



## CONGRES NATIONAL DE LA ROUTE 2018

**Formulation de la grave bitume à module élevé avec un bitume usuel**

***Cas pratique du chantier de construction de la LGV – TOARC 6***

**Auteur : Mohammed LOUARDI - LPEE**

## Table des matières

|                                                                                       |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>RESUME.....</b>                                                                    | <b>3</b>  |
| <b>1. PREAMBULE.....</b>                                                              | <b>4</b>  |
| <b>2. RAPPEL DES SPECIFICATIONS : CONSTITUANTS ET ENROBE....</b>                      | <b>5</b>  |
| 2.1 – Constituants :.....                                                             | 5         |
| 2.1.1 Granulats :.....                                                                | 5         |
| 2.1.2– Filler d’apport (éventuellement pour correction du mélange<br>granulaire)..... | 7         |
| 2.1.3– Bitume (Bitume routier usuel) .....                                            | 7         |
| 2.1.4 Dopes et additifs .....                                                         | 7         |
| 2.2 – performances de la grave bitume GB 0/14mm :.....                                | 8         |
| 2.3 – Consistance de l’étude de formulation :.....                                    | 8         |
| <b>3. FORMULATION DE LA GRAVE-BITUME DE LA LGV-TOARC6 :....</b>                       | <b>9</b>  |
| 3.1 Caractéristiques des constituants :.....                                          | 9         |
| 3.1.1 Granulats :.....                                                                | 9         |
| 3.1.2 Bitume :.....                                                                   | 11        |
| 3.1.2.1– Bitume de classe 40/50 .....                                                 | 11        |
| 3.1.2.2– Bitume de classe 20/30 .....                                                 | 12        |
| 3.2 Composition du mélange minéral (Mélange blanc) :.....                             | 12        |
| 3.3 Composition humide (enrobé bitumineux) : .....                                    | 13        |
| <b>4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS .....</b>                                        | <b>15</b> |

## RESUME

---

La formulation des enrobés à module élevé nécessite en règle générale l'emploi des bitumes de grade dur ou des bitumes modifiés aux polymères ou autres. Cette règle a été brisée sur le chantier de construction de la Ligne Grande Vitesse – TOARC 6 puisqu'on a pu avoir les performances d'une grave-bitume de classe 4 (Module complexe demandé  $\geq 11\,000$  Mpa) en utilisant simplement un bitume usuel de classe 40/50. La réussite de cette formulation a eu un impact très positif sur le chantier : Facilité d'exécution (Echandage et compactage faciles) et possibilité d'extension des délais de mise en œuvre (on a pu travailler même pendant la période hivernale). Ces avantages d'exécution ne sont pas offerts par les bitumes spéciaux (durs et modifiés).

A travers cette expérimentation qu'on a voulu partager avec les professionnels, on a pu montrer que parfois le recours aux moyens usuels et ordinaires peut s'avérer plus judicieux et plus réaliste que le recours aux moyens plus performants voire plus complexes.

**Mots clés :** Grave-bitume, Module de richesse, Essai PCG, Essai LPC, Essai à l'ornièreur, Module complexe, Essai de fatigue, Normes, Granulats, LGV.

## 1. PREAMBULE

---

Le présent article a pour objectif de traiter un cas spécifique des études de formulation des graves bitume de classe 4 qui nécessitent le plus souvent le recours à des bitumes spécifiques pour atteindre le niveau de performance requis par les normes en vigueur et surtout le module complexe qui doit avoir une valeur minimale de 11 000 Mpa. Cette règle « tacite » n'est pas toujours avérée et un exemple qui la contredit est le chantier de la LGV – TOARC 6 où on a pu formuler une Grave-Bitume de classe 4 rien qu'en utilisant un bitume usuel de classe 40/50.

Ainsi, il a été jugé utile de faire partager cette expérience avec le professionnel, coté administratif et coté entrepreneuriat, et ce dans le but d'enlever toute idée préconçue sur le fait que le recours aux moyens simples et usuels (tels l'utilisation d'un bitume usuel en l'occurrence de classe 40/50) ne permet pas l'obtention d'un enrobé à module élevé et que seuls les bitumes durs (20/30) ou les bitumes modifiés ont le privilège de faire aboutir à des enrobés à module élevé.

L'inconvénient de l'usage des bitumes spéciaux réside dans le fait que ces produits nécessitent des précautions spécifiques lors de la fabrication et de la mise en œuvre de la grave bitume (surtout en périodes hivernales) sans parler de la balance budgétaire qui serait affectée avec l'utilisation de ce genre de bitumes.

Néanmoins, on signale tout même que la réussite de la formulation de la grave bitume de classe 4 est tributaire de la qualité des granulats qui doivent avoir des très bonnes performances de dureté, tel est le cas des granulats issus des carrières de la région de SKHIRATE (carrières qui possèdent des bancs calcaires indurés et exemptes des faciès schisteux).

## 2. RAPPEL DES SPECIFICATIONS : CONSTITUANTS ET ENROBE

### 2.1 – Constituants :

La grave bitume est généralement constituée par un mélange minéral à trois coupures : Sable 0/4mm, Gravillon de petit calibre 4/10mm et un gravillon de calibre plus gros 10/14mm (ou 8/14mm). Les spécifications demandées sont celles de la norme NF EN 13043 pour les granulats, NF EN 12591 pour les bitumes routiers usuels, NF EN 14023 pour les bitumes modifiés par des polymères et NF EN 13924 pour les bitumes routiers de grade dur. On fera un rappel de ces spécifications :

#### 2.1.1 Granulats :

Les caractéristiques minimales sont les suivantes :

| Destination    | Caractéristique intrinsèque des gravillons | Caractéristiques de fabrication des gravillons | Caractéristiques de fabrication des sables |
|----------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| GB pour assise | Code C                                     | Code III                                       | Code a                                     |

On peut traduire ces spécifications pour les granulats des coupures qu'on a utilisées sur le chantier de la LGV – TOARC 6 (0/4mm, 4/10mm et 8/14m) comme suit :

#### - Sable 0/4mm :

| Granulométrie (% passants) |        |               |       |       | MB ou SE |       |
|----------------------------|--------|---------------|-------|-------|----------|-------|
| 2D=8                       | 1.4D=6 | D=4           | D/2=2 | 0.063 | MB       | SE(1) |
| 100                        | ≥98    | 85-99<br>e=10 | e=20  | e=6   | ≤ 2      | ≥ 60  |

(1)NF EN 13242 uniquement.

- Gravillon GI 4/10mm :

| Granulométrie (% passants) |         |                   |                               |              |       | %<br>fines(1) | Aplatissement | Duretés |      |
|----------------------------|---------|-------------------|-------------------------------|--------------|-------|---------------|---------------|---------|------|
| 2D=20                      | 1.4D=14 | D=10              | D/1.4=8                       | d=4          | d/2=2 | <0.063(1)     | FI            | LA      | MDE  |
| 100                        | ≥98     | 85-<br>99<br>e=10 | 25-80<br>ou 20-<br>70<br>e=30 | 0-20<br>e=10 | ≤5    | ≤1            | ≤ 25          | ≤<br>25 | ≤ 20 |

(1)Vss2 pour NF EN 13242 ; Vss2 pour NF EN 13043 si MBF ≤10

(2) il est admis une compensation à hauteur de 5 unités entre LA et MDE (LA+MDE ≤ 45%).

- Gravillon GII 8/14mm :

| Granulométrie (% passants) |         |                   |              |       | %<br>fines(1) | Aplatissement | Duretés |      |
|----------------------------|---------|-------------------|--------------|-------|---------------|---------------|---------|------|
| 2D=31.5                    | 1.4D=20 | D=14              | d=8          | d/2=4 | f<br>(<0.063) | FI            | LA      | MDE  |
| 100                        | >98     | 85-<br>99<br>e=10 | 0-20<br>e=10 | ≤5    | ≤1            | ≤ 25          | ≤<br>25 | ≤ 20 |

(1)Vss2 pour NF EN 13242 ; Vss2 pour NF EN 13043 si MBF ≤ 10

(2) il est admis une compensation à hauteur de 5 unités entre LA et MDE (LA+MDE ≤ 45%).

Les Caractéristiques complémentaires sont les suivantes :

1- Angularité (pour les granulats d'origine alluvionnaire)

L'angularité mesurée selon la norme NF 18-545 est de code Ang 2

2- Sensibilité au gel

La sensibilité au gel des gravillons est communiquée conformément à la norme NF 18- 545, le granulat doit être résistant au gel-dégel.

### 3- Matière organique

Les gravillons doivent avoir une teneur en matière organique inférieure à 0,2 % (Norme NF EN1744-1).

#### 2.1.2– Filler d’apport (éventuellement pour correction du mélange granulaire)

Conforme à la norme NF P 98 – 150 -1 et au tableau suivant :

| Paramètre                                |          | Spécification              | Étendue maximale                |
|------------------------------------------|----------|----------------------------|---------------------------------|
| Granulométrie<br>(% en masse de passant) | 2 mm     | Vsi 100                    | -                               |
|                                          | 0,125 mm | Li 85                      | 10                              |
|                                          | 0,063 mm | Li 70                      | 10                              |
| Essai Blaine                             |          | Étendue déclarée           | $e < 140 \text{ m}^2/\text{kg}$ |
| Masse volumique réelle                   |          | Valeur déclarée            |                                 |
| Indice de vide Rigden                    |          | $V_{28/45}$                |                                 |
| Delta température bille-anneau           |          | $\Delta_{\text{TBA}} 8/16$ |                                 |

#### 2.1.3– Bitume (Bitume routier usuel)

Il doit être conforme à la norme NF P 98 -150 -1 (renvoi à la norme NF EN 12591). Pour le contexte marocain on utilise un bitume de classe 40/50 au lieu de la classe européenne 35/50. Les caractéristiques principales à vérifier sont les suivantes :

| <i>Caractéristiques</i>                                                     | <i>Spécifications</i> |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Température de ramollissement Bille –anneau (TBA origine) en °C NM 03.4.015 | 47 à 60               |
| Pénétrabilité à 25°C (1/10mm) NM 03.4.012                                   | 40 à 50               |
| Densité relative à 25°C NM 03.4.014                                         | 1.00 à 1.10           |
| Point d’éclair en vase ouvert °C NM 03.04.019                               | > 250                 |
| Détermination de la perte de masse à la chaleur NM 03.4.017                 | < 1                   |

#### 2.1.4 Dopes et additifs

Conformes à la norme NF P 98 -150 -1.

## **2.2 – performances de la grave bitume GB 0/14mm :**

Les graves bitumes pour assise devront répondre aux performances mécaniques des graves bitumes de classe 4 conformément à la norme NF EN 13108-1. Les caractéristiques performantielles sont rappelées ci-après :

| <i>Essais</i>                                                                                                                                                                      | <i>Spécifications</i>     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| Module de richesse K                                                                                                                                                               | $\geq 2.9$                |
| Essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire<br>- % vides à 100 girations                                                                                              | $\leq 9$                  |
| Essai DURIEZ<br>Rapport : r (après immersion)/ R (à sec)                                                                                                                           | $\geq 70\%$               |
| Essai à l'ornièreur LPC :<br>- Profondeur d'ornière en % de l'épaisseur de la dalle, à 60°C avec le bitume de chantier, à un % de vides compris entre 5 et 8% après 30.000 cycles. | $\leq 10\%$               |
| Essai de détermination du module complexe                                                                                                                                          | $\geq 11\,000\text{ Mpa}$ |
| Essai de fatigue                                                                                                                                                                   | $\geq 100\ \mu\text{def}$ |

## **2.3 – Consistance de l'étude de formulation :**

L'étude de formulation doit être conduite selon la norme NF P 98-150-1. Pour une nouvelle formule, on exige une épreuve de formulation de niveau 4. Ce niveau est traduit par les essais suivants :

- 1 - Essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire sur plusieurs variantes (NF EN 12697-31),
- 2 - Essai de compression simple LPC (Duriez) sur un minimal de 2 formules sélectionnées (NF EN 12697-12 et NF P 98-251-1),
- 3 - Un essai d'orniérage sur la formule retenue (NF EN 12697-22)
- 4 - Un essai de détermination du module complexe ou un essai de résistance à la traction (NF EN 12697-26)
- 5 - Un essai de fatigue (NF EN 12697 – 24)

### 3. FORMULATION DE LA GRAVE-BITUME DE LA LGV-TOARC6 :

#### 3.1 Caractéristiques des constituants :

##### 3.1.1 Granulats :

Pour les granulats, on a choisi une carrière située à la région de SKHIRATE et qui est réputée par sa très bonne qualité de granulats. Cette carrière est constituée de faciès de calcaire dévonien presque sans intrusions schisteuses.



*Photos : Aperçu sur les faciès calcaires de la région de SKHIRATE*

Les caractéristiques des granulats enregistrées sont les suivantes :

##### - Sable 0/4mm :

| Désignation           | Granulométrie (% passants) |            |                             |             |             | MB ou SE   |             |
|-----------------------|----------------------------|------------|-----------------------------|-------------|-------------|------------|-------------|
|                       | 2D=8                       | 1.4D=6     | D=4                         | D/2=2       | 0.063       | MB         | SE(1)       |
| <b>Moy</b>            | <b>100</b>                 | <b>100</b> | <b>93</b>                   | <b>63</b>   | <b>10,0</b> | <b>0,8</b> | <b>68</b>   |
| <b>Min</b>            | <b>100</b>                 | <b>99</b>  | <b>89</b>                   | <b>55</b>   | <b>6,4</b>  | <b>0,5</b> | <b>67</b>   |
| <b>Max</b>            | <b>100</b>                 | <b>100</b> | <b>96</b>                   | <b>75</b>   | <b>13,2</b> | <b>1,2</b> | <b>71</b>   |
| <b>Spécifications</b> | <b>100</b>                 | <b>≥98</b> | <b>85-99</b><br><b>e=10</b> | <b>e=20</b> | <b>e=6</b>  | <b>≤ 2</b> | <b>≥ 60</b> |

(1) NF EN 13242 uniquement.

- Gravillon GI 4/10mm :

| Désignation           | Granulométrie (% passants) |             |               |                              |              |           | % fines(1) | Aplatissement | Duretés(2) |      |
|-----------------------|----------------------------|-------------|---------------|------------------------------|--------------|-----------|------------|---------------|------------|------|
|                       | 2D=<br>20                  | 1.4D=<br>14 | D=10          | D/1.4<br>=6.3                | d=4          | d/2=<br>2 | <0.063(1)  | FI            | LA         | MDE  |
| <b>Moy</b>            | 100                        | 100         | 95            | 48                           | 8            | 3         | 1          | 18            | 23         | 19   |
| <b>Min</b>            | 100                        | 100         | 89            | 39                           | 5            | 2         | 0,7        | 14            | 19         | 15   |
| <b>Max</b>            | 100                        | 100         | 100           | 62                           | 12           | 5         | 2,2        | 22            | 25         | 24   |
| <b>Spécifications</b> | 100                        | ≥98         | 85-99<br>e=10 | 25-80<br>ou<br>20-70<br>e=30 | 0-20<br>e=10 | ≤5        | ≤1 (1)     | ≤ 25          | ≤<br>25    | ≤ 20 |

(1)Vss2 pour NF EN 13242 ; Vss2 pour NF EN 13043 si MBF ≤ 10

(2) il est admis une compensation à hauteur de 5 unités entre LA et MDE  
(LA+MDE ≤ 45%).

- Gravillon GII 8/14mm :

| Désignations          | Granulométrie (% passants) |             |               |              |       | % fines(1)    | Aplatissement | Duretés (2) |      |
|-----------------------|----------------------------|-------------|---------------|--------------|-------|---------------|---------------|-------------|------|
|                       | 2D=<br>25                  | 1.4D<br>=20 | D=14          | d=8          | d/2=4 | f<br>(<0.063) | FI            | LA          | MDE  |
| <b>Moy</b>            | 100                        | 100         | 94            | 6            | 1,5   | 0,7           | 11            | 22          | 15   |
| <b>Min</b>            | 100                        | 100         | 82            | 1            | 0     | 0,3           | 8             | 19          | 14   |
| <b>Max</b>            | 100                        | 100         | 99            | 13           | 3     | 1,4           | 16            | 24          | 16   |
| <b>Spécifications</b> | 100                        | >98         | 80-99<br>e=10 | 0-20<br>e=10 | ≤5    | ≤1(1)         | ≤ 25          | ≤ 25        | ≤ 20 |

(1)Vss2 pour NF EN 13242 ; Vss2 pour NF EN 13043 si MBF ≤ 10

(2) il est admis une compensation à hauteur de 5 unités entre LA et MDE  
(LA+MDE ≤ 45%).

*Les Caractéristiques complémentaires sont les suivantes :*

### 1- Angularité

L'angularité est spécifiée pour les granulats d'extraction alluvionnaire ou marine. Pour notre cas, il s'agit d'une carrière de roches massives, donc la caractéristique d'angularité est non requise.

### 2- Sensibilité au gel

Le granulat doit être résistant au gel-dégel. Pour notre cas, les gravillons ont un coefficient LA inférieur à 25%, de ce fait, ils sont automatiquement résistants au phénomène de gel-dégel.

### 3- Matière organique

Les gravillons proviennent d'une roche calcaire saine, ils ne possèdent aucune trace de matière organique (0% de matière organique).

Les caractéristiques des granulats identifiés sont donc toutes satisfaisantes.

#### 3.1.2 Bitume :

On a testé deux types de bitume : un bitume usuel de classe 40/50 et un bitume de grade dur de classe 20/30. Le bitume dur a été testé dans l'objectif de l'adopter au cas où le bitume normal ne permettrait pas d'aboutir à des performances d'une GB de classe 4 (soucis du gain de délai d'étude).

##### 3.1.2.1– Bitume de classe 40/50

Un échantillon de bitume qui a servi à la réalisation de ces études de formulation et de provenance usine LA SAMIR (Fournisseur national) a été prélevé pour faire l'objet des essais d'analyse complète. Les principaux résultats obtenus sont donnés dans le tableau ci-dessous. Il en ressort que le bitume testé est bel et bien de classe 40/50.

| <i>Caractéristiques</i>                                                      | <i>Résultats</i> | <i>Spécifications</i> |
|------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------|
| Température de ramollissement Bille – anneau (TBA origine) en °C NM 03.4.015 | 50               | 47 à 60               |
| Pénétrabilité à 25°C (1/10mm) NM 03.4.012                                    | 45               | 40 à 50               |
| Densité relative à 25°C NM 03.4.014                                          | 1.042            | 1.00 à 1.10           |
| Point d'éclair en vase ouvert °C NM 03.04.019                                | 340 - 315        | > 250                 |
| Détermination de la perte de masse à la chaleur NM 03.4.017                  | 0.1              | < 1                   |

### 3.1.2.2– Bitume de classe 20/30

Un échantillon de bitume classé 20/30 et de provenance usine LA SAMIR a été prélevé pour faire l'objet des essais d'analyse complète. Les principaux résultats obtenus sont donnés dans le tableau ci-dessous :

| <i>Caractéristiques</i>                                                     | <i>Résultats</i> | <i>Spécifications</i> |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------|
| Température de ramollissement Bille –anneau (TBA origine) en °C NM 03.4.015 | 58               | 52 à 68               |
| Pénétrabilité à 25°C (1/10mm) NM 03.4.012                                   | 23               | 20 à 30               |
| Densité relative à 25°C NM 03.4.014                                         | 1.046            | 1.00 à 1.10           |
| Point d'éclair en vase ouvert °C NM 03.04.019                               | 325 - 332        | > 250                 |
| Détermination de la perte de masse à la chaleur NM 03.4.017                 | 0.12             | < 1                   |

Il en ressort que le bitume testé est bel et bien de classe 20/30.

### 3.2 Composition du mélange minéral (Mélange blanc) :

Pour la composition du mélange minéral on a tenu compte des ratios qui peuvent induire à une formule s'approchant autant que possible de la courbe référentielle classiquement adoptée et qui rentre dans le fuseau dictée par la norme NF EN 13108-1 (voir tableau ci-après). En outre et pour se prémunir du problème d'orniérabilité éventuelle et dans le but de prévoir des valeurs satisfaisantes et du module complexe ( $\geq 11\ 000$  Mpa) et de la résistance à la fatigue, on a essayé de minimiser le taux du composant sableux (on a tourné autour de 45% au lieu de s'approcher de 50%).

La combinaison de toutes ces considérations a conduit à retenir le mélange granulaire pondéral suivant : - Sable concassé 0/4mm : 45% ; - Gravillon GI 4/10mm : 25% et Gravillon GII 10/14mm : 30%.

La courbe granulométrique moyenne du mélange reconstitué à partir de ces ratios et avec les granulométries moyennes des échantillons identifiés est donnée dans le tableau suivant :

| Tamis (mm)                                                       | 0.063      | 0.08     | 0.315     | 0.5       | 2         | 4         | 6.3       | 10        | 12.5      | 14        |
|------------------------------------------------------------------|------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>% passant</b>                                                 | <b>6.9</b> | <b>7</b> | <b>12</b> | <b>13</b> | <b>31</b> | <b>44</b> | <b>57</b> | <b>73</b> | <b>90</b> | <b>99</b> |
| <b>Courbe<br/>référentielle<br/>d'information</b>                | -          | 8        | -         | -         | 34        | -         | 58        | 78        | -         | 98        |
| <b>Fuseau de la<br/>norme NF EN<br/>13108-1 (en<br/>%)</b>       | 0-12       |          |           |           | 10-50     |           |           |           |           | 90-100    |
| <b>Tolérance de<br/>contrôle<br/>(norme : NF<br/>EN 13108-21</b> | 5.9-7.9    |          |           | 11-15     | 28-34     |           | 53-61     |           |           | 94-100    |

MVRG = 2.720 T/m<sup>3</sup>

### **3.3 Composition humide (enrobé bitumineux) :**

Comme cité auparavant, l'épreuve de formulation est classée de niveau 4 (à ne pas confondre avec la classe de la GB qui elle fait référence aux performances de la GB) et comprend les essais suivants : Essai à la PCG, Essai DURIEZ, l'essai à l'ornièrreur, la détermination du Module complexe et la résistance à la fatigue. Pour le dosage en bitume, il a fallu respecter le module de richesse qui doit être supérieur à 2,9. Cette valeur minimale coïncide avec un dosage de bitume théorique de 4.65 %. C'est ainsi qu'il a été décidé de commencer les études de formulation (Essai à la PCG notamment) avec un dosage de 4.7%. Aussi, a-t-on

testé les dosages suivants : 4.7%, 4.9% et 5.1% (avec un pas de 0.2%), ce qui correspond à des modules de richesse de 2.94, 3.06 et 3.19. Pour les essais d'orniérage, du Module complexe et de résistance à la fatigue, on a travaillé avec le dosage nominal en bitume de 4.9%. On donnera ci-après les résultats de tous les essais obtenus :

- Formule avec bitume de classe 40/50

| Caractéristiques                                       | Dosage en bitume (%) |        |       | Spécifications       |
|--------------------------------------------------------|----------------------|--------|-------|----------------------|
|                                                        | 4.7                  | 4.9    | 5.1   |                      |
| Module de richesse K                                   | 2.94                 | 3.06   | 3.19  | $\geq 2.9$           |
| Masse volumique absolue <i>MVR</i> (t/m <sup>3</sup> ) | 2.536                | 2.529  | 2.522 | -                    |
| Essai PCG<br>(% de vides à 100<br>girations)           | 3.3                  | 2      | 1.8   | $\leq 9 \%$          |
| Essai Duriez (TSR)<br>(Rapport r/R)                    | 87 %                 | 90 %   | 89 %  | $\geq 70 \%$         |
| Essai à l'ornièreur<br>(%)<br>(30000 cycles)           |                      | 4.95 % |       | $\leq 10\%$          |
| Module complexe<br>(MPa)                               |                      | 11 480 |       | $\geq 11\,000$ Mpa   |
| Essai de fatigue ( $\epsilon_6$ -<br>100 $\mu$ def)    |                      | 116    |       | $\geq 100$ $\mu$ def |

- Formule avec bitume de classe 20/30

| Caractéristiques                                       | Dosage en bitume (%) |        |       | Spécifications       |
|--------------------------------------------------------|----------------------|--------|-------|----------------------|
|                                                        | 4.7                  | 4.9    | 5.1   |                      |
| Module de richesse K                                   | 2.94                 | 3.06   | 3.19  | $\geq 2.9$           |
| Masse volumique absolue <i>MVR</i> (t/m <sup>3</sup> ) | 2.537                | 2.531  | 2.524 | -                    |
| Essai PCG<br>(% de vides à 100 girations)              | 7.8 %                | 6.9 %  | 7.3 % | $\leq 9 \%$          |
| Essai Duriez (TSR)<br>(Rapport r/R)                    | 79 %                 | 83 %   | 81 %  | $\geq 70 \%$         |
| Essai à l'ornièreur<br>(%)<br>(30000 cycles)           | -                    | 2.67 % | -     | $\leq 10\%$          |
| Module complexe<br>(MPa)                               | -                    | 13 066 | -     | $\geq 11\,000$ Mpa   |
| Essai de fatigue ( $\epsilon_6$ -<br>100 $\mu$ def)    | -                    | 120.6  | -     | $\geq 100$ $\mu$ def |

#### 4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Au vu des résultats obtenus, on peut conclure que la grave bitume 0/14mm formulée avec le bitume 40/50 possède des performances permettant de la classer en tant que GB de classe 4 (Module complexe supérieure à 11 000 Mpa et la résistance à la fatigue est supérieure à 100  $\mu$ def).

L'essai à l'ornièreur (à 30 000 cycles) sur la formule travaillée avec le bitume de classe 40/50 a abouti à une valeur de 4.95%, valeur très concluante ( $\leq 10\%$ ). De plus la tenue à l'eau jugée par l'essai DURIEZ est très satisfaisante ( $\geq 70\%$ ).

En ce qui concerne la formulation ayant fait usage du bitume de classe 20/30 (Etude comparative), l'ensemble des résultats prouvent les très bonnes performances de la GB et qui permettent de la classer dans la classe 4 (ce qui a été présagé dès le départ).

Il est à noter par ailleurs, que les résultats obtenus sur la formulation faisant usage du bitume 40/50 montrent une formule facilement compactable (selon l'essai PCG) et très performante (Orniérage et Module complexe). C'est l'objectif idéal recherché par les études de formulation des enrobés bitumineux.

Ainsi et à travers cette étude expérimentale, on a pu montrer que rien qu'avec un bitume normal (classe 40/50) on a pu formuler une grave-bitume à module élevé (Module  $\geq 11\ 000$  MPa). Toutefois l'obtention de ces performances reste tributaire de l'emploi des granulats de très bonne qualité, en l'occurrence ceux provenant des carrières de la région de SKHIRATE.

A noter que seules quelques carrières situées dans cette région produisent ce genre de granulats. Les massifs calcaires (Calcaire dévonien) exploités doivent être propres et exempts des filons schisteux qui traversent, inéluctablement et par endroits, ces bancs calcaires. Il serait préférable que le carrier fasse un tri et un zoning d'exploitation au préalable et réserve les meilleurs faciès à ce genre de production.

Enfin, on souhaite que cette formulation constituera pour les professionnels une référence intéressante et exploitable pour les futures chantiers qui feront appel à ce genre d'enrobés bitumineux.