

# Contribution physico-chimique à la compréhension du mûrissement des mélanges routiers traités à l'émulsion de bitume

Amélie Thiriet<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Gustave Eiffel, Nantes, France

## RESUME

Les enrobés à froid peuvent être une solution pour participer à la décarbonation des routes. La présence d'eau dans le matériau, bénéfique pour sa mise en place, confère au matériau un comportement extrêmement évolutif et dépendant des conditions extérieures. Cet article a pour but de compléter la connaissance des mécanismes régissant cet aspect évolutif, en étudiant l'enrobé, le liant, mais aussi ce qu'il se passe à l'interface entre le liant et le granulat sous différentes conditions extérieures. L'enrobé se rigidifie avec le temps, surtout sous des conditions chaudes et sèches. Cette augmentation de module est due à la rigidification du liant mais aussi à l'évolution de la géométrie des contacts entre le liant et le granulat.

**Mots-clefs** grave-émulsion, mûrissement, module œdométrique, rhéologie, mouillabilité

## I. INTRODUCTION

La France compte 1,1 million de kilomètres de réseau routier, qui a par exemple amené en 2019 une production de 36 millions de tonnes d'enrobés (Routes de France, 2020). Les enrobés usuellement utilisés, dits « à chaud », nécessitent d'être chauffés pour leur mise en œuvre, ce qui demande beaucoup d'énergie et rejette des composés organiques (tels que des gaz à effet de serre et des hydrocarbures aromatiques polycycliques). L'épuisement des ressources non renouvelables, le réchauffement climatique et les risques pour les employés sur chantier suscitent le besoin d'aller vers une démarche plus écologique et réfléchie des pratiques routières. Une solution proposée est l'utilisation plus large de la grave-émulsion (GE). Ce matériau, dit « à froid », est constitué d'un squelette granulaire lié par une émulsion de bitume (bitume dans eau). L'eau présente dans le mélange permet la mise en place aisée du matériau sur chaussée sans besoin de chauffer, ce qui évite les rejets nocifs et permet une baisse de la consommation énergétique (Goyer et al., 2012). Cependant, cette eau confère au matériau au jeune âge un comportement unique : il se rigidifie lors d'une phase appelée « mûrissement », qui peut durer de

quelques mois à quelques années. Dans la littérature, la rigidification de l'enrobé est mise en relation avec le séchage (Serfass et al., 2004) et la rigidification du liant (Carbonneau et al., 2012). Ce processus est difficilement prévisible car il dépend considérablement des conditions extérieures et de la composition de la GE. Ceci constitue un verrou scientifique à leur développement et à leur utilisation plus systématique (en 2019, les enrobés à froid représentaient seulement 4% de la production d'enrobés, (Routes de France, 2020)). L'évolution du matériau a été évaluée en laboratoire (Thiriet et al., 2022; Thiriet et al., 2021), in situ sur un démonstrateur à l'échelle 1, mais aussi modélisée à partir des résultats mécaniques obtenus. L'étude présentée ici, qui se concentre sur les résultats en laboratoire, a pour but de participer à une meilleure compréhension des mécanismes régissant le mûrissement. Après une partie présentant les matériaux étudiés et les méthodes utilisées, cet article se concentre en premier sur l'échelle la plus large, l'enrobé. Ensuite, l'échelle intermédiaire, les contacts entre le liant et le granulat, est observée. Finalement, l'échelle la plus fine, la physico-chimie du liant, est exposée.

## II. MATERIAUX ET METHODES

### A. Matériau utilisé

La grave-émulsion (NF P98-121) étudiée est composée d'une émulsion bitume/phase aqueuse de ratio 65/35. Le bitume est de grade 70/100. La phase aqueuse contient de la diamine à 6 kg/t d'émulsion. Le granulat est de type silico-calcaire, la granulométrie du mélange est la suivante : 10/14 20%, 6/10 20%, 2/6 15% et 0/2 45%. L'enrobé contient 6,50% d'eau finale et 4,55% de liant résiduel. Il est malaxé pendant 2 minutes puis compacté à 160 kN pendant 2 minutes directement dans des moules Duriez sous forme d'éprouvettes cylindriques de diamètre 120 mm et de hauteur 60 mm. Les éprouvettes restent dans leur moule tout le long de l'étude.

### B. Protocole de l'étude

Après fabrication, les éprouvettes sont placées en enceinte climatique sous différentes conditions de température et d'hygrométrie.

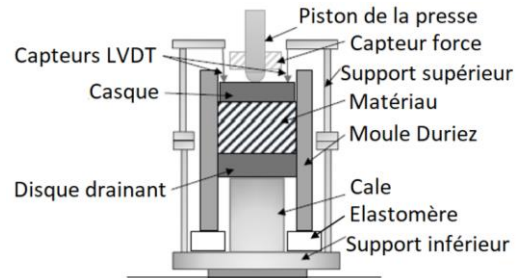
- Le groupe d'éprouvettes A est soumis à 2 mois sous 35 °C et 20 %HR (humidité relative) suivi de 2 mois à 10 °C et 80 %HR,
- Le groupe B subit 10 °C et 80 %HR pendant 2 mois puis 35 °C et 20 %HR pendant 2 mois.

Ces conditions ont été choisies dans le but d'étudier l'influence de l'historique des conditions climatiques sur le mûrissement. Les conditions à 35 °C et 20 %HR ont été utilisées dans la littérature pour accélérer le mûrissement ((Serfass et al., 2004), pendant 14 jours pour simuler 3 étés).

Trois éprouvettes du groupe A et deux du groupe B sont régulièrement testées mécaniquement par essai œdométrique (partie C) au cours du mûrissement, tandis que les autres sont retirées au fur et à mesure, et utilisées pour en extraire le liant (partie D) et étudier son comportement rhéologique (partie E).

### C. Essais œdométriques

Au jeune âge, la GE est très peu cohésive ; il est donc impossible de découper des éprouvettes ou de procéder à des essais mécaniques usuellement utilisés pour les enrobés à chaud sans risquer son endommagement. L'essai œdométrique a été retenu pour cette campagne expérimentale puisqu'il consiste en la compression cyclique uni-axiale (petites déformations) d'éprouvettes cylindriques contenues dans leurs moules rigides. Les éprouvettes sont alors confinées et ne risquent pas de casser lors de l'essai (Fig. 1). Cet essai est particulièrement simple à mettre en place, à utiliser et permet d'évaluer le comportement mécanique de plusieurs éprouvettes dans une même journée avec une seule presse.



**FIGURE 1.** Montage de l'éprouvette dans le bâti, d'après (Lambert et al., 2018)

L'essai est réalisé avec une presse Schenck Prüfraahmen Typ, en utilisant le protocole développé par (Lambert, 2018). Les éprouvettes sont testées sous différents paramètres d'essai : 3 températures (15, 25 et 35 °C, 5 fréquences (0.1, 1, 3, 6 et 10 Hz et 3 amplitudes de force (2.8, 5.1 et 9.5 kN)). Les signaux de force et déplacement recueillis sont traduits en signaux de contrainte et déformation, permettant le calcul du module œdométrique et de l'angle de phase.

#### *D. Extraction*

Les éprouvettes vouées à être détruites sont tout d'abord lyophilisées avec un lyophilisateur Alpha 1-2 LDplus Bioblock-Christ pour permettre une extraction du liant (bitume) sans présence d'eau sans avoir besoin de chauffer le matériau, ce qui risquerait de le vieillir prématurément. Le liant est ensuite extrait au perchloroéthylène grâce à un Asphalt Analysator InfraTest Prüftechnik GmbH. Les fines et le solvant sont séparés du liant par centrifugation puis distillation.

#### *E. Rhéologie*

La rhéologie du liant extrait est évaluée grâce à un DSR MCR102 Anton Paar en contrainte imposée (NF EN 14770).

Les mesures sont réalisées en deux phases : un essai dit « à froid » et un essai « à chaud ». Le comportement du liant en température est étudié par pas de 10 °C avec 15 minutes d'attente de stabilisation avant essai et pour chaque température. Les géométries utilisées sont de type plan-plan. L'essai « à froid » est réalisé de 20 à -10 °C avec une géométrie de diamètre 8mm. La contrainte imposée est de 5000 Pa. Pour l'essai « à chaud », une géométrie de diamètre 25 mm est utilisée de 20 à 80 °C et la contrainte imposée est de 500 Pa. L'échantillon est chargé à 60 °C pour permettre un bon contact initial entre la géométrie et l'échantillon. L'entrefer entre les géométries basse et haute est fixé à 1 mm.

#### *F. Mesure de la cinétique de mouillage au tensiomètre à goutte*

Parallèlement aux essais présentés ci-dessus et dans un objectif de mieux comprendre le phénomène de mûrissement au travers de l'étalement du bitume, un protocole spécifique a été développé. Il consiste à mesurer l'angle de contact entre une goutte de bitume déposée sur une lame de verre avec un tensiomètre thermo-régulé (DSA100 Kruss). Le bitume étudié, de grade 160/220 (choisi pour accélérer le processus d'étalement par rapport au bitume 70/100 utilisé pour fabriquer l'enrobé), est tout d'abord chauffé à 110 °C pendant 30 minutes et coulé dans des moules cylindriques en silastène. Ils sont placés au congélateur en attendant les essais au tensiomètre. En début d'essai, les échantillons ainsi obtenus sont placés dans la seringue en laiton du tensiomètre chauffée à 120 °C. La goutte de bitume est ensuite déposée sur le substrat (lame de verre) chauffé à 40 °C.

L'immersion dans l'eau du système goutte-substrat est réalisée dans une cellule de mesure thermo-régulée à double paroi remplie d'eau distillée disposée sur le tensiomètre. La température de l'eau est réglée à 70 °C. Cette température n'est pas représentative d'un enrobé GE sous conditions normales de mise en place ou d'utilisation, elle a été choisie pour permettre un essai rapide et accélérer les mouvements du liant sur la lame de verre.

Les gouttes sont observées en direct à travers la caméra du tensiomètre. Les profils photographiés sont étudiés grâce au logiciel DSA Analysis, permettant la mesure des angles de contact.

### III. CARACTERISATION DU COMPORTEMENT MECANIQUE DES MELANGES AU COURS DU MURISSEMENT

#### A. Evolution du module œdométrique dans le temps et en fonction des conditions extérieures

La littérature montre que les conditions de mûrissement ont un fort impact sur la rigidification de la GE. Son module augmente avec le temps et la température de conditionnement ((Doyle et al., 2013; Lambert, 2018)). De plus, des essais sur enrobé à froid contenant des matériaux recyclés et du ciment ont montré qu'après 14 jours à la même température (40 °C), la rigidité d'éprouvettes précédemment mûries 14 jours à 5 °C ne rattrape pas celle d'éprouvettes mûries 14 jours à 25 °C (Raschia et al., 2020). Le module œdométrique des éprouvettes a été mesuré sur les 4 mois de mûrissement pour les deux groupes A et B. La Fig. 2 présente ces résultats pour des paramètres d'essais à 15 °C, 10 Hz et 9.5 kN.

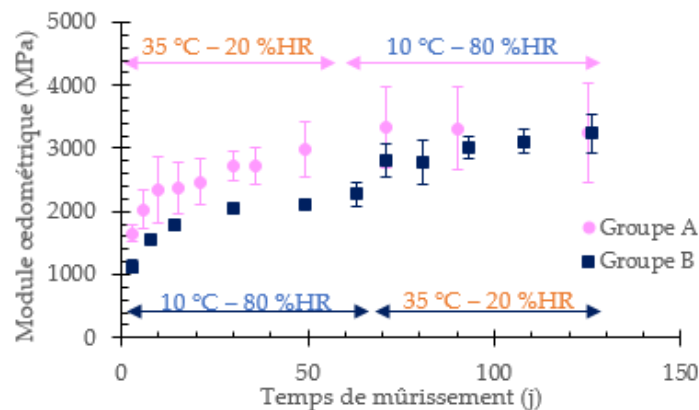


FIGURE 2. Evolution du module œdométrique dans le temps pour les deux groupes (Thiriet et al., 2021)

Sur les 4 mois, le module des deux groupes augmente avec le temps jusqu'à des états finaux similaires (autour de 3200 MPa). Ceci montre que l'ordre des conditions de mûrissement n'a pas d'influence sur le comportement final du mélange. Les conditions 35 °C et 20 %HR amènent une rigidification du mélange pour les deux groupes, tandis que les conditions 10 °C et 80 %HR ont pour conséquence une stagnation du module pour le groupe A et une rigidification légère pour le groupe B. La cinétique d'évolution diffère donc en fonction du traitement.

#### B. Remarque sur la réintroduction d'eau dans le mélange

Lors des premiers mois de mûrissement du groupe A, les éprouvettes ont subi des « pics » d'hygrométrie non souhaités dans l'enceinte climatique (compte tenu de problèmes de régulation), à 15 et 35 jours de mûrissement. L'humidité a pu atteindre jusqu'à 80 %HR au lieu de 20 %HR. La Fig. 3 montre l'évolution du module œdométrique sur les 2 premiers mois de mûrissement du groupe A et repère les moments où l'hygrométrie a fortement augmenté. Les pics d'hygrométrie induisent la baisse du module particulièrement visible sur les éprouvettes A1 et A2. Ce phénomène est court dans le temps et réversible car le module augmente à nouveau une fois le pic passé (c'est-à-dire une fois l'hygrométrie rabaisée à 20 %HR).

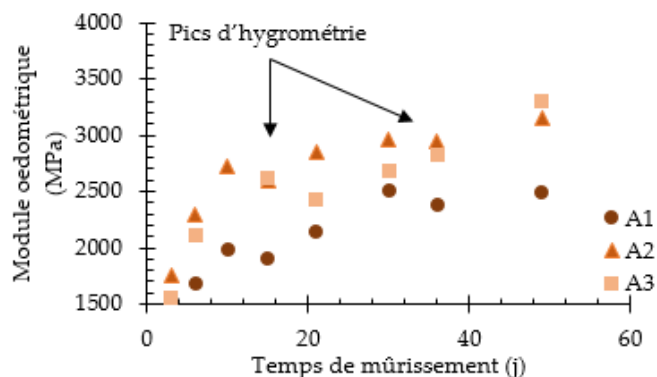


FIGURE 3. Réaction de l'enrobé à une réintroduction d'eau

## IV. MOUILLAGE LIANT-GRANULAT SUITE AU DEPART ET A LA REINTRODUCTION D'EAU

### A. Cheminement

L'eau a une influence non négligeable sur les contacts entre le liant et le granulat. En effet, une goutte de bitume sur un substrat passe d'une forme étalée avec de petits angles de contact entre la goutte et le substrat à l'air (mouillabilité élevée), à une forme plus rétractée voire sphérique en présence d'eau (mouillabilité faible) (Ramond and Lesueur, 2004). L'eau pourrait donc influencer le mûrissement.

En visualisant un pont de bitume entre deux granulats entourés d'eau, l'évacuation de l'eau amènerait une rétractation du pont et une augmentation de sa surface de contact avec le granulat. A l'échelle du mélange, le module augmenterait alors avec le séchage. Il a d'ailleurs déjà été remarqué que le module d'un enrobé à froid a tendance à augmenter avec le séchage du matériau

(Chen et al., 2021; Graziani et al., 2018; Raschia et al., 2020; Serfass et al., 2004; Thiriet et al., 2021). A l'inverse, une reprise hydrique engendrerait une perte de surface de contact (comme déjà illustré par (Vinet-Cantot et al., 2019)) et donc une baisse de module de l'enrobé.

Pour simuler une évacuation de l'eau, le bitume est déposé sur la lame de verre à sec puis le système est immergé, jusqu'à obtention d'un angle de contact suffisamment élevé (voir partie suivante). Ensuite, l'eau est évacuée et l'angle de contact suivi dans le temps.

#### B. Traitement des données

Les deux paramètres étudiés dans le suivi de la goutte sont  $\theta_s$ , l'angle de contact à l'équilibre théorique (final) et  $\tau$ , le temps de demi-vie du mouillage (étalement) avant équilibre. Ces valeurs sont calculées en modélisant la courbe des valeurs expérimentales grâce à la méthode des moindres carrés suivant l'équation suivante tirée de (Cantot, 2019), avec  $\theta(t)$  l'angle de contact à chaque instant en degrés,  $\theta_s$  en degrés et  $\theta_i$  l'angle initial fixé en degrés.

$$\theta(t) = \theta_s + (\theta_i - \theta_s)e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

Il a été constaté que l'angle en tout début d'essai est rarement identique à chaque fois. Afin d'établir la cinétique à partir du même état transitoire de mouillage (étalement du bitume sur la surface), il a été décidé de fixer un angle initial, en choisissant le plus petit angle initial mesuré sur tous les essais. Cet angle est fixé à 93°. Le temps a donc été fixé à  $t=0s$  pour cet angle pour chaque essai, en décalant les valeurs suivantes d'angles dans le temps.

#### C. Influence de la température d'essai

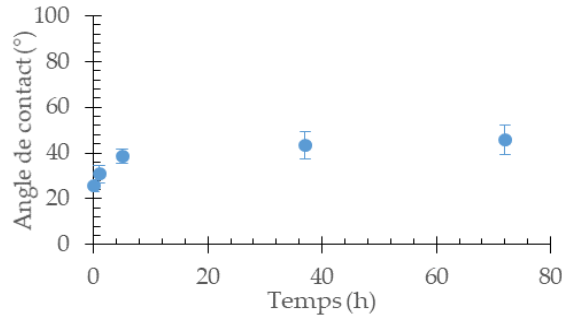
Le tableau 1 résume les angles et temps de demi-vie calculés aux différentes températures testées. Malgré des conditions de températures différentes, l'angle final  $\theta_s$  est équivalent pour tous les essais, et atteint environ 29°. De plus, le temps d'étalement diminue avec l'augmentation de la température, ce qui serait cohérent avec les résultats vus sur l'enrobé : il se rigidifie plus rapidement à plus haute température. En ne prenant en compte que l'effet de mouillabilité entre le bitume et le granulat, ceci amènerait à terme une rigidité équivalente de l'enrobé, quelques soient les conditions de température, mais une cinétique de rigidification qui, elle, dépendrait de la température.

**TABLEAU 1. Temps d'étalement calculés**

Température d'essai (°C)	40	50	60	70
$\theta_s$ (°)	28.7	28.2	29.3	28.7
$\tau$ (s)	6896	902	188	119

#### D. Influence d'une ré-immersion du système

Dans cette sous-partie, le système est une fois de plus plongé dans l'eau à 70 °C, après le premier séchage de la partie précédente. Ceci donne une idée de la réaction du matériau à une intempérie. La Fig. 4 illustre l'évolution des angles de contact de la goutte pendant cette ré-immersion.



**FIGURE 4.** Angle de contact en fonction du temps après ré-immersion

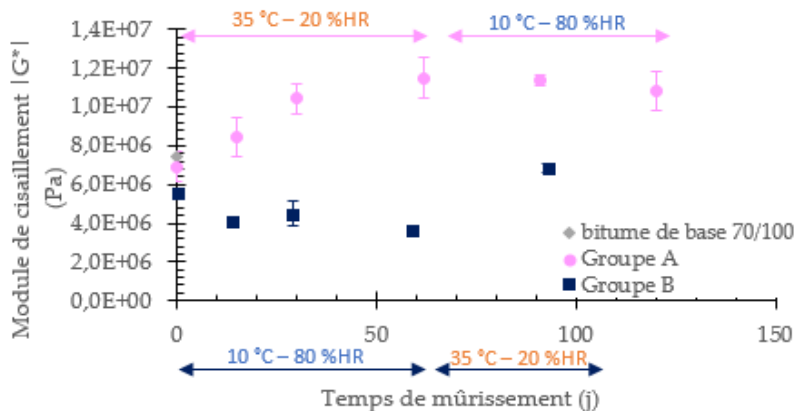
La ré-immersion du système bitume-lame de verre dans l'eau conduit à nouveau à une rétractation de la goutte de bitume. Cependant, ce retrait est moins fort que pour la première immersion : après 3 jours dans l'eau à 70 °C, les angles sont compris entre 40 et 50° alors qu'auparavant ils pouvaient dépasser 93°. Ceci montre une bonne adhésion du bitume sur le substrat en présence d'eau, même à des températures élevées.

Ce résultat permet d'expliquer les baisses de module réversibles vues en début de mûrissement du groupe A lors des reprises hydriques dans l'enceinte climatique (Fig. 3). La réintroduction d'eau dans le système, par exemple sous forme de pluie sur la route, sera accompagnée d'une légère baisse de la qualité des contacts liant-granulat qui induirait une baisse de module. Les angles de contact n'ont pas beaucoup ré-augmenté, ce qui expliquerait la réversibilité de la perte de module et sa reprise rapide juste après l'évacuation du surplus d'eau. Ceci pourrait aussi expliquer en partie pourquoi le module ne baisse pas significativement lors d'un passage de conditions 35 °C-20 %HR à 10 °C-80 %HR.

## VI. EVOLUTION DU LIANT AU COURS DU MÛRISSEMENT

### A. Evolution du module de cisaillement dans le temps et en fonction des conditions extérieures

Les essais de rhéologie sur les liants extraits permettent d'étudier l'effet du mûrissement sur l'évolution du liant. La Fig. 5 illustre le module de cisaillement  $|G^*|$  à 20 °C et 10 Hz en fonction du temps de mûrissement pour les deux groupes d'éprouvettes.



**FIGURE 5.** Module de cisaillement dans le temps pour les deux groupes (Thiriet et al., 2021)

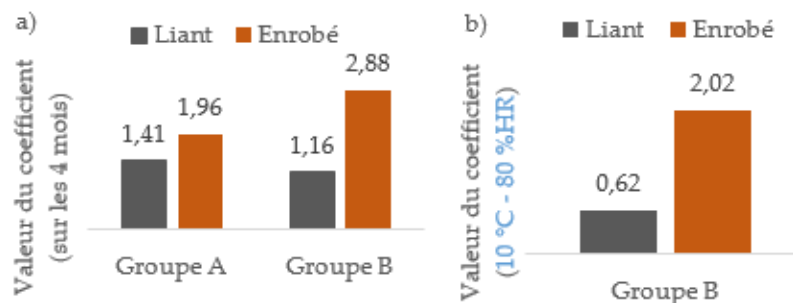
Les conditions à 35 °C et 20 %HR amènent une rigidification du liant (gain de 5 MPa pour le groupe A en deux mois, et 3 MPa en un mois pour le groupe B), ce qui est cohérent avec ce qui a été observé sur le module de l'enrobé. Sous 10 °C et 80 %HR, la rigidité du liant du groupe A stagne tandis que celle du groupe B diminue. Une fois de plus, la cinétique d'évolution diffère en fonction du traitement.

#### B. Comparaison des évolutions de l'enrobé et du liant extrait

Pour comparer aisément les évolutions de l'enrobé et du liant, les modules œdométrique et de cisaillement sont utilisés. Les ratios mettant en jeu le module mesuré en fin de période (au bout de 2 ou 4 mois) et le module mesuré en début de période sont calculés (équation 2).

$$\text{Ratio} = \frac{\text{Module final}}{\text{Module initial}} \quad (2)$$

Ces ratios permettent de quantifier les variations de modules. Un coefficient proche de 1 montre une stagnation du module, inférieur à 1 une diminution et supérieur à 1 une rigidification. Ils sont calculés sur les moyennes de chaque lot, pour des essais à 15 °C et 10 Hz. La Fig. 6 illustre ces coefficients sur les 4 mois pour l'enrobé (module œdométrique) et le liant (module de cisaillement) (Fig. 6-a), ainsi que les détails du groupe B pour des conditions à 10 °C et 80 %HR (Fig. 6-b).



**FIGURE 6.** Comparaisons des coefficients d'évolutions de la rigidité de l'enrobé et du liant

Sur les 4 mois de mûrissement et pour les deux groupes A et B, la rigidification du mélange est plus importante que celle du liant, ce qui montre que le liant n'explique pas à lui seul l'évolution de l'enrobé. De plus, en se concentrant sur les évolutions du groupe B, il peut être remarqué que sous les conditions à 10 °C et 80 %HR, le liant perd en rigidité (coefficient de 0.6) alors que l'enrobé gagne en rigidité (coefficient de 2). Cette différence peut être expliquée par le séchage du matériau : il a été vu plus haut que le séchage peut amener une rigidification du mélange par étalement du bitume sur le granulat, de fait sans évolution de la physico-chimie du liant.

## VII. CONCLUSION

Ces essais ont permis d'apporter un éclairage nouveau sur le mûrissement de la grave-émulsion. En effet, l'influence des mouvements d'eau au sein de la structure du matériau était peu connue et expliquée et la rigidification du matériau était souvent mise en relation avec celle du liant. Les



mouvements structurels possibles du bitume dans l'enrobé ont été observés par l'intermédiaire d'un système composé d'une goutte de bitume sur une lame de verre. Il a été vu que lors d'un séchage, le bitume tend à s'étaler sur la lame de verre, ce qui engendrerait une rigidification de l'enrobé. La vitesse d'étalement est régie par la température : le bitume s'étale plus rapidement à température élevée, ce qui peut être mis en parallèle avec l'enrobé, qui se rigidifie plus rapidement sous 35 °C que sous 10 °C. Une reprise hydrique amène une légère rétraction de la goutte, ce qui expliquerait les légères pertes de module de l'enrobé lors d'augmentations d'hygrométrie dans l'enceinte climatique. Les différences d'évolutions de rigidité entre l'enrobé et le liant montrent que le liant n'explique pas à lui-seul l'évolution de l'enrobé, et que l'effet du retrait de l'eau prend une part importante dans cette rigidification.

## REFERENCES

- Cantot, J., 2019. Contribution à l'étude de la tenue à l'eau des enrobés : Approche expérimentale multi échelle en laboratoire, d'un système modèle aux mélanges compactés (Thèse de doctorat). Ecole Centrale de Nantes, Nantes.
- Carbonneau, X., Gaudefroy, V., Lubineau, F., Buisson, S., Wendling, L., Dubois, V., 2012. Comportement et étude des graves-émulsion, coopération public-privé: Résistance à l'orniérage. *Revue générale des routes et de l'aménagement (RGRA)* 902.
- Chen, Z., Yi, J., Zhao, H., Luan, H., Xu, M., Zhang, L., Feng, D., 2021. Strength development and deterioration mechanisms of foamed asphalt cold recycled mixture based on MD simulation. *Construction and Building Materials* 269, 121324. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121324>
- Doyle, T.A., McNally, C., Gibney, A., Tabaković, A., 2013. Developing maturity methods for the assessment of cold-mix bituminous materials. *Construction and Building Materials* 38, 524–529. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.008>
- Goyer, S., Dauvergne, M., Wendling, L., Gaudefroy, V., Ropert, C., 2012. Environmental data of cold mix using emulsified bitumen for a better selection of road materials. Presented at the ISAP, France, pp. 1–12.
- Graziani, A., Iafelice, C., Raschia, S., Perraton, D., Carter, A., 2018. A procedure for characterizing the curing process of cold recycled bitumen emulsion mixtures. *Construction and Building Materials* 173, 754–762. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.091>
- Lambert, M., 2018. Comportement mécanique évolutif des enrobés bitumineux à l'émulsion : étude expérimentale et modélisation (Thèse de doctorat). Université de Limoges, Limoges.
- Lambert, M., Piau, J.-M., Gaudefroy, V., Millien, A., Dubois, F., Petit, C., Chaignon, F., 2018. Modeling of cold mix asphalt evolutive behaviour based on nonlinear viscoelastic spectral decomposition. *Construction and Building Materials* 173, 403–410. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.207>
- Ramond, G., Lesueur, D., 2004. Chapitre 4: Adhésion liant granulat, in: *Matériaux Routiers Bitumineux 1*. Paris.
- Raschia, S., Perraton, D., Graziani, A., Carter, A., 2020. Influence of low production temperatures on compactability and mechanical properties of cold recycled mixtures. *Construction and Building Materials* 232, 117169. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117169>
- Routes de France, 2020. Bilan environnemental: rapport annuel 2019.
- Serfass, J.-P., Poirier, J.-E., Henrat, J.-P., Carbonneau, X., 2004. Influence of curing on cold mix mechanical performance. *Materials and Structures* 37, 365–368.
- Thiriet, A., Gaudefroy, V., Chailleux, E., Piau, J.-M., Delfosse, F., Leroy, C., 2021. Effects of curing on emulsion cold mix asphalts and their extracted binder. *Functional Composite Mater* 2, 12. <https://doi.org/10.1186/s42252-021-00024-2>

- Thiriet, A., Gaudefroy, V., Piau, J.-M., Delfosse, F., Chailleux, E., Leroy, C., 2022. Assessment of the Behavior of Emulsified Asphalt Mixes During Curing, in: Di Benedetto, H., Baaj, H., Chailleux, E., Tebaldi, G., Sauzéat, C., Mangiafico, S. (Eds.), Proceedings of the RILEM International Symposium on Bituminous Materials. Springer International Publishing, Cham, pp. 331–337. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-46455-4\\_42](https://doi.org/10.1007/978-3-030-46455-4_42)
- Vinet-Cantot, J., Gaudefroy, V., Delfosse, F., Chailleux, E., Crews, E., 2019. Stripping at the Bitumen–Aggregate Interface: A Laboratory Method To Assess the Loss of Chemical Adhesion. *Energy Fuels* 33, 2641–2650. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b03410>