق, طبقة تسوية, خرسانة زفتية, تجارب ميكانيكية, خبث الفرن العالي

Une chaussée est une structure multicouche constituée de trois parties principales qui ont chacune un rôle bien défini (LCPC, 1994), [1].

Tout d’abord le sol terrassé ou sol-support est surmonté généralement d’une couche de forme. L’ensemble sol-couche de forme représente la plate-forme support de la chaussée.

Puis viennent la couche de base et la couche de fondation, formant ainsi la couche d’assise. Les couches d’assise apportent à la chaussée la résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic et répartissent les pressions sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à un niveau admissible.

Enfin, la couche de surface se compose de la couche de roulement, et éventuellement d’une couche de liaison entre la couche de roulement et la couche d’assise.

La couche de roulement est la partie superficielle du corps de la chaussée. Elle a deux fonctions ; d’une part, elle assure la protection des couches d’assise vis-à-vis des infiltrations d’eau ; d’autre part elle confère aux usagers un confort de conduite d’autant plus satisfaisant que les caractéristiques de surface sont bonnes (LCPC 1994), [1].

L’étude réalisée est la suivante :

Pour réaliser la couche de forme, on utilise des matériaux naturels et de carrière disponibles au voisinage du chantier, le laitier est introduit avec un pourcentage successif. Le résultat de l’essai Proctor fixe le pourcentage optimal du laitier utilisé.

L’enrobé bitumineux est un mélange dans des proportions choisies de granulats et de liant (5 %) pour atteindre des caractéristiques mécaniques meilleures, on introduit un pourcentage de laitier dans la formulation, en conservant dans les premiers temps un seul type de bitume.

En second lieu, on utilise plusieurs types de bitumes modifiés par les polymères, dans le sens de l’amélioration des caractéristiques mécaniques des bitumes utilisés, et l’augmentation de la durabilité de l’enrobé bitumineux (surtout sa résistance à la fatigue).

Dans ce travail, on utilise un seul type de bitume.

1. COUCHE DE FORME

La figure 1 montre les différentes couches d’une chaussée.

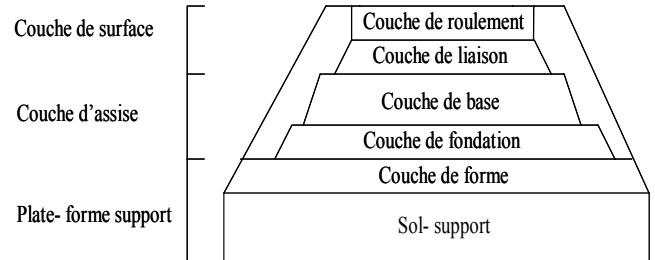


Figure 1 : Constitution d’une structure de chaussée

1.1. Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés sont les suivants :

- a) des matériaux d’origine naturelle, concassés : un tout-venant concassé provenant de la carrière SOREST, Oued Sagan Wilaya de Mila.
- b) des matériaux d’origine naturelle, roulé : un tout-venant de « oued »
- c) des matériaux d’origine artificielle, laitier granulé et laitier cristallisé, provenant de l’usine sidérurgique d’El-Hadjar (Annaba).
- d) on utilise également un sol de type (tuf – calcaire).

1.2. Prélèvement et échantillonnage

Les essais réalisés au laboratoire de matériaux de génie civil de Constantine et au laboratoire de Travaux Publics de l’Est, ont portés sur des échantillons obtenus suite à des prélèvements effectués sur des tas pour le cas des matériaux granulaires, ou sur site pour le tuf calcaire, tout en respectant les prescriptions concernant le prélèvement et l’échantillonnage [2].

Tableau 1 : Composition chimique du laitier cristallisé

| CaO % | Al ₂ O ₃ % | MgO % | Fe ₂ O ₃ % | SiO ₂ % | MnO % | K ₂ O % | Na ₂ O % | TiO ₂ % | P ₂ O ₅ % | IP= $\frac{CaO}{SiO_2}$ |
|-------|----------------------------------|-------|----------------------------------|--------------------|-------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|-------------------------|
| 41.6 | 5.1 | - | 0.35 | 40.33 | - | 0.29 | 0.07 | 0.21 | 0.05 | 1.02 |

1.3. Essais d’identification

1.3.1. Composition chimique du laitier

Elle dépend de la charge ferrière du haut fourneau et est ajustée de façon à permettre l’élimination des éléments nuisibles à la marche du haut fourneau et à la qualité de la fonte [3].

Tableau 2 : Composition chimique du laitier granulé

| CaO % | Al ₂ O ₃ % | MgO % | Fe ₂ O ₃ % | SiO ₂ % | MnO % | K ₂ O % | Na ₂ O % | TiO ₂ % | P ₂ O ₅ % | IP= $\frac{CaO}{SiO_2}$ |
|-------|----------------------------------|-------|----------------------------------|--------------------|-------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|-------------------------|
| 39.55 | 7.40 | 4.33 | 1.51 | 37.82 | 2.09 | 0.23 | 0.09 | 0.19 | 0.11 | 1.04 |

Les valeurs de l'indice de basicité des deux laitiers 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.

1.3.2. Teneur en eau et densité

Tableau 3 : Teneur en eau initial des différents matériaux

| Le matériau | La teneur en eau (%) |
|----------------------|----------------------|
| Laitier granulé | 10,5 |
| Laitier cristallisé | 1,05 |
| Tuf calcaire | 4,10 |
| Tout venant calcaire | 1,4 |
| Tout venant naturel | 0,5 |

Tableau 4 : Densité des différents matériaux

| Le matériau | Densité apparente (t/m ³) | Densité absolue (t/m ³) |
|----------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Laitier granulé | 1,08 | 2,83 |
| Laitier cristallisé | 1,4 | 2,67 |
| Tuf calcaire | 1,82 | 2,10 |
| Tout venant calcaire | 1,39 | 2,65 |
| Tout venant naturel | 1,50 | 2,85 |

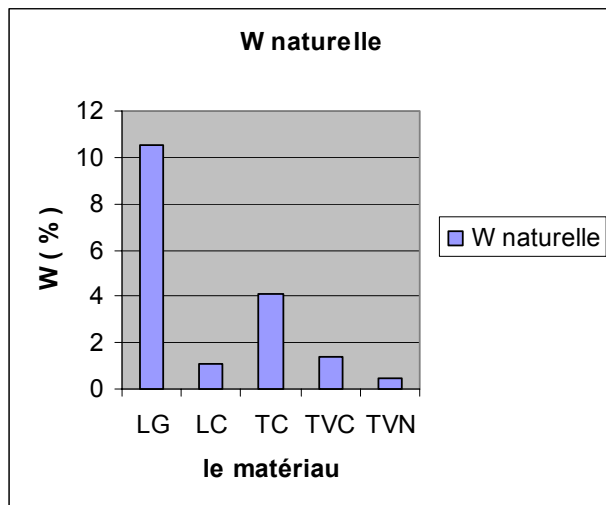


Figure 2 : Teneur en eau initial des différents matériaux

Tableau 5 : Paramètres mécaniques des différents matériaux

| Le matériau | Les essais de comportement mécanique | | | |
|----------------------|--------------------------------------|-------------|-------------------------|--------------------|
| | Friabilité du Sable | Los Angeles | Fragmentation Dynamique | Micro Deval Humide |
| Laitier granulé | 15.20% | - | - | - |
| Laitier cristallisé | - | 24% | 22% | 26.8% |
| Tuf calcaire | - | - | - | - |
| Tout venant calcaire | - | 25% | 22% | 23% |
| Tout venant naturel | - | 15% | 14% | 21% |

On constate que la teneur en eau est élevée dans le cas du laitier granulé.

Ceci est dû à son bilan thermique qui tient compte de la variation d'enthalpie ; quand le laitier passe de 1450°C à 100 °C, il faut 600 litres d'eau pour assurer son refroidissement et sa vitrification.

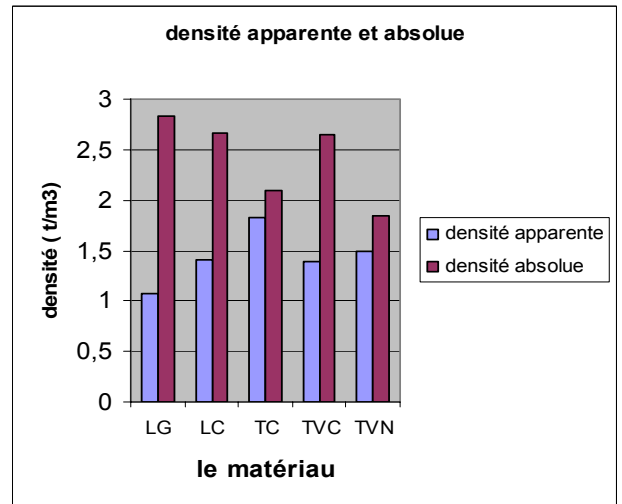


Figure 3 : Densité des différents matériaux

1.4. Essais mécaniques

Les paramètres de comportement mécanique sont considérés dans le but de distinguer les matériaux dont la fraction granulaire est susceptible de résister au trafic de ceux qui risquent de se fragmenter.

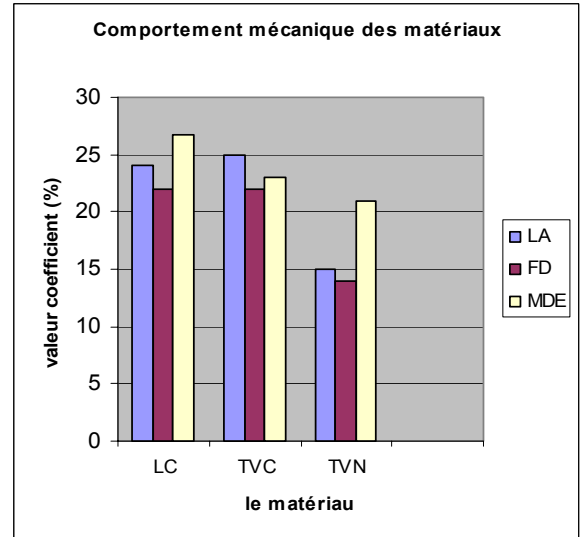


Figure 4 : Comportement mécanique des matériaux

Essai de compactage (PROCTOR)

L'essai PROCTOR [4] permet d'illustrer le comportement optimal d'un matériau au compactage. Il donne le couple ($W_{Optimum}$, $\gamma_{d\ optimum}$)

Tableau 6 : Compactage essai Proctor

| Le matériau | $W_{Optimum} (\%)$ | $\gamma_{d optimum} (g/cm^3)$ |
|----------------------|--------------------|-------------------------------|
| Laitier granulé | 14.6% | 1.26 |
| Laitier cristallisé | 2.5% | 1.75 |
| Tuf calcaire | 13.6% | 1.85 |
| Tout venant calcaire | 6.0% | 2.16 |
| Tout venant naturel | 13.1% | 1.85 |

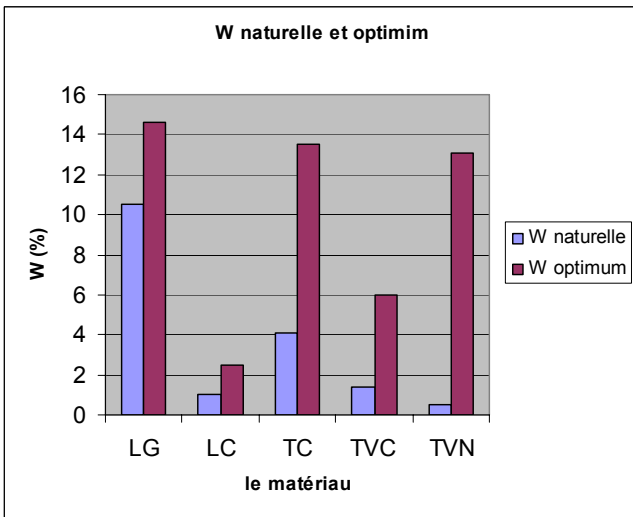


Figure 5 : Teneur en eau naturelle et optimum des différents matériaux

On constate que le laitier granulé présente : $W_n = 10,2\%$ et $W_{op} = 14,6\%$ et le laitier cristallisé présente : $W_n=0,6\%$ et $W_{op}=2,5\%$, ce qui ne demande pas une grande quantité d'eau pour leur compactage.

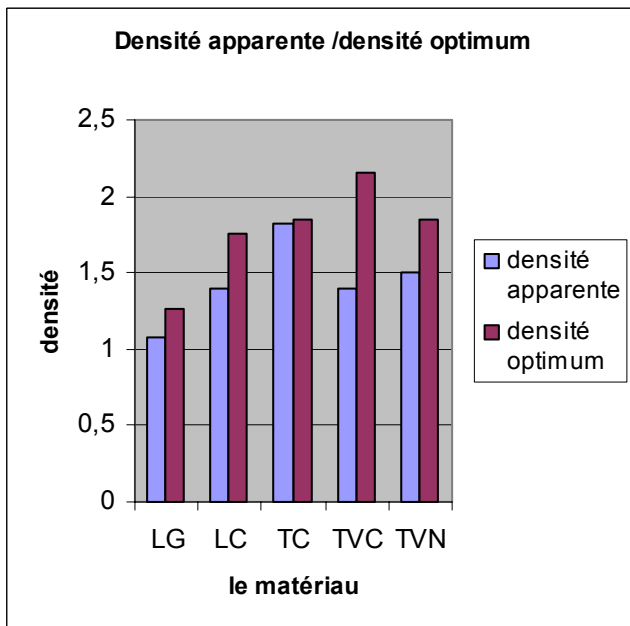


Figure 6 : Densité apparente et densité absolue des différents matériaux

On constate que la densité du laitier présente un écart non négligeable comparée à la densité de Proctor optimum, ceci reflète la sensibilité du matériau à l'opération du compactage (figure 6).

1.5. Correction du laitier

Dans le but d'améliorer les caractéristiques mécaniques du laitier, on a formulé des mélanges laitier – tuf calcaire avec des pourcentages différents, pour cela on a élaboré les mélanges suivants :

Tableau 7 : Formulation des mélanges

| Mélange | Laitier granulé | Tuf calcaire | Laitier cristallisé |
|---------|-----------------|--------------|---------------------|
| A | 100% | 0% | - |
| B | 90% | 10% | - |
| C | 80% | 20% | - |
| D | 70% | 30% | - |
| E | 0% | 100% | - |
| F | 50% | - | 50% |

L'essai Proctor, donne les résultats suivants :

Tableau 8 : Essai Proctor

| Mélange | $W_{opm} (\%)$ | $\gamma_{d opm} (t/m^3)$ |
|---------|----------------|--------------------------|
| A | 14.6 | 1.26 |
| B | 16.1 | 1.38 |
| C | 15.9 | 1.46 |
| D | 15.1 | 1.55 |
| E | 13.6 | 1.85 |
| F | 11.8 | 1.67 |

Dans le cas d'une correction avec le tuf, on remarque une légère augmentation de la teneur en eau optimale. Cette dernière tant à diminuer en fonction du pourcentage d'ajout. En ce qui concerne la densité, on constate un gain apparent. Une correction avec 30% de tuf fait augmenter la densité de 30%.

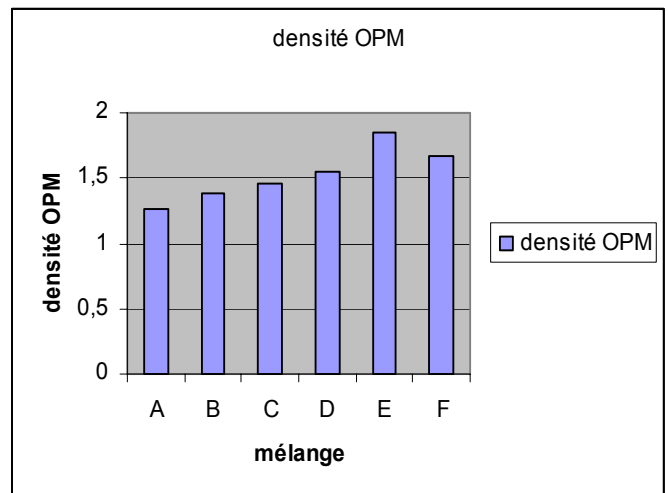


Figure 7 : Densité optimum des mélanges (figure 6)

Dans le cas d'une correction avec le laitier cristallisé, les résultats montrent qu'il y a une diminution dans l'optimum Proctor accompagné E d'un gain de densité de l'ordre de 35%.

Pour les mélanges tuf-calcaire, on constate que la meilleure densité est donnée par le mélange E.

2. COUCHE DE ROULEMENT (enrobé bitumineux)

2.1. Essais d'identification des matériaux utilisés

2.1.1. Les granulats

Les granulats se répartissent suivant leur taille moyenne en plusieurs familles : fines, sables, gravillons et cailloux. Les diamètres minimaux et maximaux de ces familles sont normalisés.

La granularité est la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat. Elle conditionne la compacité de l'enrobé ainsi que ses caractéristiques mécaniques.

Pour constituer le squelette granulaire de l'enrobé, on mélange les différentes classes granulaires dans une certaine proportion. La distribution de la taille des différents grains (des plus gros au plus petit) constitue la courbe granulométrique du mélange.

Celle-ci peut être continue ou discontinue (c'est à dire qu'une ou plusieurs fractions granulaires peuvent manquer), selon la destination du mélange et les propriétés visées.

Pour exemple la courbe granulométrique des enrobés drainant est fortement discontinue, ce qui permet d'obtenir une porosité élevée après la mise en place [7].

Les granulats utilisés proviennent des carrières de concassage de la région de Constantine.

2.1.2. Le bitume

2.1.2.1. Origine et application des bitumes

Les bitumes sont composés de carbone et d'hydrogène, d'où leur nom d'hydrocarbure, le bitume est utilisé dans l'industrie pour ses propriétés d'étanchéité et d'isolation (thermique et acoustique).

Néanmoins, les applications routières sont les plus nombreuses puisque, en effet, 90% de la production

de bitume est utilisée sous forme d'enrobés et d'enduits superficiels.

Par ailleurs, on estime que la totalité des réserves mondiales de pétrole brut devrait dépasser les 600 Gt, ce qui laisse présager un long et bel avenir à cette industrie [5].

En outre, il convient de distinguer les termes de bitume et de liant hydrocarboné trop souvent confondus. En effet, le liant hydrocarboné peut être bitumineux, goudronneux, à base de bitume fluidifié....

2.1.2.2. Bitume utilisé

Le bitume utilisé est de 1 classe 40/50 [8], bitume pur obtenu par la distillation sous vide du pétrole suivi d'un soufflage à l'air. Ses caractéristiques sont les suivantes :

Tableau 9 : caractéristiques du bitume

| Pénétration à 25 °C | Point de ramollissement et anneau | Densité relative à 25°C | Point de flamme °C | Perte de chaleur 163°C pendant 5 heures |
|---------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------|---|
| 46 | 57 | 1,05 | 264 | < 1% |

2.2. Essais mécaniques sur les granulats :

Les résultats des essais réalisés sont regroupés dans les tableaux suivants :

Tableau 10 : Essai Los Angeles

| Provenance de granulats | Los Angeles % | Fragmentation dynamique % | Classe granulaire pour l'essai | Spécification |
|-------------------------|---------------|---------------------------|--------------------------------|---------------|
| Carrière 1 | 24 | 28 | 4 – 6,3 | ≤ 25 |
| Carrière 2 | 22,4 | 23 | 4 – 6,3 | ≤ 25 |
| Carrière 3 | 23 | 25 | 4 - 6,3 | ≤ 25 |
| Laitier cristallisé | 24 | 22 | 4 – 6,3 | ≤ 25 |

Tableau 11 : Essai Micro – Deval

| Provenance de granulats | Micro Deval sec MDS % | Micro Deval humide MDE % | Classe granulaire pour l'essai | Spécification |
|-------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------------|---------------|
| Carrière 1 | 4,4 | 17 | 4 – 6,3 | MDE ≤ 20 |
| Carrière 2 | 5 | 20 | 4 – 6,3 | MDE ≤ 20 |
| Carrière 3 | 5 | 18 | 4 - 6,3 | MDE ≤ 20 |
| Laitier cristallisé | 4,4 | 20 | 4 - 6,3 | MDE ≤ 20 |

2.3. Formulation des enrobés bitumineux :

L'enrobé bitumineux hérite des caractéristiques viscoélastiques du liant qu'il contient. Ses propriétés mécaniques dépendent de la durée de sollicitation (ou de sa fréquence) et de la température.

Il entre dans la catégorie des matériaux viscoélastiques et thermoplastiques [6].

Dans la littérature, les matériaux bitumineux sont généralement considérés comme étant homogènes, isotropes, viscoélastiques, linéaires et thermo susceptibles.

Formulation de l'enrobé

La formulation d'un enrobé doit répondre aux exigences des normes en vigueur et assurer certains paramètres :

- maniabilité de l'enrobé, qui est une caractéristique primordiale puisqu'elle facilite l'obtention d'un bon uni de chaussée.
- résistance à l'ornièrage de l'enrobé bitumineux, car l'absence d'ornièrerie sur les routes accroît la sécurité des usagers.
- résistance à la fissuration thermique et par fatigue des enrobés.

Le mélange obtenu doit présenter un fuseau granulométrique situé à l'intérieur de l'intervalle imposé par les normes en vigueur.

La proportion des mélanges adoptés est la suivante (composition utilisée par plusieurs entreprises de réalisation à l'Est Algérien) :

- Gravier 8/15 : 38 %
- Gravelets 3/8 : 20 %
- Sable 0/3 : 42%

Pour analyser l'influence du laitier sur le comportement mécanique et rhéologique des enrobés, on substitue le laitier en proportions successives par un pas de 5% de l'ensemble des éprouvettes.

Pour chaque formulation, la courbe du mélange doit vérifier le fuseau spécifique du BB 0/14.

On opère d'abord sur la fraction 3/8, où le pourcentage du laitier varie de 0% (essai témoin) jusqu'à ce que la totalité des graviers 3/8 soit en grave laitier, ce qui correspond à 20% .

L'objectif principal est de trouver une valeur optimale de laitier à injecter de façon à avoir des enrobés de qualités meilleures.

Pendant la campagne d'essais, on a sélectionné les agrégats de la carrière 2 (agrégats de caractéristiques mécaniques meilleures).

Essais mécaniques :

Stabilité Duriez :

La stabilité Duriez est un facteur important dans la résistance mécanique de la couche de roulement (figure 7).

On remarque que la stabilité Duriez diminue au fur et à mesure de l'augmentation du pourcentage du laitier dans le mélange (figure 8).

En comparant ces résultats avec la stabilité limite exigée par le règlement est qui est de l'ordre de 3500KN (70bars) pour un béton bitumineux BB 0/14 avec un bitume 40/50, on constate qu'on ne peut pas dépasser la valeur de 13% de laitier qui donne une stabilité de 71,6 bars.

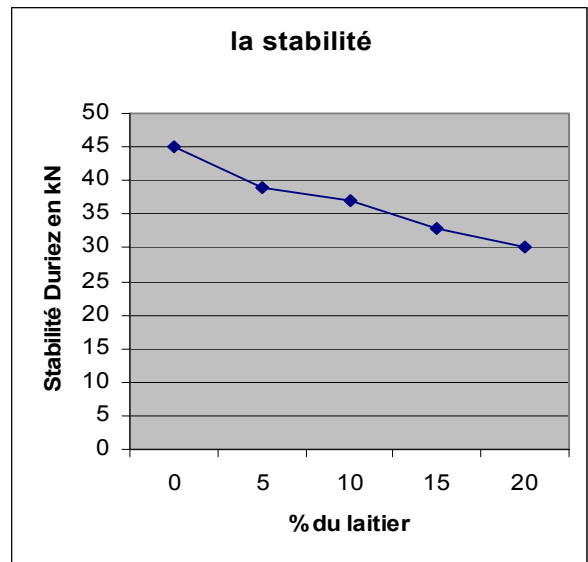


Figure 8 : Stabilité duriez

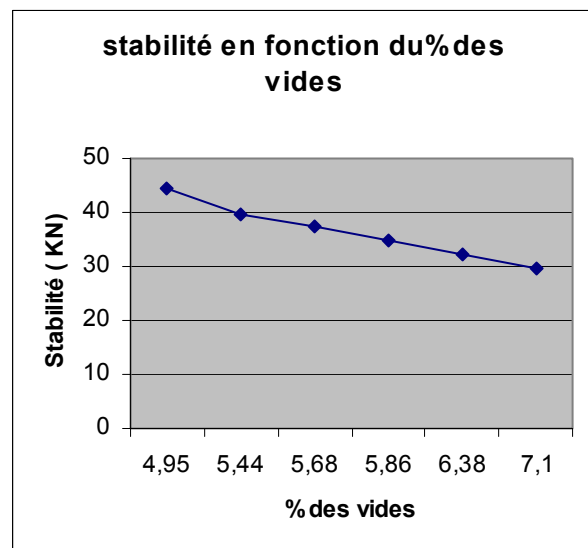


Figure 9 : Stabilité en fonction du % des vides

On constate que la stabilité est inversement proportionnelle au pourcentage des vides (figure 9).

On constate que le laitier n'a pas une influence significative sur le % d'affaissement (figure 10). Il se comporte comme un agrégat quelconque.

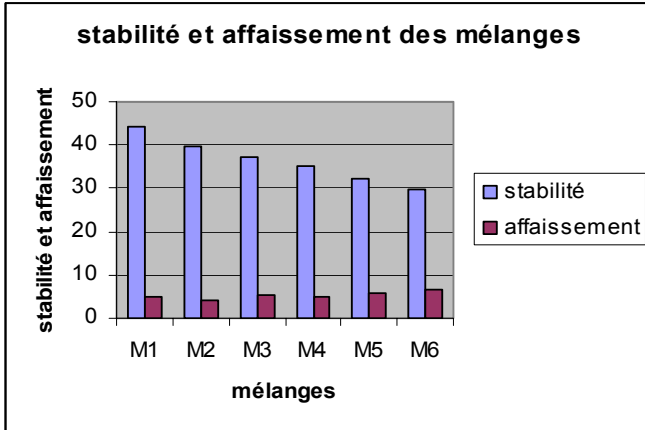


Figure 10 : Stabilité et affaissement des mélanges

Adhésivité :

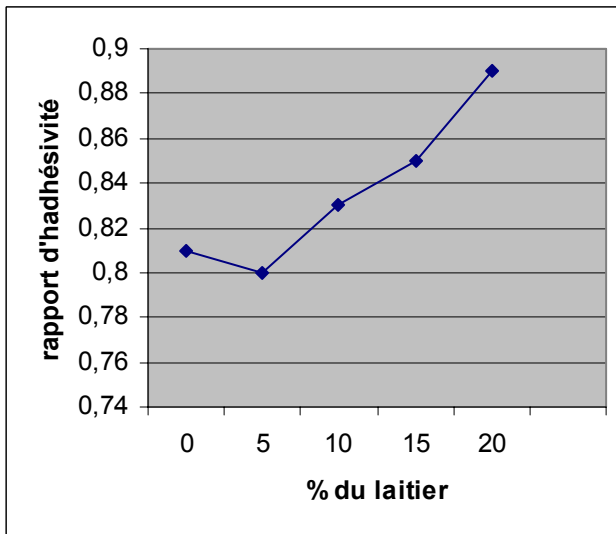


Figure 11 : Rapport adhésivité en fonction du % du laitier

L'adhésivité augmente en fonction du pourcentage du laitier. Ceci est dû à la surface rugueuse du laitier et à son affinité au liant (figure 11).

On constate la chute de la stabilité du mélange à fur et à mesure qu'on substitue le laitier, le rapport d'adhésivité $R = \text{stabilité à sec} / \text{stabilité après immersion}$ augmente ; car l'affinité du laitier au liant est meilleure que celle du granulat.

L'indice de vides de l'éprouvette augmente progressivement avec le pourcentage du laitier, car le laitier est un matériau plus poreux que le granulat naturel (figure 13).

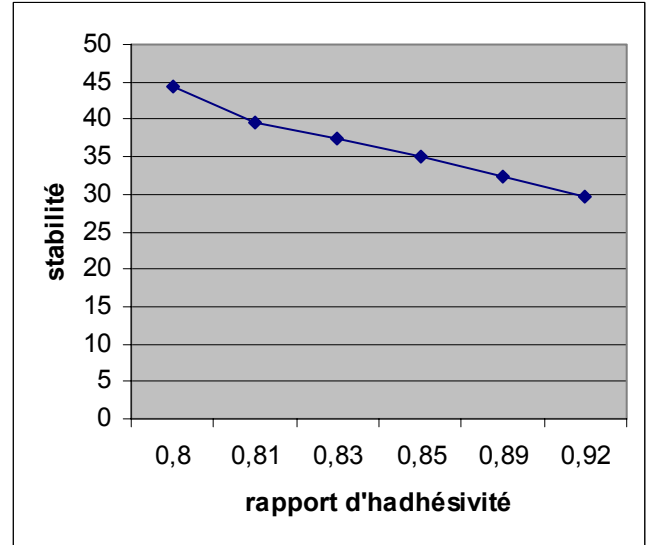


Figure 12 : Stabilité en fonction du rapport d'adhésivité

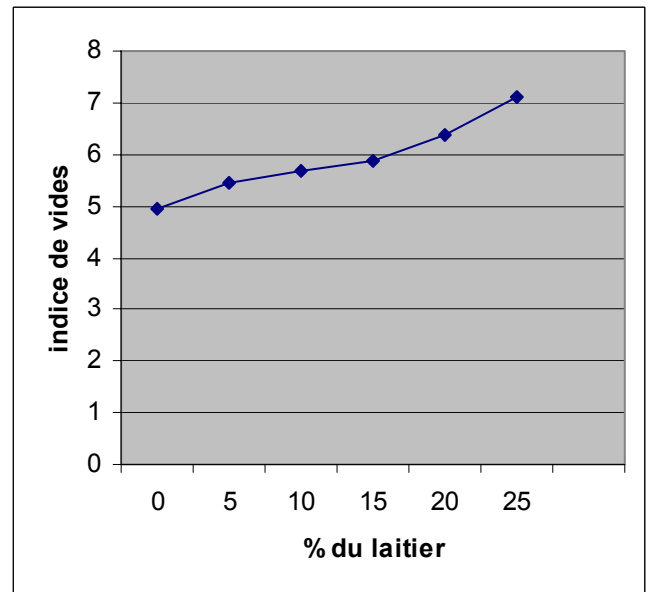


Figure 13 : Indice de vides en fonction du % du laitier

CONCLUSION

D'après l'étude bibliographique, ainsi que les résultats expérimentaux obtenus, on peut dire que les couches de formes des infrastructures routières, constituent une des utilisations qui peut valoriser les laitiers produits ou stockés avec des quantités importantes .

Les laitiers sont les mieux placés pour un tel usage, car ce sont des matériaux insensibles à l'eau, qualité indispensable pour un emploi en couche de forme.

Cette insensibilité est due essentiellement à sa propreté et à son faible pourcentage de tamisat inférieure à 80 µm.

Le laitier granulé a une composition granulométrique très serrée, ceci diminue son aptitude au compactage, il sera donc nécessaire d'effectuer une correction avec d'autre matériau (le tuf dans notre cas). Dans notre étude on a abouti à un pourcentage optimum (30 % pour le tuf).

A l'instar des pays industrialisés, l'utilisation du laitier de hauts fourneaux d'El-Hadjar dans la construction des routes, est un enjeu économique pour l'Algérie et une solution de débarrasser de l'image négative de ce sous-produit (pollution, stockage,....).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] (LCPC, 1994) LCPC : Conception et dimensionnement des structures des chaussées. Guide technique, LCPC – SETRA, 1994
- [2] R. Dupain et al. Granulats, Sols, Ciments et Bétons. Edition Casteilla. 1995
- [3] Laboratoire de contrôle de qualité de la cimenterie Hadjar El Soude
- [4] Normes françaises (NF P 94 – 093)
- [5] SHELL BITUMES, Techniques et utilisations, Ed. Société des pétroles Shell 1991.
- [6] FRANCKENL : Module complexe des mélanges bitumineux, bulletin de liaison des Laboratoires des ponts et chaussées, décembre 1977 n° spécial 5, p 181-198.
- [7] Adel Lachiheb, Application à la détermination des propriétés élastiques et en fatigue des enrobés bitumineux, thèse de doctorat (12- 2004), école nationale des ponts et Chaussées.
- [8] Produit commercialisé par Naftal –SPA Produit