



## Re-RACE (Rejuvenation of Reclaimed Asphalt in a Circular Economy): résultats de quatre années de recherche

**La Commission européenne souligne que la recherche d'une économie circulaire est un objectif stratégique important pour tous les secteurs industriels. Pour le secteur des enrobés, la réutilisation durable des agrégats d'enrobés bitumineux (AEB) est un moyen idéal d'atteindre cet objectif. Le recyclage des AEB présente de nombreux avantages écologiques et économiques, mais l'utilisation de pourcentages d'AEB toujours plus élevés et/ou la réutilisation répétée d'AEB dans un avenir proche nécessite(nt) une attention supplémentaire.**

En Belgique, le recyclage est appliqué avec succès depuis plus de 40 ans dans le secteur des enrobés. Cela fait de notre pays l'un des précurseurs en Europe et, par extension, dans le monde. Dans les années 70, la crise pétrolière a été l'instigateur économique de la réutilisation d'AEB. Au cours de la dernière décennie, les avantages écologiques sont devenus un moteur supplémentaire dans la transition vers la circularité au sein du secteur. Par conséquent, la technologie du recyclage des enrobés a continué à se développer et le processus de recyclage est de mieux en mieux maîtrisé. Les pourcentages d'AEB aussi ont augmenté progressivement - jusqu'à plus de 60 % dans certaines couches de liaison en enrobé.

Aujourd'hui, grâce à ce succès, une partie des AEB parcourent déjà un second cycle de vie. Par conséquent, le secteur est confronté au problème de la réutilisation répétée ou *multiple recycling* des AEB. Dans un avenir proche, cela se produira beaucoup plus souvent. C'est pourquoi, en Belgique, comme dans d'autres pays européens, l'utilisation d'AEB dans les couches de roulement en enrobé reste limitée malgré la demande du secteur des enrobés. Les principaux obstacles sont liés à la nature et à la constance de la qualité des AEB et à leur impact éventuel sur les performances de l'enrobé, ce qui est plus important pour les couches de roulement que pour les couches de liaison.

Au cours de son cycle de vie, le liant bitumineux subit un processus de vieillissement oxydatif, ce qui réduit certaines de ses propriétés performantielles. Cette réduction se manifeste par une augmentation de la rigidité et de la fragilité du matériau et une moindre capacité d'auto-réparation (*healing*). Si ce processus se poursuit dans le temps, on peut supposer que le liant finira par perdre complètement ses propriétés fonctionnelles (*black rock*).

Ce vieillissement limite une réutilisation durable des AEB et peut inciter à utiliser des additifs, en particulier des produits régénérants. Un produit régénérant est un terme générique désignant un additif qui, lorsqu'il est ajouté à un liant vieilli, tel que celui présent dans les AEB, est capable de régénérer les caractéristiques de ce vieux liant, ce qui permet de retrouver en grande partie les performances initiales du liant.

Au cours des quatre dernières années, le CRR a mené des recherches approfondies dans le cadre du projet prénormatif Re-RACE (*Rejuvenation of Reclaimed Asphalt in a Circular Economy*) afin de répondre à l'avenir aux questions et aux besoins en matière de réutilisation durable des AEB. Il a bénéficié pour ce faire du soutien du Bureau de Normalisation. Cette contribution décrit les objectifs et les principaux résultats de ce projet.

## Objectifs du projet

L'objectif du projet subventionné par le NBN était de contribuer à une application plus durable de la réutilisation des AEB sans préjudice de la qualité du matériau, soit par l'utilisation de régénérants, soit par une vision et une connaissance en matière de maîtrise des caractéristiques des AEB. En outre, l'évaluation objective de cette durabilité faisait partie intégrante du projet. Les différents volets de l'étude concernaient aussi bien le niveau du liant que l'enrobé bitumineux (avec réutilisation d'AEB). Dans ce cadre, des études de terrain et des recherches expérimentales en laboratoire ont permis d'acquérir de l'expérience dans l'utilisation de régénérants.

Au cours de la première période de deux ans, le projet s'est concentré sur l'acquisition de connaissances sur le **fonctionnement des produits régénérants et leur impact sur les performances des liants**. Dans ce contexte, une attention particulière a été accordée à la détermination d'indicateurs rhéologiques résultant des mesures *Dynamic Shear Rheometer* ou DSR. Des caractéristiques physico-chimiques pertinentes des liants ont également été déterminées. En parallèle, l'**effet des produits régénérants sur les performances des enrobés bitumineux avec AEB** a été évalué, et une grande attention a été prêtée à la réalisation d'une étude préliminaire lors de l'utilisation de produits régénérants. Enfin, une évaluation générale de la durabilité a été amorcée, dans le contexte de nouvelles formes de marchés publics (verts).

Au cours de la deuxième moitié du projet, les objectifs du projet ont été approfondis et les méthodes de mesure pour la **déduction uniforme des indicateurs tant rhéologiques que thermiques** ont été définies, tout comme leur caractère discriminant. Le fait de disposer de ces indicateurs permettra ensuite d'établir l'impact d'un additif tel qu'un régénérant. Afin de répondre à la demande du secteur des enrobés d'étendre également de manière significative la réutilisation durable des AEB dans les couches de roulement à l'avenir, le *Steering Committee Reclaimed Asphalt* a été mis sur pied. Dans le cadre de ce groupe de pilotage du CRR, **une étude de sensibilité est réalisée en étroite collaboration avec le secteur des enrobés en Belgique**, afin de déterminer l'impact des fluctuations des caractéristiques des AEB sur les carac-

téristiques performantielles des enrobés APT-C. En parallèle, une **analyse de la durabilité des variantes APT-C** a été réalisée selon l'approche développée dans le projet EDGAR (*Evaluation and Decision process for Greener Asphalt Roads*).

## Qu'est-ce qui a été réalisé?

### Classification des produits régénérants

À la demande du secteur des enrobés, un document de référence a été élaboré au début de l'étude avec une analyse critique de la *sustainability* (durabilité) des régénérants, y compris une attention particulière pour les aspects environnementaux. Un tel document est d'une grande importance pour pouvoir utiliser les produits régénérants d'une manière respectueuse de l'environnement et sûre, en prêtant attention non seulement à la phase d'utilisation initiale (production d'enrobés avec AEB), mais aussi à la phase de fin de vie (ne doit pas constituer un obstacle à la réutilisation lors du cycle suivant).

Ce document permet d'avoir une meilleure vue d'ensemble de la vaste gamme de produits disponibles sur le marché en classant les produits régénérants en plusieurs groupes en fonction de leur nature et de leur origine. Cette répartition a également permis d'analyser les atouts et les points faibles pour chaque groupe. Les éléments suivants sont abordés:

- origine et processus de production;
- composition chimique;
- fonctionnement;
- disponibilité et expérience de terrain;
- santé environnementale, sécurité au travail et certains aspects de durabilité tels que les émissions et la lixiviation.

Cette classification et cette analyse ont également été illustrées pour chaque groupe à l'aide de quelques exemples. Le document de référence a été publié en janvier 2020 sous la forme de Dossier CRR 21: Classification et analyse des produits régénérants pour la réutilisation des enrobés (De Bock et al., 2020).

### Indicateurs pour les liants

Afin de mieux comprendre le fonctionnement intrinsèque et de pouvoir démontrer l'efficacité des produits régénérants au niveau du liant, l'étude s'est attachée à déduire des indicateurs à partir de la caractérisation rhéologique et calorimétrique. Le fait de disposer de ces indicateurs permet en effet de contrôler l'impact des additifs tels que les régénérants.

Dans un premier temps, l'attention s'est portée sur la mise au point de méthodes de mesure standardisées pour la détermination d'indicateurs rhéologiques déduits de la détermination du module de cisaillement complexe  $G^*$  et de l'angle de phase  $\delta$  à l'aide du *Dynamic Shear Rheometer* (DSR) et du *Bending Beam Rheometer* (BBR). Les indicateurs rhéologiques sont subdivisés en fonction de leur applicabilité dans une certaine plage de température (T basse, intermédiaire et élevée). La caractérisation des liants a ensuite été effectuée à l'aide de la *Modulated Differen-*

tial Scanning Calorimetry (M-DSC). La M-DSC mesure les caractéristiques calorimétriques d'un matériau de manière très sensible et précise. Il est ainsi possible de déterminer le comportement de phase des matériaux en fonction de la température, par exemple le point de fusion et de cristallisation, la température de transition vitreuse ou  $T_g$ , etc.

Dans une deuxième phase, en vue de sélectionner des indicateurs, le caractère discriminant a été déterminé sur la base de la précision (répétabilité), en calculant une valeur minimale correspondant à une différence significative. Cette évaluation a permis de sélectionner les indicateurs les plus pertinents pour chaque plage de température (Tableau 1). Pour la signification exacte de ces indicateurs, voir (Piérard et al., 2020), AI-report 240 (Asphalt Institute Technical Advisory Committee, 2019) et (Apostolidis et al., 2021).

	Indicateur
<b>Mesures DSR</b> (Piérard et al, 2020)	
<b>Plage de température globale <math>T_a - T_b</math></b>	$G^*(T_a)/G^*(T_b)$
	$\delta(T_a) - \delta(T_b)$
<b>Température élevée</b>	$T @ G^* = 15 \text{ kPa}$
	$\delta @ G^* = 15 \text{ kPa}$
<b>Température intermédiaire</b>	$T_m @ \delta = 45^\circ$
	$G^* @ T_m$
<b>Mesures BBR</b> (Asphalt Institute, 2019)	
<b>Température basse</b>	$\Delta T_c = T_c(S) - T_c(m)$
<b>Mesures M-DSC</b> (Apostolidis et al, 2021)	
<b>Température basse</b>	$T_g$

**Tableau 1** – Aperçu des indicateurs sélectionnés déterminés au moyen des mesures DSR, BBR ou M-DSC

## Effet des produits régénérants sur les enrobés

Les premières expériences avec l'utilisation d'un régénérant en Belgique ont été acquises grâce à une étude de terrain menée en étroite collaboration avec Kraton Chemical (fournisseur de régénérants biosourcés) et la sa Stadsbader. Les planches d'essai posées en 2017 sur le site de production de la sa Stadsbader à Vaulx ont permis de réaliser le suivi de six variantes de couches de liaison et de couches de roulement à fort taux de réutilisation d'AEB, en combinaison ou non avec un produit régénérant (Vansteenkiste et al., 2021).

Il s'agissait en particulier:

- de couches de liaison de type APO-B:
  - mélange APO-B avec 50 % AEB;
  - mélange APO-B avec 70 % AEB;
  - mélange APO-B avec 70 % AEB avec produit régénérant;
- de couches de roulement de type APT-B:
  - mélange APT-B avec 30 % AEB;
  - mélange APT-B avec 50 % AEB;
  - mélange APT-B avec 50 % AEB avec produit régénérant.

Le produit régénérant a été ajouté directement aux AEB pendant la production (plus précisément, pendant l'approvisionnement d'AEB dans le tambour parallèle) à l'aide d'un système de pulvérisation à volume contrôlé (Centre de recherches routières, 2017).

Cette étude de terrain a été couplée à des recherches minutieuses, au cours desquelles des essais ont été effectués à différents stades (pendant la production et la mise en œuvre des enrobés, après prélèvement d'échantillons en vrac ou a posteriori, au moyen de carottes), tant au niveau du liant que de l'enrobé. Cette étude a donné les résultats suivants:

- l'impact positif de ce produit régénérant a pu être démontré par les caractéristiques empiriques (pénétrabilité à l'aiguille et température de ramollissement A&B) des liants récupérés. Cet effet a été confirmé par des mesures rhéologiques;
- l'effet du produit régénérant a également été démontré par les valeurs inférieures de la rigidité des enrobés bitumineux pour lesquels du produit régénérant a été utilisé;
- il était compliqué de démontrer l'impact du produit régénérant dans cette étude de terrain au moyen de la résistance à l'orniérage, de la sensibilité à l'eau ou du comportement à la fatigue, compte tenu de la précision de ces essais.

L'étude de terrain a également été l'occasion de disposer d'une grande quantité de matériaux afin d'élaborer une procédure appropriée et représentative en laboratoire pour réaliser l'étude préliminaire lors de l'application d'AEB en combinaison avec un produit régénérant. Au cours d'une production réelle, un produit régénérant peut être ajouté de plusieurs façons (par exemple, à froid par pulvérisation sur bande transporteuse d'AEB, à chaud par dosage direct dans le malaxeur). Les différents temps de mélange et temps d'action sont également susceptibles de jouer un rôle en raison des processus de diffusion de ces additifs liés à la température.

Cette étude a évalué l'influence de divers paramètres tels que:

- le mode d'ajout: ajout du produit régénérant à froid ou à chaud;
- la durée d'exposition ou le temps d'action entre le malaxage et la confection des éprouvettes.

Sur la base des essais performantiels effectués dans le cadre d'une étude préliminaire et de la confrontation à l'étude de terrain, les conclusions et/ou recommandations suivantes ont pu être formulées:

- les résultats de laboratoire n'ont montré aucune différence significative entre l'ajout à froid ou à chaud d'un produit régénérant. Compte tenu de la recommandation des fournisseurs, l'ajout à chaud est à privilégier;

- il n'est pas nécessaire d'intercaler un temps d'action entre le malaxage et la confection d'éprouvettes par compactage d'un mélange pour démontrer plus clairement l'efficacité et le rendement du produit régénérant;
- il est recommandé de réduire ce temps d'attente dans la norme actuelle EN 12697-35 (Comité Européen de Normalisation, 2016) afin de limiter l'effet du vieillissement (par exemple à 30 min);
- en comparant les résultats de l'étude préliminaire avec ceux obtenus sur le matériau en vrac provenant de la centrale d'enrobage, les essais avec ajout à chaud du produit régénérant et avec compactage peu après le malaxage ont donné la meilleure concordance.

Pour un aperçu détaillé de tous les résultats de cette étude, nous renvoyons à une publication récente (Tanghe et al., 2021).

## Étude de sensibilité des agrégats d'enrobés bitumineux

En 2020, le groupe de pilotage *Steering Committee Reclaimed Asphalt* a été mis sur pied. Ce groupe de pilotage CRR, auquel participent activement les principaux acteurs du secteur de la construction routière de notre pays, a pour objectif d'identifier les caractéristiques des AEB susceptibles d'avoir un impact sur les performances des enrobés bitumineux avec réutilisation d'AEB. Une attention particulière est accordée au contrôle de ces caractéristiques, qui est nécessaire pour l'application durable future d'AEB dans les mélanges pour couches de roulement (type APT-C). Actuellement, l'application de mélanges APT-C avec réutilisation d'AEB n'est pas autorisée selon les cahiers des charges types en Belgique.

Pour atteindre cet objectif, le groupe de pilotage s'est concentré sur la mise en place et la réalisation d'une vaste étude de sensibilité, basée sur l'expérience de terrain en Belgique. L'impact des fluctuations des caractéristiques des AEB, telles que la teneur en liant, la valeur résiduelle de pénétrabilité du vieux liant, la granulométrie et les vides selon Rigden du filler, a été étudié dans un premier temps au moyen de calculs théoriques avec PradoWeb pour des variantes (extrêmes) APT-C avec teneur en AEB. Les calculs ont indiqué que les fluctuations des AEB, dans les tolérances autorisées d'une référence de tas, peuvent avoir un impact sur les caractéristiques des mélanges APT-C avec AEB entre 20 % et 50 %. Plus précisément, on a pu conclure ce qui suit:

- ce sont surtout les changements dans le filler provenant des AEB qui ont un impact.
- les fluctuations de la teneur en filler des AEB affectent principalement le *Mastic Stiffness Indicator* ou valeur MSI et donc la maniabilité des mélanges APT-C correspondants. En outre, plus les vides selon Rigden du filler des AEB sont élevés, plus l'effet sur la valeur MSI est important.
- une modification de la teneur en liant des AEB et de la dureté (valeur de pénétrabilité) influence principalement la maniabilité et la rigidité du mélange.

Dans une deuxième phase, l'évaluation de l'impact des fluctuations dans les AEB est en cours pour un nombre limité de variantes APT-C au moyen d'une étude expérimentale en laboratoire (essais performantiels sur enrobé). Les résultats obtenus sur la base d'essais giratoires ont d'ores et déjà confirmé l'impact des fluctuations dans les AEB sur les vides des mélanges APT-C avec AEB.

À l'issue de l'étude expérimentale, les conclusions du comité de pilotage seront publiées sous forme de recommandations (publication prévue en 2022).

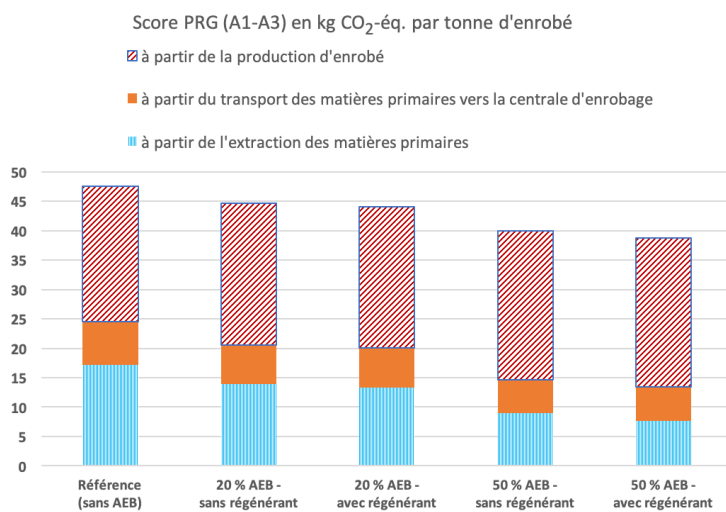
## Évaluation objective de la durabilité

L'évaluation de la durabilité dans le cadre du projet Re-RACE a été réalisée en utilisant la méthode EDGAR. Cette méthode a été développée par le CRR en collaboration avec des partenaires internationaux, à la demande de la Conférence Européenne des Directeurs des Routes (De Visscher et al., 2016). Cette approche recourt à un nombre limité d'indicateurs pertinents (voir tableau 2), pour lesquels des estimations objectives sont réalisées à l'aide de logiciels appropriés.

Impact / Indicateur	Description
Changement climatique	contribution au réchauffement climatique par les émissions de gaz à effet de serre
Épuisement des ressources abiotiques	contribution à l'épuisement des matières premières non renouvelables
Pollution de l'air	contribution à la pollution atmosphérique (émissions acidifiantes et smog)
Lixiviation	possibilité de lixiviation de substances chimiques nocives dans le sol et les eaux souterraines
Nuisances sonores	production sonore résultant de l'interaction pneu-revêtement routier
Recyclabilité	évaluation de la recyclabilité future (fin de vie)
Rugosité	rugosité déterminée par les caractéristiques superficielles de l'enrobé, en tant qu'indicateur essentiel de la sécurité routière (couches de roulement)
Achats responsables	évaluation de la responsabilité pour l'impact social et écologique dans le processus d'achat
Coût	coûts financiers sur l'ensemble du cycle de vie (mise en œuvre, entretien, fraisage et recyclage)
Embouteillage	évaluation de l'impact de la mise en œuvre et de l'entretien (en fonction de la technologie) sur la mobilité des usagers de la route
Performances, durabilité technique	combinaison d'indicateurs performantiels (résistance à la fatigue et à l'orniérage, sensibilité à l'eau) liés à la durée de vie prévue

**Tableau 2** – Ensemble d'indicateurs de durabilité (méthodologie EDGAR [De Visscher et al., 2016])

Cette évaluation a été menée sur une série d'enrobés bitumineux tant pour des couches de liaison que pour des couches de roulement (respectivement mélanges APO-B et APT-C) avec des pourcentages variables d'AEB réutilisés, en combinaison ou non avec un produit régénérant. L'accent a été mis sur le cycle de vie d'un enrobé bitumineux, pendant toute sa durée de vie (extraction des matières premières, transport vers la centrale d'enrobage et production). La figure 1 illustre le résultat pour l'indicateur de changement climatique ou le score PRG (Potentiel de réchauffement global) pour une série de variantes APT-C.



**Figure 1** – Scores PRG pour la contribution au changement climatique pour cinq variantes APT-C

démonstrable des performances, peuvent également être décisifs dans une évaluation finale de la durabilité des variantes APT-C étudiées. Un rapport détaillé sous la forme d'un Dossier CRR est en cours de préparation (publication en 2022).

## Conclusions

Les recherches effectuées ont été pour le CRR l'occasion d'acquérir un grand savoir-faire et de l'expertise sur l'utilisation possible d'un régénérant en cas de réutilisation d'AEB. Ceci se manifeste dans de nombreux domaines de connaissance tels que:

- un document de référence sur la catégorisation et l'analyse des produits régénérants (De Bock et al., 2020);
- des méthodes de mesure normalisées à disposition pour déterminer les indicateurs rhéologiques et thermiques pertinents qui permettent de sélectionner les additifs et, en particulier, les produits régénérants;
- un protocole à disposition pour réaliser l'étude préliminaire pour un enrobé bitumineux avec réutilisation d'AEB en combinaison avec un produit régénérant;
- un aperçu de l'impact potentiel des fluctuations des caractéristiques des AEB sur les performances des enrobés bitumineux contenant des AEB/un pourcentage élevé d'AEB;
- la connaissance relative à l'évaluation objective de la durabilité des enrobés bitumineux avec AEB, en combinaison ou non avec l'utilisation d'un produit régénérant, en appliquant la méthodologie EDGAR.

Sur la base de l'analyse effectuée, des conclusions peuvent être tirées concernant un impact positif ou négatif sur les indicateurs considérés. On constate ainsi une nette différence en faveur des enrobés bitumineux avec réutilisation d'AEB pour des indicateurs importants tels que le PRG, l'épuisement des matières premières, la pollution atmosphérique et le coût financier. L'utilisation d'un régénérant (en l'occurrence d'origine biologique) accroît encore cet avantage dans une (très) faible mesure. Les aspects de durabilité technique, tels que la préservation ou l'allongement de la durée de vie et l'augmentation

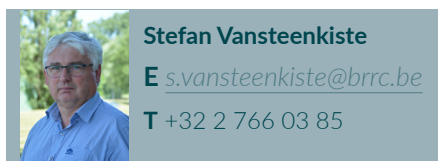


## Remerciements

Ce projet a été réalisé grâce au soutien financier du NBN (conventions CCN/NBN/PN17A et 17B et CCN/NBN/19A et 19B).

Le CRR tient également à remercier tous les membres du *Steering Committee Reclaimed Asphalt* pour leur contribution active et précieuse lors des concertations (en ligne).

Enfin, nous tenons également à remercier tous les chercheurs et techniciens impliqués pour leur engagement, le soin qu'ils ont apporté lors de la réalisation des nombreux essais et du suivi des chantiers.



## Bibliographie

Apostolidis, P., Elwardany, M.D., Porot, L., Vansteenkiste, S. & Chailleux, E. (2021). Glass transition in bituminous binders. *Materials and structures*, 54(3), Article 132. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01726-6>

Asphalt Institute Technical Advisory Committee. (2019). *State-of-the-knowledge: Use of the Delta Tc parameter to characterize asphalt binder behavior* (Asphalt Institute No. IS-240). Asphalt Institute.

Centre de Recherches Routières. (2017, septembre 12). *OCW en nv Stadsbader leggen de eerste proefvakken aan met verjongingsmiddel voor asfalthergebruik* [vidéo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=346eHEa7zTE>

Comité Européen de Normalisation. (2016). *Mélanges bitumineux: Méthodes d'essais. Partie 35: Malaxage de laboratoire* (EN 12697-35).

De Bock, L., Piérard, N., Vansteenkiste, S. & Vanelstraete, A. (2020). *Classification et analyse des produits régénérants pour la réutilisation des enrobés* (Dossier CRR No. 21). Centre de Recherches Routières (CRR). [https://brrc.be/sites/default/files/2020-02/dossier21\\_fr.pdf](https://brrc.be/sites/default/files/2020-02/dossier21_fr.pdf)

De Visscher, J., Maeck, J., Vansteenkiste, S., Vanelstraete, A., Wayman, M., Peeling, J., Bueche, N., Schobinger, B., Anastasio, S. & Hoff, I. (2016). *EDGAR: Evaluation and decision process for greener asphalt roads. Deliverable D4.6: Final report*. Conference of European Directors of Roads (CEDR). [https://www.ntnu.edu/documents/701369389/0/D4+6+Final+report\\_vFinal+%28revised+II%29.pdf/b80c3ad7-41e6-44aa-86f4-d77265da5313](https://www.ntnu.edu/documents/701369389/0/D4+6+Final+report_vFinal+%28revised+II%29.pdf/b80c3ad7-41e6-44aa-86f4-d77265da5313)

Pierard, N., Vansteenkiste, S., Vanelstraete, A. & Peaureaux, P. (2020, décembre 14-16). Methodology for evaluating the performance of bituminous binders based on rheological indicators: Impact of the use of a rejuvenator. In *Collection of papers of the RILEM international symposium on bituminous materials (ISBM 2020), Lyon, France*. Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systèmes de Construction et Ouvrages (RILEM).

Tanghe, T., Vansteenkiste, S. & Vanelstraete, A. (2021, juin 16-18). Development of a protocol for the initial type testing of asphalt mixtures with the use of rejuvenators. In *Asphalt 4.0 for future mobility: Proceedings of the 7th Eurasphalt & Eurobitume congress (7th E&E), Madrid, Spain*. Foundation Eurasphalt.

Vansteenkiste, S., Tanghe, T., Duerinckx, B., Vanelstraete, A., Porot, L., Govers, B., Libbrecht, D. & Modde, P.-P. (2021, juin 16-18). Impact of bio-based rejuvenator on bitumen and asphalt mix performance: Laboratory and field evaluation. In *Asphalt 4.0 for future mobility: Proceedings of the 7th Eurasphalt & Eurobitume congress (7th E&E), Madrid, Spain*. Foundation Eurasphalt.