

Journée d'Etude de la Route et des Infrastructures

J E R I

Poudrette de caoutchouc dans les enrobés : état actuel des connaissances et potentiel

Nicolas Schüwer, Sonia Megert,
Luis Alfonso de León, Joel Martin



ecr@trs-ch.com



Les enrobés caoutchoutés

Enrobés caoutchoutés = enrobés contenant des poudres de pneus recyclés

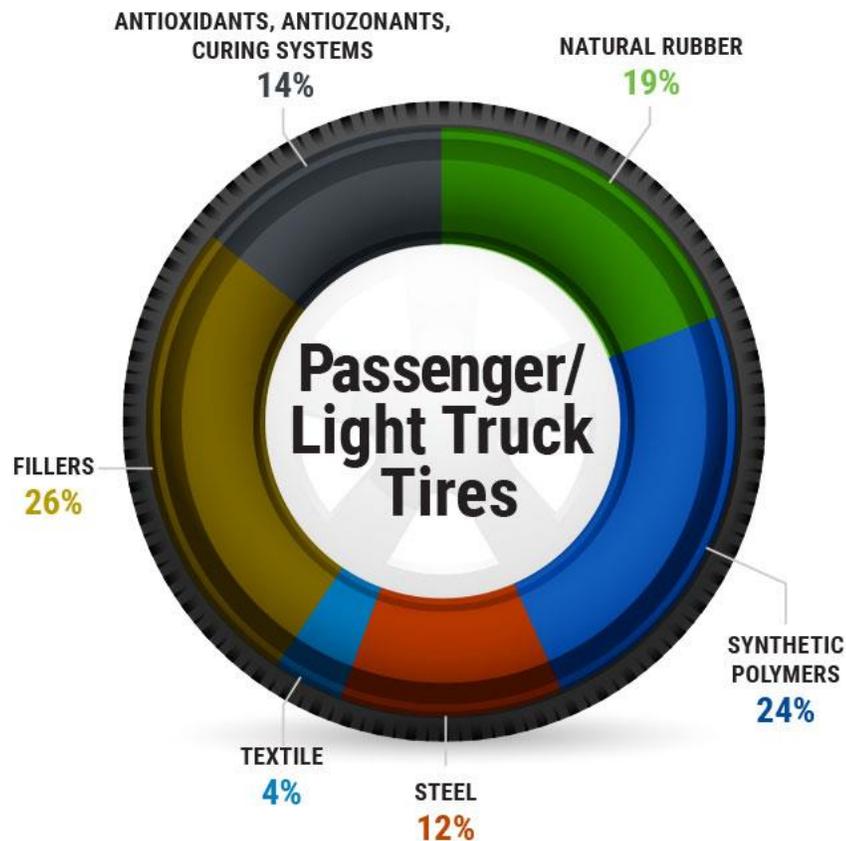
Technologie utilisée depuis les années 1960 afin d'améliorer les propriétés des enrobés

Différentes techniques de fabrication peuvent être utilisées

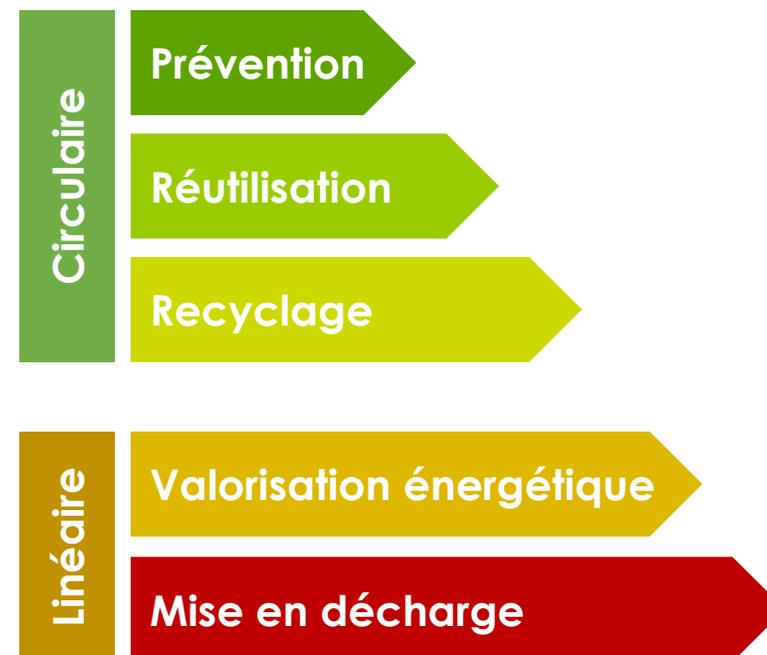
Taux de poudre, en générale, 10 à 20wt% par rapport au liant



Les pneumatiques en fin de vie



Hiérarchie des déchets selon van Lansink



~ 70 000 tonnes de pneus usagés sont générés chaque année en Suisse (monde > 30 millions de tonnes)

Les poudres de pneus

“Poudre” de pneus = particules < 1mm

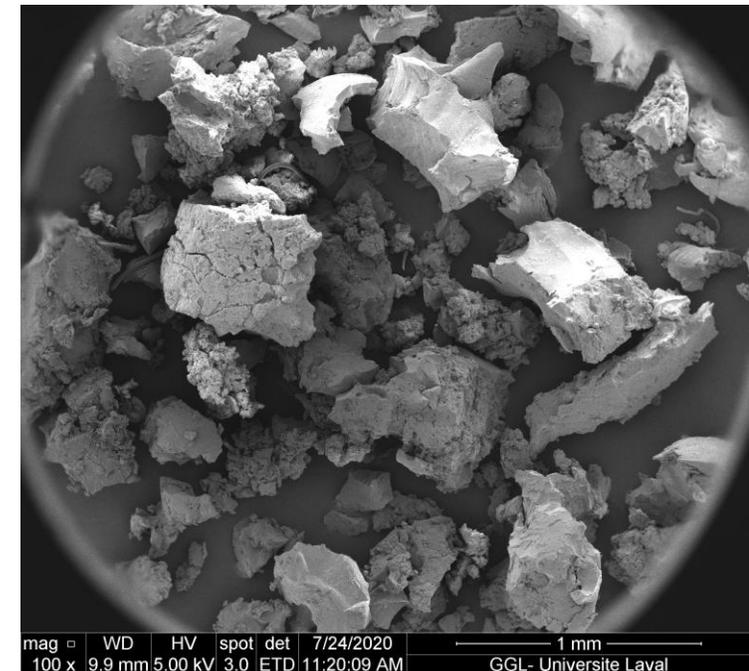
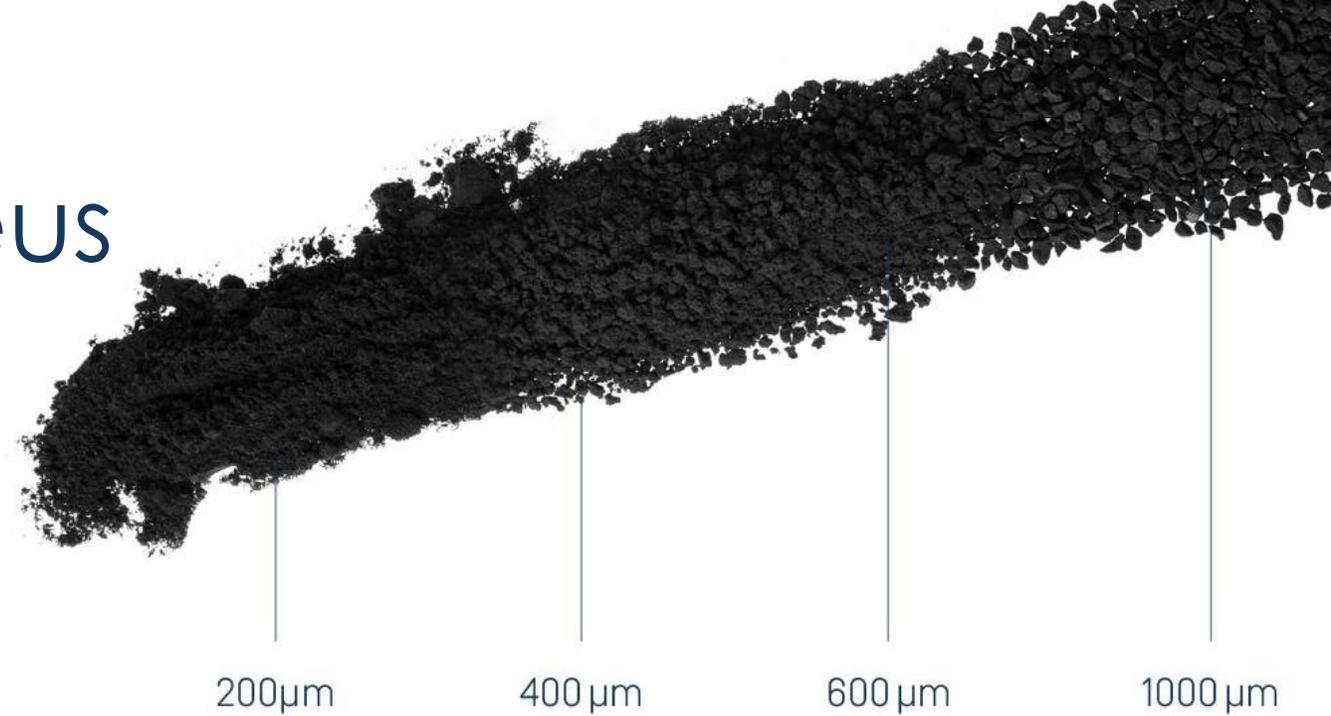
Technique de broyage

- Mécanique
- Cryogénique
- Waterjet (hydrodémolition)

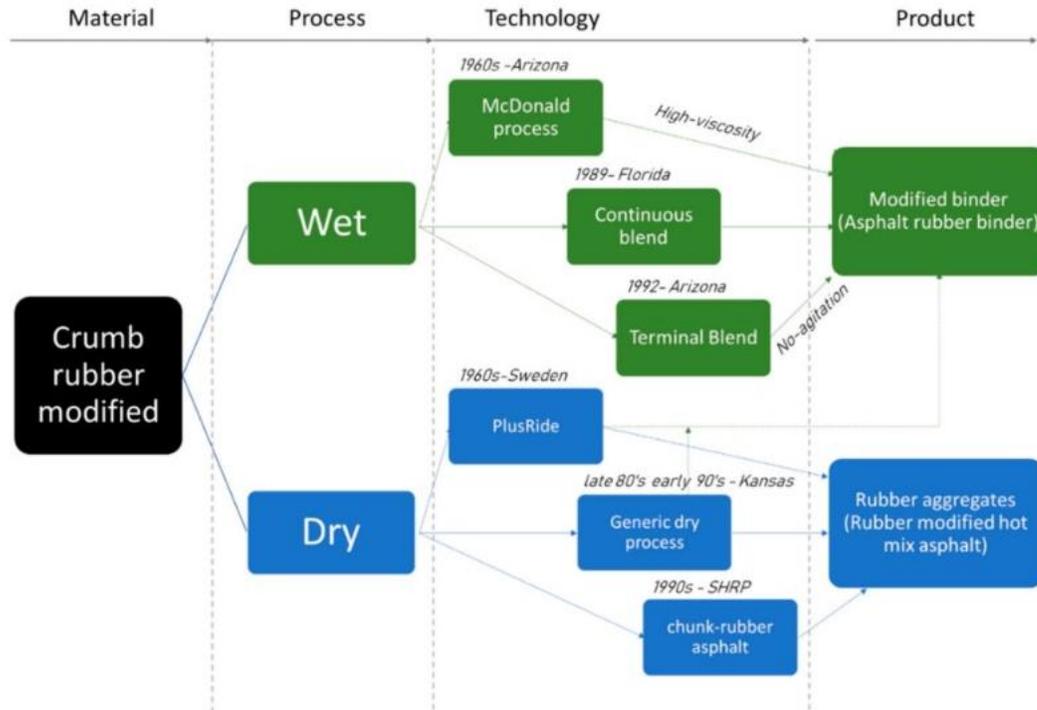
Libre de fibres textiles et métalliques
(<0.1wt% - ASTM D5603)

Selon l'OFEV:

« Les pneus suivants ne sont pas considérés comme des déchets: [...] le granulats provenant du broyage des pneus avec un calibre des granulats de **moins de 2 mm** et une proportion de métal libre et de textile libre de moins de 0,1 % »



Historique



1960

Premières expériences aux USA (Procédé Mc Donald)
Premiers essais avec la méthode «sèche» en Suède utilisant des granulats de pneu

1980 - 1990

Développement de nouvelles techniques par la voie «sèche» utilisant des poudres de pneu à la place des granulats

1991 - 1993

Mandat du congrès américain pour l'utilisation d'enrobés caoutchoutés dans les routes fédérales
Le manque d'expériences et de recommandations techniques conduit à des performances aléatoires

Depuis 2000

Regain d'intérêt associé au développement de nouvelles technologies pour la méthode sèche

“Wet process” - méthode humide

Principe

La poudre modifie le bitume lors d'un pré-mélangeage (180°C - 230°C ; 30 - 60 min). Le bitume modifié est utilisé pour la fabrication de l'enrobé.

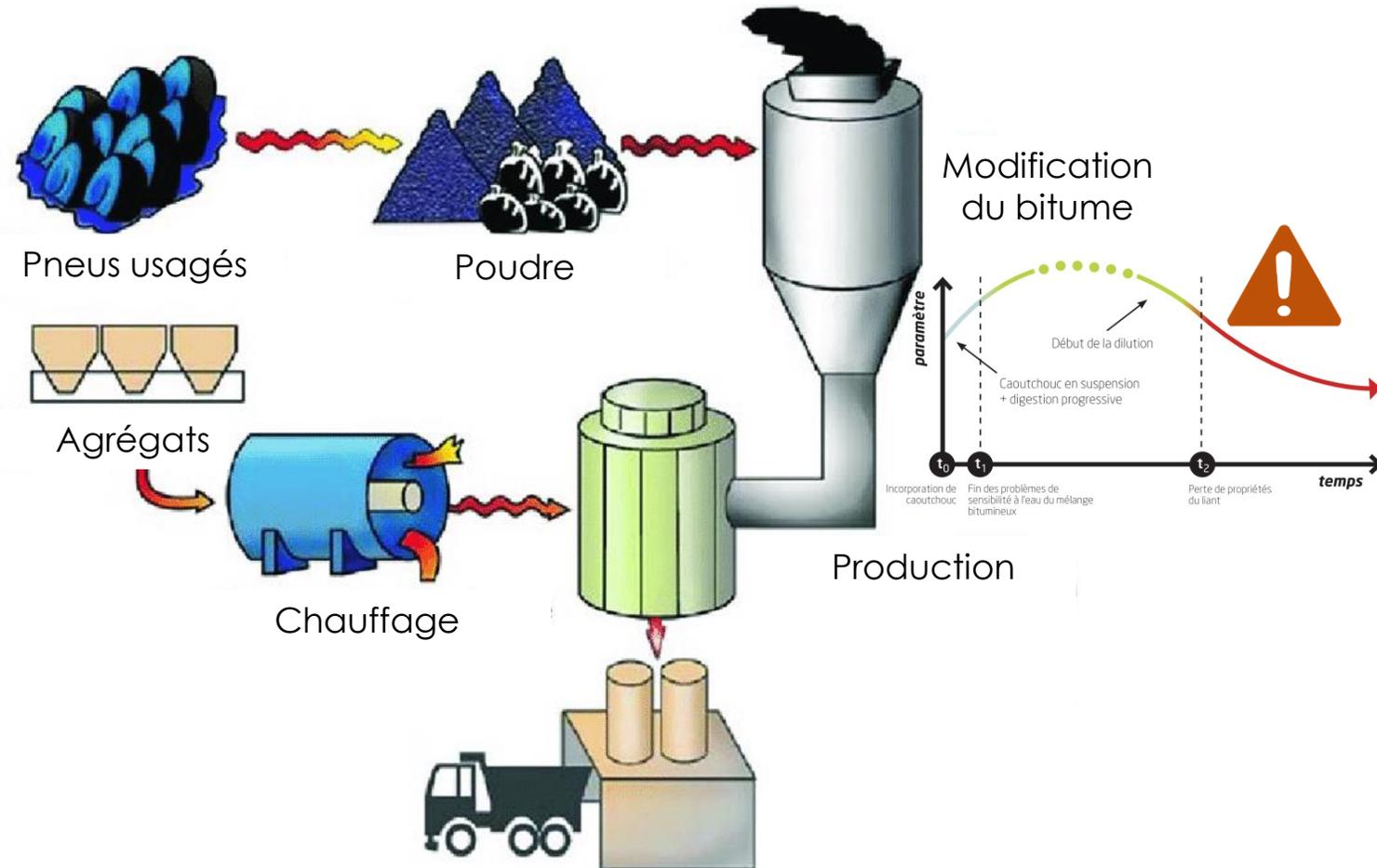
Une fois activé, le bitume activé nécessite une agitation constante (problème de sédimentation) et il est difficilement stockable (problème de «digestion»).

Fabrication

Identique à un enrobé standard (température, temps de malaxage)

Pose

Nécessite habituellement un compactage à haute température



“Dry process” - Méthode sèche

Principe

La poudre de pneu substitue une partie du filler, la poudre modifie l'enrobé lors du malaxage

Fabrication

Identique à un enrobé standard (température, temps de malaxage)

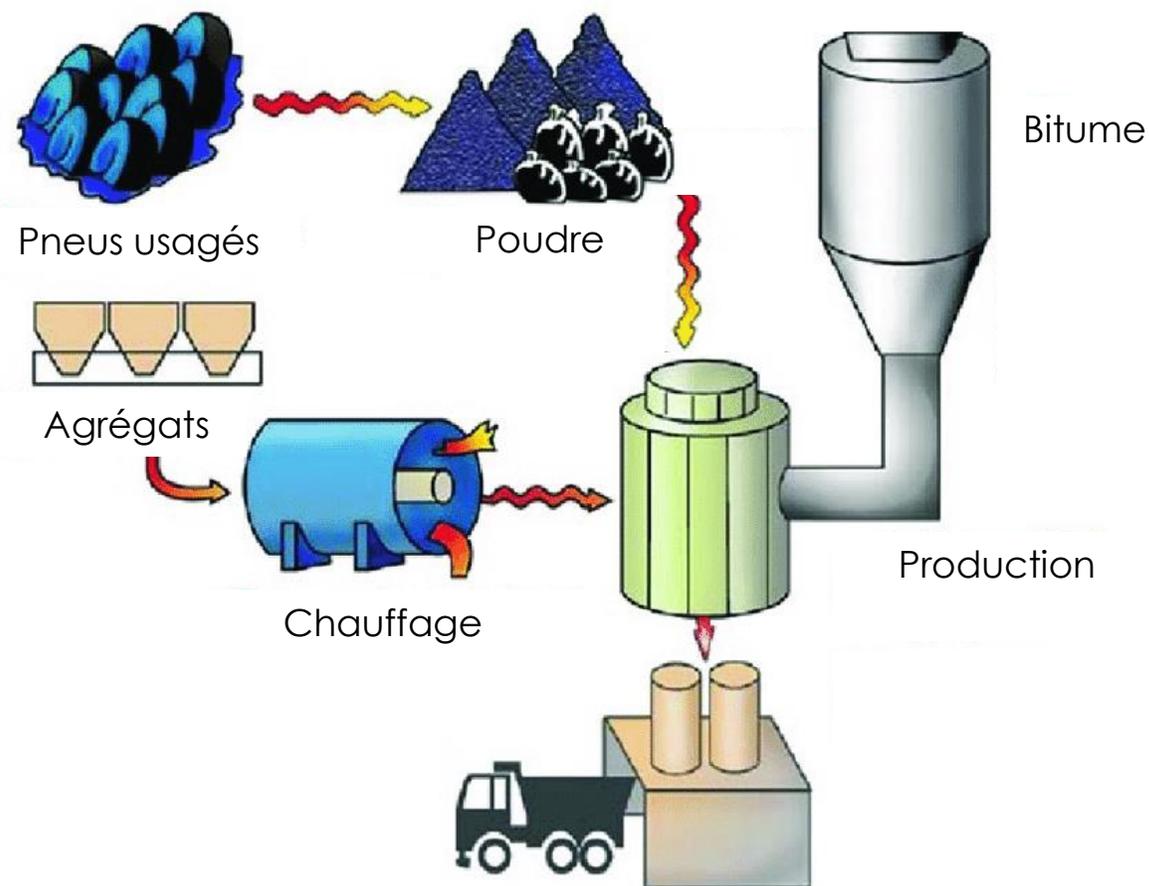
La poudre est ajoutée via un silo ou par une trappe

Certains produits nécessitent un ajustement de la courbe granulométrique (substitution du filler)

Pose

Identique à un enrobé standard

Certains fournisseurs recommandent des températures de compactage



Méthode sèche - exemples de produits

PlusRide

Technologie

Granulat de pneu (>3cm)

Composition

100% granulat de pneu



RAR

Reacted and Activated Rubber

Technologie

Poudre de pneus pré-activée

Composition

~ 60% poudre de pneus
~ 40% bitume + filler



ECR

Engineered Crumb Rubber

Technologie

Poudre de pneus imprégnée

Composition

> 99% poudre de pneus
~ 1% additive



Chaque produit a une composition différente et s'utilise d'une manière spécifique

Méthode humide vs méthode sèche

Méthode humide

- **Principe**

Modification du liant avant la fabrication
Nécessite une installation spécifique

- **Fabrication**

Similaire à un enrobé classique
Le bitume modifié ne peut pas en général être stocké

- **Pose**

Compactage à haute température

- **Coût**

Inférieur à un BmP

Méthode sèche

- **Principe**

Modification de l'enrobé pendant la fabrication
Ne nécessite pas d'installation spécifique

- **Fabrication**

Similaire à un enrobé classique

- **Pose**

Compactage aux températures usuelles ou
compactage à haute température

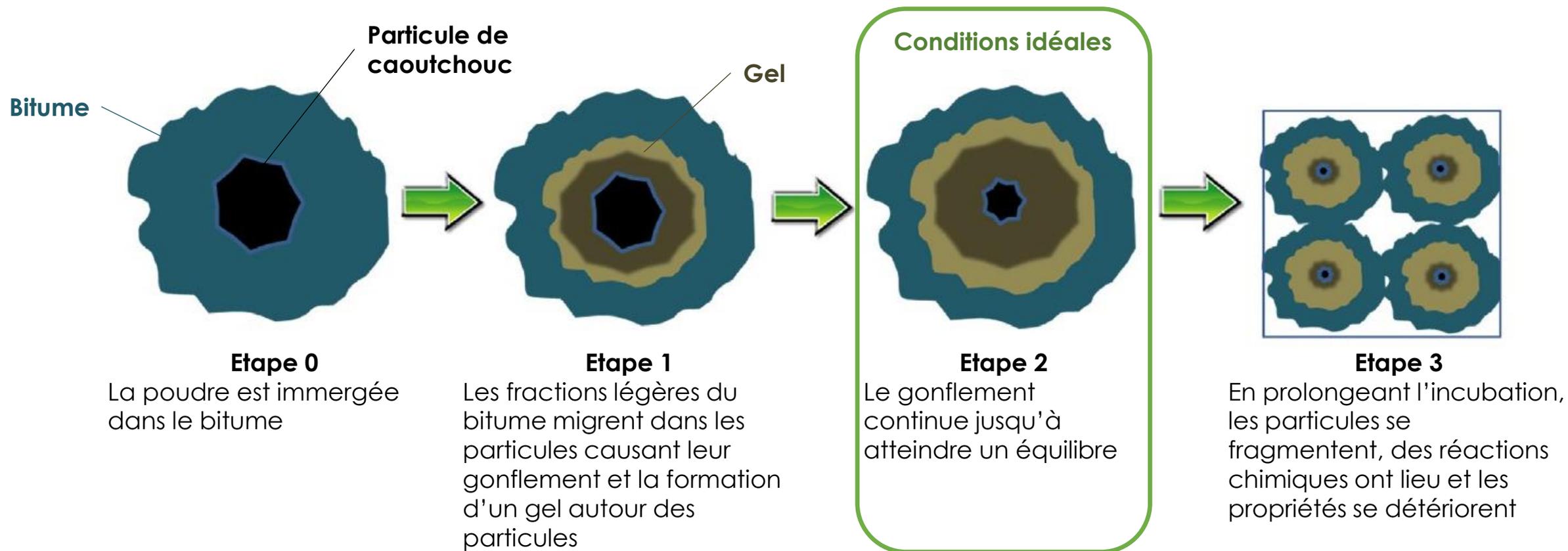
- **Coût**

Inférieur à un BmP et inférieur à la méthode humide

Malgré des méthodes de mise en pratique différentes:

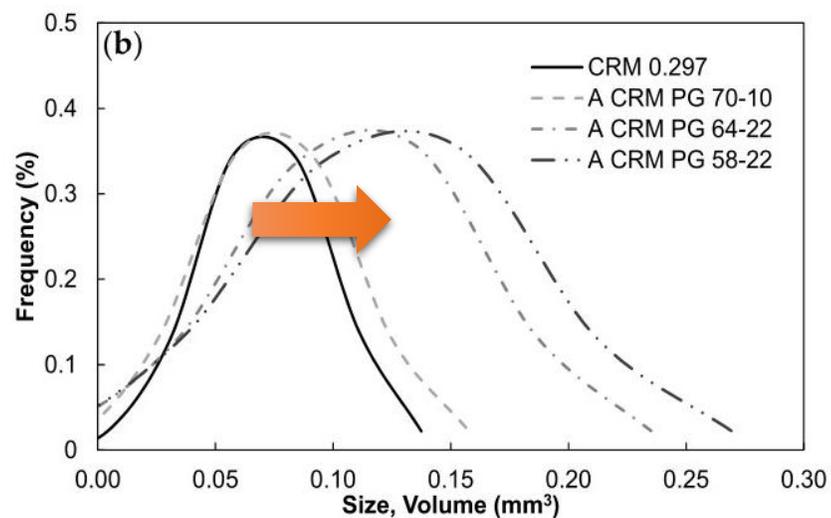
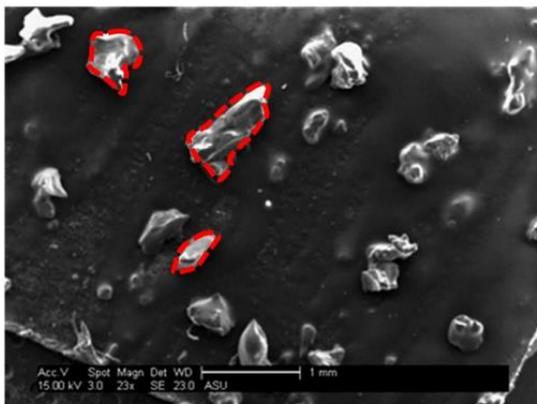
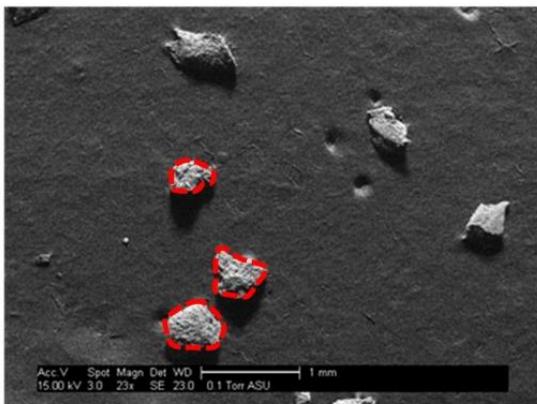
- les deux voies peuvent être utilisées avec succès pour améliorer les propriétés des enrobés
- les deux voies se basent sur des phénomènes similaires de modification des enrobés

Interaction poudre - bitume



L'interaction poudre-bitume est principalement physique et non chimique

Interaction poudre - bitume



Une augmentation du volume jusqu'à 40% peut être observée

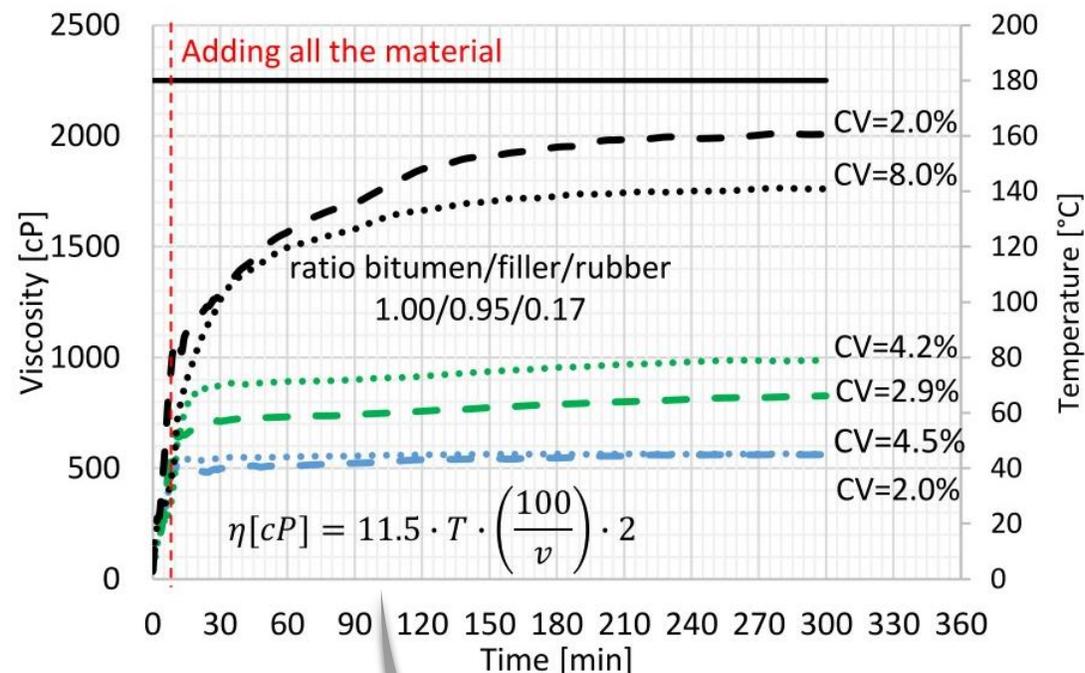
Effet dépendant du type de bitume et de la taille des particules

Cinétique de l'interaction

Le gonflement de la poudre par le bitume est fonction de la température, du type de bitume et du type de malaxage

Les poudres activées atteignent un équilibre plus rapidement

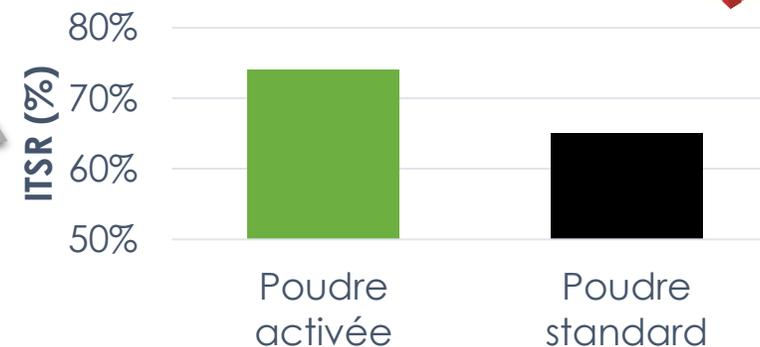
L'activation a également une influence sur les propriétés finales des enrobés



Poudre standard

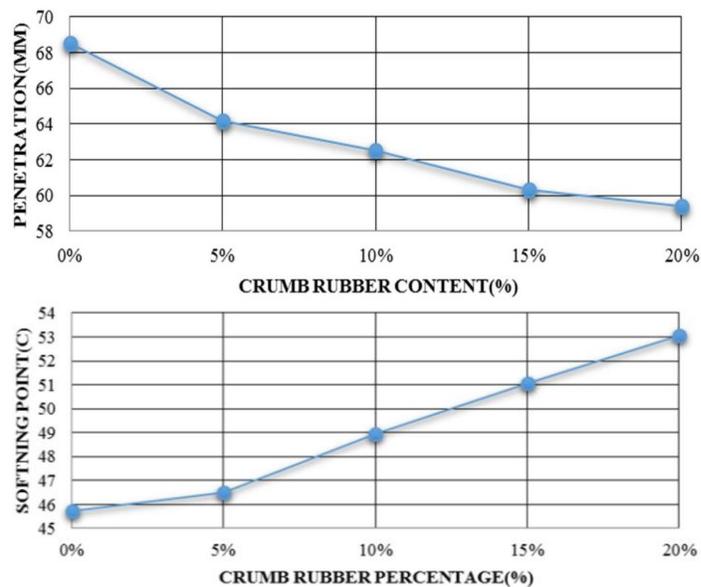
Poudre activée 1

Poudre activée 2

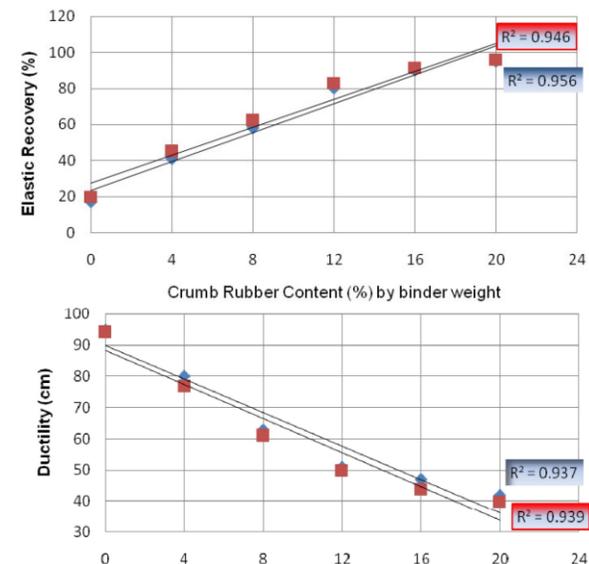


Effets sur les bitumes

60/70 bit. + poudre



80/100 bit. + poudre



Tefera et al. Am. J. Civ. Eng., 2018

Mashaan et al. Int. J. Phys. Sci., 2011

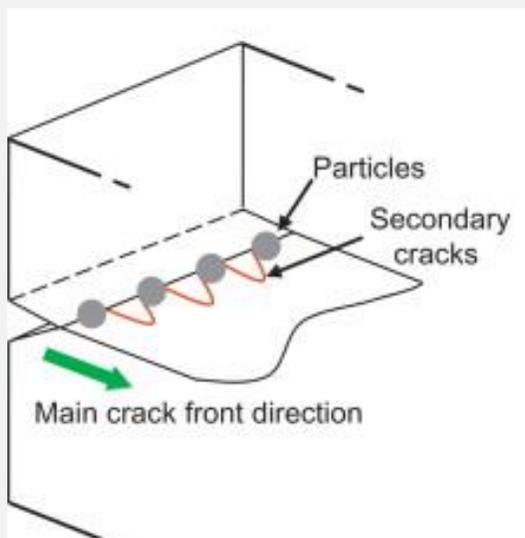
Due à l'absorption de certaines fractions du liant, l'ajout de poudre de pneu à un bitume:

- Diminue la pénétration et augmente le point de ramollissement (bille et anneau)
- Diminue la ductilité et augmente le retour élastique

Ces effets sont fonction du taux de poudre incorporé

Effets sur les enrobés

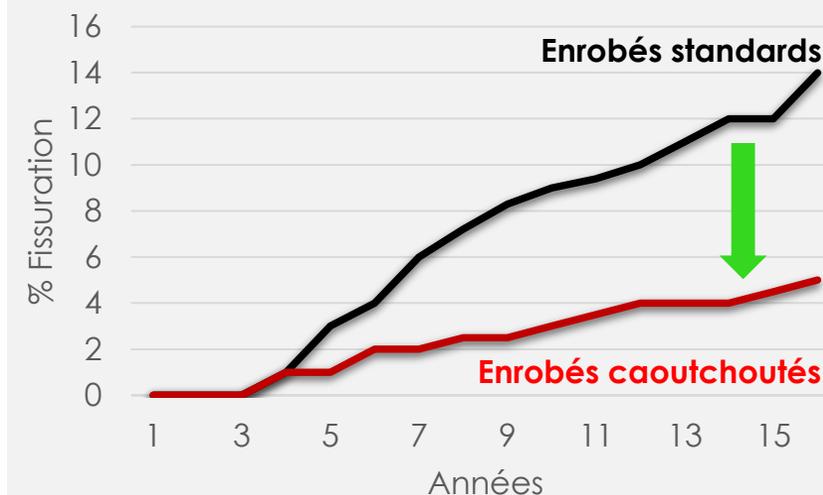
Les particules renforcent les enrobés et agissent sur la propagation des fissures



Fissure

SBS Enrobé sur base BmP

DP-GTR Enrobé contenant de la poudre de pneu



Des mesures in-situ (Arizona) ont démontré une meilleure résistance à la fatigue

Effet des poudres de pneus

Les poudres de pneus modifient les enrobés par un mécanisme différent de celui des polymères

Les poudres produisent une synergie entre:

- la modification partielle du liant (vs modification avec un polymère)
- un effet d' «agrégat élastique» modifiant les propriétés de l'enrobé

Modification
du
bitume



Renforcement
de
l'enrobé



Arrêt
des
fissures



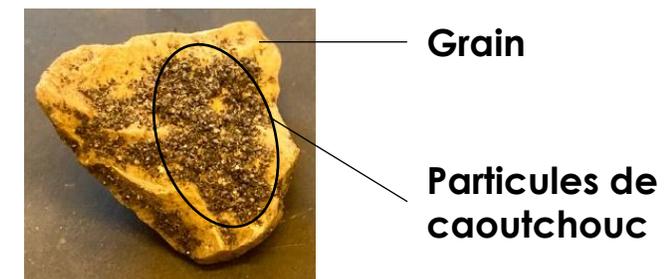
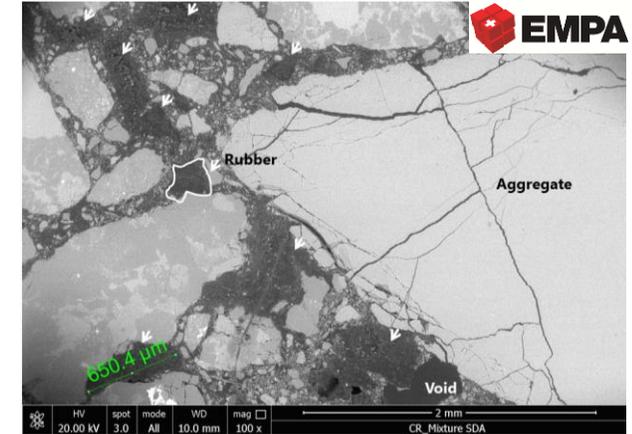
Caractérisation des enrobés caoutchoutés

Les poudre de pneus modifient les enrobés par un mécanisme différent de celui des polymères, des tests différents doivent être considérés

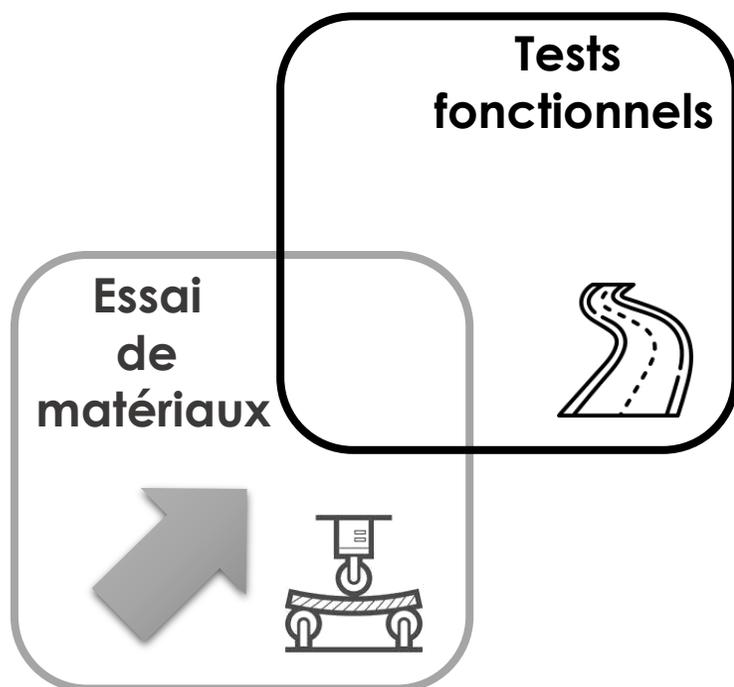
L'extraction des liants caoutchoutés est plus complexe que celle des liants conventionnels. Une partie du liant et des poudres peut bloquer les filtres ou rester avec les agrégats



Les tests sur les liants récupérés ne donnent pas toujours des informations fiables sur la qualité des enrobés caoutchoutés

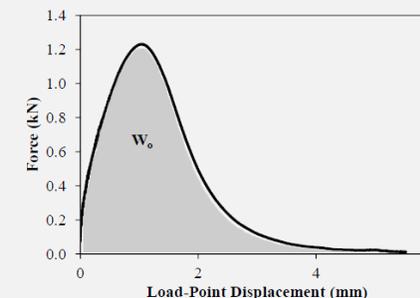
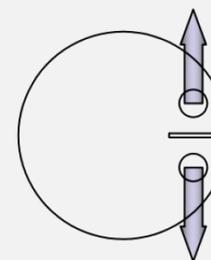


Caractérisation & performances



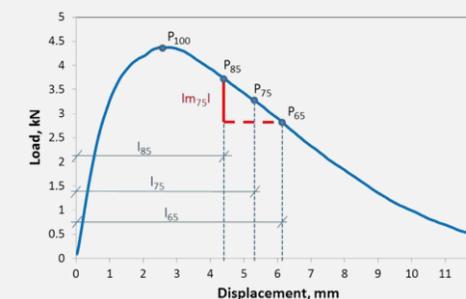
- ✓ Sensible à la composition
- ✓ Bonne répétabilité
- ✓ Bonne corrélation

Disk-Shaped Compact Tension (DC-T)



Nsengiyumva, 2015

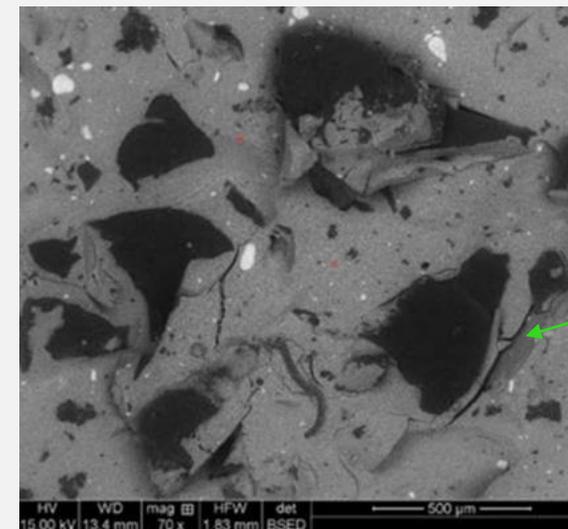
Indirect Tensile Asphalt Cracking Test (Ideal-CT)



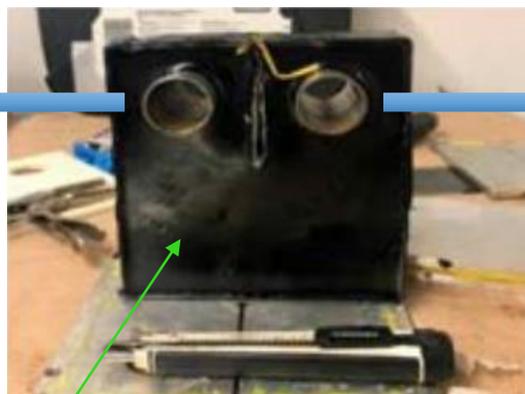
Dong et al. *J. Mater. Civ. Eng.*, 2019

Mécanisme de fracture

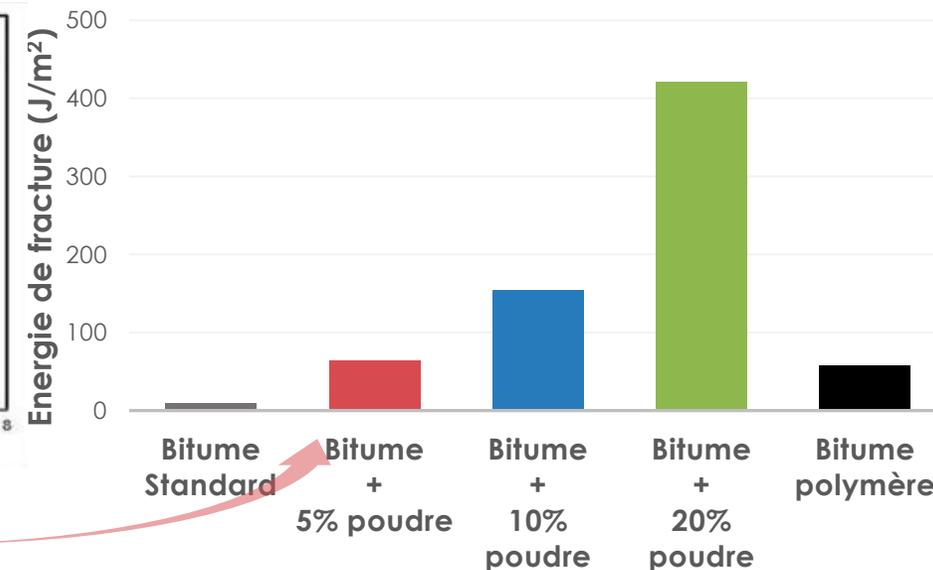
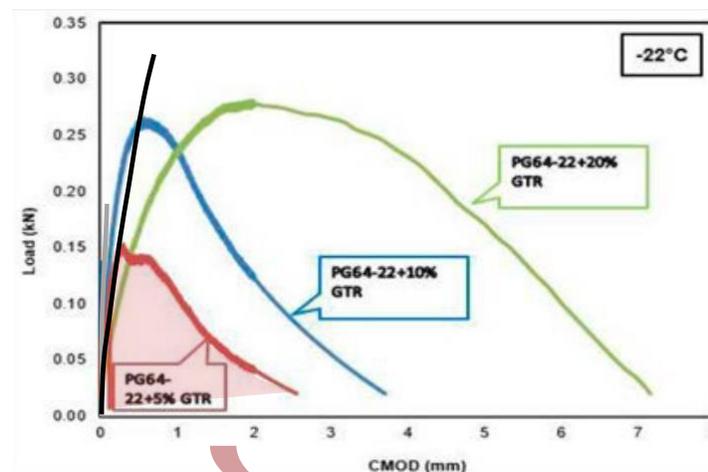
Les bitumes polymères présentent une «rupture fragile» mais les bitumes modifiés par des poudres de pneus présentent une «rupture ductile»



microfissure



100% liant

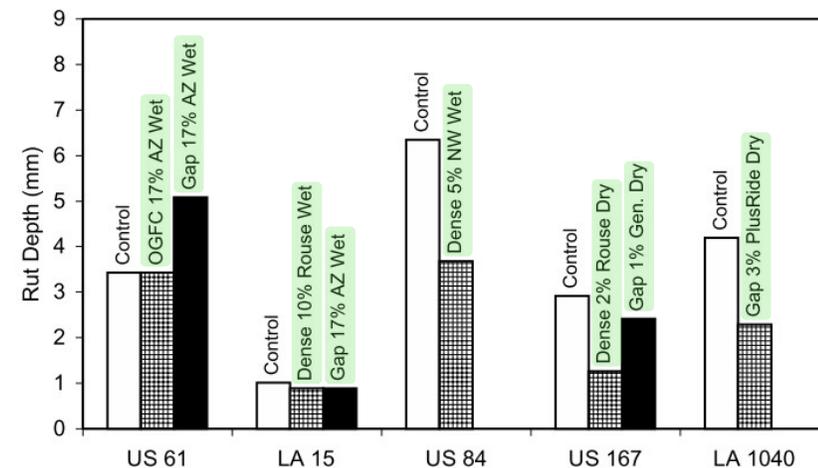


Résistance à l'ornièrage

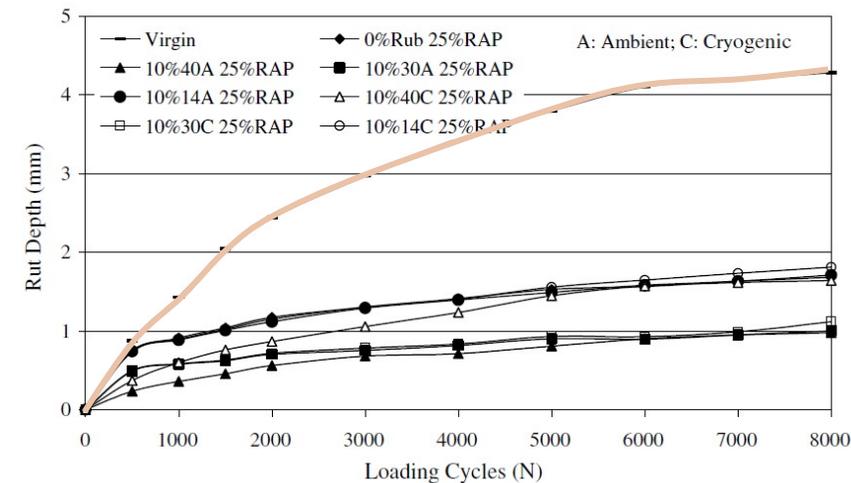
La modification du liant avec de la poudre de pneus augmente la viscosité, rend le mélange plus rigide et plus résistant à l'ornièrage

Les routes contenant des poudres ont démontré une profondeur d'ornière similaire ou inférieure à celle des sections de contrôle après 5 à 7 ans de service (Louisiane)

Des essais de laboratoire indiquent que des enrobés combinant poudres de pneus et du fraisât possèdent une bonne résistance à l'ornièrage



Huang, 2002



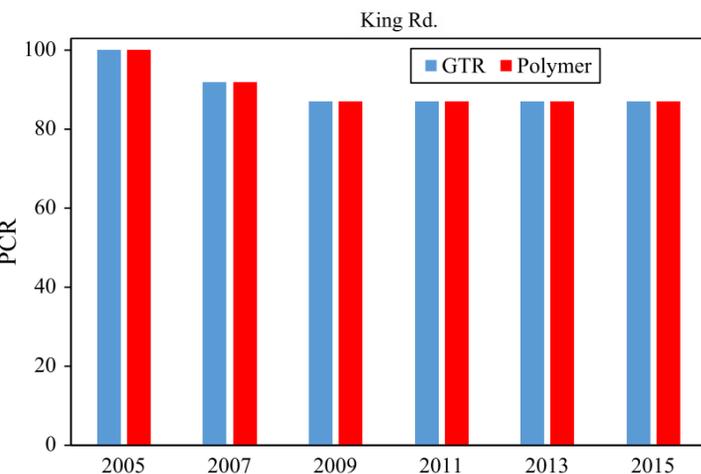
Xiao et al. Constr. Build. Mater, 2009

Performances *in situ* - exemple

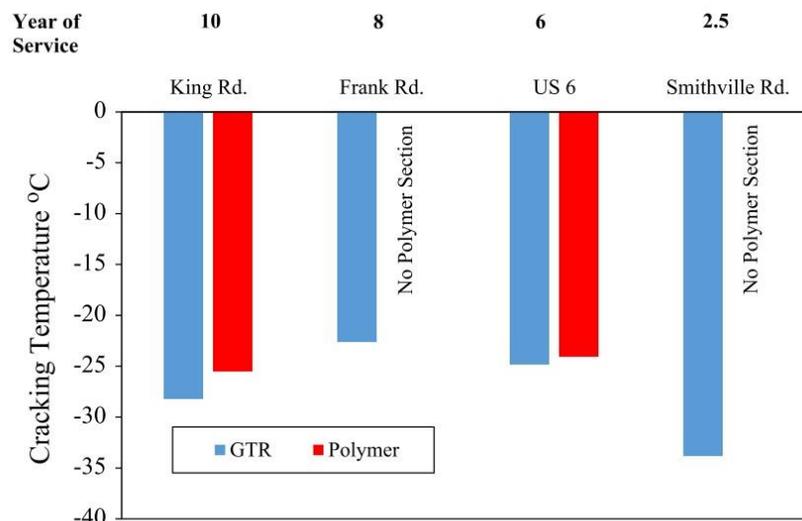
Description des planches d'essai

Chantier	Construction	Charge de trafic moyenne (vhc/j)		Température moyenne	
		Totale	Camions	basse	haute
King Rd.	2005	7120	142	-6	31
Frank Rd.	2007	19698	1241	-7	29
US 6	2009	6039	1420	-8	29
Smithville Rd.	2012	8372	167	-7	29

Propriétés



"PCR"= pavement condition rating



Suivi comparatif de chaussées contenant des poudres de pneu (méthode humide) ou des bitumes polymères pendant 10 ans (Ohio)

Les enrobés caoutchoutés («GTR») ont des performances similaires à celles des mélanges bitumineux modifiés avec des polymères («Polymer»)

Propriétés phoniques

De nombreuses études indiquent que l'ajout de poudre de pneus recyclés a un impact sur la qualité phonique des enrobés

Des mesures in-situ suggèrent que les enrobés caoutchoutés conservent plus longtemps leurs propriétés phoniques

Des différences de performances acoustiques entre enrobés par méthode sèche et méthode humide ont parfois été rapportées

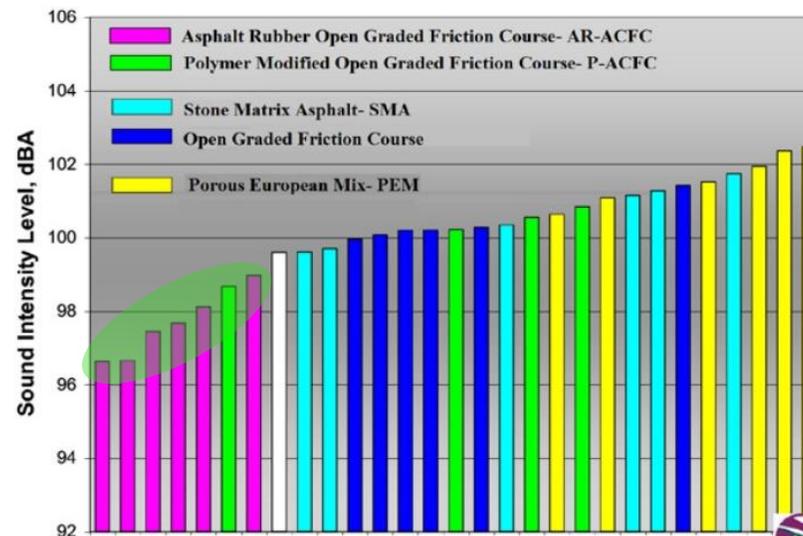
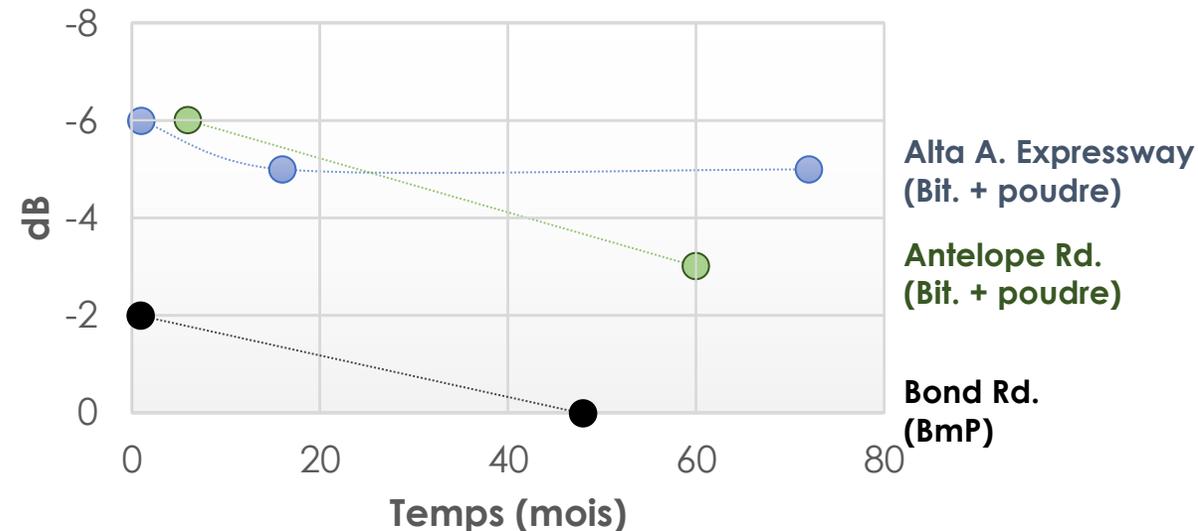


Figure 30. Comparison of tire-pavement noise of asphalt pavement courses (ATRC, 1996)

March. Oklahoma DEQ, 2016



Adapté de Rath et al. State of knowledge on rubber modified asphalt, 2021

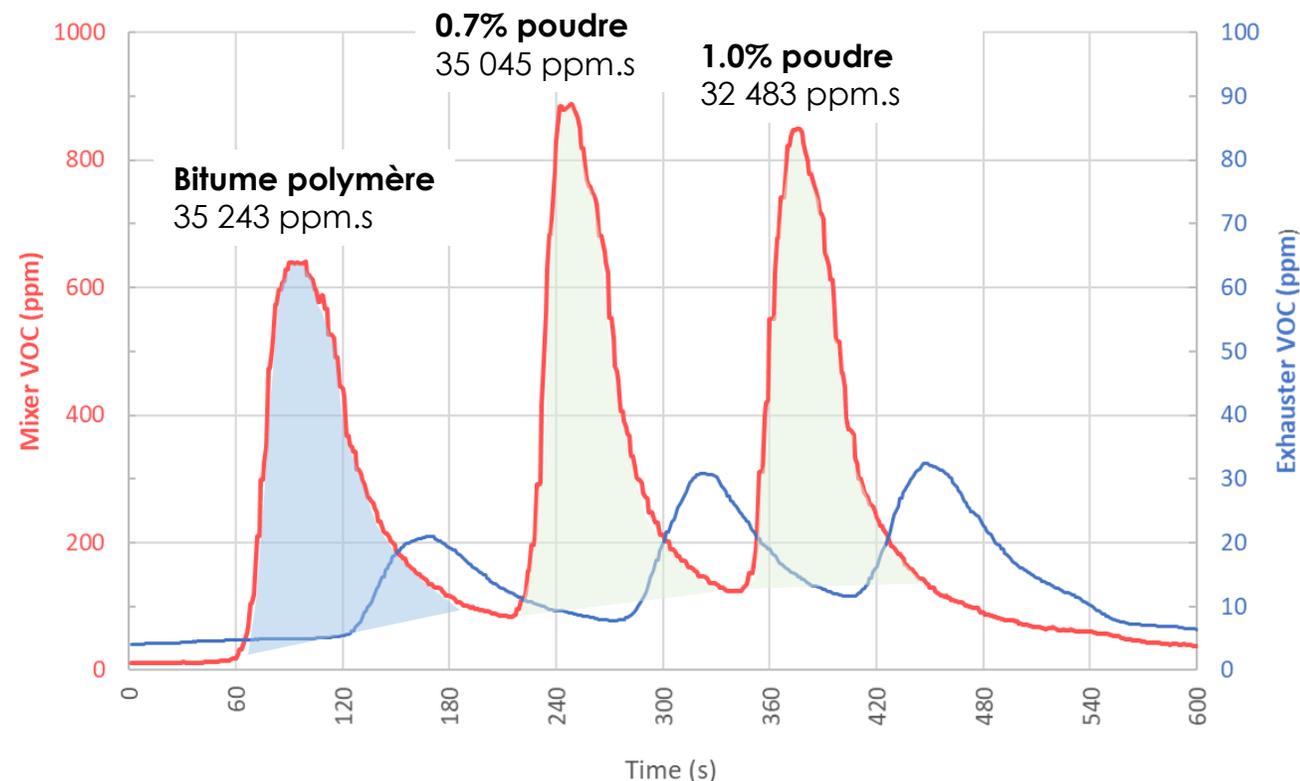
Impact environnemental à la fabrication

Dans les conditions de fabrication standard l'ajout de poudre de pneus n'a pas d'effet sur les émissions de composés organiques volatiles

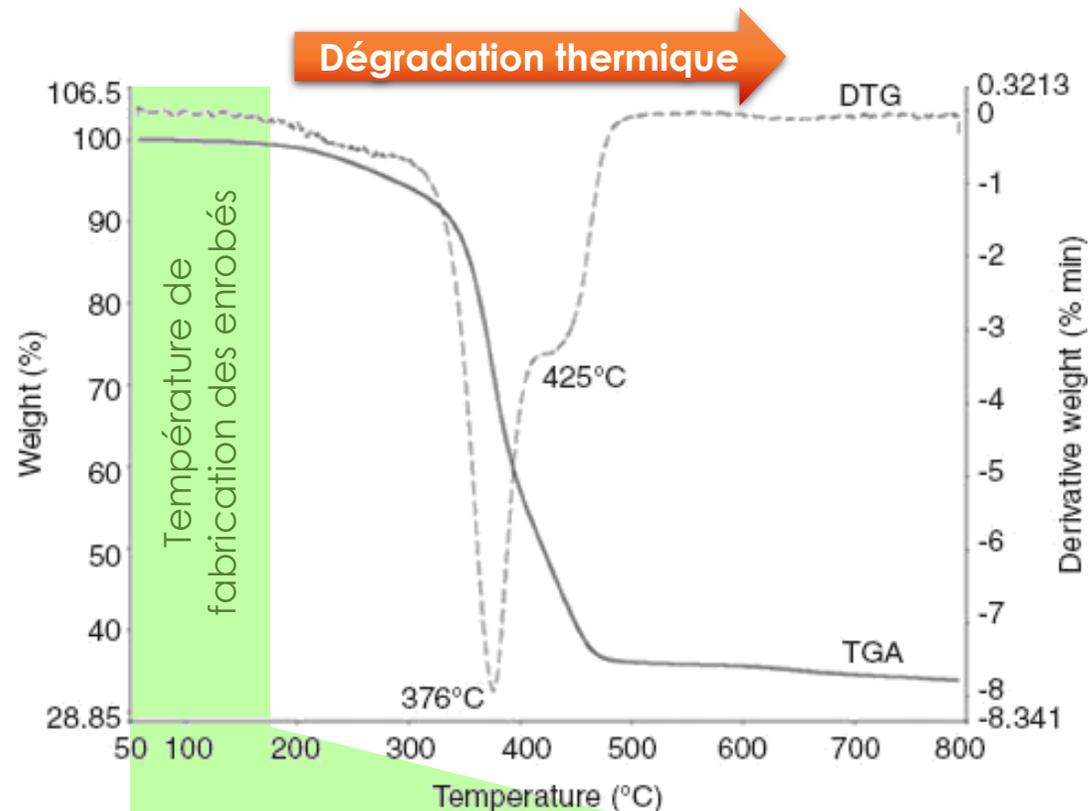
En centrale, les émissions ne sont pas significativement différentes de celles d'une production conventionnelle (Stout *et al.* 2013)

Sur chantier, la composition des fumées est comparable à celui des matériaux de pavage standards (Zanetti *et al.* 2013; Xu *et al.* 2018).

Les émissions dépendent principalement de la quantité, du type et de la composition du bitume (Zanetti *et al.* 2014)



Analyse thermogravimétrique



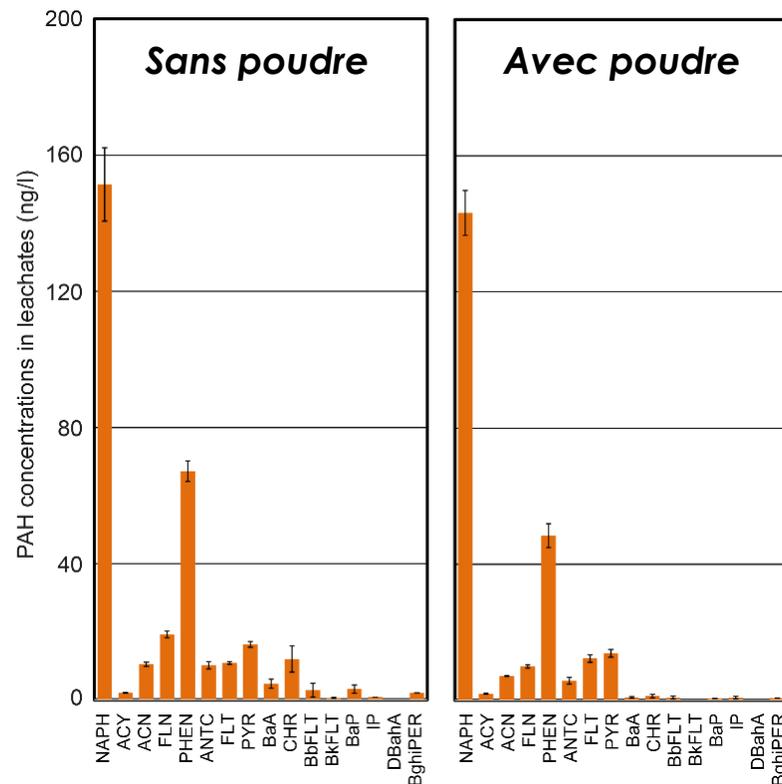
Les poudres de pneus commencent à se dégrader à des températures supérieures à 200°C

Les enrobés se fabriquent et se posent à des températures inférieures à celle de la dégradation des poudre de pneus

Lixivation des enrobés

Des analyses de lixiviats ont démontré des taux d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) similaires aux enrobés conventionnels

Les enrobés contenant des poudres de pneus peuvent être re-incorporés dans un nouvel enrobé sans aucune restriction selon la norme "Österreichische Recycling-Baustoffverordnung"



Bueno et al. Mater. Struct. 2020



Eluatuntersuchung		Ergebnis	Grenzwerte	
Parameter	Dim.		Qualitätsklasse B-B	Qualitätsklasse U-B
pH-Wert	---	8,8	7,5	12,5
Leitfähigkeit	mS/m	8,7	150	150
Chrom-gesamt als Cr	mg/kg TM	< 0,1	1,00	1,0
Kupfer als Cu	mg/kg TM	< 0,2	2,0	2,0
Nickel als Ni	mg/kg TM	< 0,1		0,60
Ammonium als N	mg/kg TM	< 0,8	8,0	8,0
Chlorid als Cl	mg/kg TM	16	1000	1000
Nitrit als N	mg/kg TM	0,04	2,0	2,0
Sulfat als SO4	mg/kg TM	24	6000	6000
TOC als C	mg/kg TM	25		200

Recyclabilité

La question de la recyclabilité des enrobés contenant des poudres de pneus a été étudiée dès le début de cette technologie

Des résultats de laboratoire ont démontré que du fraisât d'enrobés caoutchoutés peut être réutilisé sans péjorer les performances mécaniques

(Rodríguez-Fernández *et al.*, 2020)

En pratique, les fraisâts d'enrobés caoutchoutés sont ré-utilisés de la même manière que les fraisâts conventionnels

1. Report No. FHWA/TX-95/1333-1F	2. Government Accession No.	3. Recipient's Catalog No.
4. Title and Subtitle RECYCLING CRUMB RUBBER MODIFIED ASPHALT PAVEMENTS		5. Report Date May 1995 Revised: July 1995
		6. Performing Organization Code
7. Author(s) William W. Crockford, Danai Makunike, Richard R. Davison, Tom Scullion, and Travis C. Billiter		8. Performing Organization Report No. Research Report 1333-1F
9. Performing Organization Name and Address Texas Transportation Institute The Texas A&M University System College Station, Texas 77843-3135		10. Work Unit No. (TRAIS)
		11. Contract or Grant No. Study No. 0-1333
12. Sponsoring Agency Name and Address Texas Department of Transportation Research and Technology Transfer Office P. O. Box 5080 Austin, Texas 78763-5080		13. Type of Report and Period Covered Final: September 1992 - August 1994
		14. Sponsoring Agency Code
15. Supplementary Notes Research performed in cooperation with the Texas Department of Transportation and the U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. Research Study Title: Recycling Second Generation Asphalt Rubber Pavements		
16. Abstract There has been concern that the legislative mandate to use waste rubber in paving applications will result in a severe environmental problem when it becomes necessary to recycle these pavements. If successful recycling is possible, the long term performance of these pavements becomes a concern. The results of this study indicate that it is possible to recycle this material. However, some techniques for conventional asphalt mixture design, material processing, and construction must be modified to ensure this success, and some techniques may not be appropriate when waste rubber is present in the mixture to be recycled. Many of the results presented in this study are based on experiences in Tyler and San Antonio, Texas, where two of the earliest crumb rubber recycling operations in the United States have transpired.		

Utilisation en Europe

Espagne

>20 années d'utilisations
 Volumes variables, jusqu'à 200km/ans posés

Italie

~600km de routes posées en 2020 (+ 63% vs 2019)

Hongrie

Investissement en 2019, capacité 3 000 tons de pneus

Portugal

~ 13 000 tons de pneus valorisés en 2020

Allemagne

Utilisation dans le sud du pays

Suède

Utilisation ponctuelle

UK

Début d'utilisation



Pays utilisant la méthode humide



Pays utilisant la méthode sèche

Utilisation dans les autres régions

Chine

Première expérience dans les années 1980, regain d'intérêt depuis les années 2000

Moyen orient

Usage fréquent en Arabie Saoudite
Début d'utilisation dans d'autres pays (Koweït)

Afrique du sud

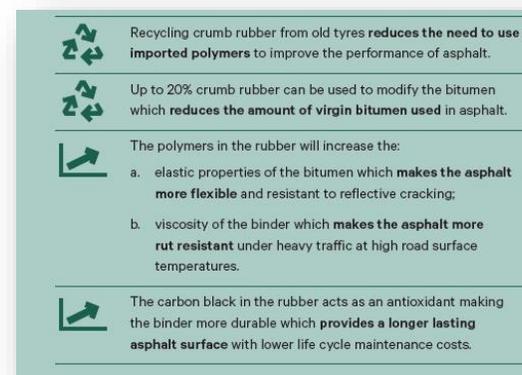
Utilisation ponctuelle

Australie

>1 million pneus de voitures sont recyclés chaque année dans les enrobés routiers



Provinces chinoise utilisant des poudres de pneus dans les enrobés



 Recycling crumb rubber from old tyres **reduces the need to use imported polymers** to improve the performance of asphalt.

 Up to 20% crumb rubber can be used to modify the bitumen which **reduces the amount of virgin bitumen used** in asphalt.

 The polymers in the rubber will increase the:

- elastic properties of the bitumen which **makes the asphalt more flexible** and resistant to reflective cracking;
- viscosity of the binder which **makes the asphalt more rut resistant** under heavy traffic at high road surface temperatures.

 The carbon black in the rubber acts as an antioxidant making the binder more durable which **provides a longer lasting asphalt surface** with lower life cycle maintenance costs.



"Rubber from old tyres improves asphalt performance" (www.colas.com.au)

Utilisation en Suisse

Quelques expériences au début des années 2000 avec la méthode humide

Depuis 2021, avec la méthode sèche (technologie ECR), différents types d'enrobés ont été posés:

- AC MR 8
- AC 8
- AC 11
- AC TDS 16
- SDA 4 - 12
- SDA 8 - 12

Un suivi des sections récentes à été mis en place



Aspect normatif

USA

De nombreux états possèdent des spécifications pour la voie humide (CA, FL, AZ). L'état de Géorgie possède des spécifications pour la méthode humide et la méthode sèche

Australie

Documentation décrivant les exigences relatives aux liants modifiés par des poudre de pneus

Chine

Recommandations techniques et spécifications locales et nationales

Espagne

Spécifications des poudres et recommandations techniques

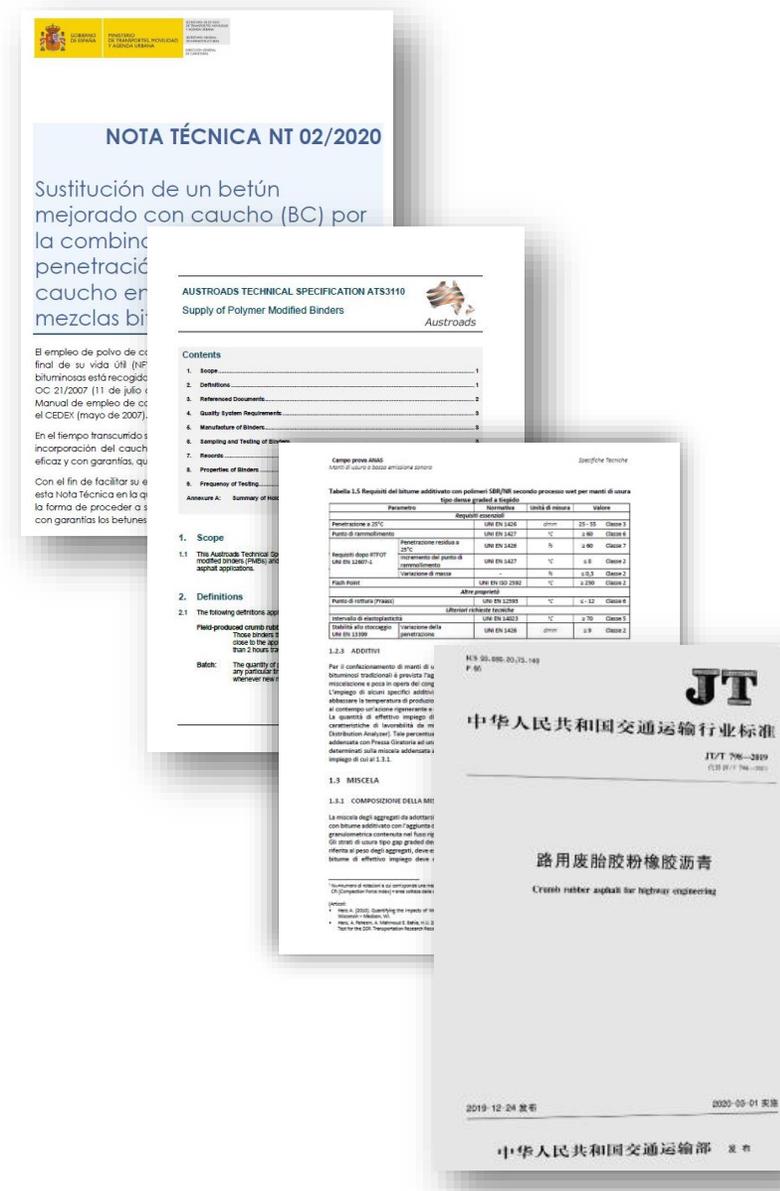
Italie

Recommandations techniques et spécifications

Suisse

SNR 640 436 - section D Matériaux

"les additifs sont autorisés pour autant que l'aptitude de l'enrobé qui les contient soit démontrée"



Bilan et perspectives



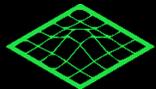
L'utilisation de poudrette de caoutchouc dans les enrobés permet l'amélioration des performances et de la durabilité des enrobés



Cette technologie est une technologie mature dont l'usage est bien documenté



Le recyclage des pneus en fin de vie dans les enrobés routiers est une option écologique et économique



Les poudres de pneus sont des matériaux indigènes offrant de bonnes perspectives d'usage en Suisse





Merci pour votre attention

