

## **L'utilisation du nucléodensimètre dans le contrôle des enrobés**

*K. EL AZDI, Ingénieur au LPEE*

### **I- INTRODUCTION**

Dans les travaux de revêtements bitumineux, la compacité des enrobés revêt une grande importance puisqu'elle en conditionne la durabilité. La méthode utilisée jusqu'à présent au Maroc est celle se basant sur le prélèvement de carottes dont la densité est mesurée au laboratoire et comparée à une densité de référence. Quoique cette méthode permette de produire des résultats fiables, elle est destructive et son délai de réalisation est assez important. En plus, les trous laissés dans la chaussée constituent des points faibles s'ils ne sont pas correctement rebouchés.

Le nucléodensimètre, dont l'utilisation s'est vue généralisée dans les travaux de terrassements et de couches non traitées de chaussées, n'a pas trouvé, pour le moment, une application dans le contrôle des couches bitumineuses et ce par manque de recul et surtout de corrélation bien établie entre ce type de mesures et les mesures directes sur carottes.

Le présent article présente les résultats d'une campagne de mesures réalisées simultanément au nucléodensimètre et sur carottes prélevées. En comparant les valeurs obtenues, on tentera de prouver que ce moyen de mesure peut très bien être utilisé pour la réception en compactage des couches traitées aux liants hydrocarbonés s'il l'on s'entoure d'un minimum de précautions et si l'on tient compte des conditions de la mesure.

### **II- DESCRIPTION DU NUCLEODENSIMETRE**

Le matériel utilisé est de type Humboldt HS-5100-B dont le fonctionnement est basé sur l'émission de radiations à partir de deux sources gamma : (Cesium-137) et neutrons (Americium-241). Le temps d'exposition 15s, 1 min et 4 min selon la précision recherchée. La mesure peut être effectuée sur une profondeur allant jusqu'à 30cm avec un pas de 5 cm.

La fiche technique du constructeur dont un extrait est présenté ci-dessous donne des indications sur la précision de l'appareil.



|                                       |                             |                              |                            |
|---------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| <b>DENSITÉ PAR<br/>RÉTRODIFFUSION</b> | <b>LENT<br/>(4 minutes)</b> | <b>NORMAL<br/>(1 minute)</b> | <b>RAPIDE<br/>(15 sec)</b> |
|---------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|

|                                                     |                             |                              |                            |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Précision Kg/m <sup>3</sup>                         | +/- 4                       | +/- 8                        | +/- 16                     |
| Erreur chimique Kg/m <sup>3</sup>                   | +/- 40                      | +/- 40                       | +/- 40                     |
| Erreur de surface Kg/m <sup>3</sup>                 | - 48                        | - 48                         | - 48                       |
| Profondeur millimètre                               | 88                          | 88                           | 88                         |
| <b>DENSITÉ PAR TRANSMISSION<br/>DIRECTE A 150mm</b> | <b>LENT<br/>(4 minutes)</b> | <b>NORMAL<br/>(1 minute)</b> | <b>RAPIDE<br/>(15 sec)</b> |
| Précision Kg/m <sup>3</sup>                         | +/- 2                       | +/- 4                        | +/- 8                      |
| Erreur chimique Kg/m <sup>3</sup>                   | +/- 16                      | +/- 16                       | +/- 16                     |
| Erreur de surface Kg/m <sup>3</sup>                 | - 8                         | - 8                          | - 8                        |
| Profondeur millimètre                               | 50 à 300                    | 50 à 300                     | 50 à 300                   |
| <b>HUMIDITÉ À 160 KG/M3</b>                         | <b>LENT<br/>(4 minutes)</b> | <b>NORMAL<br/>(1 minute)</b> | <b>RAPIDE<br/>(15 sec)</b> |
| Précision Kg                                        | +/- 2                       | +/- 4                        | +/- 8                      |
| Erreur de surface Kg/m3                             | - 4                         | - 4                          | - 4                        |
| Profondeur millimètre                               | 100 à 200                   | 100 à 200                    | 100 à 200                  |

Tab1 : Données concernant la précision du nucléodensimètre Humboldt pour une densité de référence de 2 t/m<sup>3</sup>

### **III-METHODOLOGIE ET RESULTATS DE MESURES**

Si l'utilisation du nucléodensimètre pour la mesure des densités in situ des matériaux non traités est pour le moment assez généralisée, il n'en est pas de même pour les matériaux traités aux liants hydrocarbonés pour lesquels on continue à préférer la mesure directe sur carottes. Dans ce sens, ont été menées une série de mesures dans l'objectif de :

- trouver une méthode d'essai adaptée aux différents types d'enrobés ;
- évaluer la fiabilité des mesures en fonction des différents paramètres ;
- vérifier si un même facteur de correction entre les densités obtenues par carottage et celles mesurées par le nucléodensimètre, peut être appliqué.

C'est ainsi qu'à l'occasion de la construction de l'autoroute Casablanca-El Jadida, ont été réalisées plusieurs campagnes de mesures qui ont permis d'avoir les résultats présentés et commentés ci-après.

#### **III-1- Mesure directe en surface**

Les mesures effectuées en surface des matériaux traités aux liants hydrocarbonés (Grave bitume sur 11 cm ou enrobé bitumineux sur 7 cm) n'ont permis d'établir aucune corrélation. La dispersion des valeurs obtenues au nucléodensimètre est très grande et les valeurs lues dépendent, dans une grande mesure de l'état de surface et les vides liés à la rugosité de l'enrobé en surface sont comptabilisés en tant que vides intérieurs. Ces mesures en surface ont été de ce fait abandonnées.

#### **III-2- Mesure en profondeur**

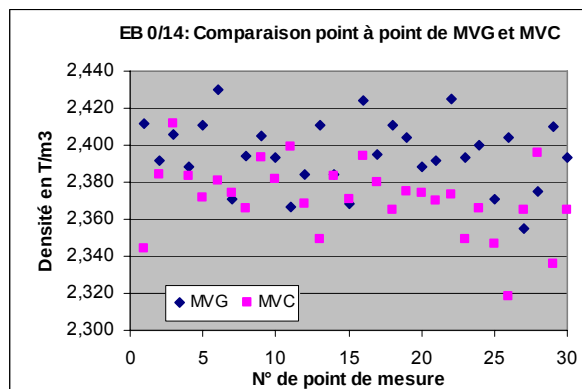
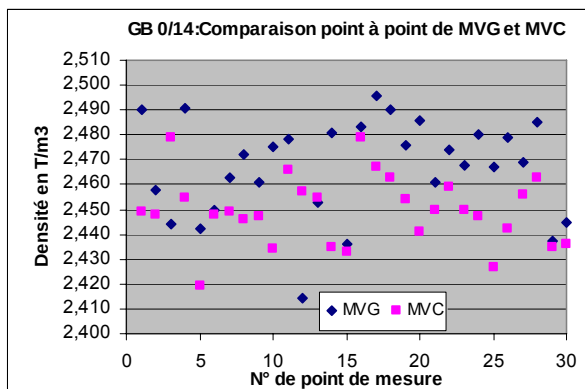
Des trous de 20 mm ont été réalisés dans les couches traitées aux liants hydrocarbonés à l'aide d'une perceuse et ce pour la réalisation de mesures de densités en profondeur. La profondeur de mesure dépend de l'épaisseur de la couche à mesurer. Ainsi, les mesures sur

la couche de base ont été réalisées à 10 cm de profondeur et les mesures sur la couche de roulement à 5 cm. La durée d'exposition choisie est 1 mn (Mode normal).

Parallèlement à ces mesures aux nucléodensimètre, des carottes ont été réalisées aux mêmes emplacements et des mesures de densités par pesée hydrostatique ont été effectuées. Les résultats obtenus sont présentés en annexes 1 et 2 et analysés dans ce qui suit :

### III-2-a- Comparaison 1 mesure gamma / 1 mesure carotte

La première approche adoptée dans le cadre de cette étude est celle consistant à comparer deux mesures ponctuelles effectuées respectivement au nucléodensimètre et par carottage.



Les nuages de points obtenus ne permettent pas de déceler une corrélation claire entre les valeurs obtenues par les deux moyens de mesure. L'analyse de l'ensemble des résultats conduit toutefois à la comparaison suivante :

| <i>Ecart de densités par référence à la densité de la carotte en Kg/m<sup>3</sup></i> | <i>GB 0/14</i>         | <i>EB 0/14</i>         | <i>Fiche technique</i> |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Densité théorique pleine                                                              | 2528 kg/m <sup>3</sup> | 2469 kg/m <sup>3</sup> | 2000 kg/m <sup>3</sup> |
| minimum                                                                               | -43                    | -32                    | -28                    |
| maximum                                                                               | +46                    | +86                    | +12                    |
| moyenne                                                                               | +17                    | +24                    | -                      |
| Ecart type                                                                            | +21                    | +28                    | -                      |

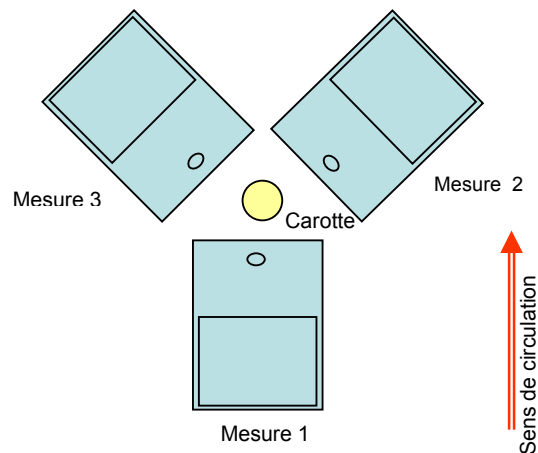
Tab 2 : Comparaison des densités au nucléodensimètre par rapport aux densités sur carottes

✓ La densité obtenue par nucléodensimètre paraît être surestimée par rapport à la densité réelle de l'enrobé.

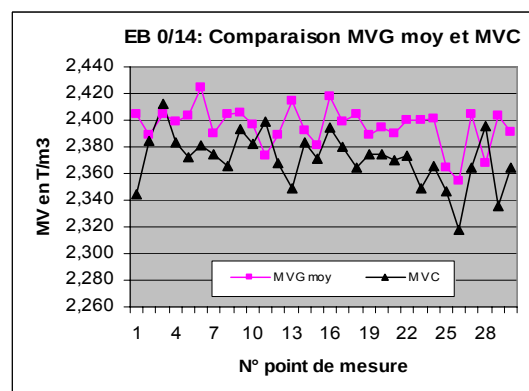
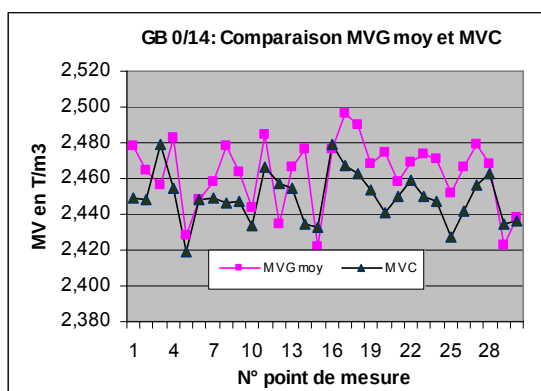
✓ La densité des enrobés en couche de roulement semble être encore plus surestimée à cause de la présence d'un support en grave bitume d'une densité supérieure.

### III-2-b- Comparaison moyenne de 3 mesures gamma / 1 mesure carotte

Les résultats obtenus n'étant pas très encourageants, une autre approche consistant à améliorer la répétabilité de l'essai a été définie à travers la multiplication des essais au même point avec changement de l'orientation de l'appareil tel que schématisé ci-dessous.



La valeur prise en compte est la moyenne des valeurs obtenues dans les trois directions avec élimination de la valeur qui s'écarte de plus de 30 kg/m<sup>3</sup> des deux autres.



L'allure des courbes représentant les densités au nucléodensimètre et celles obtenues sur carottes montrent des tendances assez similaires bien que les densités au nucléodensimètre restent sensiblement élevées par rapport aux autres. Ceci se note aisément à travers l'analyse statistique récapitulée dans le tableau suivant :

| <i>Ecart de densités par référence à la densité de la carotte en Kg/m<sup>3</sup></i> | <i>GB 0/14</i>         | <i>EB 0/14</i>         | <i>Fiche technique</i> |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Densité théorique pleine                                                              | 2528 kg/m <sup>3</sup> | 2469 kg/m <sup>3</sup> | 2000 kg/m <sup>3</sup> |
| minimum                                                                               | -23                    | -28                    | -28                    |
| maximum                                                                               | +41                    | +67                    | +12                    |
| moyenne                                                                               | +13                    | +24                    | -                      |
| Ecart type                                                                            | +16                    | +22                    | -                      |

Tab 3 : Comparaison des densités au nucléodensimètre par rapport aux densités sur carottes

✓ L'analyse par rapport à la moyenne des trois valeurs a permis de réduire l'étendue des valeurs (maxi-min) : de 128 à 95 kg/m<sup>3</sup> pour l'EB et de 89 à 64 Kg/m<sup>3</sup> pour la GB.

✓ La densité des enrobés en couche de roulement reste légèrement surestimée à cause de la présence d'un support en grave bitume d'une densité supérieure.

Les valeurs obtenues au nucléodensimètre se situent par rapport à la densité réelle comme suit

- 63% des valeurs de la densité MVG sont à  $\pm 1$  % de la MVC,
- 93% des valeurs de la densité MVG sont à  $\pm 2$  % de la MVC,
- 100% des valeurs de la densité MVG sont à  $\pm 3$  % de la MVC

Exprimés en pourcentage de vides par rapport à la densité théorique pleine, Les valeurs obtenues restent en réalité assez acceptables et conduisent, en tout état de causes, au même jugement concernant le degré de serrage des matériaux enrobés. Le tableau suivant reprend ces mêmes écarts en les exprimant en pourcentage de vides.

| <i>Ecart du % des vides</i> | <i>GB 0/14</i> | <i>EB 0/14</i> |
|-----------------------------|----------------|----------------|
| minimum                     | -1,6           | -2,7           |
| maximum                     | +0,9           | +1,1           |
| moyenne                     | -0,5           | -1,0           |
| Ecart type                  | +0,6           | +0,9           |

Tab 4 : Ecart du taux de vides des deux méthodes

### **III-2-c- Comparaison population à population (Test de Colin White)**

L'utilisation du test statistique de Colin White (annexes 3 et 4) a permis de confirmer les constats déjà faits à savoir que les deux moyens aboutissent à des valeurs assez proches avec toutefois une légère surestimation de la densité par le nucléodensimètre. Le test de Colin White donne les résultats suivants

|                           | <i>Grave bitume 0/14</i> | <i>Enrobé bitumineux 0/14</i> |
|---------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Somme des rangs           | 712                      | 611.5                         |
| Limites du test bilatéral | 782-1048                 |                               |

Tab5 : Résultats du test Colin White comparant la population Gamma à la population Carottes

La somme des rangs est située en dehors de la fourchette fixée par la norme, ce qui veut dire que la population des vides gamma est sensiblement inférieure à la population des vides carottes.

## **IV-PROPOSITION DE METHODOLOGIE DE MESURES**

A la lumière de tout ce qui précède, il est possible d'adopter une méthodologie de travail qui, tout en visant la généralisation de ce moyen de mesure, tente d'en réduire les fluctuations en en faisant un moyen de jugement fiable. Cette méthodologie s'articule autour des points suivants :

### **1- La mesure elle-même :**

✓ La valeur de la densité au nucléodensimètre est la moyenne de trois mesures réalisées en profondeur dans un trou foré (à la perceuse et non par battage). Les trois mesures sont réalisées selon trois directions à 60°. La valeur qui s'écarte de plus de 30 Kg/m<sup>3</sup> par rapport aux deux autres étant éliminée.

✓ La profondeur de mesure est choisie pour intéresser la plus grande épaisseur possible de la couche par pas de 5 cm. Dans le cas de mesures anormalement basses, il convient de vérifier si la couche sous-jacente n'a pas été, à cause d'une faible épaisseur ponctuelle, atteinte par la source gamma.

✓ La chaussée objet des mesures au nucléodensimètre doit être sèche et le trou exempt de toute poussière ou particule.

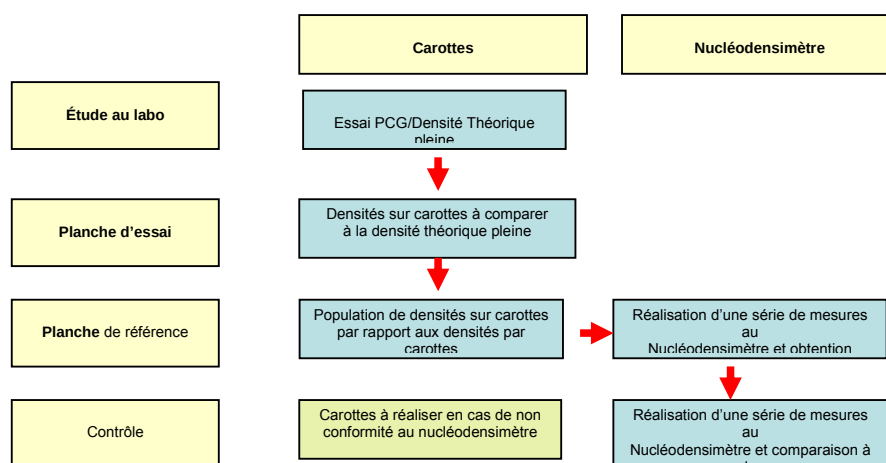
√ Le mode 'rapide' n'est pas recommandé.

## 2- L'interprétation des mesures :

√ Il est recommandé de s'orienter vers une interprétation globale d'une population de densités plutôt que vers une interprétation point à point. Le test de Colin White constitue de ce fait un bon outil de comparaison.

√ Pour une section donnée, les densités obtenues au nucléodensimètre sont à comparer aux densités déterminées par le même moyen sur une planche de référence qui elle, aurait été validée par des mesures de densités sur carottes. Le schéma synoptique ci-après récapitule la méthodologie proposée :

- A partir d'une étude de formulation au laboratoire, l'on évalue l'aptitude au compactage à la PCG et l'on détermine une densité à atteindre sur chantier,
- Une planche d'essai, dans laquelle sont testés les moyens matériels et les modalités d'exécution, permet de vérifier que l'on peut atteindre la densité de référence de laboratoire. La mesure de densités est à réaliser dans ce cas sur carottes. D'abord parce que la densité de référence est déterminée sur une éprouvette PCG par mesure directe et ensuite parce que les carottes permettent d'apprécier d'autres paramètres qui ne peuvent être appréhendés à travers des mesures gamma (homogénéité de compactage dans le sens vertical, ségrégation, état de collage...)
- Les modalités arrêtées en planche d'essai sont adoptées pour réaliser une planche de référence dans laquelle on vérifie que l'on obtient, dans un travail normal d'une journée, les mêmes performances obtenues en planche d'essai. A cet effet, une campagne de carottage est menée et une population de densités est déterminée et comparée à celles de la planche d'essai, et ce n'est qu'une fois cette population acceptée et la planche de référence validée que l'on détermine au moyen du nucléodensimètre une *population de densités équivalente* qui servira pour la réception en compactage des lots de contrôle pour le futur.



Synoptique de méthodologie de réception en compactage des assises traitées aux liants hydrocarbonés

**Annexe 1: Mesures des densités in-situ de grave bitume 0/14 par carottage et au gammadensimètre**

| N° | MVG1<br>en t/m3 | MVG2<br>en t/m3 | MVG3 en<br>t/m3   | MVG<br>moy en<br>t/m3 | MVC en<br>t/m3 | VG en<br>% | VC en<br>% | Ecart<br>MV en<br>t/m3 | Ecart<br>MV en<br>% | Ecart<br>vides |
|----|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------------|----------------|------------|------------|------------------------|---------------------|----------------|
| 1  | 2,490           | 2,463           | 2,480             | 2,478                 | 2,449          | 2,0        | 3,1        | 0,029                  | 1,2                 | -1,1           |
| 2  | 2,458           | 2,466           | 2,471             | 2,465                 | 2,448          | 2,5        | 3,2        | 0,017                  | 0,7                 | -0,7           |
| 3  | 2,444           | 2,457           | 2,468             | 2,456                 | 2,479          | 2,8        | 1,9        | -0,023                 | -0,9                | 0,9            |
| 4  | 2,491           | 2,476           | 2,482             | 2,483                 | 2,455          | 1,8        | 2,9        | 0,028                  | 1,1                 | -1,1           |
| 5  | 2,442           | 2,418           | 2,423             | 2,428                 | 2,419          | 4,0        | 4,3        | 0,009                  | 0,4                 | -0,3           |
| 6  | 2,450           | 2,437           | 2,457             | 2,448                 | 2,448          | 3,2        | 3,2        | 0,000                  | 0,0                 | 0,0            |
| 7  | 2,463           | 2,454           | 2,458             | 2,458                 | 2,449          | 2,8        | 3,1        | 0,009                  | 0,4                 | -0,3           |
| 8  | 2,472           | 2,470           | 2,492             | 2,478                 | 2,446          | 2,0        | 3,2        | 0,032                  | 1,3                 | -1,2           |
| 9  | 2,461           | 2,454           | 2,477             | 2,464                 | 2,447          | 2,5        | 3,2        | 0,017                  | 0,7                 | -0,7           |
| 10 | 2,475           | 2,415           | 2,441             | 2,444                 | 2,434          | 3,3        | 3,7        | 0,010                  | 0,4                 | -0,4           |
| 11 | 2,478           | 2,482           | 2,496             | 2,485                 | 2,466          | 1,7        | 2,5        | 0,019                  | 0,8                 | -0,8           |
| 12 | 2,414           | 2,440           | 2,452             | 2,435                 | 2,457          | 3,7        | 2,8        | -0,022                 | -0,9                | 0,9            |
| 13 | 2,453           | 2,467           | 2,478             | 2,466                 | 2,455          | 2,5        | 2,9        | 0,011                  | 0,4                 | -0,4           |
| 14 | 2,481           | 2,467           | 2,479             | 2,476                 | 2,435          | 2,1        | 3,7        | 0,041                  | 1,7                 | -1,6           |
| 15 | 2,436           | 2,401           | 2,428             | 2,422                 | 2,433          | 4,2        | 3,8        | -0,011                 | -0,5                | 0,4            |
| 16 | 2,483           | 2,475           | 2,469             | 2,476                 | 2,479          | 2,1        | 1,9        | -0,003                 | -0,1                | 0,2            |
| 17 | 2,496           | 2,483           | 2,509             | 2,496                 | 2,467          | 1,3        | 2,4        | 0,029                  | 1,2                 | -1,1           |
| 18 | 2,490           | 2,507           | 2,472             | 2,490                 | 2,463          | 1,5        | 2,6        | 0,027                  | 1,1                 | -1,1           |
| 19 | 2,476           | 2,456           | 2,472             | 2,468                 | 2,454          | 2,4        | 2,9        | 0,014                  | 0,6                 | -0,5           |
| 20 | 2,486           | 2,470           | 2,470             | 2,475                 | 2,441          | 2,1        | 3,4        | 0,034                  | 1,4                 | -1,3           |
| 21 | 2,461           | 2,457           | 2,457             | 2,458                 | 2,45           | 2,8        | 3,1        | 0,008                  | 0,3                 | -0,3           |
| 22 | 2,474           | 2,466           | 2,466             | 2,469                 | 2,459          | 2,3        | 2,7        | 0,010                  | 0,4                 | -0,4           |
| 23 | 2,468           | 2,477           | 2,477             | 2,474                 | 2,45           | 2,1        | 3,1        | 0,024                  | 1,0                 | -1,0           |
| 24 | 2,480           | 2,466           | 2,466             | 2,471                 | 2,447          | 2,3        | 3,2        | 0,024                  | 1,0                 | -0,9           |
| 25 | 2,467           | 2,444           | 2,444             | 2,452                 | 2,427          | 3,0        | 4,0        | 0,025                  | 1,0                 | -1,0           |
| 26 | 2,479           | 2,459           | 2,459             | 2,466                 | 2,442          | 2,5        | 3,4        | 0,024                  | 1,0                 | -0,9           |
| 27 | 2,469           | 2,484           | 2,484             | 2,479                 | 2,456          | 1,9        | 2,8        | 0,023                  | 0,9                 | -0,9           |
| 28 | 2,485           | 2,460           | 2,460             | 2,468                 | 2,463          | 2,4        | 2,6        | 0,005                  | 0,2                 | -0,2           |
| 29 | 2,437           | 2,416           | 2,416             | 2,423                 | 2,435          | 4,2        | 3,7        | -0,012                 | -0,5                | 0,5            |
| 30 | 2,445           | 2,435           | 2,435             | 2,438                 | 2,436          | 3,6        | 3,6        | 0,002                  | 0,1                 | 0,0            |
|    |                 |                 | <b>Minimum</b>    | <b>2,422</b>          | <b>2,419</b>   | <b>1,3</b> | <b>1,9</b> | <b>-0,023</b>          | <b>-0,9</b>         | <b>-1,6</b>    |
|    |                 |                 | <b>Maximum</b>    | <b>2,496</b>          | <b>2,479</b>   | <b>4,2</b> | <b>4,3</b> | <b>0,041</b>           | <b>1,7</b>          | <b>0,9</b>     |
|    |                 |                 | <b>Moyenne</b>    | <b>2,463</b>          | <b>2,450</b>   | <b>2,6</b> | <b>3,1</b> | <b>0,013</b>           | <b>0,5</b>          | <b>-0,5</b>    |
|    |                 |                 | <b>Ecart type</b> | <b>0,019</b>          | <b>0,014</b>   | <b>0,8</b> | <b>0,6</b> | <b>0,016</b>           | <b>0,7</b>          | <b>0,6</b>     |

**Annexe 2: Mesures des densités in-situ de béton bitumineux 0/14 par carottage et au gammadensimétrie**

| N°                | MVG1<br>en t/m3 | MVG2<br>en t/m3 | MVG3 en<br>t/m3 | MVG<br>moy en<br>t/m3 | MVC en<br>t/m3 | VG en<br>% | VC en<br>% | Ecart<br>MV en<br>t/m3 | Ecart<br>MV en<br>% | Ecart<br>vidé |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------|----------------|------------|------------|------------------------|---------------------|---------------|
| 1                 | 2,412           | 2,408           | 2,393           | 2,404                 | 2,344          | 2,6        | 5,1        | 0,060                  | 2,6                 | -2,           |
| 2                 | 2,392           | 2,374           | 2,400           | 2,389                 | 2,384          | 3,2        | 3,4        | 0,005                  | 0,2                 | -0,           |
| 3                 | 2,406           | 2,399           | 2,410           | 2,405                 | 2,412          | 2,6        | 2,3        | -0,007                 | -0,3                | 0,            |
| 4                 | 2,388           | 2,418           | 2,392           | 2,399                 | 2,383          | 2,8        | 3,5        | 0,016                  | 0,7                 | -0,           |
| 5                 | 2,411           | 2,39            | 2,408           | 2,403                 | 2,372          | 2,7        | 3,9        | 0,031                  | 1,3                 | -1,           |
| 6                 | 2,430           | 2,418           | 2,425           | 2,424                 | 2,381          | 1,8        | 3,6        | 0,043                  | 1,8                 | -1,           |
| 7                 | 2,379           | 2,404           | 2,388           | 2,390                 | 2,374          | 3,2        | 3,8        | 0,016                  | 0,7                 | -0,           |
| 8                 | 2,394           | 2,416           | 2,402           | 2,404                 | 2,366          | 2,6        | 4,2        | 0,038                  | 1,6                 | -1,           |
| 9                 | 2,405           | 2,397           | 2,417           | 2,406                 | 2,393          | 2,6        | 3,1        | 0,013                  | 0,5                 | -0,           |
| 10                | 2,393           | 2,404           | 2,395           | 2,397                 | 2,382          | 2,9        | 3,5        | 0,015                  | 0,6                 | -0,           |
| 11                | 2,367           | 2,383           | 2,37            | 2,373                 | 2,399          | 3,9        | 2,8        | -0,026                 | -1,1                | 1,            |
| 12                | 2,384           | 2,378           | 2,406           | 2,389                 | 2,368          | 3,2        | 4,1        | 0,021                  | 0,9                 | -0,           |
| 13                | 2,415           | 2,420           | 2,410           | 2,415                 | 2,349          | 2,2        | 4,9        | 0,066                  | 2,8                 | -2,           |
| 14                | 2,384           | 2,393           | 2,400           | 2,392                 | 2,383          | 3,1        | 3,5        | 0,009                  | 0,4                 | -0,           |
| 15                | 2,368           | 2,391           | 2,385           | 2,381                 | 2,371          | 3,6        | 4,0        | 0,010                  | 0,4                 | -0,           |
| 16                | 2,424           | 2,412           | 2,418           | 2,418                 | 2,394          | 2,1        | 3,0        | 0,024                  | 1,0                 | -0,           |
| 17                | 2,395           | 2,387           | 2,414           | 2,399                 | 2,38           | 2,8        | 3,6        | 0,019                  | 0,8                 | -0,           |
| 18                | 2,411           | 2,401           | 2,399           | 2,404                 | 2,365          | 2,6        | 4,2        | 0,039                  | 1,6                 | -1,           |
| 19                | 2,404           | 2,378           | 2,385           | 2,389                 | 2,375          | 3,2        | 3,8        | 0,014                  | 0,6                 | -0,           |
| 20                | 2,388           | 2,402           | 2,396           | 2,395                 | 2,374          | 3,0        | 3,8        | 0,021                  | 0,9                 | -0,           |
| 21                | 2,392           | 2,386           | 2,391           | 2,390                 | 2,37           | 3,2        | 4,0        | 0,020                  | 0,8                 | -0,           |
| 22                | 2,425           | 2,408           | 2,366           | 2,400                 | 2,373          | 2,8        | 3,9        | 0,027                  | 1,1                 | -1,           |
| 23                | 2,393           | 2,389           | 2,417           | 2,400                 | 2,349          | 2,8        | 4,9        | 0,051                  | 2,2                 | -2,           |
| 24                | 2,400           | 2,410           | 2,392           | 2,401                 | 2,366          | 2,8        | 4,2        | 0,035                  | 1,5                 | -1,           |
| 25                | 2,371           | 2,368           | 2,354           | 2,364                 | 2,347          | 4,3        | 4,9        | 0,017                  | 0,7                 | -0,           |
| 26                | 2,355           | 2,348           | 2,361           | 2,355                 | 2,318          | 4,6        | 6,1        | 0,037                  | 1,6                 | -1,           |
| 27                | 2,404           | 2,41            | 2,399           | 2,404                 | 2,365          | 2,6        | 4,2        | 0,039                  | 1,6                 | -1,           |
| 28                | 2,375           | 2,366           | 2,362           | 2,368                 | 2,396          | 4,1        | 3,0        | -0,028                 | -1,2                | 1,            |
| 29                | 2,410           | 2,404           | 2,395           | 2,403                 | 2,336          | 2,7        | 5,4        | 0,067                  | 2,9                 | -2,           |
| 30                | 2,393           | 2,384           | 2,396           | 2,391                 | 2,365          | 3,2        | 4,2        | 0,026                  | 1,1                 | -1,           |
| <b>Minimum</b>    |                 |                 |                 | <b>2,355</b>          | <b>2,318</b>   | <b>1,8</b> | <b>2,3</b> | <b>-0,028</b>          | <b>-1,2</b>         | <b>-2,</b>    |
| <b>Maximum</b>    |                 |                 |                 | <b>2,424</b>          | <b>2,412</b>   | <b>4,6</b> | <b>6,1</b> | <b>0,067</b>           | <b>2,9</b>          | <b>1,</b>     |
| <b>Moyenne</b>    |                 |                 |                 | <b>2,395</b>          | <b>2,371</b>   | <b>3,0</b> | <b>4,0</b> | <b>0,024</b>           | <b>1,0</b>          | <b>-1,</b>    |
| <b>Ecart type</b> |                 |                 |                 | <b>0,015</b>          | <b>0,020</b>   | <b>0,6</b> | <b>0,8</b> | <b>0,022</b>           | <b>0,9</b>          | <b>0,</b>     |



### Annexe 3: TEST DE COLIN WHITE GB 0/14

| vides<br>carottes | vides<br>gamma | RANG<br>m+n | n+m<br>valeurs | m<br>valeurs<br>MVC | n<br>valeurs<br>MVG | Rang<br>des m | Rang<br>des n |
|-------------------|----------------|-------------|----------------|---------------------|---------------------|---------------|---------------|
| 3,1000            | 2,000          | 1           | 1,300          |                     | 1,300               |               | 1             |
| 3,2000            | 2,500          | 2           | 1,500          |                     | 1,500               |               | 2             |
| 1,9000            | 2,800          | 3           | 1,700          |                     | 1,700               |               | 3             |
| 2,9000            | 1,800          | 4           | 1,800          |                     | 1,800               |               | 4             |
| 4,3000            | 4,000          | 6           | 1,9000         | 1,900               |                     | 6             |               |
| 3,2000            | 3,200          | 6           | 1,9000         | 1,900               |                     | 6             |               |
| 3,1000            | 2,800          | 6           | 1,900          |                     | 1,900               |               | 6             |
| 3,2000            | 2,000          | 8,5         | 2,000          |                     | 2,000               |               | 8,5           |
| 3,2000            | 2,500          | 8,5         | 2,000          |                     | 2,000               |               | 8,5           |
| 3,7000            | 3,300          | 11,5        | 2,100          |                     | 2,100               |               | 11,5          |
| 2,5000            | 1,700          | 11,5        | 2,100          |                     | 2,100               |               | 11,5          |
| 2,8000            | 3,700          | 11,5        | 2,100          |                     | 2,100               |               | 11,5          |
| 2,9000            | 2,500          | 11,5        | 2,100          |                     | 2,100               |               | 11,5          |
| 3,7000            | 2,100          | 14,5        | 2,300          |                     | 2,300               |               | 14,5          |
| 3,8000            | 4,200          | 14,5        | 2,300          |                     | 2,300               |               | 14,5          |
| 1,9000            | 2,100          | 17          | 2,4000         | 2,400               |                     | 17            |               |
| 2,4000            | 1,300          | 17          | 2,400          |                     | 2,400               |               | 17            |
| 2,6000            | 1,500          | 17          | 2,400          |                     | 2,400               |               | 17            |
| 2,9000            | 2,400          | 21          | 2,5000         | 2,500               |                     | 21            |               |
| 3,4000            | 2,100          | 21          | 2,500          |                     | 2,500               |               | 21            |
| 3,1000            | 2,800          | 21          | 2,500          |                     | 2,500               |               | 21            |
| 2,7000            | 2,300          | 21          | 2,500          |                     | 2,500               |               | 21            |
| 3,1000            | 2,100          | 21          | 2,500          |                     | 2,500               |               | 21            |
| 3,2000            | 2,300          | 24,5        | 2,6000         | 2,600               |                     | 24,5          |               |
| 4,0000            | 3,000          | 24,5        | 2,6000         | 2,600               |                     | 24,5          |               |
| 3,4000            | 2,500          | 26          | 2,7000         | 2,700               |                     | 26            |               |
| 2,8000            | 1,900          | 29          | 2,8000         | 2,800               |                     | 29            |               |
| 2,6000            | 2,400          | 29          | 2,8000         | 2,800               |                     | 29            |               |
| 3,7000            | 4,200          | 29          | 2,800          |                     | 2,800               |               | 29            |
| 3,6000            | 3,600          | 29          | 2,800          |                     | 2,800               |               | 29            |
|                   |                | 29          | 2,800          |                     | 2,800               |               | 29            |
|                   |                | 33          | 2,9000         | 2,900               |                     | 33            |               |

|               |           |                      |        |       |       |      |                     |
|---------------|-----------|----------------------|--------|-------|-------|------|---------------------|
|               |           | 33                   | 2,9000 | 2,900 |       | 33   |                     |
|               |           | 33                   | 2,9000 | 2,900 |       | 33   |                     |
|               |           | 35                   | 3,000  |       | 3,000 |      | 35                  |
|               |           | 37,5                 | 3,1000 | 3,100 |       | 37,5 |                     |
|               |           | 37,5                 | 3,1000 | 3,100 |       | 37,5 |                     |
|               |           | 37,5                 | 3,1000 | 3,100 |       | 37,5 |                     |
|               |           | 37,5                 | 3,1000 | 3,100 |       | 37,5 |                     |
|               |           | 42,5                 | 3,2000 | 3,200 |       | 42,5 |                     |
|               |           | 42,5                 | 3,2000 | 3,200 |       | 42,5 |                     |
|               |           | 42,5                 | 3,2000 | 3,200 |       | 42,5 |                     |
|               |           | 42,5                 | 3,2000 | 3,200 |       | 42,5 |                     |
|               |           | 42,5                 | 3,2000 | 3,200 |       | 42,5 |                     |
|               |           | 42,5                 | 3,200  |       | 3,200 |      | 42,5                |
|               |           | 46                   | 3,300  |       | 3,300 |      | 46                  |
|               |           | 47,5                 | 3,4000 | 3,400 |       | 47,5 |                     |
|               |           | 47,5                 | 3,4000 | 3,400 |       | 47,5 |                     |
|               |           | 49,5                 | 3,6000 | 3,600 |       | 49,5 |                     |
|               |           | 49,5                 | 3,600  |       | 3,600 |      | 49,5                |
|               |           | 52,5                 | 3,7000 | 3,700 |       | 52,5 |                     |
|               |           | 52,5                 | 3,7000 | 3,700 |       | 52,5 |                     |
|               |           | 52,5                 | 3,7000 | 3,700 |       | 52,5 |                     |
|               |           | 52,5                 | 3,700  |       | 3,700 |      | 52,5                |
|               |           | 55                   | 3,8000 | 3,800 |       | 55   |                     |
|               |           | 56,5                 | 4,0000 | 4,000 |       | 56,5 |                     |
|               |           | 56,5                 | 4,000  |       | 4,000 |      | 56,5                |
|               |           | 58,5                 | 4,200  |       | 4,200 |      | 58,5                |
|               |           | 58,5                 | 4,200  |       | 4,200 |      | 58,5                |
|               |           | 60                   | 4,3000 | 4,300 |       | 60   |                     |
| <b>m réf</b>  | <b>30</b> | Somme des rangs n    |        |       |       |      | <b>712</b>          |
| <b>n cont</b> | <b>30</b> | Limites du bilatéral |        |       |       |      | <b>782 et 1 048</b> |

#### Annexe 4: TEST DE COLIN WHITE EB 0/14

| vides carottes | vides gamma | RANG m+n | n+m valeurs | m valeurs MVC | n valeurs MVG | Rang des m | Rang des n |
|----------------|-------------|----------|-------------|---------------|---------------|------------|------------|
| 5,1000         | 2,600       | 1        | 1,800       |               | 1,800         |            | 1          |
| 3,4000         | 3,200       | 2        | 2,100       |               | 2,100         |            | 2          |
| 2,3000         | 2,600       | 3        | 2,200       |               | 2,200         |            | 3          |
| 3,5000         | 2,800       | 4        | 2,3000      | 2,300         |               | 4          |            |
| 3,9000         | 2,700       | 7,5      | 2,600       |               | 2,600         |            | 7,5        |
| 3,6000         | 1,800       | 7,5      | 2,600       |               | 2,600         |            | 7,5        |
| 3,8000         | 3,200       | 7,5      | 2,600       |               | 2,600         |            | 7,5        |
| 4,2000         | 2,600       | 7,5      | 2,600       |               | 2,600         |            | 7,5        |
| 3,1000         | 2,600       | 7,5      | 2,600       |               | 2,600         |            | 7,5        |
| 3,5000         | 2,900       | 7,5      | 2,600       |               | 2,600         |            | 7,5        |
| 2,8000         | 3,900       | 11,5     | 2,700       |               | 2,700         |            | 11,5       |
| 4,1000         | 3,200       | 11,5     | 2,700       |               | 2,700         |            | 11,5       |
| 4,9000         | 2,200       | 15,5     | 2,8000      | 2,800         |               | 15,5       |            |
| 3,5000         | 3,100       | 15,5     | 2,800       |               | 2,800         |            | 15,5       |
| 4,0000         | 3,600       | 15,5     | 2,800       |               | 2,800         |            | 15,5       |
| 3,0000         | 2,100       | 15,5     | 2,800       |               | 2,800         |            | 15,5       |

|                 |       |                         |        |       |       |      |                 |
|-----------------|-------|-------------------------|--------|-------|-------|------|-----------------|
| 3,6000          | 2,800 | 15,5                    | 2,800  |       | 2,800 |      | 15,5            |
| 4,2000          | 2,600 | 15,5                    | 2,800  |       | 2,800 |      | 15,5            |
| 3,8000          | 3,200 | 19                      | 2,900  |       | 2,900 |      | 19              |
| 3,8000          | 3,000 | 21                      | 3,0000 | 3,000 |       | 21   |                 |
| 4,0000          | 3,200 | 21                      | 3,0000 | 3,000 |       | 21   |                 |
| 3,9000          | 2,800 | 21                      | 3,000  |       | 3,000 |      | 21              |
| 4,9000          | 2,800 | 23,5                    | 3,1000 | 3,100 |       | 23,5 |                 |
| 4,2000          | 2,800 | 23,5                    | 3,100  |       | 3,100 |      | 23,5            |
| 4,9000          | 4,300 | 27,5                    | 3,200  |       | 3,200 |      | 27,5            |
| 6,1000          | 4,600 | 27,5                    | 3,200  |       | 3,200 |      | 27,5            |
| 4,2000          | 2,600 | 27,5                    | 3,200  |       | 3,200 |      | 27,5            |
| 3,0000          | 4,100 | 27,5                    | 3,200  |       | 3,200 |      | 27,5            |
| 5,4000          | 2,700 | 27,5                    | 3,200  |       | 3,200 |      | 27,5            |
| 4,2000          | 3,200 | 27,5                    | 3,200  |       | 3,200 |      | 27,5            |
|                 |       | 31                      | 3,4000 | 3,400 |       | 31   |                 |
|                 |       | 33                      | 3,5000 | 3,500 |       | 33   |                 |
|                 |       | 33                      | 3,5000 | 3,500 |       | 33   |                 |
|                 |       | 33                      | 3,5000 | 3,500 |       | 33   |                 |
|                 |       | 36                      | 3,6000 | 3,600 |       | 36   |                 |
|                 |       | 36                      | 3,6000 | 3,600 |       | 36   |                 |
|                 |       | 36                      | 3,600  |       | 3,600 |      | 36              |
|                 |       | 39                      | 3,8000 | 3,800 |       | 39   |                 |
|                 |       | 39                      | 3,8000 | 3,800 |       | 39   |                 |
|                 |       | 39                      | 3,8000 | 3,800 |       | 39   |                 |
|                 |       | 42                      | 3,9000 | 3,900 |       | 42   |                 |
|                 |       | 42                      | 3,9000 | 3,900 |       | 42   |                 |
|                 |       | 42                      | 3,900  |       | 3,900 |      | 42              |
|                 |       | 44,5                    | 4,0000 | 4,000 |       | 44,5 |                 |
|                 |       | 44,5                    | 4,0000 | 4,000 |       | 44,5 |                 |
|                 |       | 46,5                    | 4,1000 | 4,100 |       | 46,5 |                 |
|                 |       | 46,5                    | 4,100  |       | 4,100 |      | 46,5            |
|                 |       | 50                      | 4,2000 | 4,200 |       | 50   |                 |
|                 |       | 50                      | 4,2000 | 4,200 |       | 50   |                 |
|                 |       | 50                      | 4,2000 | 4,200 |       | 50   |                 |
|                 |       | 50                      | 4,2000 | 4,200 |       | 50   |                 |
|                 |       | 50                      | 4,2000 | 4,200 |       | 50   |                 |
|                 |       | 53                      | 4,300  |       | 4,300 |      | 53              |
|                 |       | 54                      | 4,600  |       | 4,600 |      | 54              |
|                 |       | 56                      | 4,9000 | 4,900 |       | 56   |                 |
|                 |       | 56                      | 4,9000 | 4,900 |       | 56   |                 |
|                 |       | 56                      | 4,9000 | 4,900 |       | 56   |                 |
|                 |       | 58                      | 5,1000 | 5,100 |       | 58   |                 |
|                 |       | 59                      | 5,4000 | 5,400 |       | 59   |                 |
|                 |       | 60                      | 6,1000 | 6,100 |       | 60   |                 |
| m réf<br>n cont |       | Somme des<br>rangs n    |        |       |       |      | 611,5           |
|                 |       | Limites du<br>bilateral |        |       |       |      | 782 et 1<br>048 |