

# Les enseignements de l'ANR ImprovMURE

Simon POUGET  
Routes de France  
Eiffage



# En bref

## ⇒ Projet ANR :

- Montant global : 2 318 k€
- Dont subvention : 801 k€
- Durée du projet : 48 mois
- Démarrage : 1er mars 2014



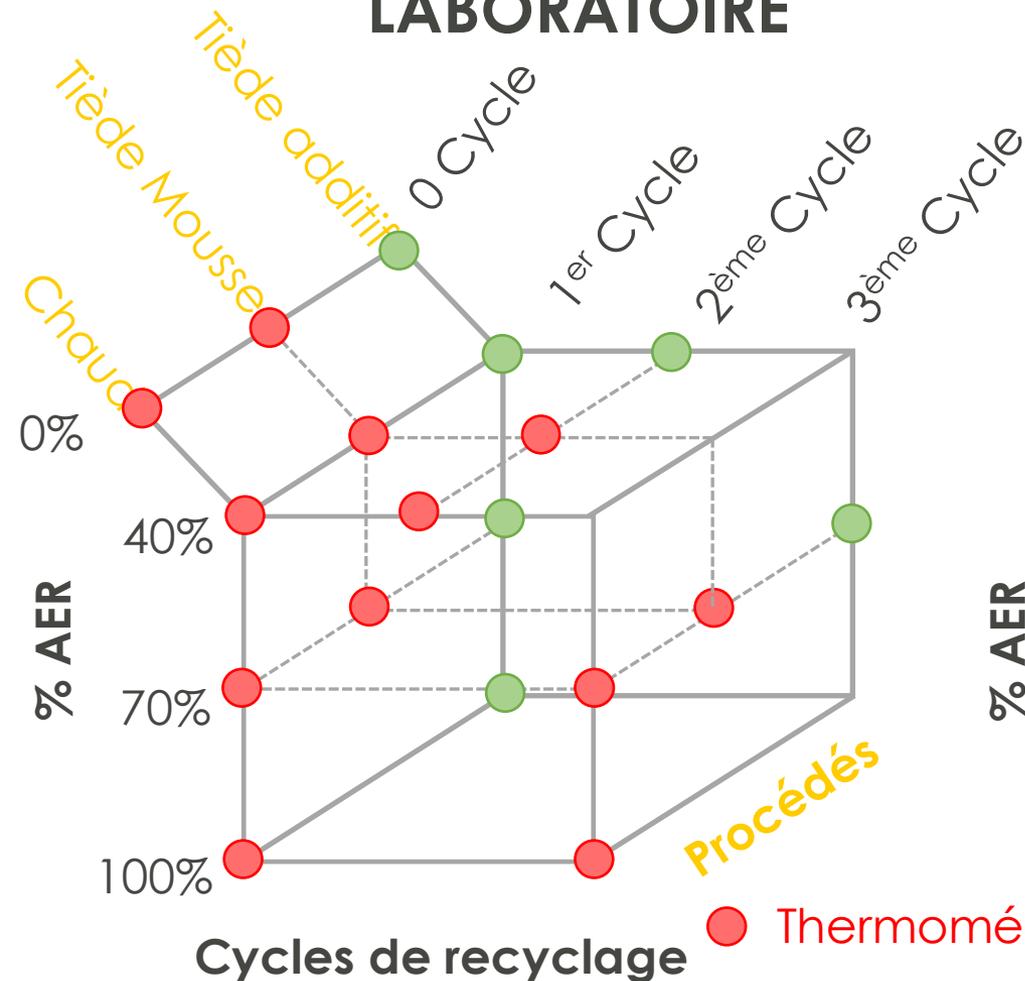
## ⇒ Coordination: EIFFAGE

## ⇒ Partenariat: ENTPE, IFSTTAR, IREX, USIRF, CEREMA

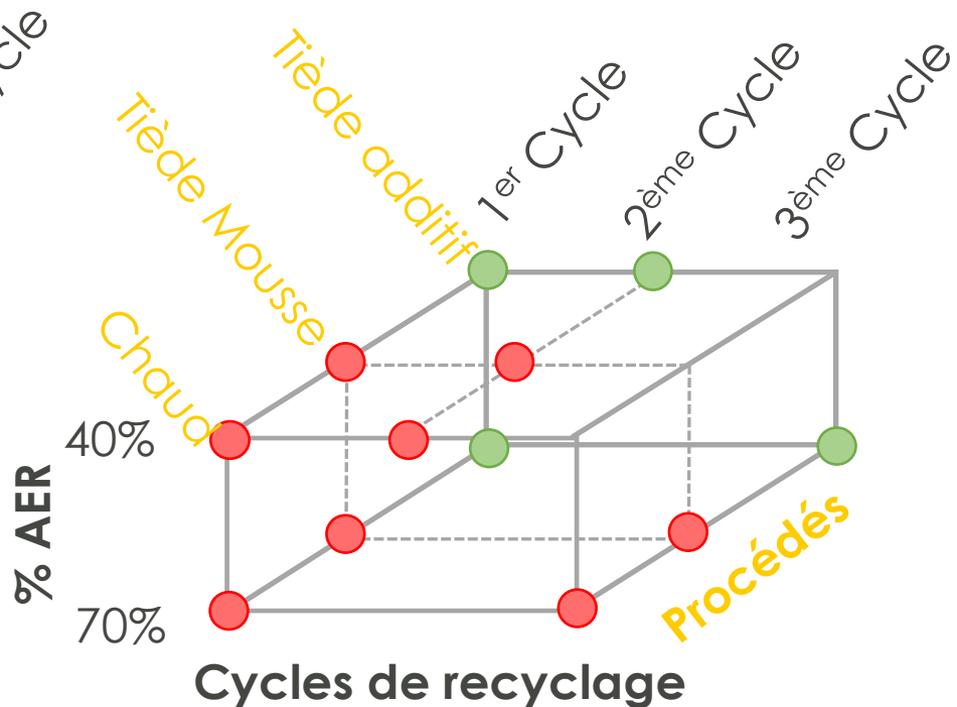


# Matériaux

## LABORATOIRE



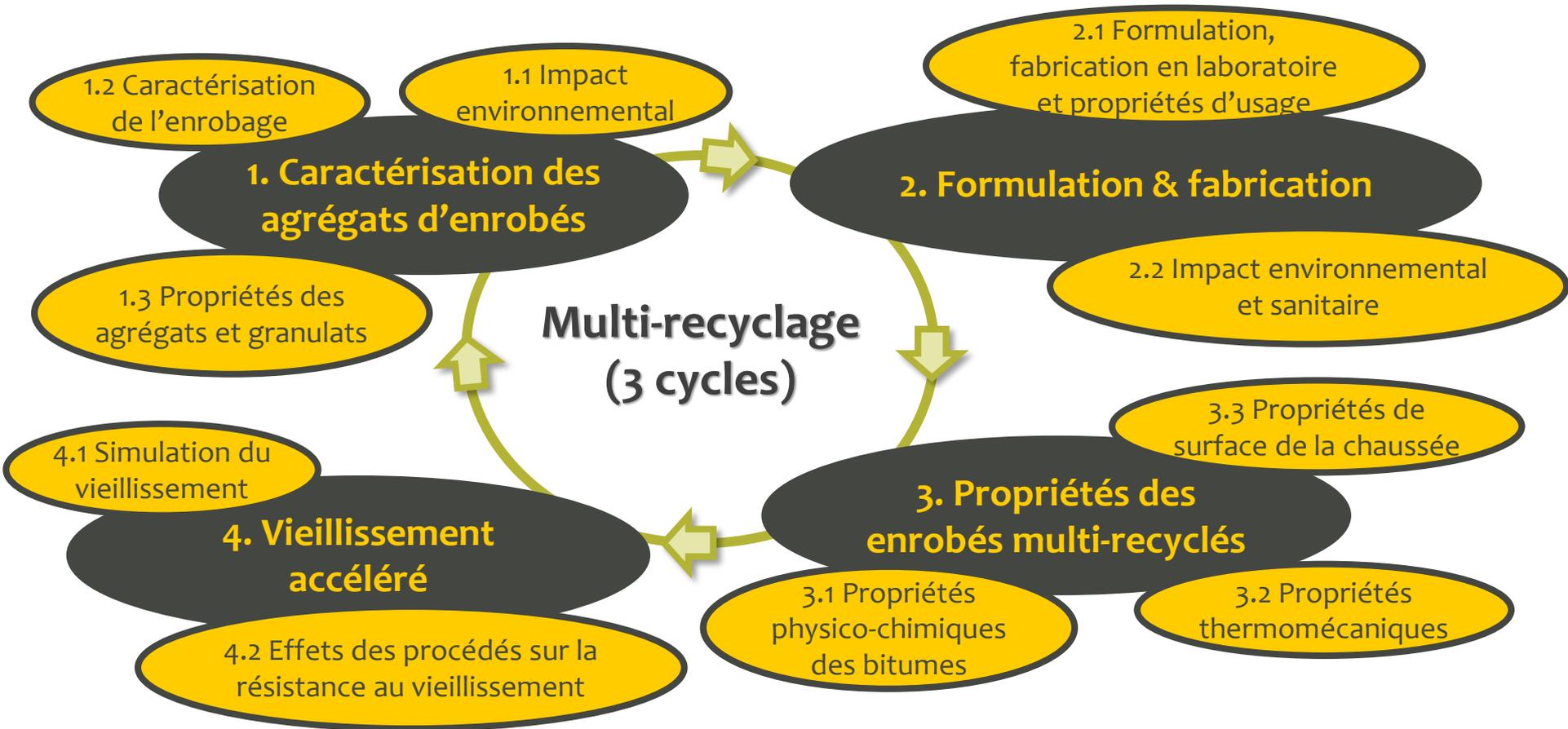
## CHANTIERS PN MURE



- Thermomécanique + Chimique Environnemental
- Chimique Environnemental uniquement

# Programme expérimental

## 2 thèses financées



# Tâche 1 – Caractérisation des AE

## Impact environnemental

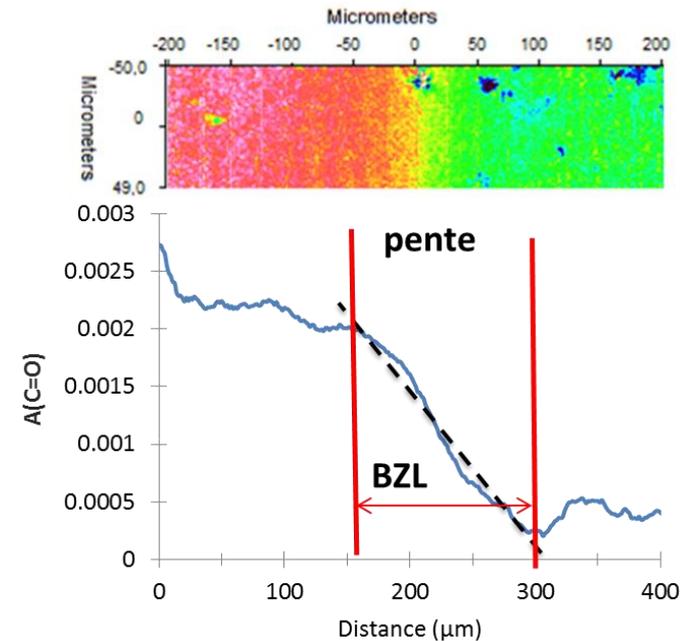
Paramètres	Valeurs limites	AE0	Valeurs limites	Eluats (AE0)
COT (g(C)/kg MS)	30*/60**	60	500 mg/kg*	26,6 mg/kg
BTEX (mg/kg MS)	6*/**	<0,07	-	<10 µg/kg
PCB (mg/kg MS)	1*/**	<0,07	7 µg/kg***	<LQ
HAP (mg/kg MS)	50*/**	18	300 µg/kg ***	<LQ

Concentrations largement inférieures aux valeurs seuils relatives aux installations de stockage de déchets inertes répertoriées dans l'arrêté du 12 Décembre 2014.

# Tâche 1 – Caractérisation des AE

## Caractérisation de l'enrobage

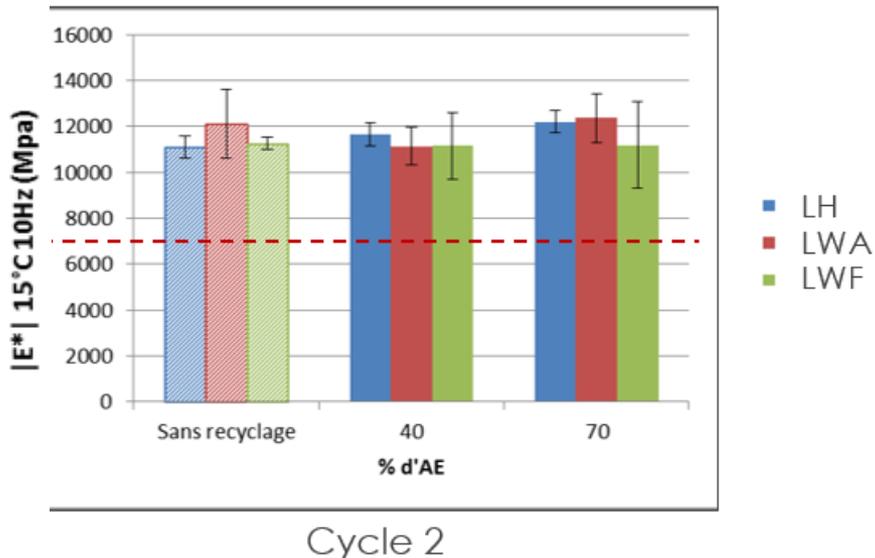
- ➔ Développement de méthodologies en laboratoire pour l'étude du mouillage et la remobilisation
- ➔ Quantification des phénomènes et Introduction d'indicateurs et de critères
- ➔ Identification des facteurs influents



# Tâche 2 – Formulation & Fabrication

## Propriétés d'usage

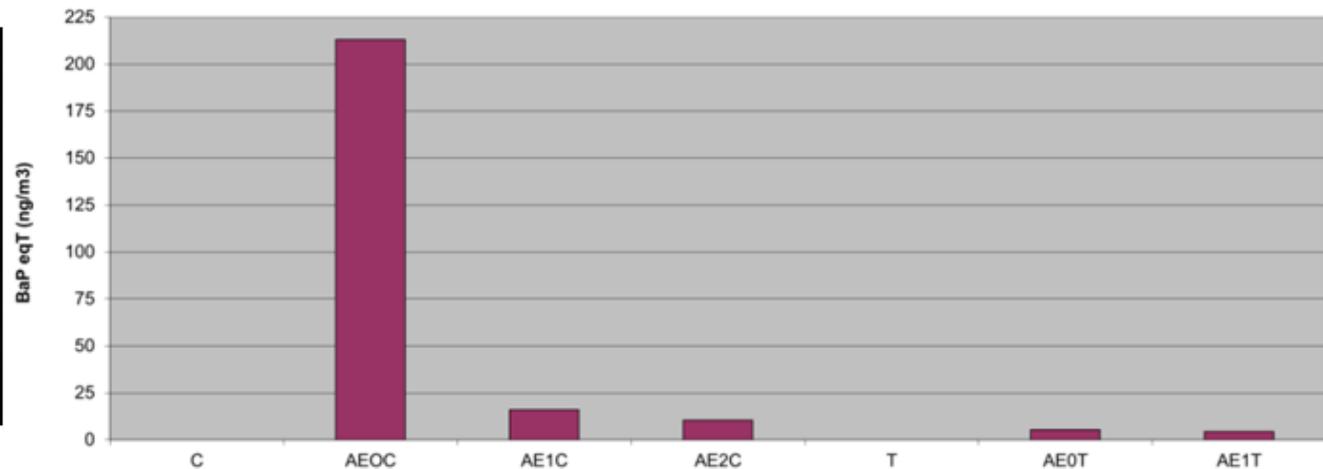
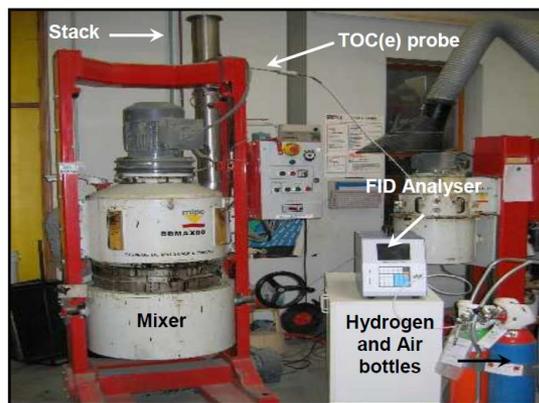
- ⇒ Spécificité des enrobés tièdes multi-recyclés
  - Sensibilité à la mise en œuvre, particulièrement à 70% d'AE
  - Légère diminution de la sensibilité à l'eau
- ⇒ Le module de rigidité dépend essentiellement du mélange liant des agrégats/liant d'apport (loi des mélanges)



# Tâche 2 – Formulation & Fabrication

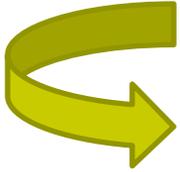
## Impact environnemental

- Les mélanges à chaud génèrent dans nos conditions de laboratoire plus de composés que les mélanges à tiède
- La concentration en COT et en HAP diminue avec l'augmentation du cycle de recyclage
- L'émission de composés organiques provient de l'AE utilisé,
- Les HAP émis sont plus lourds pour les mélanges à chaud contrairement aux enrobés fabriqués à tiède



# Tâche 3 – Propriétés des enrobés

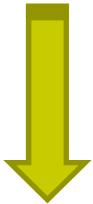
## Propriétés physico-chimiques des bitumes



### TENEUR EN CARBONYLES

#### Hypothèse :

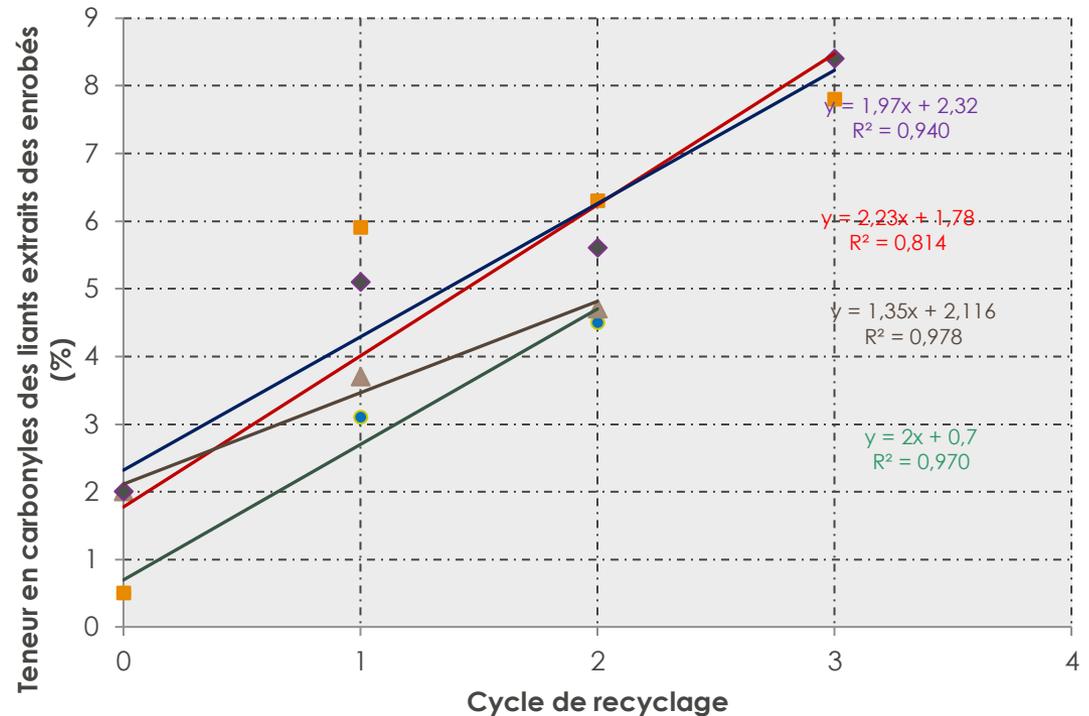
AE0 avec une teneur en carbonyles de 9% = état moyen de fin de vie d'un enrobé



✓ pour un ajout de 70% d'agrégats à chaud ou tiède, limite atteinte après 3 cycles de recyclage

✓ pour un ajout de 40% d'agrégats à chaud ou tiède, limite atteinte après 4 cycles de recyclage

(tout paramètre de fabrication et formulation équivalent)



● 40% d'agrégats à chaud

■ 70% d'agrégats à chaud

▲ 40% d'agrégats à tiède

◆ 70% d'agrégats à tiède

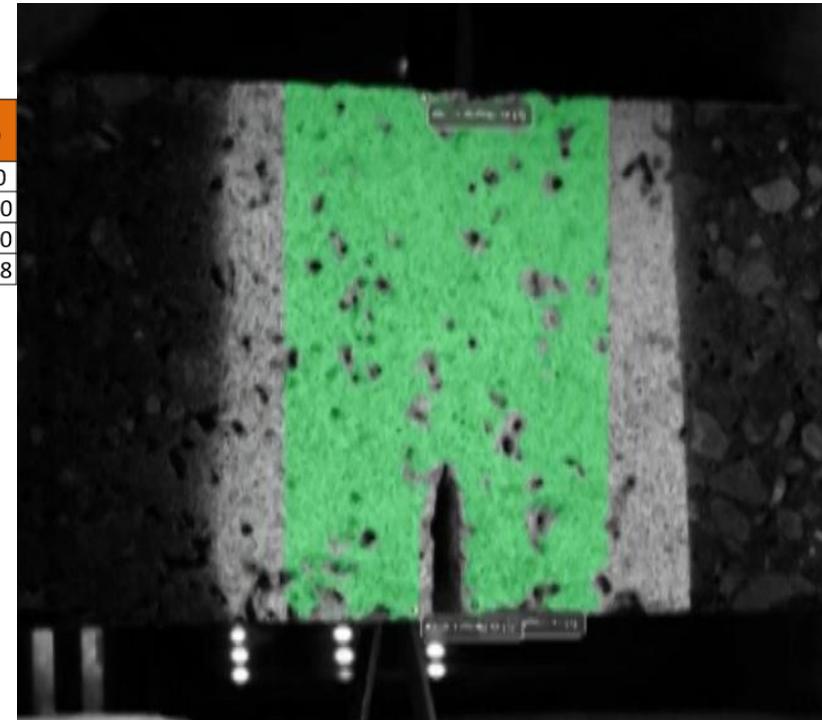
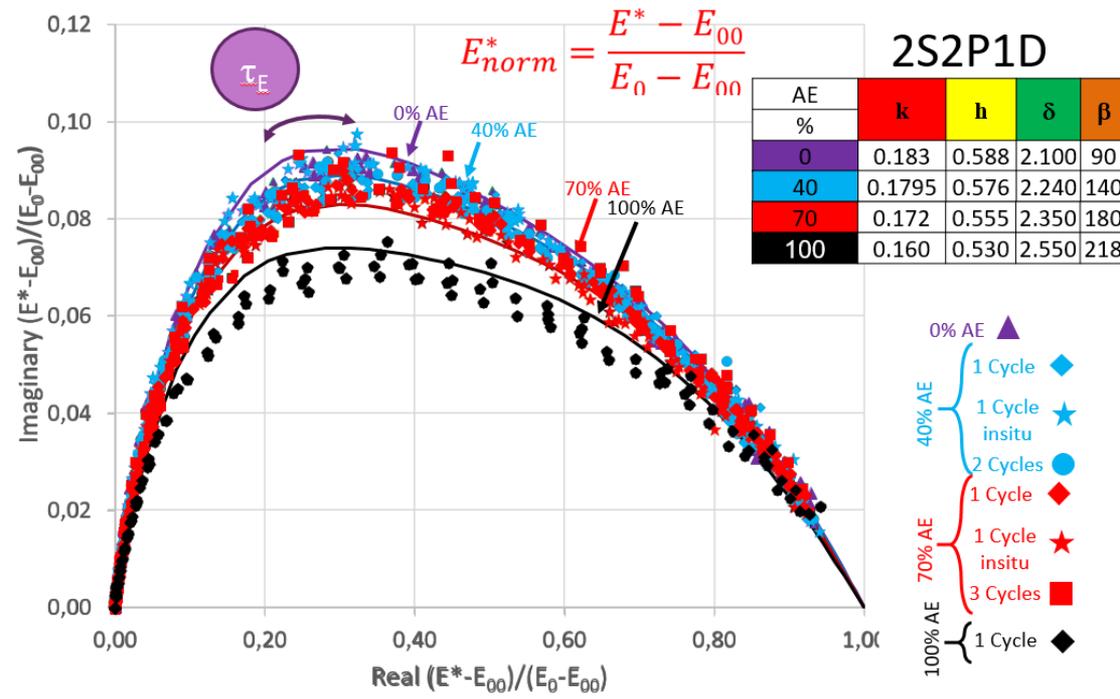
# Tâche 3 – Propriétés des enrobés

## Propriétés thermomécaniques

➔ Les enrobés:

- contenant des AE,
- ou fabriqués selon un procédé tiède / chaud,
- ou multi-recyclés

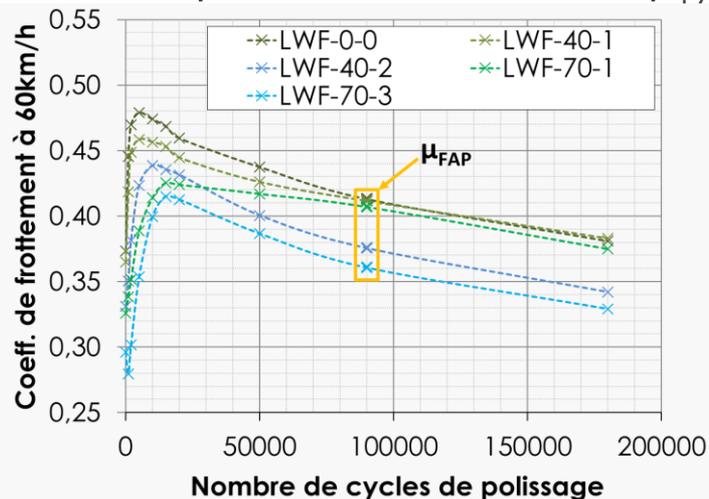
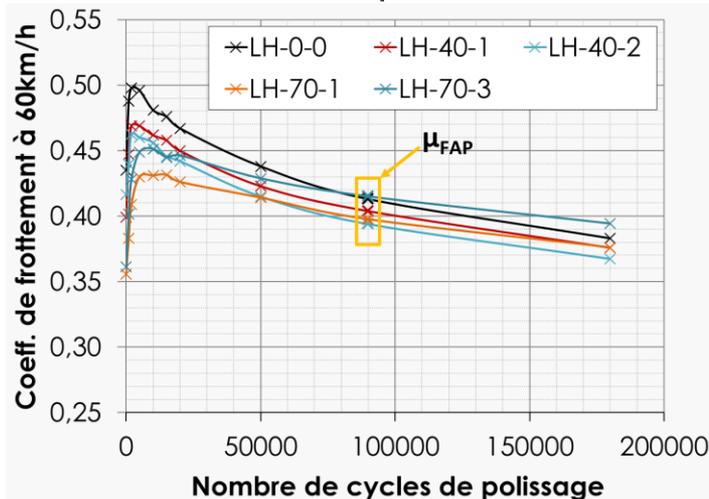
ont des propriétés similaires (ou améliorées), à condition de maîtriser la formulation (bitume d'apport).



# Tâche 3 – Propriétés des enrobés

## Propriétés de surface

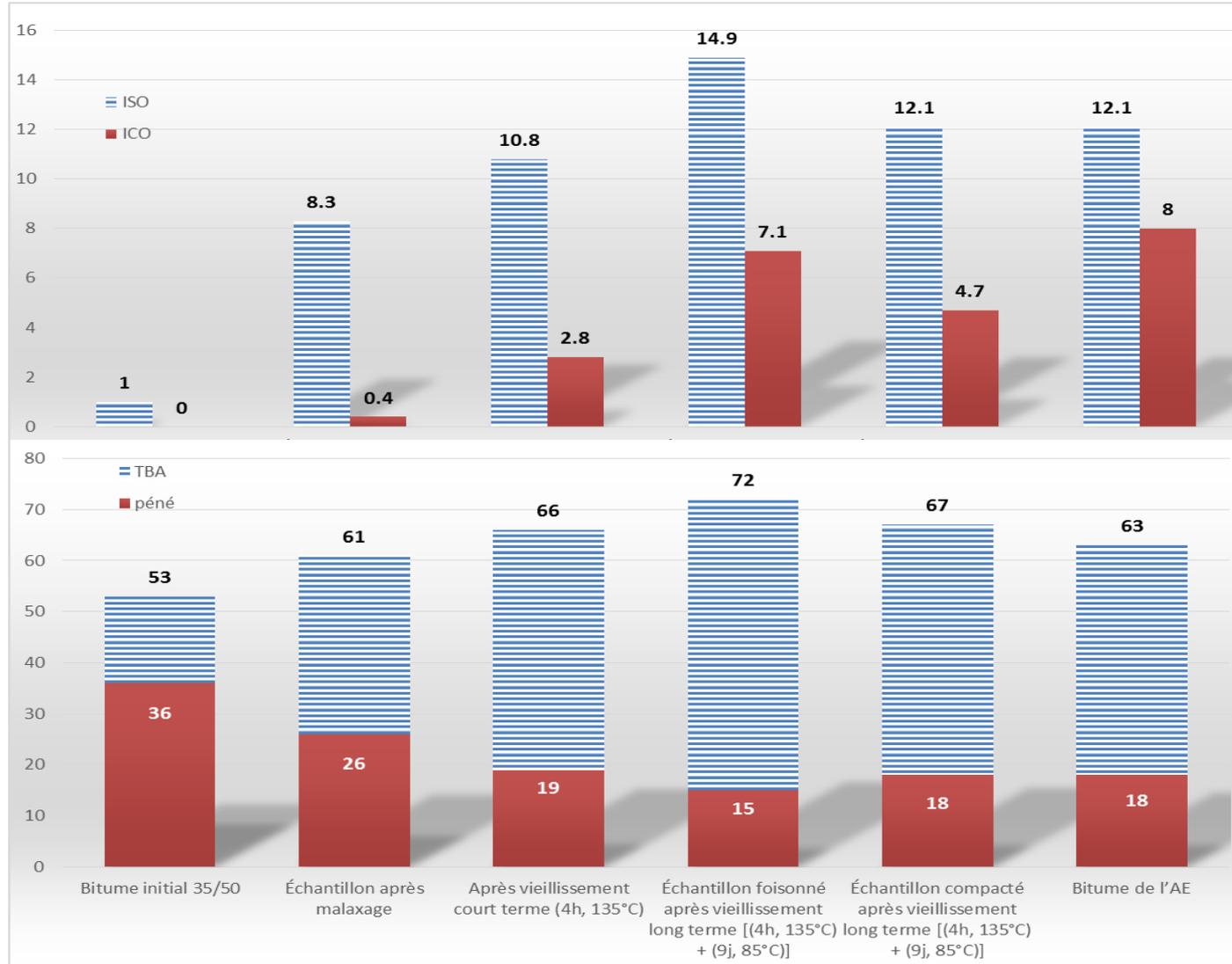
- La phase initiale de décapage du liant est influencée par le taux d'AE ainsi que le procédé de fabrication.
- Recyclage: Influence faible du % AE et du procédé de fab. sur le  $\mu_{FAP}$  et la vitesse de polissage de l'enrobé
- Multi-recyclage:
  - Mêmes performances observées pour les enrobés à chaud
  - Pour les enrobés tièdes à la mousse, une adaptation de la formule pourrait être nécessaire pour maintenir le  $\mu_{FAP}$



# Tâche 4 – Vieillessement accéléré

## Simulation du vieillissement

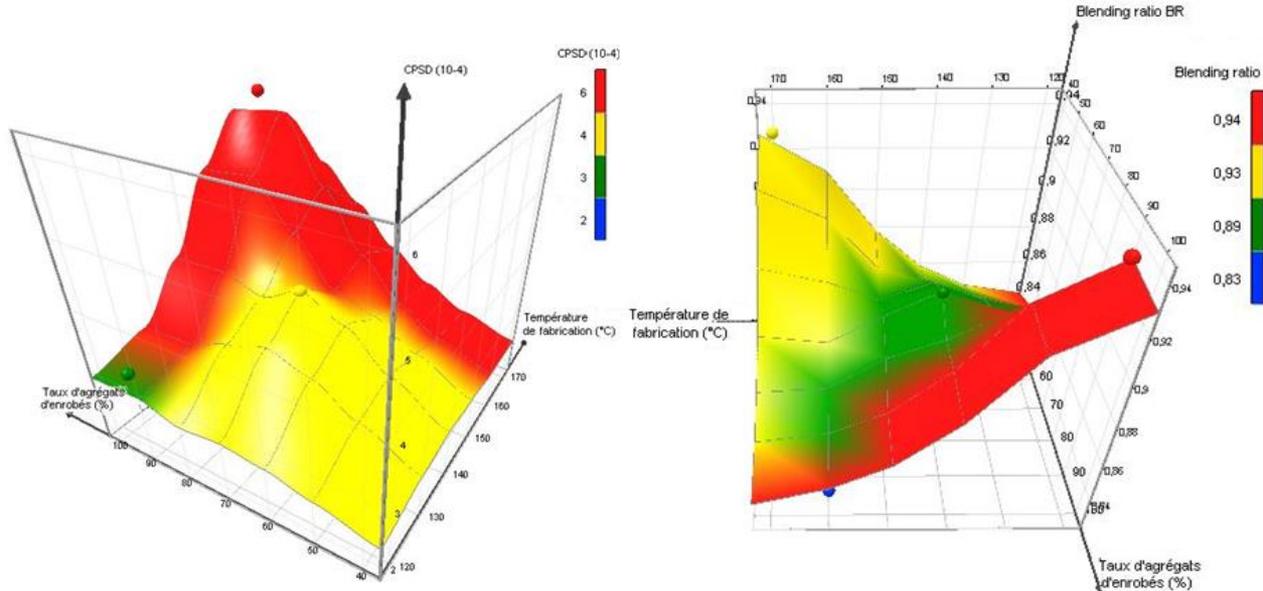
Vieillessement  
RILEM  
=  
Bonne  
simulation du  
vieillessement  
oxydatif des  
bitumes



# Tâche 4 – Vieillissement accéléré

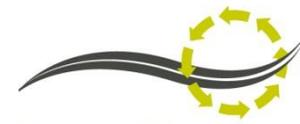
## Effet des procédés

- ➔ Microscopie infrarouge en mode d'imagerie ATR : technique d'avenir : permet d'évaluer sur le matériau l'homogénéité du mélange de bitumes au sein d'enrobés incorporant des AE
- ➔ Mécanismes complexes de mélange des bitumes



# Conclusions

- ⇒ Approche unique multidisciplinaire et multi- échelle
- ⇒ Mise au point d'outils méthodologiques pour la caractérisation des enrobés multi-recyclés
- ⇒ Pas de limite observée pour le recyclage et le multi-recyclage à des taux de 40%
- ⇒ Pour des taux de 70%, étude spécifique nécessaire



## **BILAN ImprovMURE**

- 2 thèses
- 17 livrables
- ≈ 20 articles scientifiques
- 3 journées thématiques
- 1 site internet ([www.improvmure.fr](http://www.improvmure.fr))
- 1 journée de restitution

# **MERCI DE VOTRE ATTENTION**

# 17 livrables rédigés

<b>Date de livraison</b>	<b>N°</b>	<b>Titre</b>	<b>Nature</b> (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	<b>Partenaires</b> ( <u>souligner le responsable</u> )
12/05/15	1	Accord de consortium	Contrat	Tous ( <u>EIFFAGE</u> )
10/08/15	2	Rapport intermédiaire à 18 mois	Rapport	Tous ( <u>EIFFAGE</u> )
29/09/16	3	Rapport intermédiaire à 30 mois	Rapport	Tous ( <u>EIFFAGE</u> )
28/09/18	4	Caractérisation des agrégats d'enrobés	Rapport	<u>CEREMA</u>
28/09/18	5	Méthode de caractérisation de l'enrobage de matériaux routiers bitumineux	Rapport	<u>IFSTTAR</u> , EIFFAGE, CEREMA
28/09/18	6	Propriétés des agrégats et granulats (Rhéologiques et Géométriques)	Rapport	<u>IFSTTAR</u>
28/09/18	7	Formulation, fabrication en laboratoire et propriétés d'usage des enrobés tièdes multi-recyclés	Rapport	<u>IFSTTAR</u>

28/09/18	8	Analyse comparative des émissions selon les procédés de fabrication	Rapport	<u>IFSTTAR</u>
28/09/18	9	Analyse de l'évolution des propriétés physico-chimiques des liants en fonction du multi-recyclage et du procédé de fabrication	Rapport	<u>CEREMA</u> , <u>EIFFAGE</u> , <u>IFSTTAR</u>
28/09/18	10	Propriétés thermomécaniques des enrobés multi-recyclés	Rapport	<u>ENTPE</u>
28/09/18	11	Propriétés d'adhérence des enrobés multi-recyclés	Rapport	<u>EIFFAGE</u>
28/09/18	12	Simulation du vieillissement en laboratoire	Rapport	<u>IFSTTAR</u>
28/09/18	13	Analyse comparative du vieillissement des liants en fonction des procédés de fabrication	Rapport	<u>EIFFAGE</u> , <u>IFSTTAR</u> , <u>CEREMA</u>
28/09/18	14	Actions de valorisation	Rapport	<u>IREX</u>
28/09/18	15	Rapport final	Rapport	Tous ( <u>EIFFAGE</u> )
28/09/18	16	Thèse Sabine Vassaux	Rapport	<u>IFSTTAR</u> , <u>EIFFAGE</u> , <u>CEREMA</u>
28/09/18	17	Thèse Alvaro Pedraza	Rapport	<u>ENTPE</u> , <u>EIFFAGE</u>

# Impact du projet

		<b>Publications multipartenaires</b>	<b>Publications monopartenaires</b>
<b>International</b>	<b>Revue à comité de lecture</b>	4	1
	<b>Ouvrages ou chapitres d'ouvrage</b>	1 (en projet)	
	<b>Communications (conférence)</b>	5	
<b>France</b>	<b>Revue à comité de lecture</b>		
	<b>Ouvrages ou chapitres d'ouvrage</b>		
	<b>Communications (conférence)</b>		
<b>Actions de diffusion</b>	<b>Articles vulgarisation</b>	3	
	<b>Conférences vulgarisation</b>	3	2
	<b>Autres</b>	2 thèses	

## ⇒ Autres valorisations

- 1 site internet ([www.improvmure.fr](http://www.improvmure.fr))
- 3 journées d'information et d'échange
- 1 journée de restitution

# Liste publications [1/3]

## ⇒ ARTICLE DE REVUE SCIENTIFIQUE (5)

- Carret J.C., Pedraza A., Di Benedetto H., Sauzeat C. "Comparison of the 3-Dim linear viscoelastic behavior of asphalt mixes determined with tension-compression and dynamic tests", *Construction & Building Materials*, Vol.174, pp.529-536, [doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.156]
- Vassaux S., Gaudefroy V., Boulangé L., Soro L.J., Pévère A., Michelet A., Barragan-Montero V., Mouillet V. "Study of remobilization phenomena at reclaimed asphalt binder/virgin binder interphases for recycled asphalt mixtures using novel microscopic methodologies", *Construction & Building Materials*, Vol.165 doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.01.055
- Vassaux S., Gaudefroy V., Boulangé L., Pévère A., Mouillet V., Barragan-Monterod V. "Towards a better understanding of wetting regimes at the interface asphalt/aggregate during warm-mix process of asphalt mixtures", *Construction & Building Materials*, Vol.133, pp.182-195, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.015
- Pedraza A., Di Benedetto H., Sauzéat S., Pouget S. "3D linear viscoelastic behaviour of bituminous mixtures containing high content of multi-recycled RAP", *Road Materials & Pavement Design*, (July 2018)
- Pedraza A., Sauzéat C., Di Benedetto H., Pouget S. "Fracture properties of multi-recycled asphalt mixes from four-point bending test using Digital Image Correlation and back calculation" *ASTM Journal of Testing and Evaluation*, (submitted - July 2018)

## ⇒ ARTICLE DE REVUE SPECIALISEE (3)

- Vassaux S., Gaudefroy V., Boulangé L., Pévère A., Mouillet V. « Projet IMPROVMURE: Chemomap : Une nouvelle méthode sans solvant, pour qualifier in situ l'homogénéité du liant total au sein d'enrobés à base de recyclés », *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement*, soumis le 01/09/2018
- Di Benedetto H., Olard F., Pedraza A., Pouget S., Sauzéat C. « Comportement viscoélastique linéaire des enrobés multi-recyclés » *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement* n° 949, pp. 35-39
- Boulangé L., Gaudefroy V., Mouillet V., Pévère A., Vassaux S. « Identification des paramètres affectant l'enrobage des granulats », *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement* n° 949, pp. 40-45

# Liste publications [2/3]

## ⇒ COMMUNICATION INTERNATIONALE (5)

- Vassaux S., Gaudefroy V., Boulangé L., Pévère A., Mouillet V. "Chemomap imaging infrared microscopy to in situ assess oxidative ageing in compacted asphalt mixtures", RILEM 252-CMB-Symposium, Braunschweig, September 2018
- Pedraza A., Di Benedetto H., Sauzéat C. and Pouget S. "3D linear viscoelastic behaviour of bituminous mixtures with high content of reclaimed asphalt pavement recycled 3 times", ISAP 4th Int. Symp. On Asphalt Pavements & Environment, Tokyo, Japan, November 2017
- Pedraza A., Di Benedetto H., Sauzéat C., Pouget S. "Linear viscoelastic behaviour of bituminous mixtures with multi-recycled asphalt pavement", 10th Int. Conf. Bearing Capacity of Roads Railways and Airfields (BCRRA), 8 p. Athens, Greece, June 2017
- Vassaux S., Gaudefroy V., Soro L.J., Pévère A., Mouillet V., Boulangé L., Barragan-Montero V. "Evaluation of bituminous binders miscibility for warm-mix recycling techniques", 10th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (BCRRA 2017), Athens, Greece, June 2017
- Vassaux S., Gaudefroy V., Boulangé L., Pévère A., Mouillet V. "Identification of factors impacting the mixing quality of asphalt mixtures incorporating reclaimed asphalts", Young Research Seminar, Berlin, May 2017

## ⇒ COMMUNICATION NATIONALE (4)

- Vassaux S., Gaudefroy V., Boulangé L., Pévère A., Mouillet V. « Identification des facteurs impactant le mouillage à l'interface liant/granat pour les applications routières », Matériaux 2018, Strasbourg, 11/2018
- Vassaux S., Gaudefroy V., Boulangé L., Pévère A., Mouillet V. « Mouillabilité et miscibilité des bitumes : application au multi-recyclage » Journées Techniques Routes 2017, Nantes, France, janvier 2017
- Pedraza A., Di Benedetto H., Sauzéat C., Pouget S. « Propriétés Thermomécaniques d'enrobés multi-recyclés » Journées Techniques Routes 2017, Nantes, France, janvier 2017
- Pouget, S. « IMPROVMURE : Introduction & état d'avancement », Journées Techniques Routes 2017, Nantes, France, janvier 2017

# Liste publications [3/3]

## ⇒ POSTER (1)

- Vassaux S. « Recyclage des matériaux routiers », Colloque Spice, Avril 2017

## ⇒ THESE (2)

- Pedraza A. « Propriétés thermomécaniques d'enrobés multi-recyclés », Université de Lyon / ENTPE, soutenue le 6 mars 2018
- Vassaux S. « Mouillabilité et miscibilité des bitumes : application au recyclage », Université de Montpellier, soutenue le 27 novembre 2017

## ⇒ CO-ORGANISATION DE 3 JOURNEES D'ECHANGES

- « Sensibilité à l'eau et adhésivité » le 12 octobre 2016 à Lyon
- « Apports des régénérants dans le recyclage des enrobés » le 15 mars 2017 à Paris
- « Recyclage à fort taux: du laboratoire au chantier » le 21 novembre 2017 à Lyon



# Validation procédure vieillissement



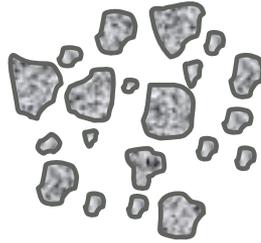
Bitume  
extrait

AE0

de centrale SLE

AE1 et AE2

Procédure RILEM



Agrégat d'enrobé	Pour la fabrication d'enrobé	Pénétrabilité Bitume extrait (1/10mm)	TBA (°C)	ICO (%)
AE <sub>0</sub>	LH40-1; LWF40-1; LH70-1; LWF70-1; LH100-1	10	76.2	8.4
AE <sub>1</sub>	LH40-2	14	72.8	5.9
AE <sub>1</sub>	LWF40-2	15	70.0	6.8
AE <sub>2</sub>	LH70-3	18	67.8	10.2
AE <sub>2</sub>	LWF70-3	18	57.9	9.1



# Validation loi des mélanges

$$\log(\text{pen})_{mix} = a \log(\text{pen})_a + b \log(\text{pen})_b$$

Bitume d'apport

Bitume récupéré AE

$a$ : % (masse) du bitume d'apport

$b$ : % (masse) du bitume des AE

