



N° 41
MARS
2020

Sommaire

1 | Introduction / Contexte

2 | Descriptif de l'étude menée par l'IDRRIM

3 | Résultats du traitement de comparaison des données par la méthode à la tache et la méthode profilométrique

4 | Conclusions et perspectives

5 | Bibliographie

Mesure de la macrotexture par des méthodes optiques pour la réception des chaussées : avancées sur la comparaison avec la méthode de l'essai à la tache

1 Introduction / Contexte

La réception en adhérence des couches de roulement neuves s'effectue en France sur la base de spécifications de la macrotexture des revêtements routiers (Guide IDRRIM « *L'adhérence des chaussées* » – octobre 2015 [1] ; Instruction technique « *adhérence* » – 2015 [2]).

Il existe deux méthodes de mesure de la macrotexture, présentant des contraintes opérationnelles différentes : l'essai volumétrique à la tache (EN NF 13036-1 [3]) fournissant une PMT (Profondeur Moyenne de Texture) et la mesure profilométrique (NF EN ISO 13473-1 : 2004 [4]) fournissant une PMP (Profondeur Moyenne de Profil).

L'essai volumétrique (PMT) est la méthode de référence ; il s'agit d'une mesure statique ponctuelle dépendant fortement de l'opérateur. Sa mise en œuvre nécessite de réaliser de nombreux essais pour être représentatif de l'état de la chaussée, ce qui est chronophage. Egalement, il peut être réalisé un essai profilométrique utilisant une technique laser, par exemple sur chaussée neuve dès que le revêtement a refroidi. Il permet une mesure en continu, dans le flux de circulation, mais il ne peut être utilisé sur chaussée humide ou brillante.

À l'heure actuelle, un lot peut être accepté indifféremment sur la base d'un essai volumétrique (PMT) ou profilométrique (PMP). En revanche, un lot ne peut être refusé que sur la base d'un essai volumétrique (PMT).

Depuis 2005, une relation linéaire dite « *loi plancher* » entre la PMP et la PMT est préconisée : $PMT = 1,1 * PMP$ [1]. Néanmoins, cette relation a été déterminée sur un échantillonnage réduit de techniques routières et elle ne permet pas de traiter la question des valeurs maximales de macrotexture dans les marchés.

Dans ce contexte, l'IDRRIM, via le sous-groupe « *adhérence* » du GNCDS, a souhaité dès 2012 travailler sur la mise à jour d'une relation entre les deux indicateurs de macrotexture. La présente note décrit l'étude menée et les principaux résultats obtenus.

2 Descriptif de l'étude menée par l'IDRRIM

Dans un premier temps, un recensement des données disponibles (mesures PMP et PMT effectuées parallèlement sur les mêmes zones d'essais de différents chantiers) a été réalisé, puis ces données ont été analysées afin d'évaluer la possibilité d'actualiser la relation PMP/PMT. Cependant, le nombre de données exploitables était trop faible (localisation, informations sur les formulations manquantes, ...) et il n'a pas été possible d'atteindre l'objectif.

En 2015, l'IDRRIM, via le GNCDS, a mis en place un observatoire « *PMP-PMT* » afin de traiter cette question. Cet observatoire, piloté par l'Université Gustave Eiffel (ex-IFSTTAR), a permis de recueillir pendant deux ans des données sur une grande variété de chantiers grâce à l'implication du Cerema (Strasbourg, Lyon, Bordeaux), de l'ASFA, des DIR et des conseils départementaux. La base de données ainsi constituée a été analysée à l'aide de différentes méthodes statistiques.

Méthodologie

La méthodologie appliquée dans le cadre de cette étude est détaillée sur la Figure 1. L'étude a été divisée en trois étapes :

1. Définition du formulaire de collecte des données et du guide de collecte par les membres du sous-groupe « *adhérence* » du GNCDS de l'IDRRIM ;
2. Réalisation des mesures de macrotexture par les équipes et mise en forme des données ;
3. Création d'une base de données et analyses statistiques de son contenu.

L'étape 1 s'est avérée cruciale car elle a posé les bases de la méthode de collecte en insistant notamment sur la nécessité de disposer de revêtements variés et représentatifs du réseau routier français, de localiser de manière précise les mesures et de fournir les caractéristiques techniques connues de l'enrobé (formulation, mise en oeuvre).

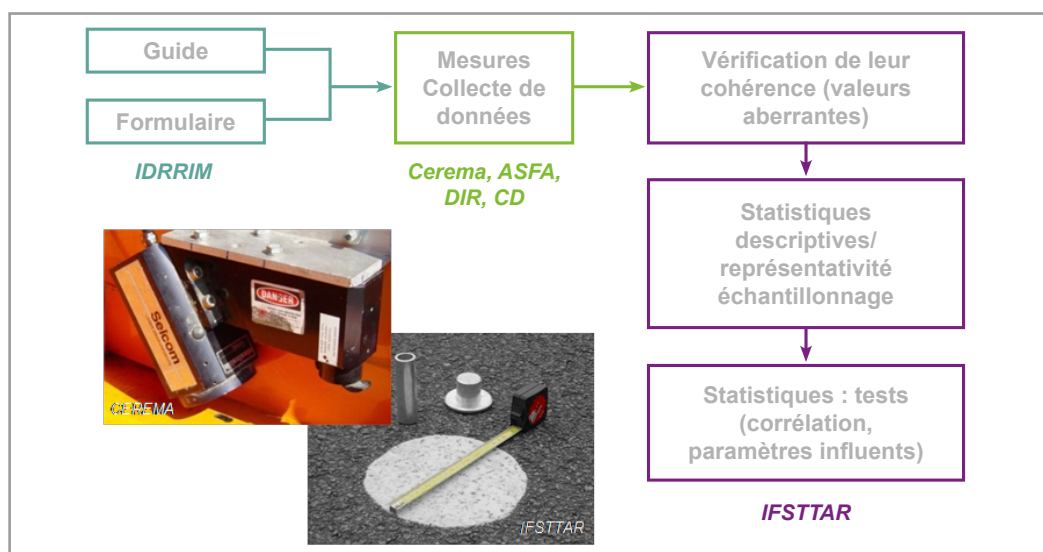


Figure n°1 : Méthodologie de l'étude PMP-PMT

Difficultés rencontrées

Plusieurs difficultés sont apparues au fur et à mesure de l'avancement de l'expérimentation. Tout d'abord, des problèmes de disponibilité de sites d'expérimentation sur lesquels il était possible de mener successivement les essais de PMT et de PMP sont apparus. De même, le recollage des données de PMT et de PMP, ainsi que la collecte de l'ensemble des informations descriptives requises, ont nécessité du temps.

Ensuite, une difficulté liée à la surreprésentation de certaines techniques routières est apparue. En effet, les chantiers neufs étaient globalement réalisés avec les mêmes types de revêtements, ce qui a obligé les acteurs à orienter leurs recherches de chantiers sur des techniques spécifiques afin d'élargir le panel de l'étude.

Données obtenues

In fine, sur la période considérée, 6 280 mesures représentant un linéaire de 1 100 km environ ont été relevées. Cette première base a été analysée afin d'éliminer les valeurs aberrantes, correspondant par exemple à des valeurs excessives de PMP (> 2,5 mm) liées à des artefacts de mesure.

Après traitement, la base de données finale contient 6 208 mesures. Chaque mesure est constituée d'un couple de valeurs de PMP et de PMT associé à 17 éléments caractéristiques de la géométrie de la route (catégorie de route, type de voies, VL/VR, sens de mesure), du revêtement (formulation, granulométrie, présence ou non d'agrégats d'enrobés, âge, procédé) et des conditions d'essais (réception/suivi, bande de roulement/axe).

La distribution des données de PMP et de PMT est fournie sur la figure 2.

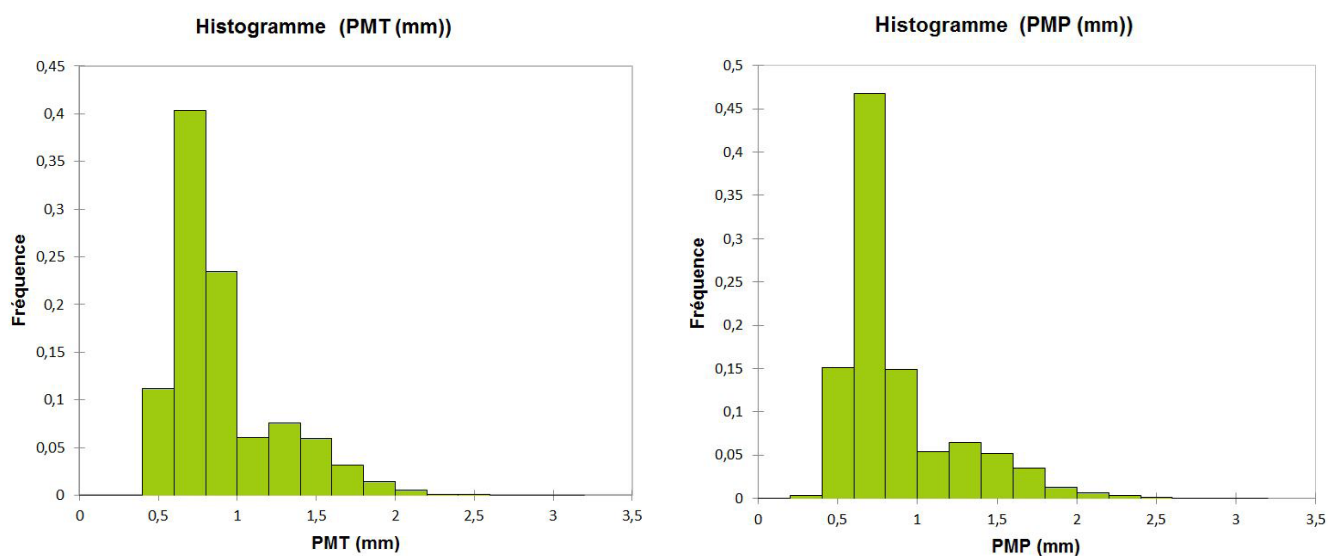


Figure 2 : Distribution des données de macrotexture par classe de 0,40 mm (PMT, PMP)

Concernant les caractéristiques des données, on observe que :

- Plus de 75 % des mesures de la base sont des données mesurées moins de deux mois après leur mise en œuvre, ce qui correspond à de la réception de chantiers. Les mesures sont réalisées en axe et en bande de roulement. 60 % des mesures de la base sont localisées en bande de roulement droite et 40 % en axe ;
- Le Cerema de Strasbourg a réalisé près de la moitié des mesures présentes dans la base, le Cerema de Lyon ayant pour sa part fourni un quart des mesures. Ceci a conduit à une analyse spécifique qui a permis de conclure que cette surreprésentation de Strasbourg n'induit pas de biais dans l'étude ;
- Plus de la moitié des mesures sont faites sur autoroutes et 2 x 2 voies ;
- 80 % des mesures sont réalisées sur la voie lente ; enfin, 77 % des enrobés sont des techniques « à chaud » avec une granulométrie 0/10. Plus de la moitié des données de la base sont obtenues sur des BBSG (Béton Bitumineux Semi-Grenu), 20 % sur des BBTM (Béton Bitumineux Très Mince), 20 % sur des BBME (Béton Bitumineux à Module Elevé). Le reste des données se répartit sur des techniques moins utilisées comme des enduits superficiels, des SMA (Stone Mastic Asphalt),...

3 Résultats du traitement de comparaison des données par la méthode à la tache et la méthode profilométrique

Pour l'exploitation des résultats de mesures collectés, une approche statistique a été privilégiée. Trois types d'analyse ont été menés sur cette base, à savoir :

1. Une analyse en composantes principales (ACP) ;
2. Une analyse de la variance (ANOVA) ;
3. Une analyse de régression linéaire.

Elles visent à déterminer les paramètres influant sur la relation entre PMP et PMT ainsi que le niveau de corrélation existant entre ces deux indicateurs de macrotexture.

Qualification des données

La première partie de l'étude a permis de déterminer les paramètres peu influents et donc inutiles à retenir pour établir une relation entre la PMT et la PMP. Les tests statistiques ont ainsi permis de s'affranchir des variables suivantes : type et catégorie de route, voie de mesure, sens de mesure, laboratoire mesureur, taux d'agrégats d'enrobés, procédé, trace de mesure (axe/bande de roulement).

La variation de PMP peut donc s'écrire sous la forme suivante :

$$PMP = a \times PMT + b \text{ (formulation)}$$

Avec b (formulation) : offset du modèle de régression variant avec la formulation.

L'âge du revêtement lors des mesures ne semblait pas avoir d'impact statistiquement significatif. Toutefois, ce paramètre a fait l'objet d'une attention particulière du fait des difficultés soulevées par la mesure profilométrique au jeune âge.

Corrélations

Les premiers calculs sont réalisés sur la loi de régression linéaire déterminée sur tous les revêtements confondus. Afin d'apprécier la qualité de prédiction obtenue par la base de données, la base complète a été échantillonnée à l'aide du logiciel XLSTAT afin d'utiliser 2/3 des valeurs pour calibrer une relation entre PMP et PMT et 1/3 des valeurs pour valider cette relation. Par souci de simplification, on parlera de base de calibration (2/3 des valeurs) et de base de validation (1/3 des valeurs). La distribution des données de PMT et PMP des bases de calibration et de validation est identique à celle de la base complète.

Relation « tous revêtements »

En utilisant la base de calibration, une relation linéaire présentant un coefficient de régression R^2 de 0,73 est obtenue (Figure 3).

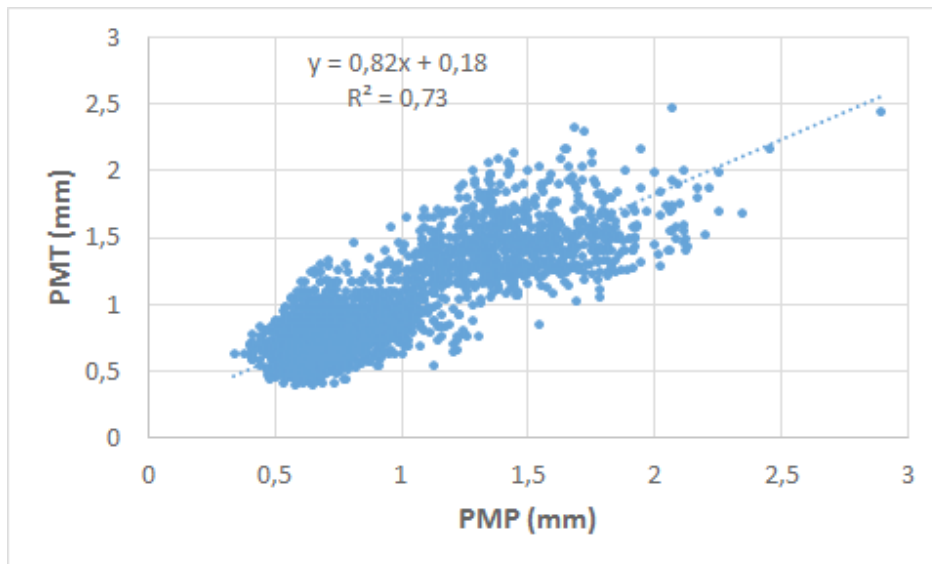


Figure n°3 : Relation PMP-PMT (tous revêtements)

La base de validation est ensuite utilisée afin d'estimer l'erreur induite par la mise en œuvre de cette relation linéaire. Deux paramètres sont pris en compte : l'erreur quadratique moyenne et le pourcentage d'erreur absolu en moyenne.

L'erreur quadratique moyenne est définie de la manière suivante :

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{1}^{n} (PMT_{théorique} - PMT_{mesurée})^2}$$

Avec n : nombre de valeurs de PMT dans la base.

De plus, le pourcentage d'erreur absolue en moyenne se calcule de la manière suivante :

$$\%EAM = \frac{1}{n} \sum_{1}^{n} \frac{|PMT_{théorique} - PMT_{mesurée}|}{PMT_{mesurée}}$$

Ainsi, l'erreur quadratique moyenne RMS vaut 0,16 mm et l'erreur absolue en moyenne est de 14 %.

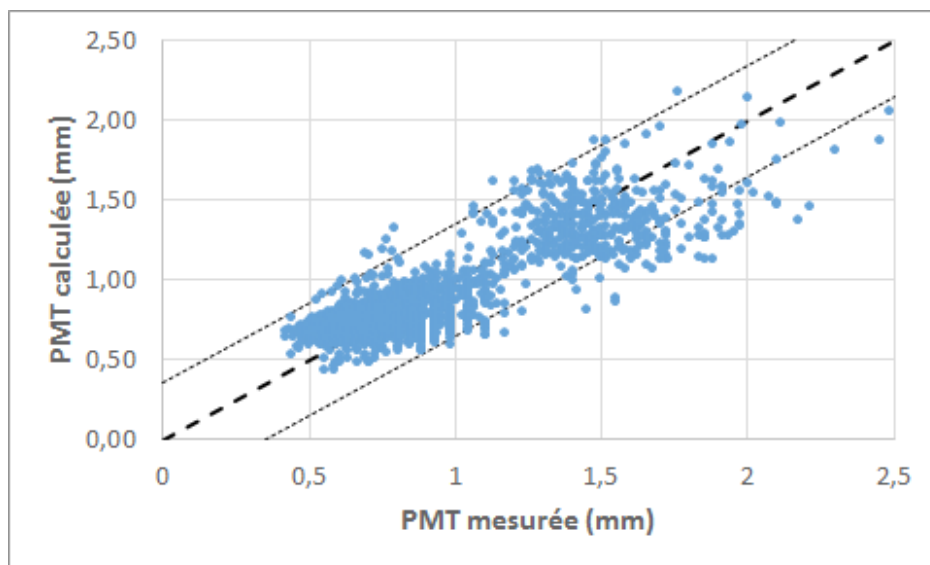


Figure n°4 : Relation PMP-PMT (tous revêtements) et fuseau associé (droite de régression à $\pm 0,35$ mm)

On note également que 95 % des valeurs se situent dans un fuseau correspondant à la droite de régression à $\pm 0,35$ mm (Figure 4).

Relation « par revêtement »

Afin de compléter cette étude, une approche par revêtement a été testée. Trois formulations sont retenues compte tenu des effectifs de la base : BBSG (Figure 5), BBTM (Figure 6) et BBME (Figure 7).

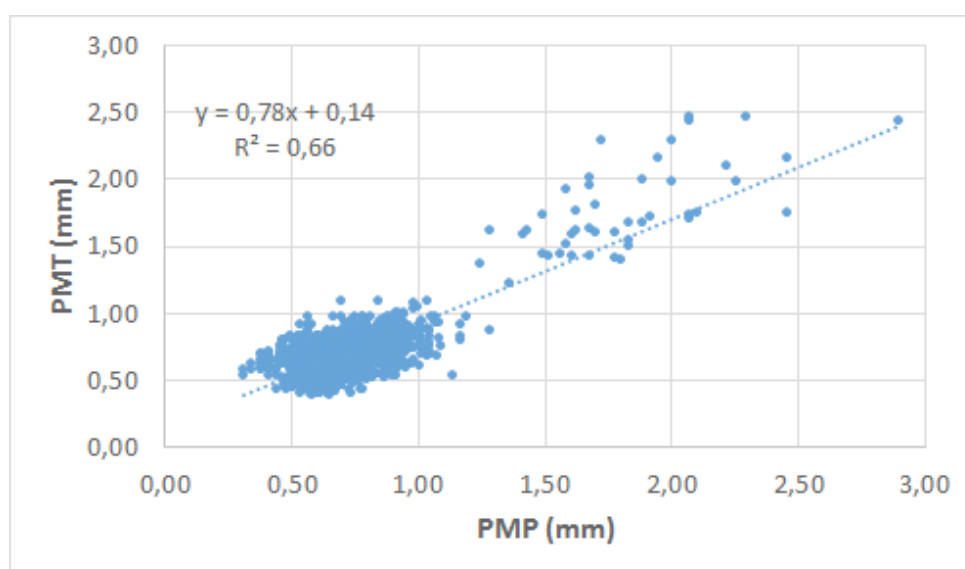


Figure n°5 : Relation PMP-PMT (BBSG)

Pour les BBSG, l'effectif pris en compte est de 2 692 mesures soit environ 450 km de linéaire. La valeur de RMS est égale à 0,13 mm et l'erreur absolue moyenne vaut 13 %.

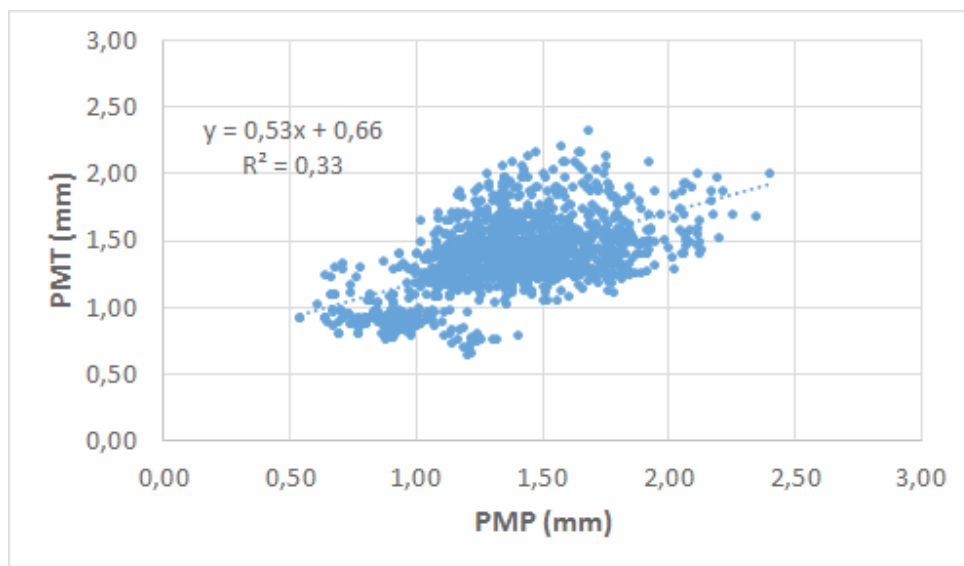


Figure n°6 : Relation PMP-PMT (BBTM)

Pour le BBTM, l'effectif pris en compte est de 1 345 mesures soit 200 km environ de linéaire. La valeur de RMS est égale à 0,26 mm et l'erreur absolue moyenne vaut 16 %.

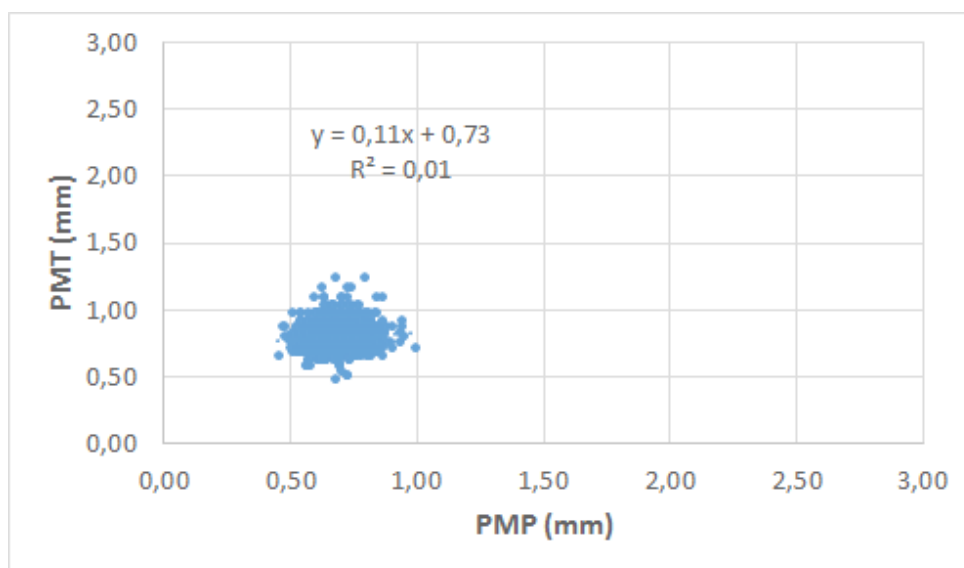


Figure n°7 : Relation PMP-PMT (BBME)

Pour le BBME, l'effectif pris en compte est de 1 159 mesures. La droite de régression obtenue sur cet échantillon est non pertinente. Les valeurs de RMS et d'erreur absolue moyenne ne sont pas calculées.

La détermination des corrélations par familles de revêtement pose quelques difficultés. En effet, dans le cas du BBME, l'étendue des valeurs est trop faible pour permettre d'obtenir une droite de régression correcte. Pour le BBTM, le nuage de points est assez étendu et large, ce qui rend la définition d'une droite de régression linéaire quelque peu hasardeuse. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que cette analyse mélange des mesures réalisées sur des BBTM 0/4, 0/6 et 0/10 qui présentent des textures différentes. En ce qui concerne les BBSG, on note la présence de quelques valeurs de macrotexture anormalement élevées qui orientent la droite de régression linéaire. Dans tous les cas, les coefficients de régressions linéaires ne sont pas satisfaisants et ils n'amènent aucune amélioration par rapport à l'existant.

Influence de l'âge du revêtement

L'influence de l'âge du revêtement pour les mesures de réception a été spécifiquement examinée. Ainsi, la base de données a été séparée en deux parties : mesures réalisées sur des revêtements ayant moins de 6 semaines (délai maximal de mesure en cas de réception de chantier [1]) et celles réalisées sur des revêtements ayant plus de 6 semaines.

2 190 mesures de PMP ont été réalisées dans un délai de moins de 6 semaines après mise en oeuvre de l'enrobé, soit 35 % de l'effectif de la base de données. La relation linéaire entre PMP et PMT est assez proche de celle établie en prenant toute la base (Figure 8). La valeur de RMS est égale à 0,20 mm et l'erreur absolue moyenne vaut 15 %, ce qui est comparable aux résultats précédents.

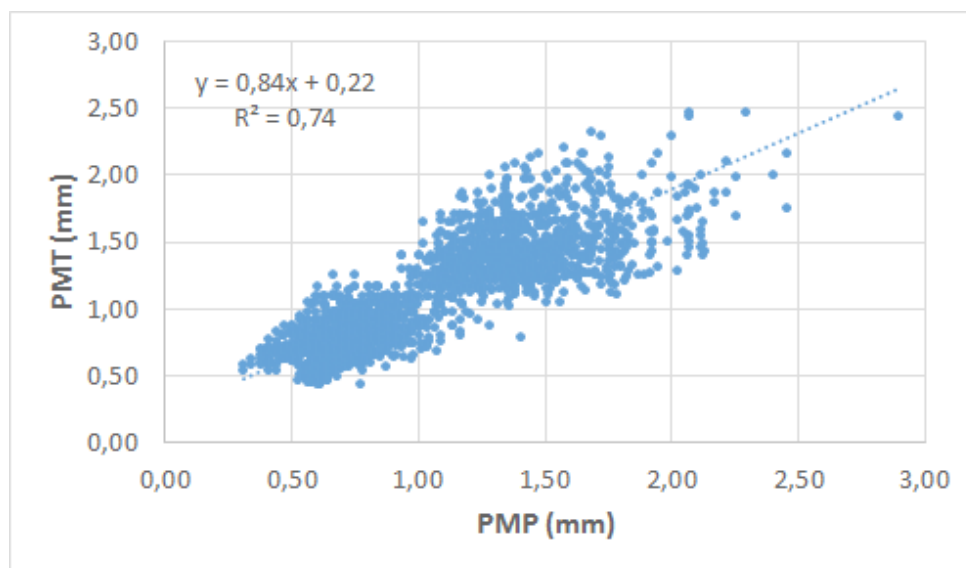


Figure n°8 : Relation PMP-PMT (tous revêtements) – âge inférieur à 6 semaines

4 018 mesures de PMP ont été réalisées au-delà du délai de 6 semaines après mise en oeuvre de l'enrobé, soit 65 % de l'effectif. La Figure 9 présente des données légèrement moins bien réparties par rapport à la figure précédente, ce qui peut expliquer un léger changement de pente de la régression linéaire entre PMP et PMT. La valeur de RMS est égale à 0,14 mm et l'erreur absolue moyenne vaut 13 %, ce qui est comparable aux résultats précédents.

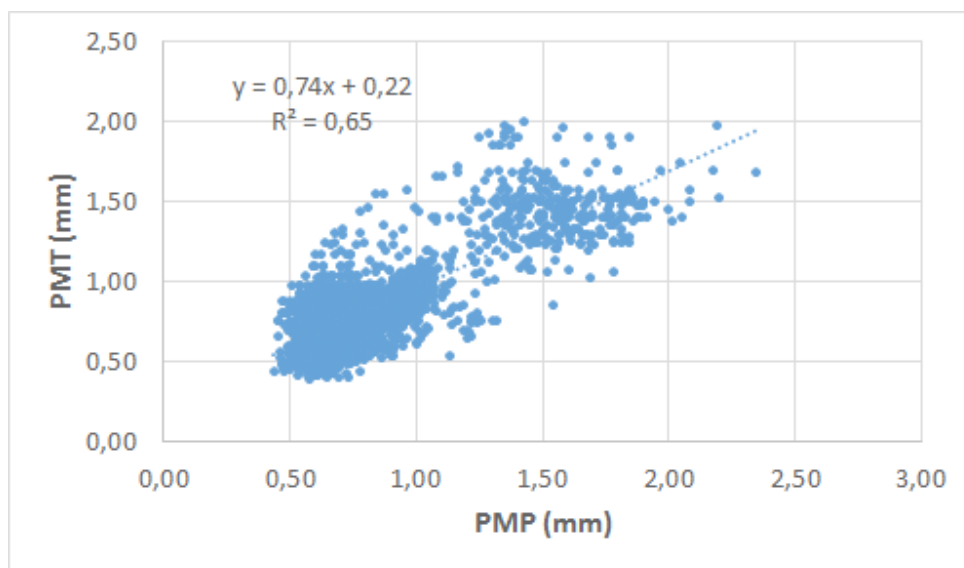


Figure n° 9 : Relation PMP-PMT (tous revêtements) – âge supérieur à 6 semaines

Enfin, la régression linéaire PMP-PMT a été vérifiée en considérant que la réception à l'aide des mesures de PMP pouvait être réalisée dans un délai de 3 mois. 2 595 mesures de PMP ont été prises en compte, soit 42 % de la base de données initiale. La relation linéaire entre PMP et PMT est quasi identique à celle établie avec les mesures de moins de 6 semaines (Figure 10). La valeur de RMS est égale à 0,19 mm et l'erreur absolue moyenne vaut 15 %, ce qui est identique aux résultats précédents.

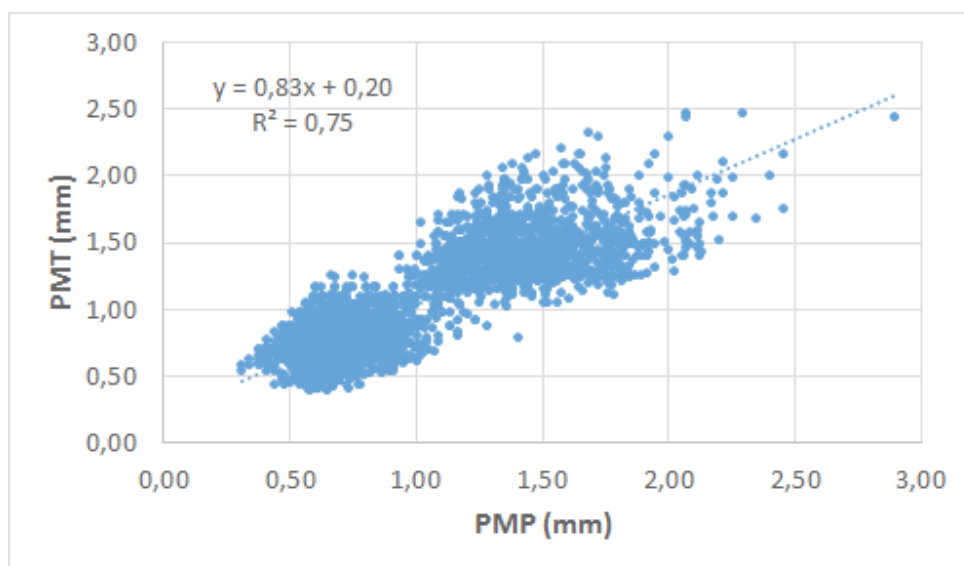


Figure n°10 : Relation PMP-PMT (tous revêtements) – âge inférieure à 3 mois

Point de vigilance de l'étude

Cette étude avait pour objectif de vérifier la validité des corrélations existantes entre PMP et PMT et si nécessaire de la mettre à jour. L'observatoire a ainsi pu collecter 6 208 mesures valides, représentant environ 1 100 km de linéaire routier. Le travail de collecte de données n'a pas permis d'obtenir des effectifs équilibrés entre les différentes techniques utilisées. Cependant, les principaux revêtements rencontrés sur le réseau routier français sont représentés et la loi de régression semble relativement fiable en première approche et constitue une amélioration par rapport à la loi plancher antérieure.

L'erreur de prédiction de cette relation est à comparer aux écarts de répétabilité et de reproductibilité de l'essai PMT, respectivement de 12 % et de 17 % sur un même lot.

Par ailleurs, une amélioration des résultats de ce travail peut être espérée dans le futur. En effet, des travaux de normalisation internationaux (ISO et EN) menés depuis une dizaine d'années ont abouti en 2019 à la révision de la norme ISO EN 13473-1 permettant de calculer l'indicateur PMP. Les principales avancées concernent l'amélioration du filtrage des données brutes et l'introduction d'une méthode de correction des artefacts de mesure (ou « *pics* »). L'exploitation des données avec cette nouvelle méthode pourrait avoir un impact notable sur la dispersion des valeurs de PMP calculées.

Cette nouvelle exploitation nécessite un important travail calculatoire qui sera mené à partir de 2020. Dans le même temps, un travail de collecte des données supplémentaires est engagé afin d'augmenter la robustesse des résultats.

4 Conclusions et perspectives

Cette étude a permis de constituer une base de données contenant 6 208 mesures de macrotexture des revêtements (PMP, PMT), ainsi que des éléments caractéristiques de la géométrie de la route, des conditions d'essais et du revêtement.

Des analyses statistiques ont permis de déterminer une loi de corrélation linéaire entre PMP et PMT très proche de la relation proposée dans la norme NF EN ISO 13473-1 (2004) [2], soit :

$$PMT = 0,82 * PMP + 0,18 \text{ avec un } R^2 = 0,73$$

Elle a été déterminée en considérant un échantillon de 2/3 des valeurs prises au hasard dans la base de données incluant tous les types de revêtement. La relation a ensuite été validée sur le 1/3 des valeurs restantes. La valeur de RMS (erreur quadratique moyenne) est égale à 0,16 mm et l'erreur absolue moyenne vaut 14 %. On note également que 95 % des valeurs se situent dans un « fuseau » correspondant à la droite de régression à $\pm 0,35$ mm.

Une analyse par type de revêtement, qui par nature produisent des populations assez homogènes, n'a pas permis de définir des relations spécifiques. Dans ces conditions, la poursuite de l'observatoire est nécessaire afin de disposer d'un effectif de mesures couvrant une gamme de valeurs plus large et mieux répartie. Cette extension associée à un traitement amélioré des données permettra de préciser la corrélation « tous revêtements » et de s'assurer qu'elle est suffisante.

Par ailleurs, l'analyse des données en fonction de l'âge des revêtements au moment des mesures ne modifie pas de manière significative la qualité de la régression linéaire entre PMP et PMT. En revanche, l'analyse montre que l'extension à 3 mois du délai de réalisation des mesures de PMP a peu d'incidence sur la relation entre PMP et PMT.

De plus, cette étude a permis de vérifier que la relation linéaire préconisée dans la norme NF EN ISO 13473-1 (2004) restait valide. Elle a également mis en exergue le fait que l'établissement d'une relation linéaire entre deux paramètres de macrotexture calculés suivant des principes de mesure différents, s'accompagne d'un niveau d'incertitude significatif du fait de l'incertitude sur chacune des mesures, et dont il faut tenir compte dans les analyses. Il peut être utile dans certains cas de chantier de procéder à un recalage de la relation entre mesures de PMP et de PMT sur une planche de référence afin de réduire ce niveau d'incertitude, par exemple dans le cas de techniques peu représentées dans l'étude.

Enfin, la loi « plancher » ($PMP = 1,1 * PMT$) reste utilisable dans le cadre de la réception de couches de roulement neuves lorsqu'il n'y a pas de valeur maximale de PMT spécifiée.

L'IDRRIM va poursuivre ses travaux afin de tenter d'améliorer la connaissance de la relation entre PMT et PMP, notamment avec les nouvelles règles de filtrage prévues dans la nouvelle version de la norme ISO 13473-1 publiée en 2019.

5 Bibliographie

- [1] IDRRIM, L'adhérence des chaussées - État de l'art et recommandations, Ed. Cerema, Octobre 2015, 64 pages.
- [2] Instruction Technique relative à l'adhérence des couches de roulement neuves du domaine routier, 30 septembre 2015, 11 pages.
- [3] NF EN 13036-1, caractéristiques de surface des routes et aérodromes - Méthodes d'essai - Partie 1 : mesurage de la profondeur de macrotecture de la surface d'un revêtement à l'aide d'une technique volumétrique à la tache, Septembre 2010, 12 pages.
- [4] NF EN ISO 13473-1, Caractérisation de la texture d'un revêtement de chaussée à partir de relevés de profils de la surface - Partie 1: Détermination de la profondeur moyenne du profil, Octobre 2004, 43 pages.
- [5] Bouyer, J. Hémon, D. Cordier, S. Derriennic, F. Stücker, I. Stengel, B. & Clavel, J. (2009). Epidémiologie : Principes et méthodes quantitatives, Ed. Tec & Doc, Lavoisier, 498 pages.



La présente note d'information a été rédigée par Veronique Cerezo (IFSTTAR), et relue par le sous-groupe Adhérence du GNCDS de l'IDRRIM, ainsi que par le comité opérationnel Gestion de Patrimoine d'Infrastructures de l'IDRRIM.

Avertissement : La présente note est destinée à une information rapide. La contrepartie de cette rapidité est le risque d'erreur et de non exhaustivité. Ce document ne peut en aucun cas engager la responsabilité ni des auteurs, ni de l'Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité.



9, rue de Berri - 75008 Paris - Tél : +33 1 44 13 32 99

www.idrrim.com - idrrim@idrrim.com

 [@IDRRIM](https://twitter.com/IDRRIM)

Association loi 1901