

# Prédiction du degré d'homogénéité de mélange entre les constituants neufs et les agrégats d'enrobé (AE) par un modèle hétérogène triphasique

**Elio Ziade**

*Université de Limoges, laboratoire GC2D, Egletons, France*

*Spie Batignolles malet, direction technique, Toulouse, France*

**RESUME.** Dans le contexte de l'économie circulaire, l'utilisation des enrobés recyclés dans la construction routière est devenue une nécessité forte. L'incorporation d'Agrégats d'Enrobés (AE) dans les enrobés nous mène à poser des questions sur l'homogénéité de mélange avec les matériaux neufs. Cette dernière présente une problématique qui influe sur les performances finales d'une chaussée. Plusieurs chercheurs ont essayé de mettre en place un essai afin de mesurer l'homogénéité du mélange tel que la lixiviation séquentielle. Cependant, ces méthodes restent compliquées à réaliser et non normalisées. D'où l'objectif de cet article de proposer une méthode basée sur une approche numérique permettant de déterminer ce pourcentage. Un modèle hétérogène triphasique est développé en se basant sur la méthode des éléments finis et sur un logiciel de générations de géométries développé dans notre laboratoire. Un mortier numérique est formé de mortiers neuf, vieux et mélange. Variant le volume des différentes phases, on pourra piloter le pourcentage d'homogénéité. En comparant le module du mélange numérique au module d'un mortier mélange testé au labo, on aura le degré expérimental d'homogénéité du mélange. Cette méthode sert à économiser de ressources ; elle est simple à réaliser en comparaison aux essais expérimentaux, compliqués et pas encore normalisés.

**Mots-clefs** Recyclage, AE (agrégats d'enrobé), mortier, mélange, degré d'homogénéité.

## I. INTRODUCTION

Le recyclage des enrobés est devenu courant au cours des dernières années. En effet, la substitution d'une partie des matériaux neufs par les vieux permet la réalisation d'économies substantielles sur le coût de construction des nouvelles voiries tout en contribuant à la préservation des ressources naturelles.

Le recyclage des enrobés, qui bénéficie de plus de trente ans d'expérience en France, a pris un nouvel essor par les directives de ces dernières années jusqu'au Pacte d'engagement des acteurs du secteur routier, signé en 2021. Dans ce pacte, la réintroduction d'au moins 20% d'agrégats d'enrobé (AE) dans les nouvelles formules d'enrobés bitumineux (Routes de France, rapport annuel 2022) figure parmi les objectifs à l'horizon 2025/2030.

Les agrégats d'enrobé sont des matériaux récupérés du fraisage des couches bitumineuses sur les chantiers, de la déconstruction des chantiers d'enrobé et du surplus de production dans les usines d'enrobé. Plusieurs projets de recherche (le Projet National Mure par exemple (Pouget et al.,

2023)) ont permis de consolider les connaissances scientifiques et techniques dans le domaine du recyclage des chaussées. Cependant, la confiance reste limitée quant à la réutilisation des AE sans doute en raison d'un manque de connaissances scientifiques sur l'interaction entre les matériaux d'apport et les AE au sein d'un enrobé recyclé. Plus particulièrement, la question de l'homogénéité de mélange entre les matériaux d'apport et les AE est au cœur du débat et de nombreuses études sont menées afin de répondre à cette question.

Dans la pratique, le liant d'agrégats d'enrobé se trouve en une fine couche recouvrant les granulats d'AE et n'existe pas en tant que masse libre ce qui ne favorise pas un mélange mécanique entre le matériau d'AE et le liant d'apport pendant la phase de mélange. D'autres phénomènes peuvent aider deux liants à se mélanger lorsqu'ils sont exposés à des températures précises pendant un temps donné. Ce mécanisme appelé diffusion, permet le transfert des molécules dans la matière lorsqu'elles ont suffisamment d'énergie pour se déplacer. En fonction du degré d'homogénéité de mélange, plusieurs cas de figure peuvent être identifiés :

- Black Rock (Zero Blending) : le liant d'AE ne se mélange pas avec le liant d'apport, on parle de 0% d'homogénéité de mélange.
- Partial Blending : le liant d'AE se mélange partiellement avec le liant d'apport, on parle d'homogénéité intermédiaire ou indéterminée.
- Total Blending : le liant d'AE se mélange totalement avec le liant d'apport, on parle d'un mélange homogène.

L'homogénéité du mélange entre le liant d'AE et le liant d'apport est une problématique qui influe sur les performances finales d'une chaussée (Rad, 2013, Gaspar et al., 2020). Plusieurs chercheurs ont essayé de mettre en place un essai afin de mesurer l'homogénéité du mélange ou le degré de remobilisation du constituant vieux dans le mélange. Parmi les différentes méthodes disponibles, il y a celle qui consiste à séparer de manière séquentielle les couches successives du liant enrobant les granulats. Cette technique utilise la méthode de lixiviation au perchloroéthylène. Pour Navaro, 2011, la distinction entre le liant d'agrégats d'enrobé et le liant d'apport se fait en utilisant la spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier IRTF. Pour Gaspar et al., 2020, les liants récupérés sont testés au laboratoire par des essais rhéologiques afin d'évaluer les propriétés des couches extraites et, à partir de là, d'obtenir une indication de l'homogénéité des couches de liant, qui est supposée être liée au degré de mélange des liants.

Ces méthodes restent des méthodes non normalisées, compliquées à réaliser et nécessitent du temps. De plus, le mélange se fait au niveau du film qui existe entre ces granulats. Ce film n'est pas seulement un mélange de bitume vieux et neuf mais aussi de fines et du sable ce qu'on appelle mastic ou mortier. D'où l'intérêt de comprendre l'influence d'AE au niveau de ce film. Par conséquent, l'objectif de ce papier est de proposer un modèle numérique hétérogène afin d'évaluer le pourcentage d'homogénéité d'un mortier mélange.

## II. Simulation numérique

Dans cette section, les différentes étapes de la modélisation d'un mortier mélange sont présentées, depuis la création de la microstructure jusqu'à la réalisation des calculs.

Au début, le mortier mélange, peut être considéré comme un composite à deux phases, le constituant neuf et le constituant vieilli. En s'inspirant du travail réalisé par Rad, 2013, les deux phases commenceront à se mélanger au niveau des surfaces de contact. Dans ce cas, une troisième phase, qui est un mélange de matériau neuf et vieux, se formera dans le composite. Comme la diffusion dépend du temps et de la température, les phases diffusantes se diffusent progressivement dans le milieu. Par conséquent, la procédure suppose que le composite est formé d'une couche de matériau neuf, d'une couche de composant vieux et d'une couche correspondante à leur mélange. En d'autres termes, en fonction du temps, les épaisseurs des composants neuf et vieux vont diminuer continuellement tandis que l'épaisseur du mélange augmente jusqu'à ce que le mélange complet entre eux soit atteint. Dans notre étude, le phénomène est simulé sans prendre en compte le temps et le coefficient de diffusion de chaque constituant.

### *Modèle triphasique*

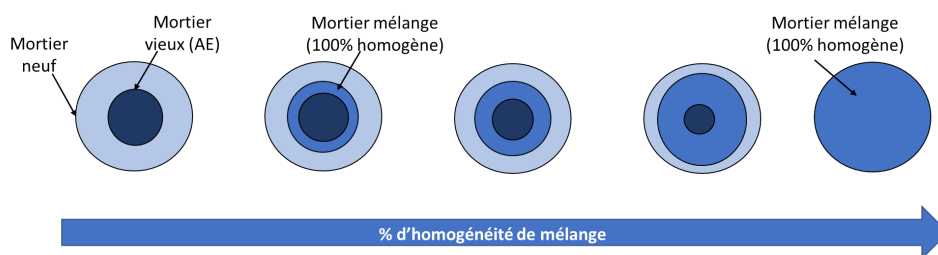
Cette modélisation consiste à déterminer le degré d'homogénéité de mélange des constituants vieux et neuf. Le mortier mélange est formé du mortier neuf et du mortier vieux. Dans le cas où un mélange existe entre ces deux constituants, un troisième composant apparaît. Ce dernier représente la partie mélangée (considérée 100% homogène) des constituants vieux et neuf.

Ainsi, l'objectif est de modéliser le mortier mélange en utilisant l'approche triphasique :

- La première phase est constituée des inclusions 1 (le mortier d'AE dans notre cas),
- La seconde phase est constituée des inclusions 2 (le mortier mélange 100% homogène dans notre cas)
- La troisième phase est la matrice (le mortier neuf dans notre cas).

En variant le volume de chaque phase, le pourcentage d'homogénéité de mélange est piloté. En comparant le module du mélange numérique au module d'un mortier mélange testé au laboratoire, le degré d'homogénéité de mélange expérimental du constituant vieux est déterminé.

Le concept de la modélisation triphasique, afin de déterminer le pourcentage de mélange, est présenté dans la Figure 1.



**Figure 1. Le concept de la modélisation triphasique adoptée**

### *Création des modèles numériques*

Le mortier mélange est formé de 51% de volume d'un mortier neuf (d'apport) et 49% de volume d'un mortier vieux (d'AE). Variant les volumes des différents mortiers, le degré d'homogénéité de mélange est piloté. 12 modèles numériques d'un mortier mélange sont développés en simulant 12 étapes de mélanges entre les constituants neufs et vieux. La Figure 2 illustre ces étapes de

mélange. A chaque étape, 5% du mortier vieux est mélangé avec 5% du mortier neuf donnant un mortier mélange homogène. La cinétique de diffusion est prise, en première approche, égale pour les différents constituants dans ce travail de recherche. Le premier modèle correspond à 0% d'homogénéité et peut être présenté par un modèle biphasique. Ensuite, des modèles triphasiques sont développés représentant les différents degrés d'homogénéité de mélange entre les constituants. Enfin, le dernier modèle formé d'une seule phase (le mortier 100% homogène) correspond à un mélange homogène entre les mortiers neuf et vieux.

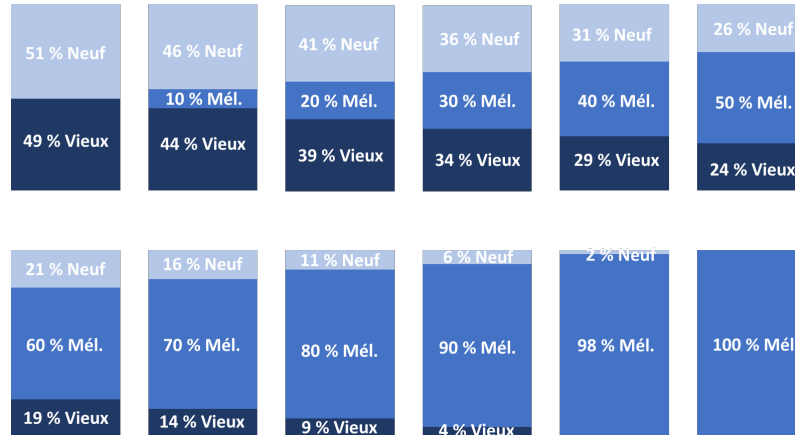


Figure 2. Les différentes étapes de mélange entre les mortiers neuf et vieux

*Génération des différentes phases*

Le logiciel ABAQUS est utilisé pour réaliser les calculs numériques basées sur la méthode des éléments finis. Vu que les granulats possèdent des formes irrégulières, des angularités complexes et des tailles différentes, ABAQUS est incapable de créer ces agrégats et de les distribuer aléatoirement dans un domaine donné. C'est pourquoi un logiciel appelé MOA (acronyme de modeleur d'objet aléatoire) est introduit. Ce logiciel est développé dans notre laboratoire et est écrit en langage C++. Il a été validé dans le travail de Tehrani et al., 2012 et il a été utilisé par Ziade et al., 2021. Cet outil permet de générer des objets de manière aléatoire dans un espace défini en deux ou trois dimensions.

En adoptant la modélisation triphasique, le mortier vieux est considéré comme des inclusions et le mortier neuf comme la matrice. Le mortier (100% homogène) correspond à la couche de mortier qui existe entre le mortier neuf et le mortier vieux. Deux générations sont réalisées en utilisant le logiciel MOA (Voir Tableau 1). Les générations résultantes sont présentées dans la Figure 3. Un exemple d'un mortier triphasique correspondant à la 4ème étape de mélange (36% neuf, 30% mélange et 34 % vieux) est présenté dans la Figure 4.

**Tableau 1. Pourcentage volumétrique des générations résultantes**

Génération	Phase	Diamètre des sphères (µm)	Pourcentage volumétrique (%)
1	Mortier AE	50/250	$V_{\text{mortier AE}}$
2	Mortier AE+ Mortier mélange (homogène)	100/400	$V_{\text{mortier AE}} + V_{\text{mortier mél}}$

Plusieurs modèles sont générés en variant la taille des objets tout en respectant le pourcentage volumétrique de chaque phase. Ces modèles donnent des résultats de module complexe très proches avec des différences de moins de 3%. Concernant l'impact de la forme des objets sur le module dynamique des enrobés bitumineux calculé numériquement, Fakhari Tehrani et al., 2013 ont déterminé que l'effet de la forme des inclusions n'est pas significatif.

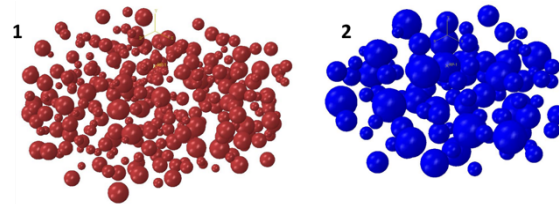


Figure 3. Les deux générations obtenues par MOA

#### *Création de l'échantillon de mortier numérique*

Après avoir importé ces deux générations dans le logiciel Abaqus, les trois phases sont créées et enfin le mortier numérique est obtenu en les combinant. Dans ce but, des opérations booléennes sont effectuées comme le montre la Figure 4. Ces opérations sont :

- Une première : sert à créer le mortier avec un degré d'homogénéité de mélange de 100%.
- Une deuxième : sert à créer la troisième phase qui est le mortier neuf.
- Une troisième : sert à créer le mortier mélange triphasique.

Le volume de chaque phase est vérifié après chaque opération booléenne afin de respecter les pourcentages volumétriques souhaités.

Le modèle est assimilé à un cylindre de 4 mm de diamètre et de 1 mm de hauteur afin de représenter l'échantillon expérimental de mortier bitumineux.

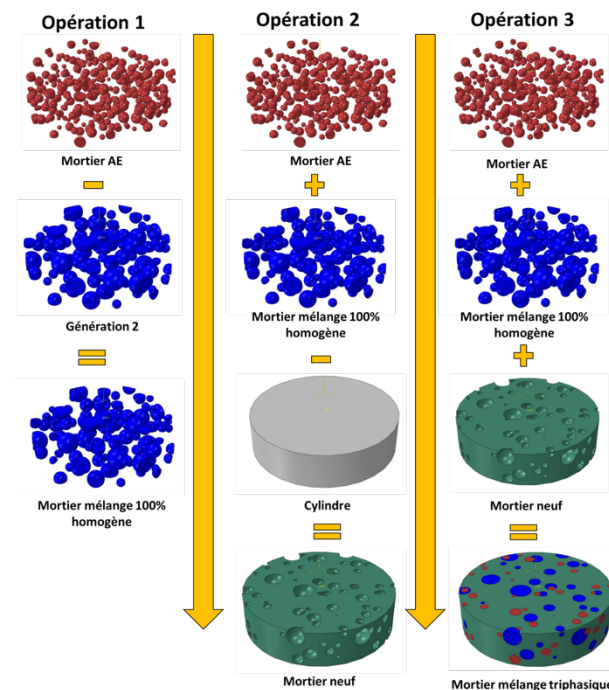


Figure 4. Opérations booléennes pour un modèle de mortier triphasique

Une cohésion parfaite entre les trois phases est considérée. Pour ce faire, la fonction "Tied Contact" intégrée dans le code MEF était utilisée. Cette fonction permet de relier les nœuds situés aux interfaces entre les deux domaines adjacents, éliminant ainsi tout degré de liberté et garantissant la continuité des déplacements et l'égalité des contraintes sur toute la surface des différentes phases.

### *Propriétés mécaniques*

Après avoir créé la structure du modèle, chaque phase est affectée par des propriétés mécaniques différentes. L'exemple présenté dans cette section concerne la simulation d'un mortier à une température de 15°C et une fréquence de 10Hz. Les différentes phases sont affectées par des propriétés élastiques linéaires pour de petites valeurs de déformation. Ces propriétés sont définies par le module d'Young E et le coefficient de Poisson  $\nu$  à chaque température et fréquence en utilisant les résultats expérimentaux des mortiers testés grâce à l'utilisation d'un rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR) (voir Tableau 2 pour l'exemple présenté).

**Tableau 2. Propriétés élastiques des différentes phases**

Phase	Module d'Young E (MPa) à 15°C et 10 Hz	Coefficient de Poisson
Mortier AE	2236	0.4
Mortier mélange 100% homogène	1366	0.4
Mortier Neuf	413	0.4

### *Chargement et conditions aux limites*

Pour définir les conditions aux limites à fixer numériquement, les conditions expérimentales sont simulées. Expérimentalement, les éprouvettes sont fixées à une extrémité et une charge ou un déplacement est imposé à l'autre extrémité. En général, la surface inférieure des modèles est encastree, ce qui signifie que les déplacements sont annulés. Cependant, un déplacement rotatif  $\theta$  de 0.0003 (correspondant à  $\gamma = 0.06\%$ , trouvée expérimentalement) est imposé à un point de référence créé au centre de la surface supérieure du modèle.

L'essai de module complexe de cisaillement est simulé à différents taux de chargement en imposant différentes fréquences de déplacement sinusoïdal à la surface supérieure de l'échantillon à différentes températures (voir Figure 5 (gauche)).

### *Maillage*

Pour obtenir un état de cohésion entre la matrice et les inclusions, une fonction de liaison, prédéfinie dans le logiciel ABAQUS, est imposée, assurant un degré de liberté nul entre les nœuds, garantissant une distribution égale des déformations et une transmission égale des contraintes aux interfaces, ainsi que la continuité d'un déplacement. Pour obtenir une distribution uniforme des contraintes et des déformations dans le modèle, l'opération de maillage est effectuée en choisissant l'élément tétraédrique quadratique à dix nœuds (C3D10) (voir Figure 5 (droite)).

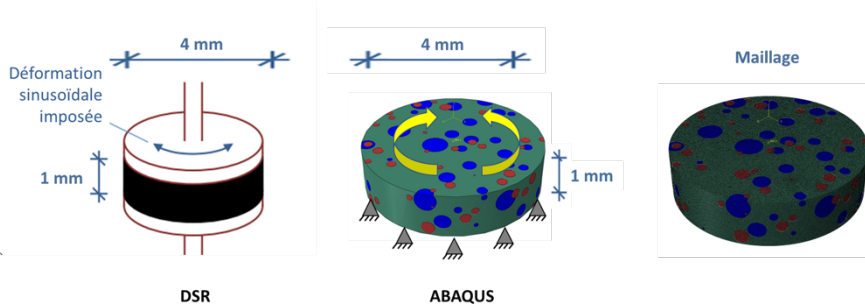


Figure 5. Chargement et conditions aux limites (gauche) et maillage du modèle (droite)

*Calcul du module complexe de cisaillement*

Une analyse pseudo-élastique est appliquée, ce qui signifie que le module complexe de chaque phase est attribué à un modèle correspondant à une certaine température et fréquence. Le coefficient de Poisson a été supposé égal à 0.4 indépendamment de la température et de la fréquence. L’analyse pseudo-élastique est adoptée pour étudier la validité et l’efficacité des modèles triphasiques. Ces derniers sont considérés comme des modèles très complexes vu qu’ils correspondent à 3 phases de propriétés différentes et à un nombre d’éléments très important.

*Résultats*

La norme du module complexe  $|E^*|$  est mesurée en variant le degré de mélange entre le mortier vieux et le mortier neuf. Pour chaque cas de mélange, cinq modèles numériques de mortiers sont réalisés, chacun est créé avec des générations différentes d’inclusions. Ces dernières ont été achevées d’une façon aléatoire à l’aide du logiciel MOA tout en respectant les taux de remplissage volumiques qui correspondent à chaque cas de mélange. Les modules complexes des mortiers résultants sont similaires avec une différence inférieure à 3%. Enfin, les valeurs calculées sont la moyenne des modules complexes de ces cinq modèles.

Ce module  $E^*$  est obtenu à partir de module complexe de cisaillement  $G^*$  à l’aide de l’équation 1 en prenant le coefficient de Poisson  $\nu = 0.4$  pour les mortiers.

$$G^* = E^* / (2(1 + \nu)) \text{ Équation 1}$$

La Figure 6 représente les résultats obtenus à 15°C et à 10 Hz en fonction du degré de mélange du mortier triphasique.

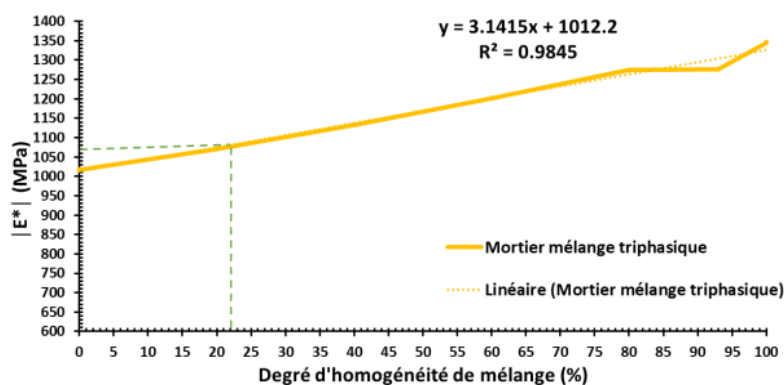


Figure 6. La norme du module complexe  $E^*$  en fonction du degré d’homogénéité de mélange du mortier triphasique obtenue à 15°C, 10Hz

Le module mesuré représente une fonction linéaire avec le degré d'homogénéité de mélange. Cette fonction est représentée par l'équation suivante :

$$E^*_{\%mélange} = 3.14 \times \%mélange + E^*_{0\%mélange} \quad \text{Équation 2}$$

Avec,  $\%mélange$  est le pourcentage d'homogénéité de mélange.

On peut conclure que plus le mélange est homogène c'est-à-dire plus le constituant vieux se remobilise dans le mélange, plus la rigidité du mélange augmente. Ainsi, peut-on justifier l'importance d'estimer et de contrôler le pourcentage d'homogénéité de mélange entre les différents constituants.

A partir d'un mélange 90% homogène, des irrégularités sont observées concernant la linéarité de la courbe. Cela pourrait être expliqué par le passage d'un modèle triphasique à un modèle biphasique à partir de ce pourcentage vu que le constituant vieux se remobilise en totalité dans le mélange et il ne reste qu'un petit volume du mortier neuf qui n'est pas encore mélangé. A 100% d'homogénéité de mélange, tous les constituants sont mélangés et le modèle correspond à un mortier monophasique dont les propriétés sont égales à celles mesurées expérimentalement du mortier mélange 100% homogène.

Rappelons que ce modèle est développé afin de prédire le taux d'homogénéité d'un mortier mélange. Ayant le module calculé en fonction du pourcentage d'homogénéité, on compare ce module numérique au module d'un mortier mélange testé au labo et on obtiendra le degré d'homogénéité de mélange expérimental entre les constituants neuf et vieux. Prenons l'exemple du mortier mélange avec le pourcentage inconnu d'homogénéité fabriqué en mélangeant le mortier neuf et le mortier d'AE. Ce mortier est obtenu après mélange manuel au niveau des mortiers neufs et vieux alors que le mortier 100% homogène est obtenu après un mélange manuel au niveau des liants neufs et vieux. Il est testé au laboratoire par un DSR. Ce mortier a un module  $E^* = 1076$  MPa (à 15°C et 10Hz). En plaçant ce module sur le graphe de la Figure 6, on peut estimer que le degré de mélange entre les constituants est de 22%.

Chaque étape de notre modélisation est basée sur une hypothèse de simplification : 5% de volume de mortier vieux se mélange avec 5% de volume du mortier neuf. Notre modèle peut être optimisé en considérant différentes vitesses de mélange pour les constituants neuf et vieux afin de mieux représenter le mélange.

### III. Conclusion

En adoptant le modèle triphasique, le pourcentage de mélange entre les composants vieux et neuf d'un mortier mélange est prédit. Cette approche peut être optimisée en prenant en compte le coefficient de diffusion du constituant vieux dans le neuf, et en la validant expérimentalement.

Enfin, cette méthode semble être un bon outil pour caractériser l'homogénéisation des constituants vieux et neufs au sein d'un matériau mélange vu qu'elle ne nécessite pas de fabriquer l'échelle finale à tester, donc elle sert à économiser de ressources et elle est simple à réaliser en comparaison aux essais expérimentaux souvent, compliqués et pas encore normalisés.

### REFERENCES

Fakhari Tehrani, F., Absi, J., Allou, F., & Petit, C. (2013). Heterogeneous numerical modeling of asphalt concrete through use of a biphasic approach: Porous matrix/inclusions. *Computational Materials Science*, 69, 186–196. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.11.041>

Gaspar, M. S., Vasconcelos, K. L., Lopes, M. M., & Bernucci, L. L. (2020). Evaluation of binder blending on warm mix asphalt recycling. *Transportes*, 28(2), 87-99. DOI:10.14295/transportes.v28i2.2133

Navaro, J. (2011). Cinétique de mélange des enrobés recyclés et influence sur les performances mécaniques (Doctoral dissertation, Arts et Métiers-ParisTech). <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00613960>

Pouget, S., Marsac, P., Pedraza, A., Sauzéat, C., Di Benedetto, H., Gaudefroy, V., ... & Mouillet, V. (2023). Advanced characterisation of multi-recycled warm asphalt pavement (MRWAP) with high content of recycled asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*, 1-22. DOI: 10.1080/14680629.2021.2018352

Route de France- Etat de la route. (2022). Rapport annuel. Paris. <https://www.routesdefrance.com/wp-content/uploads/2022/06/rdf-edlr2022-web.pdf>

Tehrani, F. F., Quignon, J., Allou, F., Absi, J., & Petit, C. (2012). Modélisations numériques en deux et en trois dimensions de matériaux bitumineux en tant que biphasés à fort contraste de propriétés mécaniques. XXXe rencontres AUGC-IBPSA, 1-12.

Yousefi Rad, F. (2013). Estimating blending level of fresh and RAP binders in recycled hot mix asphalt (Doctoral dissertation). <https://minds.wisconsin.edu/handle/1793/66319>

Ziade, E., Fakhari Tehrani, F., Beghin, A., Petit, C., Absi, J., Millien, A., & Reynaud, P. (2021). Experimental and numerical investigation on the rheological behaviour of bituminous composites via DSR testing. *Road Materials and Pavement Design*, 22(sup1), S328-S344. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1912812>