

# Valorisation des déchets de sachets plastique pour des enrobés routiers plus performants

NOUALI Mohammed<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire L2MGC, CY Cergy Paris Université

<sup>2</sup> Laboratoire LTPiTE, ENSTP, Algérie

## RESUME

Cette étude vise la valorisation du déchet de sachets plastique pour la modification d'un bitume pur. Le problème majeur des bitumes modifiés par le plastique (BmP) est la séparation de phases (phase riche en bitume et phase riche en plastique) pendant leur stockage à hautes températures. La séparation de phases est évaluée par l'essai normalisé de stabilité au stockage. Dans ce travail, l'essai normalisé a été critiqué et une autre procédure a été proposée pour évaluer la séparation de phases. Des essais physiques et rhéologiques ont été utilisés pour mettre en évidence l'apport du déchet plastique sur les caractéristiques du bitume dans un premier temps et évaluer le potentiel de séparation de phases entre le bitume et les particules de plastique dans un deuxième temps. Les résultats ont montré que le plastique contribue positivement dans l'amélioration des performances du bitume. Les résultats de l'évaluation de la séparation de phases ont montré que la totalité des particules de plastique se déplacent vers le haut de l'échantillon stocké sans agitation (selon la norme). Cependant, les particules de plastique restent bien distribuées dans la matrice bitumineuse pour les échantillons stockés sous une faible agitation continue selon la nouvelle procédure d'essai proposée.

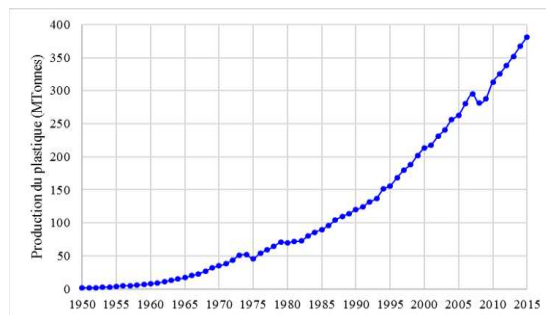
**Mots-clefs** Bitume modifié, déchets de sachets plastique, stabilité au stockage, séparation de phases.

## I. INTRODUCTION

Les dégradations prématurées qui apparaissent sur de nombreuses chaussées routières et autoroutières, au cours de leurs premières années de service, représentent une préoccupation majeure pour les autorités concernées par la durabilité des infrastructures et la rentabilité des investissements financiers routiers. Les enrobés bitumineux de type traditionnel ; mélange de granulats et de bitume pur, ne répondent plus aux exigences, sollicitations mécaniques, thermiques et thermomécaniques très élevées imposées par les conditions réelles d'exploitation des chaussées. Les dégradations prématurées des chaussées routières ont provoqué le recours à l'introduction de nouveaux matériaux tels que l'Enrobé à Module Elevé (EME) et les bitumes modifiés par les polymères afin d'améliorer les performances mécaniques des enrobés et augmenter la durée de vie de la chaussée routière.

D'un autre côté, la production annuelle de plastique a presque été multipliée par 200, depuis 1950, pour atteindre 381 millions de tonnes en 2015 (Geyer et al., 2017). La Fig. 1 montre l'évolution alarmante de la production mondiale de plastique, mesurée en millions de tonnes par an, de 1950 à 2015 (Geyer et al., 2017). En Méditerranée, la France est le premier producteur de déchets

plastiques avec 4,5 millions de tonnes de déchets plastiques, environ 66,6 kg/personne, dont 22% recyclés, 40% incinérés, 36% enfouis et 2% jetés dans la nature (WWF, 2019).



**FIGURE 1.** Production mondiale annuelle de déchets plastique, mesurée en tonnes par an (Geyer et al., 2017)

La production croissante de déchets plastique à l'échelle planétaire requiert la mise en place d'initiatives efficaces afin d'éliminer graduellement cette source de pollution. Plusieurs recherches ont été effectuées sur la réutilisation des déchets plastiques dans les matériaux routiers pour améliorer les performances mécaniques des chaussées bitumineuses et diminuer les risques environnementaux de ces déchets. Il a été trouvé que les déchets plastique améliorent significativement les caractéristiques physiques des bitumes et les performances mécaniques des enrobés bitumineux.

Comme tous les bitumes modifiés aux polymères, le bitume-plastique devient malheureusement instable durant son stockage à hautes températures. Il subit une séparation de phases, phase riche en bitume et phase riche en plastique. La séparation de phases des liants modifiés par les polymères reste le problème majeur de la majorité des bitumes modifiés et limite l'utilisation de ces bitumes dans la pratique de la construction routière. Le mécanisme de séparation de phases entre le polymère et le bitume peut se produire via les trois phénomènes reconnus: la floculation gravitationnelle ou brownienne des particules fines de polymère, suivie de leur coalescence et enfin de leur crémage jusqu'au sommet de l'échantillon de bitume modifié (Hesp S. A. M and Woodhams R. T, 1992; Pérez-Lepe et al., 2006).

Les chercheurs ont testé différentes solutions pour régler le problème de séparation de phases entre les bitumes et les polymères durant le stockage à hautes températures. Ces additifs sont, dans l'ensemble, restés à un stade expérimental en laboratoire pour des raisons de coût et de sécurité du procédé industriel.

La méthode principale utilisée pour estimer la séparation de phases des bitumes modifiés par des polymères, durant le stockage à hautes températures, est l'essai de stabilité au stockage standardisé dans les normes EN 13399 et ASTM D7173-11. L'essai de stabilité au stockage des bitumes modifiés, tel que réalisé en laboratoire, est sensé simuler la situation du bitume dans les réservoirs de stockage dans les centres d'enrobage lors de la fabrication des enrobés bitumineux. Selon ces normes, le protocole exige que l'échantillon de bitume modifié soit stocké à hautes températures de manière statique dans un tube cylindrique en aluminium pendant un certain temps.

Par ailleurs, les réservoirs de stockage sont équipés d'un agitateur pour mélanger le bitume afin de maintenir l'homogénéité du matériau et l'uniformité de la température au sein du bitume. En réalité, le bitume subit une agitation continue dans le réservoir de stockage avant de le mélanger avec les agrégats. Tel que réalisé, l'essai de stabilité au stockage normalisé se fait sans agitation

continue du bitume modifié ce qui amplifie le caractère instable de ce dernier. En 2005, les chercheurs du NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) ont critiqué le test de l'essai de stabilité au stockage tel que normalisé. De ce fait, le NCHRP ont proposé une méthode différente appelée LAST (LAST : Laboratory Asphalt Stability Test) (Youtcheff et al., 2005).

Le travail présenté dans cet article adresse le problème de l'instabilité au stockage à hautes températures du bitume-plastique. Partant du fait que tous les bitumes subissent une agitation dans les futs ou citernes de stockage, on a introduit et testé l'agitation dans la procédure d'essai de stabilité au stockage à hautes températures. Pour démontrer le bien-fondé de la nouvelle procédure proposée, on a évalué la stabilité au stockage à hautes températures du bitume-plastique selon deux modes de stockage, le premier sans agitation, conforme au standard et le second avec une faible agitation maintenue durant toute la période de stockage.

## II. Matériaux et méthodes

### A. Matériaux

Le bitume utilisé dans ce travail est de classe 50/70, fourni par le laboratoire L2MGC, CY Cergy Paris Université dont sa pénétrabilité à 25 °C est de 52.4 (1/10 mm) et son point de ramollissement est de 50 °C. Les sachets plastiques utilisés dans cette étude sont largement utilisés à porter les marchandises achetées dans les magasins (sachet blanc). Ils sont essentiellement composés de polyéthylène basse densité (LDPE) de formule chimique générale  $(C_2H_4)_n$ . La densité du plastique est  $0,925 \pm 0,01$  et sa température de fusion est 130 °C. Le plastique de sachet a été déchiqueté en petites particules de taille moyenne comprise entre 2 et 5 mm.

### B. Méthodes expérimentales

Les filaments de plastiques sont introduits progressivement dans le bitume préalablement chauffé. Le bitume et le plastique ont été malaxés à une température de  $170 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$  avec une vitesse de malaxage de 1200 tr/min pendant une heure. La teneur en plastique a été fixée à 0.7% de plastique en masse du bitume. L'agitateur utilisé pour faire la modification du bitume est de type Heidolph RzR 2041.

L'essai de pénétrabilité à l'aiguille et du point de ramollissement ont été réalisés selon les normes EN 1426 et EN 1427 respectivement. Les propriétés rhéologiques, telles que le module complexe et l'angle de phase, ont été mesurées dans le domaine viscoélastique linéaire sous un mode de chargement à contrainte imposée avec un balayage en fréquence de 0,1 à 10 Hz et un balayage en température de 20 à 80 °C, en utilisant un Rhéomètre plan-plan de type Rotovisco RT20.

Afin d'évaluer la séparation de phases qui se produit entre le bitume et les particules de plastique, le bitume-plastique a été stocké à haute température (163 °C) pendant 48 heures selon deux modes de stockage, un stockage sans agitation continue selon la norme et un stockage avec une faible agitation continue (300 tr/min). Après le stockage, le bitume-plastique a été divisé en trois parties égales (supérieure, intermédiaire et inférieure) pour les deux modes de stockage et les propriétés physiques et rhéologiques de chaque partie ont été mesurées.

## III. Résultats et discussions

### A. Effet de l'ajout de déchet plastique sur les propriétés physiques et rhéologiques du bitume

Les résultats de la Fig. 2 mettent en évidence le fait que la pénétrabilité décroît et le point de ramollissement augmente après l'incorporation du plastique de sachets dans le liant ; le bitume devenant plus dur avec l'ajout de plastique de sachet. La Fig. 3 montre que le bitume pur et le bitume-plastique ont qualitativement les mêmes allures, augmentation linéaire du module complexe en fonction de la fréquence, pour les températures testées, montrant ainsi un comportement viscoélastique. Le bitume-plastique possède des propriétés viscoélastiques supérieures à celles du bitume pur sur toute la gamme de fréquences testées. A la température de 20 °C et à basse fréquence, le bitume-plastique présente des modules supérieurs à ceux du bitume pur. A hautes fréquences, les modules du bitume-plastique deviennent inférieurs ou égaux à ceux du bitume pur. Il est connu qu'à basse température et à fréquences élevées, les liants présentent un comportement rigide et cassant ce qui est à l'origine des fissurations et dégradation des chaussées bitumineuses à basses températures. A ces conditions, il peut être noté que le bitume-plastique présente une rigidité similaire ou parfois inférieure à celle du bitume pur montrant ainsi que la rigidité apportée par l'ajout de plastique à hautes températures n'influe pas substantiellement sur le comportement des enrobés aux basses températures. A hautes températures, 50 et 80°C, le bitume-plastique présente une rigidité très élevée comparativement au bitume pur. Il est connu qu'à hautes températures et à basse fréquence les liants montrent un comportement visqueux qui favorise l'apparition d'ornières (Hills et al., 1974; Irfan et al., 2018; Lesueur, 2002). Les résultats montrent que l'ajout de plastique améliore la rigidité du bitume à hautes températures et par conséquent améliore la résistance à l'orniérage (Navarro et al., 2009).

Les résultats de variation de l'angle de phase en fonction du module complexe du bitume pur et du bitume-plastique dans l'espace de Black (Fig. 4) montrent que les isothermes sont continues et uniques montrant ainsi que le principe de superposition temps-températures est applicable dans le domaine viscoélastique linéaire à la fois pour le bitume pur et le bitume-plastique (thermorhéologiquement simple). Après l'ajout de plastique, le liant se structure pour avoir un comportement plus élastique, explicité par la diminution de son angle de phase et de sa susceptibilité thermomécanique, à une température ou fréquence donnée comparativement au bitume pur. Conformément à la spécification SHRP (Strategic Highway Research Program), le paramètre d'orniérage  $G^*/\sin\phi$  à 1,6 Hz (fréquence équivalent à une vitesse de 100 Km/h) a été utilisé pour montrer la contribution de l'ajout du plastique dans l'amélioration de la résistance à la déformation permanente du liant modifié. Les résultats présentés dans la Fig. 5 montrent que le paramètre de la résistance à l'ornière ( $G^*/\sin\phi$ ) du bitume-plastique est supérieur à celui du bitume pur sur toute la plage de températures. Selon le critère SHRP, la température provoquant l'orniérage correspond à la température à laquelle le paramètre  $G^*/\sin\phi = 1000$  Pa. On remarque d'après les résultats de la Fig. 5 que l'ajout de plastique augmente la température de l'orniérage d'environ 10 °C par rapport à celle du bitume pur.

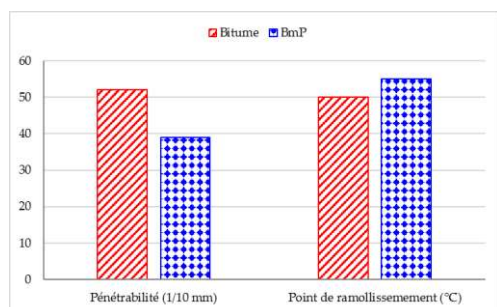


FIGURE 2. Pénétrabilité et point de ramollissement du bitume pur et bitume-plastique

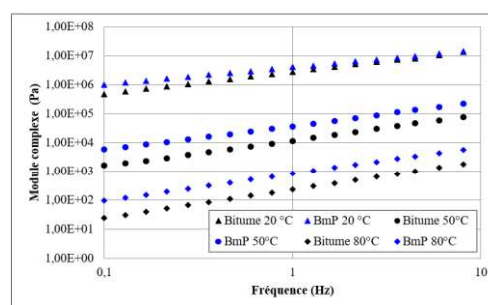
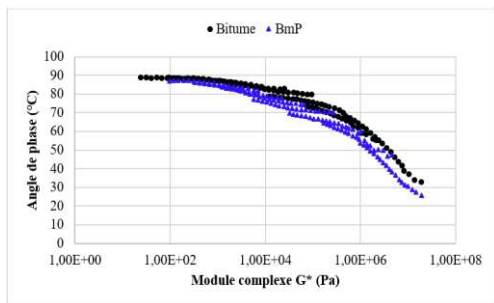
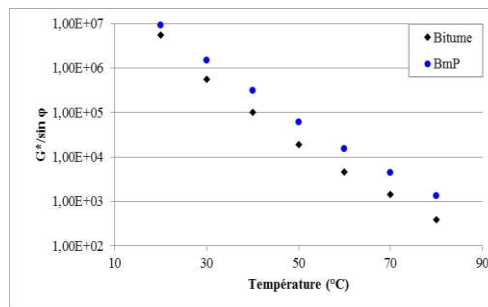


FIGURE 3. Variation du module complexe en fonction de la fréquence du bitume pur et bitume-plastique



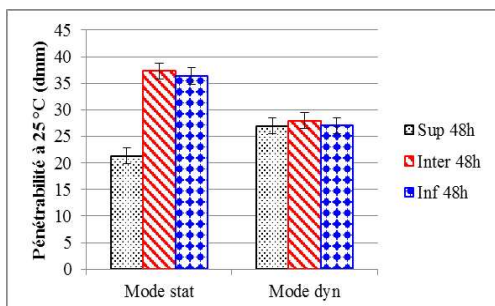
**FIGURE 4.** Variation de l'angle de phase en fonction du module complexe du bitume pur et bitume-plastique



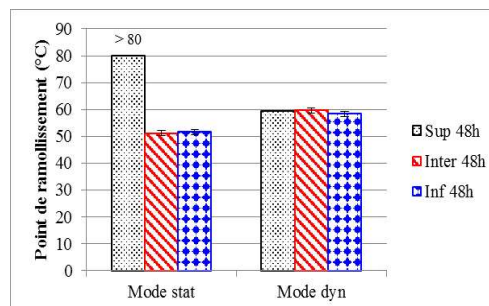
**FIGURE 5.** Variation du paramètre d'orniérage en fonction de la température du bitume pur et bitume-plastique

*B. Etude de la stabilité au stockage du bitume-plastique*

Les résultats de la Fig. 6 et 7 montrent clairement que les trois parties de l'échantillon stocké sous une agitation continue présentent pratiquement les mêmes valeurs de pénétrabilité et de température de ramollissement contrairement à celles de l'échantillon stocké sans agitation (mode statique) où la partie supérieure est riche en plastique et présente des caractéristiques très différentes à celles des deux parties (intermédiaire et inférieure) riches en bitume. La différence de température de point de ramollissement dépasse 30 °C entre la partie supérieure et la partie inférieure dans le cas du stockage statique normalisé, tandis que la norme exige que la différence ne doit pas dépasser 2,5 °C. Selon les critères de la norme ASTM D7173-11 il y a une séparation de phases entre les composants du bitume et les particules de plastique durant le stockage statique à hautes températures, le mélange bitume-plastique est donc instable au stockage. Par contre aucune séparation de phases n'est produite entre le bitume et le plastique durant le stockage sous une faible agitation continue, selon les critères de la même norme.



**FIGURE 6.** Résultats de pénétrabilité de chaque partie pour les deux modes de stockage



**FIGURE 7.** Résultats du point de ramollissement de chaque partie pour les deux modes de stockage

Les Fig. 8 et 9 montrent la variation du module complexe en fonction de la température à 1.6 HZ pour les deux modes de stockage. Dans le stockage statique normalisé, les parties inférieure et intermédiaire présentent qualitativement le même comportement viscoélastique ; diminution continue de  $G^*$  en fonction de la température. Contrairement, la partie supérieure présente un comportement plutôt élastique, une faible variation en fonction de la température. Il est intéressant de souligner que ces deux parties présentent pratiquement les mêmes modules complexes comparativement au bitume pur ce qui indique la quasi absence de plastique dans ces sections. Par contre dans le stockage avec agitation continue, les différentes parties présentent qualitativement les mêmes propriétés viscoélastiques. Le module complexe des trois sections est pratiquement identique avec celui du bitume-plastique avant le stockage. Ceci montre ainsi que chaque partie contient une fraction de plastique contrairement au stockage sans agitation



continue où les particules de plastiques sont agglomérées dans la partie supérieure. Les résultats montrent que les particules de plastique restent en suspension sous l'effet de la faible agitation continue.

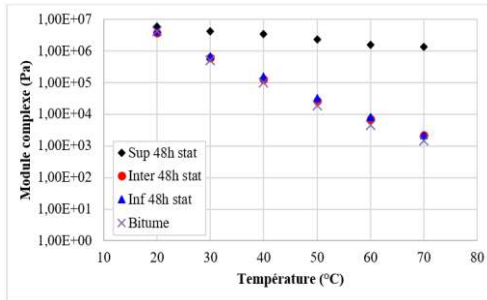


FIGURE 8. Variation du module complexe en fonction de la température (stockage statique)

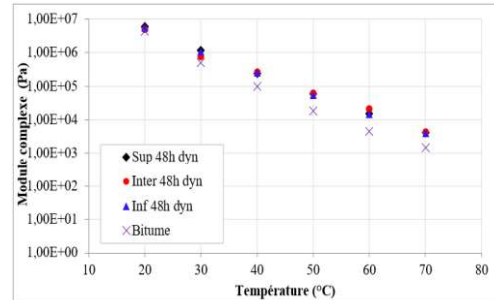


FIGURE 9. Variation du module complexe en fonction de la température (stockage dynamique)

La variation de l'angle de phase en fonction du module complexe dans l'espace de Black de chaque section du bitume-plastique après 48h de stockage statique et dynamique est donnée respectivement dans les Fig. 10 et 11. Dans le stockage statique, les isothermes de la partie intermédiaire et inférieure apparaissent continues et uniques. Ces deux parties sont thermorhéologiquement simples. Par contre la partie supérieure est thermorhéologiquement complexe, le graphique de l'angle de phase en fonction du module complexe donne un nuage de points présentant un désordre et ne suggérant aucune courbe (matériau hautement hétérogène). L'espace de Black montre que le comportement rhéologique des deux phases, phase riche en plastique en haut et phase riche en bitume en bas, est totalement différent. Cependant dans le stockage avec agitation continue, les différentes sections (sup, inter et inf) sont thermorhéologiquement simples et obéissent au principe d'équivalence temps/température. Les courbes de trois parties sont parfaitement identiques à celle du bitume-plastique avant le stockage. Ceci montre la parfaite distribution des particules de plastique sous la faible agitation continue durant le stockage à hautes températures.

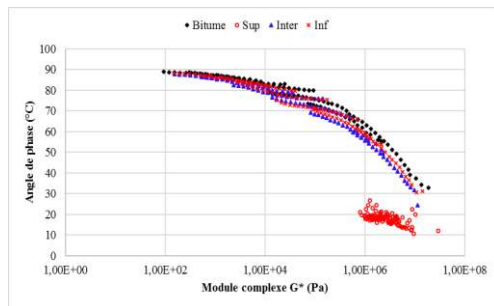


FIGURE 10. Variation de l'angle de phase en fonction du module complexe (Stockage statique)

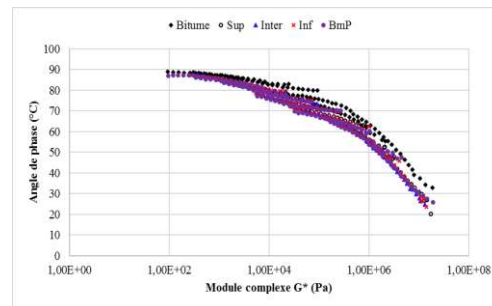


FIGURE 11. Variation de l'angle de phase en fonction du module complexe (Stockage dynamique)

L'indice de séparation de phases (Equation 1) a été utilisé aussi pour estimer la tendance de séparation entre le bitume et les particules de plastique de sachet. On rappelle qu'il n'y a pas de séparation de phases si les valeurs de  $I_s$  sont proches de zéro.

$$I_s = \log \frac{G^*_{inf}}{G^*_{sup}} \quad (1)$$

La Fig. 12 montre la variation de l'indice de séparation en fonction de la température à 1.6 Hz. Pour le stockage statique, les valeurs de  $I_s$  sont très supérieures à zéro ( $\gg 0$ ), contrairement aux

ceux calculés après le stockage avec agitation continue où ils sont très proches de zéro. Ceci montre clairement qu'aucune séparation entre le bitume et les particules de plastique se semble se produire durant le stockage avec agitation continue. Ces résultats montrent que l'effet de l'agitation sur la séparation de phases pendant le stockage est considérable et permet remettre en question la procédure de l'essai de stabilité au stockage normalisé (sans agitation pendant le stockage).

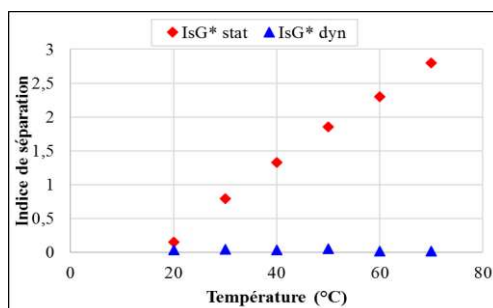


FIGURE 12. Indice de séparation de phases pour les deux modes de stockage

### III. Conclusion

Les quantités énormes des déchets de sachets plastiques, produits non biodégradables, jetés quotidiennement dans la nature représentent une menace réelle pour l'environnement. D'autre part, l'accroissement rapide du trafic appelle à utiliser des matériaux routiers plus performants afin de garantir le confort des usagers et la durabilité de la chaussée. Les performances des chaussées bitumineuses dépendent largement des propriétés rhéologiques du bitume. L'objectif de ce travail est de valoriser les déchets de sachets plastiques pour améliorer les caractéristiques physiques, rhéologiques et thermiques d'un bitume pur de classe 50/70.

L'incorporation du plastique dans le bitume a montré un gain bénéfique sur les propriétés physiques et rhéologiques du bitume. A haute température, le bitume-plastique présente une rigidité très élevée comparativement au bitume pur, explicité par l'augmentation remarquable du module complexe. Conformément à la spécification SHRP l'ajout du déchet de sachet plastique améliore significativement la résistance à l'orniérage à hautes températures.

Les résultats de la séparation de phases du bitume-plastique ont montré qu'il y a une séparation totale entre le bitume et les particules de plastique pour les échantillons stockés sans agitation (mode statique). Les particules de plastique coalescent et par l'effet de la gravité crèment en haut de l'échantillon durant le stockage statique. En revanche, il n'y a aucune séparation de phases entre le plastique et le bitume durant 48h pour l'échantillon stocké à hautes températures sous agitation continue. On a remarqué que les particules de plastique restent parfaitement dispersées dans la matrice bitumineuse grâce à la faible agitation continue qui est maintenue pendant toute la durée de stockage, ce qui a empêché la floculation et la séparation des particules de plastique.

Dans ce travail, il a été montré que l'essai de stabilité au stockage standard (EN 13399 et ASTM D7173-11) exagère le potentiel de séparation de phases des bitumes modifiés. Une autre procédure qui introduit l'agitation pendant le stockage, et qui reflète mieux les conditions réelles de stockage, a été proposée pour évaluer la séparation de phases du bitume modifié.

#### IV. Références

- de Carcer, Í.A., Masegosa, R.M., Teresa Viñas, M., Sanchez-Cabezudo, M., Salom, C., Prolongo, M.G., Contreras, V., Barceló, F., Páez, A., 2014. Storage stability of SBS/sulfur modified bitumens at high temperature: Influence of bitumen composition and structure. *Construction and Building Materials* 52, 245–252. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.069>
- Fang, C., Yu, R., Zhang, Y., Hu, J., Zhang, M., Mi, X., 2012. Combined modification of asphalt with polyethylene packaging waste and organophilic montmorillonite. *Polymer Testing* 31, 276–281. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2011.11.008>
- Galooyak, S.S., Dabir, B., Nazarbeygi, A.E., Moeini, A., 2010. Rheological properties and storage stability of bitumen/SBS/montmorillonite composites. *Construction and Building Materials* 24, 300–307. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.032>
- Geyer, R., Jambeck, J.R., Law, K.L., 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.* 3, 1–5. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- González, O., Muñoz, M.E., Santamaría, A., 2006. Bitumen/polyethylene blends: using m-LLDPEs to improve stability and viscoelastic properties. *Rheologica Acta* 45, 603–610. <https://doi.org/10.1007/s00397-005-0009-7>
- Hesp S. A. M, Woodhams R. T, 1992. Stabilization mechanisms in Polyolefin-Asphalt emulsions. in *Polymer-Modified Asphalt Binders*.
- Hills, J.F., Brian, D., Loo, P.P., 1974. The correlation of rutting and creep tests on asphalt mixes.
- Irfan, M., Ali, Y., Iqbal, S., Ahmed, S., Hafeez, I., 2018. Rutting Evaluation of Asphalt Mixtures Using Static, Dynamic, and Repeated Creep Load Tests. *Arabian Journal for Science and Engineering* 5143–5155. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2982-4>
- Jun, L., Yuxia, Z., Yuzhen, Z., 2008. The research of GMA-g-LDPE modified Qinhuangdao bitumen. *Construction and Building Materials* 22, 1067–1073. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.007>
- Lesueur, D., 2002. La Rhéologie des Bitumes : Principes et Modification. *Rhéologie* 1–30.
- Li, J., Jia, W., Yuan, W., 2014. Effect of Polyethylene Grafted with Maleic Anhydride on Asphalt Properties. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 28, 04014012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000516](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000516)
- Mohammadiroudbari, M., Tavakoli, A., Razavi Aghjeh, M.K., Rahi, M., 2016. Effect of nanoclay on the morphology of polyethylene modified bitumen. *Construction and Building Materials* 116, 245–251. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.098>
- Navarro, F.J., Partal, P., García-Morales, M., Martín-Alfonso, M.J., Martínez-Boza, F., Gallegos, C., Bordado, J.C.M., Diogo, A.C., 2009. Bitumen modification with reactive and non-reactive (virgin and recycled) polymers: A comparative analysis. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 15, 458–464. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2009.01.003>
- Ouyang, C., Wang, S., Zhang, Yong, Zhang, Yinxi, 2006. Thermo-rheological properties and storage stability of SEBS/kaolinite clay compound modified asphalts. *European Polymer Journal* 42, 446–457. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.07.004>
- Pérez-Lepe, A., Martínez-Boza, F.J., Atané, P., Gallegos, C., 2006. Destabilization mechanism of polyethylene-modified bitumen. *Journal of Applied Polymer Science* 100, 260–267. <https://doi.org/10.1002/app.23091>
- Singh, B., Kumar, L., Gupta, M., Chauhan, G.S., 2013. Polymer-modified bitumen of recycled LDPE and maleated bitumen. *Journal of Applied Polymer Science* 127, 67–78. <https://doi.org/10.1002/app.36810>
- WWF, 2019. Pollution plastique: A qui la faute ?
- Youtcheff, J., Wijayatilleke, N., Shenoy, A., 2005. Evaluation of the laboratory asphalt stability test. Report No. FHWA-HRT-04-111, Office of Infrastructure Research and Development Federal Highway Administration.
- Zhang, F., Yu, J., Wu, S., 2010. Effect of ageing on rheological properties of storage-stable SBS/sulfur-modified asphalts. *Journal of Hazardous Materials* 182, 507–517. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.06.061>
- Zhang, H., Wu, X., Cao, D., Zhang, Y., He, M., 2013. Effect of linear low density-polyethylene grafted with maleic anhydride (LLDPE-g-MAH) on properties of high density-polyethylene/styrene-butadiene-styrene (HDPE/SBS) modified asphalt. *Construction and Building Materials* 47, 192–198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.047>