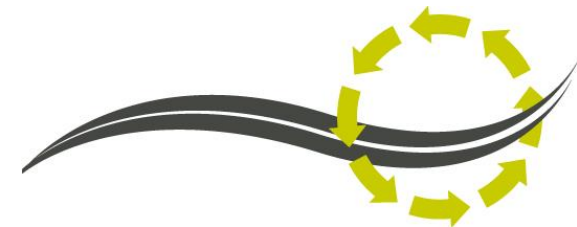


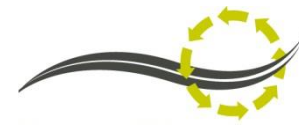
# Propriétés des agrégats et granulats (géométriques et physiques) et Simulation du vieillissement en laboratoire

Thomas Gabet, Ifsttar – Mast - MIT



PN MURE - ANR IMPROVMURE

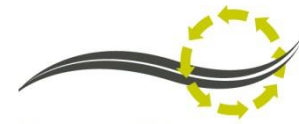
# 1.3 Propriétés des agrégats et granulats



## Travaux effectués en sous-tâche 1.3

- ⇒ Rappel des objectifs de la tâche 1.3
- ⇒ Travaux sur l'homogénéisation des Agrégats d'enrobé
- ⇒ Travaux sur la caractérisation rapide du liant des agrégats
- ⇒ Étude de l'influence du recyclage sur les granulats
  
- ⇒ Conclusions sur ces travaux

# 1.3 Propriétés des agrégats et granulats



## Rappel des objectifs de la tâche 1.3

### ⇒ Caractérisation des agrégats enrobés

Les agrégats d'enrobés doivent être caractérisés le mieux possible pour être utilisés à des taux de recyclage les plus importants possibles... La connaissance de l'homogénéité du stock ...est un critère majeur pour définir le taux de recyclage. Nous souhaitons d'abord montrer dans cette étude que la séparation d'un stock d'AE en classes granulaires est un moyen extrêmement efficace pour augmenter l'homogénéité de ce stock... L'objectif est ici de montrer qu'une séparation en classes granulaires permet d'atteindre les niveaux d'homogénéité permettant de recycler aux niveaux requis dans ce projet (40, 70 et 100%). Sur un stock extrêmement hétérogène non séparé en classe granulaires, il sera intéressant de montrer le gain d'homogénéité obtenu par séparation en classes granulaires.

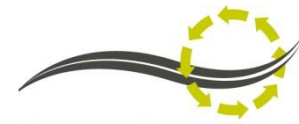
La détermination du niveau d'homogénéité d'un stock passe par un échantillonnage représentatif de ce stock. Pour être représentatif, l'échantillonnage doit généralement être assez conséquent. De ce fait, l'extraction et l'analyse des bitumes prennent beaucoup de temps.

Dans le cadre de ce projet, nous nous concentrerons sur deux façon d'accélérer la caractérisation des agrégats d'enrobés. La première étude va consister à valider des tests particuliers de pénétration sur bitumes, nécessitant 5 fois moins de bitume qu'initialement. Si ces tests sont représentatifs des tests standards, le procédé d'extraction nécessitera beaucoup moins de bitume, et donc nettement moins de temps d'extraction.

### ⇒ Caractérisation des granulats

Au cours d'une opération de recyclage, le fraisage des anciens enrobés et de re-malaxage des agrégats obtenus induisent une évolution des propriétés des granulats constitutifs du matériau... l'IFSTTAR suivra l'évolution des caractéristiques géométriques des granulats présents dans les agrégats obtenus au cours des cycles successifs de recyclage à travers des essais classiques de laboratoire (courbe granulométrique, aplatissement, angularité) et une méthode originale de caractérisation par analyse d'image 2D de coupes d'éprouvettes d'enrobés. La pertinence d'une méthode de caractérisation rapide par vidéogranulométrie, disponible à l'IFSTTAR, sera également évaluée.

# 1.3 Propriétés des agrégats et granulats



## L'homogénéisation des Agrégats d'enrobés

⇒ Solution testée:

la séparation des agrégats d'enrobés en classes granulaires.  
(comme pour les granulats classiques)

⇒ Expérimentation:

des échantillons d'AE0 ont été recomposés (AERC) après séparation en classes granulaires.

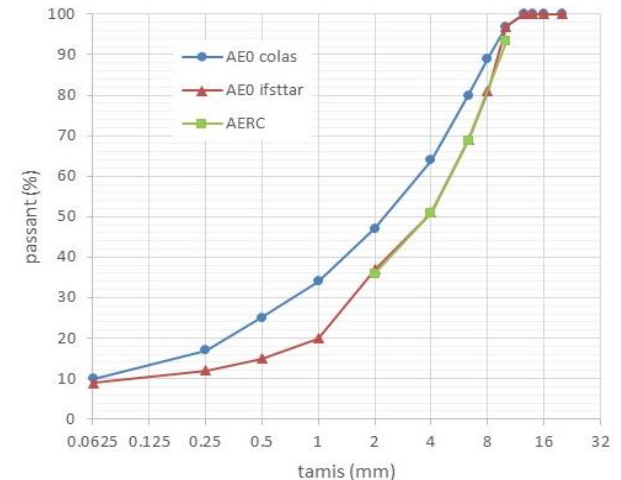
La teneur en liant et la granulométrie de ces échantillons a été mesurée  
comparaison aux valeurs des normes.

⇒ Matériaux testés

AER 0/10 SLE du projet IMPROVMURE, référencés ici AE0.

Un stock de 14 tonnes d'AE0 a été homogénéisé puis séparé en sacs de 25 kg, pour être distribué aux membres du consortium.

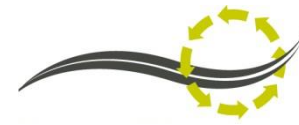
200 kg d'AE0, soit 8 sacs, ont été criblés et séparés en 4 classes granulaires :  
0\*/2, (0)2/4, (0)4/8, et (0)8/12.



\*Le (0) indique que l'AE contient des particules agglomérées de mastic et donc que la granulométrie désenrobée contient des fines. Les 200 kg ont donné respectivement 32 kg de 0/2, 36 kg de 2/4, 72 kg de 4/8 et 60 kg de 8/10. Les proportions de l'AE recomposé sont données à titre indicatif dans le tableau.

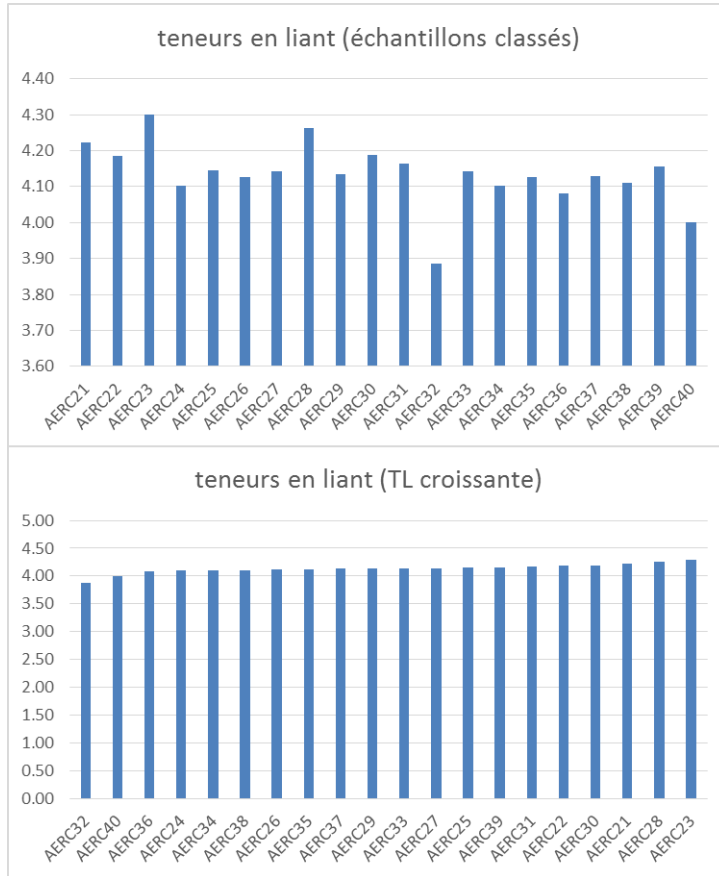
classe	prop.
AE 0/2	16
AE (0)2/4	18
AE (0)4/8	36
AE (0)8/10	30
AERC	100

# 1.3 Propriétés des agrégats et granulats



## L'homogénéisation des Agrégats d'enrobés

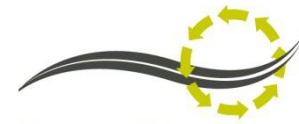
⇒ Résultats: Teneur en liant



T.L.	Moyenne	écart type	écart type relatif	Maxi -Mini
RAP	4.84	0.22	0.045	0.67
RAP recompo	5.45	0.13	0.024	0.47
AERC	4.14	0.087	0.021	0.41
EAPIC 2010			0.015	
fabrication labo			0.02	

*Comparaison de l'AERC avec un agrégat d'enrobé recomposé dans des études précédentes au projet Improvmure.*

# 1.3 Propriétés des agrégats et granulats



## l'homogénéisation des Agrégats d'enrobés

- Discussion sur le nombre de classes granulaires
  - 4 fractions granulaires nous permettent d'atteindre les critères de précision des essais
  - 2 fractions: couramment utilisé lors de grands chantiers autoroutiers
  - 3 fractions ?

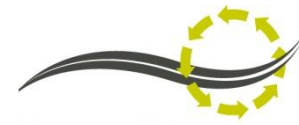
Fractions granulaires	AE	(0)0-2	(0)2-4	(0)4-8	(0)8-12
% de masse dans l'AE	100%	14%	16%	20%	50%
teneur en bitume	4.8	8.5	6.2	4.5	3.2
fractions en recombposition virtuelle		(0)0-4		(0)4-12	
% de masse virtuelle	100%	30%		70%	
teneur en btume virtuelle		7.3		3.6	
fractions en recombposition virtuelle		(0)0-2	(0)2-12		
% de masse virtuelle	100%	14%	86%		
teneur en btume virtuelle		8.5	4.1		

*Étude sur 4 fractions granulaires. Recombposition virtuelle en 2 classes granulaires, à deux coupures différentes.*

### Conclusions

La séparation en classes granulaires est l'un des moyens d'assurer une homogénéité de l'AERC. Cette séparation permet par ailleurs de contrôler la composition de l'AERC

# 1.3 Propriétés des agrégats et granulats



## caractérisation rapide du liant des agrégats

- Objectif  
évaluer une mesure de pénétrabilité basée sur un petit échantillon de bitume, d'environ 10 grammes, afin de limiter la quantité de bitume à extraire d'un échantillon d'enrobé, et dans notre cas d'un échantillon d'AE.
- Dispositif expérimental



*Empilement de 4 anneaux de TBA pour l'essai de mini-péné*



- Matériaux testés:
  - 1 bitume 10/20
  - 1 bitume 20/30
  - Le bitume issu de l'AERC

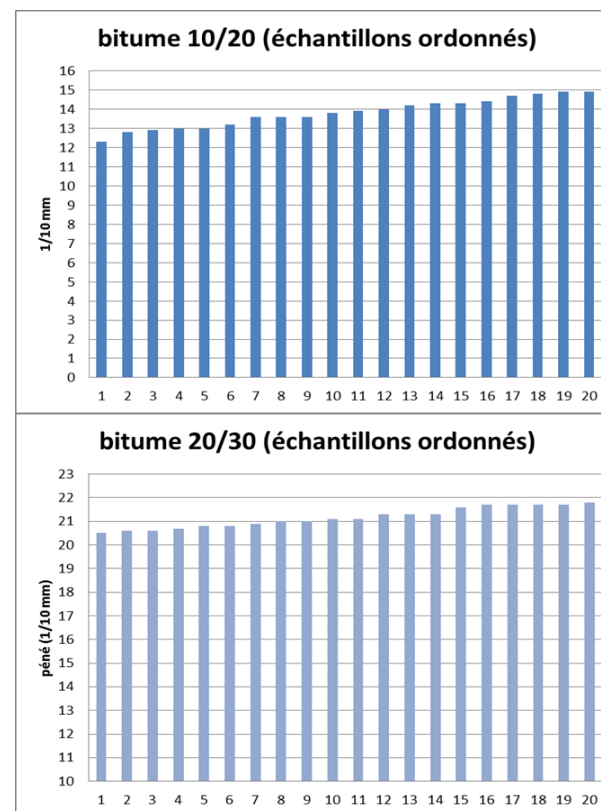
# 1.3 Propriétés des agrégats et granulats



## caractérisation rapide du liant des agrégats

- Résultats sur bitume 10/20 et 20/30

	Bitume 10/20	bitume 20/30			
n°1	14.2	21.7	moyenne	13.8	21.2
n°2	14	21	ecart type	0.75	0.42
n°3	13.6	20.8	cart type relatif	5.40%	1.97%
n°4	12.3	20.9	Max	14.9	21.8
n°5	14.3	20.5	Min	12.3	20.5
n°6	13.2	21.3	Max-Min	2.6	1.3
n°7	14.4	20.6			
n°8	13	21.1			
n°9	13.6	20.6			
n°10	14.3	21			
n°11	12.8	21.7			
n°12	14.7	21.3			
n°13	13.9	21.6			
n°14	13.6	21.3			
n°15	14.9	21.1			
n°16	14.8	20.7			
n°17	12.9	21.7			
n°18	14.9	21.7			
n°19	13.8	20.8			
n°20	13	21.8			



- La norme indique une répétabilité de 1 sur ces bitumes...



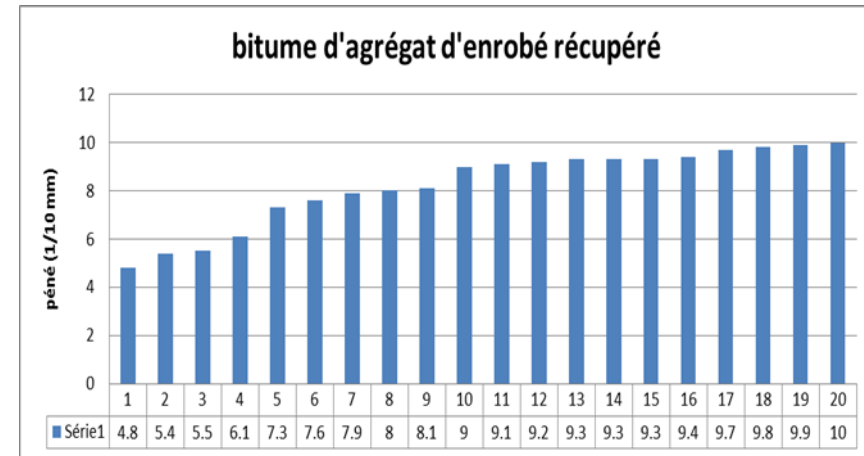
# 1.3 Propriétés des agrégats et granulats



## caractérisation rapide du liant des agrégats

- Résultats sur bitume extrait des agrégats

	n° éch.	péné		
AERC	8	4.8	moy	8.24
AERC	5	5.4	ecarttype	1.64
AERC	6	5.5	ecartrelatif	20%
AERC	7	6.1	min	4.8
AERC	14	7.3	max	10
AERC	19	7.6	max-min	5.2
AERC	3	7.9		
AERC	13	8		
AERC	2	8.1		
AERC	15	9		
AERC	20	9.1		
AERC	16	9.2		
AERC	4	9.3		
AERC	10	9.3		
AERC	11	9.3		
AERC	9	9.4		
AERC	17	9.7		
AERC	1	9.8		
AERC	12	9.9		
AERC	18	10		



Le protocole de mini-péné permet de diminuer par deux le temps d'extraction sans présenter d'inconvénient majeur vis-à-vis de la norme EN 1426, résultats au moins aussi bons que pour un essai de péné standard pour cette gamme de bitume.

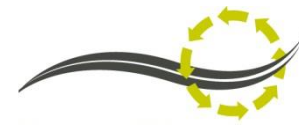
Origine de cette plus grande variabilité:

- la possible présence de fines dans l'échantillon,
- Un échantillon de bitume plus « hétérogène » qu'à l'habitude (asphaltènes?)

### ⇒ Conclusions

L'essai de mini-péné est prometteur. Il est déjà utilisé par nos techniciens lors de récupérations de bitume sur de trop petits échantillons. Pour des bitumes durs tels que les bitumes d'AE, il ne génère que peu d'erreur supplémentaire, l'erreur restant dans le cadre de la norme.

# 1.3 Propriétés des agrégats et granulats



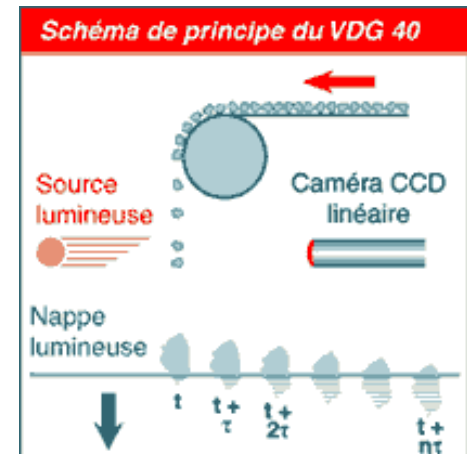
## l'Influence du recyclage sur les granulats

### Objectifs et dispositif expérimental

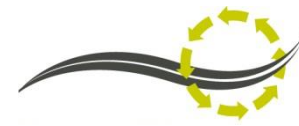
Influence du fraisage sur l'évolution géométriques des granulats, en termes de granulométrie et de forme des granulats.

Étude réalisée avec le vidéogranulomètre VDG40

matériel MLPC répondant à la norme XP P 18 566 sur l' « Analyse granulométrique, aplatissement, allongement - Essai à l'aide d'un appareil d'ombroscopie ».



# 1.3 Propriétés des agrégats et granulats



## l'Influence du recyclage sur les granulats

### Matériaux évalués

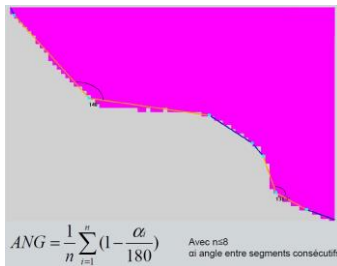
matériau	description
4/6	Classe granulaire 4/6 de l'enrobé d'origine
6/10	Classe granulaire 6/10 de l'enrobé d'origine
AE0	Agrégat d'enrobé initial fourni à l'IFSTTAR par sacs de 25 kg
AE_LH40-1	AE issu d'une fabrication à chaud à 40% d'AE0
AE_LH70-1	AE issu d'une fabrication à chaud à 70% d'AE0
AE_LW40-1	AE issu d'une fabrication tiède à 40% d'AE0
AE_LW70-1	AE issu d'une fabrication tiède à 70% d'AE0
AE_LF40-1	AE issu d'une fabrication tiède mousse à 40% d'AE0
AE_LF70-1	AE issu d'une fabrication tiède mousse à 70% d'AE0
4/10b	Classe granulaire 4/10 de l'enrobé d'origine



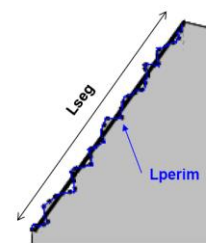
Figure 11. Gros granulats présents dans un échantillon d'AE0 désenrobé.

### Mesures effectuées

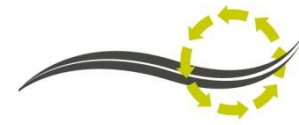
Les facteurs d'aplatissement, d'angularité et de rugosité sont déterminés à partir d'une analyse géométrique des surfaces de granulats déterminées au VDG40 :



$$RUG = \text{moyenne} \left( \frac{L_{\text{périm}} - L_{\text{seg}}}{L_{\text{périm}}} \right)$$

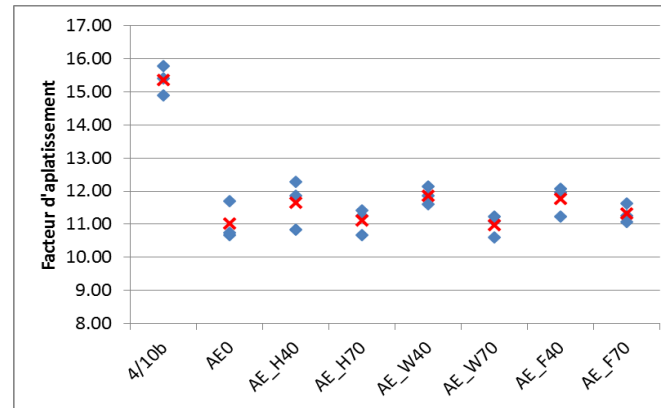


# 1.3 Propriétés des agrégats et granulats



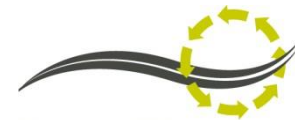
## l'Influence du recyclage sur les granulats

Résultats: aplatissement VDG



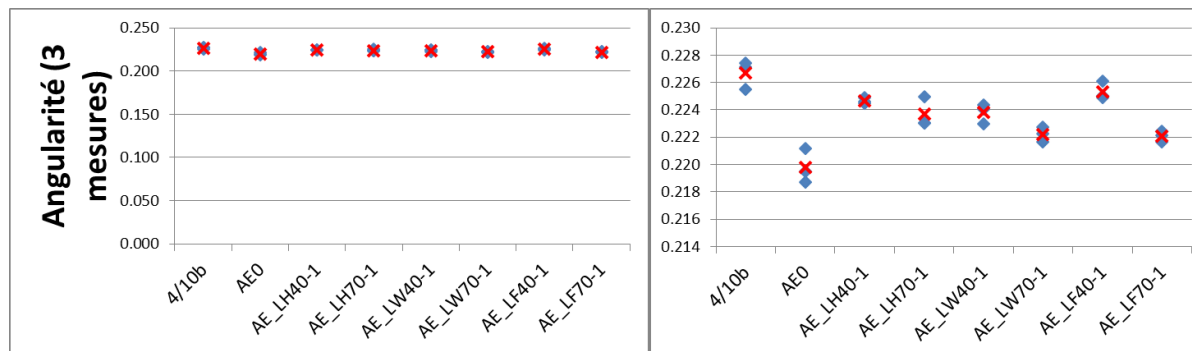
Pas d'éléments majeur permettant de montrer l'influence du recyclage sur l'évolution des granulats...

# 1.3 Propriétés des agrégats et granulats



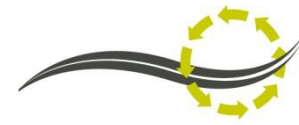
## l'Influence du recyclage sur les granulats

Résultats: angularité VDG



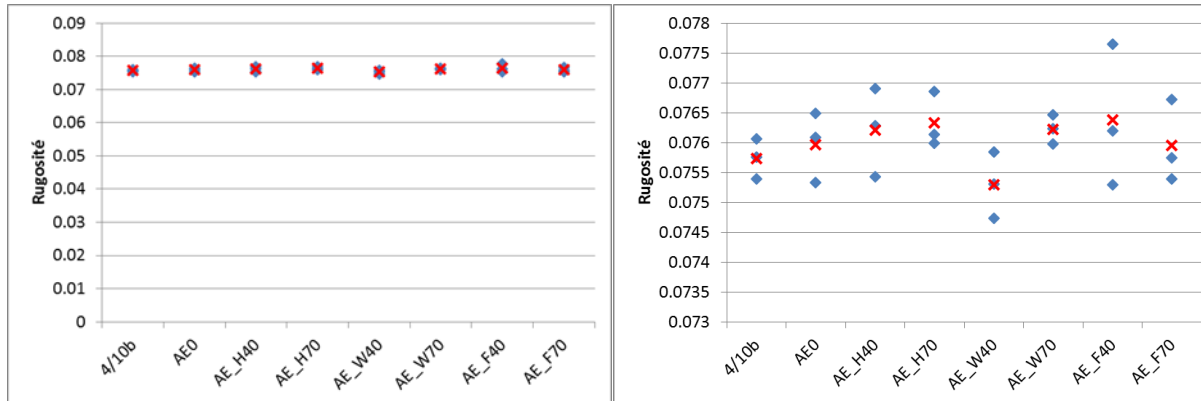
Pas d'éléments majeur permettant de montrer l'influence du recyclage sur l'évolution des granulats...

# 1.3 Propriétés des agrégats et granulats



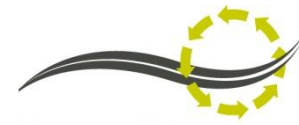
## l'Influence du recyclage sur les granulats

Résultats: rugosité VDG



Pas d'éléments majeur permettant de montrer l'influence du recyclage sur l'évolution des granulats...

# 1.3 Propriétés des agrégats et granulats



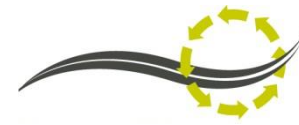
## Conclusions

La séparation en classes granulaires peut faciliter le recyclage à fort taux.

Le protocole de mini-péné est un protocole utilisable pour les bitumes d'AE. Il est déjà utilisé par nos techniciens lors de récupérations de bitume sur de petits échantillons.

L'étude de l'influence du recyclage sur les propriétés des granulats a montré une faible influence du recyclage sur l'évolution des propriétés des granulats. On observe peu d'aplatissement, peu de perte de rugosité et peu de perte d'angularité. Les modes de fabrication semblent par ailleurs peu jouer sur le résultat.

# 4.1 Propriétés des agrégats et granulats

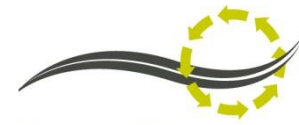


## Travaux effectués en sous-tâche 4.1

- ⇒ Rappel des objectifs de la tâche 4,1
- ⇒ Évaluation de la méthode de vieillissement Rilem\_ETB (adaptée aux échantillons d'enrobés compactés)
- ⇒ Application de la méthode Rilem\_AE aux AE du projet Improvmure
- ⇒ Conclusions sur ces travaux



# 4.1 Simulation du vieillissement en laboratoire



## Rappel des objectifs

La mise au point d'une méthode de vieillissement des enrobés a deux intérêts majeurs:

- D'une part, la fabrication d'agrégats d'enrobé de laboratoire permet de réaliser des études préliminaires sur des matériaux parfaitement contrôlés.

Plusieurs méthodes de fabrication en laboratoire ont été récemment étudiées (méthode RILEM, BRRC, UV, PAV). Ces méthodes nécessitent d'être optimisées pour être représentatives des réalités de terrain. Dans le cadre d'une thèse soutenue en 2015 [Iopes 2015], l'IFSTTAR a adapté la méthode RILEM à une technique d'enrobé tiède utilisant un surfactant. Il nous semble particulièrement intéressant d'évaluer cette méthode de vieillissement sur une technique tiède utilisant un procédé de moussage du bitume.

- D'autre part, ces méthodes de vieillissement permettent la prédiction du comportement à long terme des enrobés bitumineux. En effet, la méthode actuelle de formulation des matériaux est basée sur des essais que l'on effectue sur le matériau neuf. Le vieillissement que nous proposons permet donc de simuler le comportement supposé d'un matériau vieux de 10 ans (ordre de grandeur). Les enrobés du projet seront donc vieillis artificiellement, leurs performances en terme de durabilité seront étudiées.

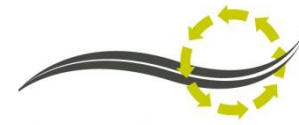
Les expérimentations envisagées sont :

- La réalisation d'essais croisés de vieillissement avec la méthode de vieillissement RILEM sur les différents enrobés du projet, avec pour premier objectif de comparer l'évolution de différents matériaux, les différents taux de recyclage, les différentes techniques et le caractère multiple du recyclage pourront ainsi être évalués par comparaison. Des mesures de péné, TBA, d'évolution de l'oxydation des matériaux et de module complexe seront effectuées sur le bitume extrait de l'enrobé vieilli, à différentes étapes de vieillissement afin d'identifier des tendances. Si des différences ou des problèmes majeurs sont observées, il conviendra de changer les modalités de la méthode de vieillissement (température, temps d'exposition à cette température...) ou de changer la méthode (la méthode BRRC, par exemple, nécessite des temps d'analyse plus long et le vieillissement du matériau résultant est moins important).

- Une seconde étude va consister à comparer les caractéristiques mécaniques des différents enrobés, avant et après vieillissement, notamment en terme de module complexe et de fatigue (notons que tous les matériaux ne pourront pas être testés, des priorités seront à formuler). L'objectif est ici de déterminer un ordre de grandeur de l'évolution des caractéristiques mécaniques des matériaux, afin de montrer que ceux-ci conservent de bonnes caractéristiques malgré leur vieillissement.



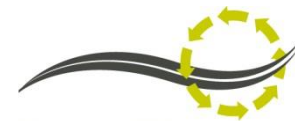
# 4.1 Simulation du vieillissement en laboratoire



Évaluation de la méthode de vieillissement Rilem\_EBT/Rilem\_AE

Rilem_AE	Rilem_EBT
Malaxage	
vieillissement court terme (4h, 135°C)	
Enrobé foisonné	Compactage de l'enrobé
Enrobé foisonné	Réalisation des échantillons de module et fatigue
vieillissement long terme (9 jours, 85°C)	
Intégration de l'AE dans une nouvelle fabrication	Réalisation des essais de module ou fatigue sur enrobés vieillis

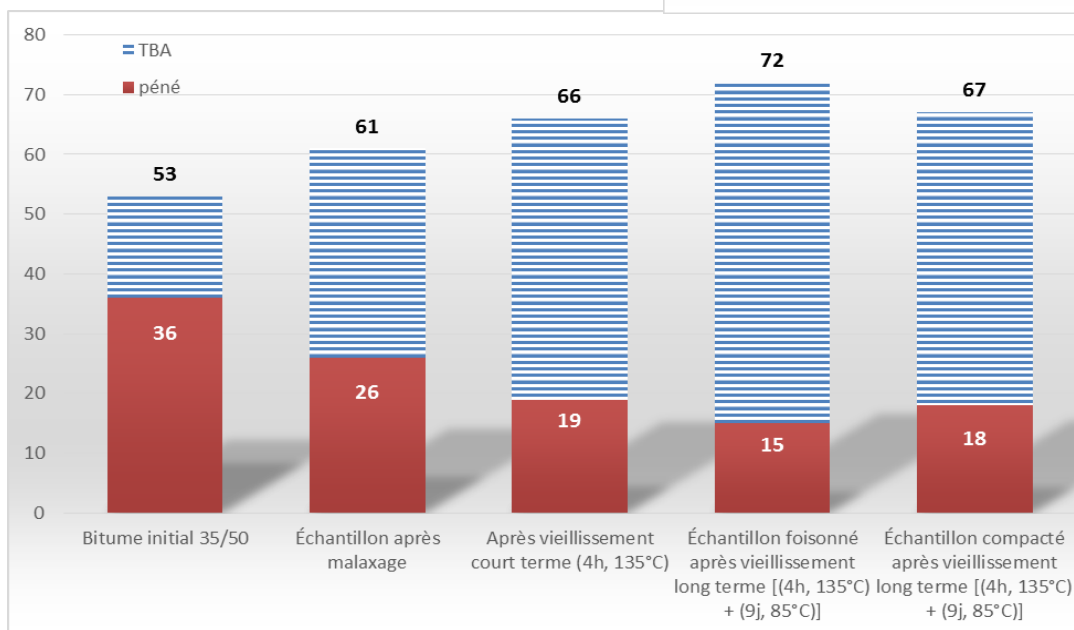
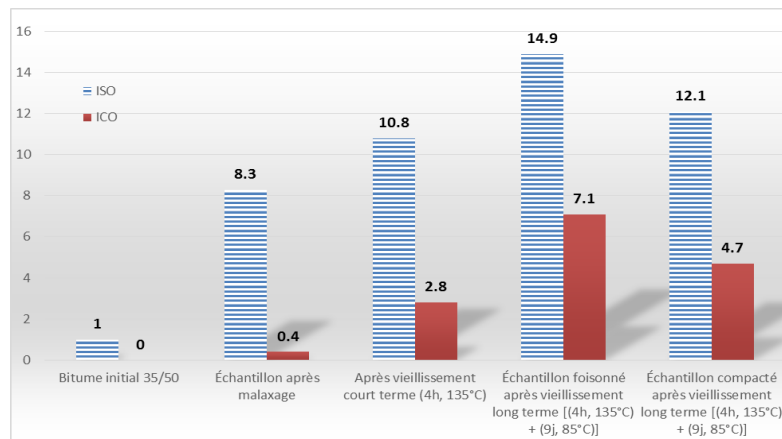
# 4.1 Simulation du vieillissement en laboratoire



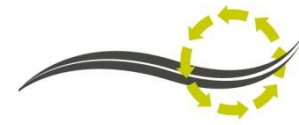
## Évaluation de la méthode de vieillissement Rilem\_EBT

### Résultats

Bitume récupéré de :	péné (0.1 mm)	TBA (°C)	ICO (%)	ISO (%)
Bitume initial 35/50	36	53	0,0	1,0
Bitume de l'AE	18	63	8.0	12.1
Échantillon après malaxage	26	61	0.4	8.3
Après vieillissement court terme (4h, 135°C)	19	66	2.8	10.8
Échantillon foisonné après vieillissement long terme [(4h, 135°C) + (9j, 85°C)]	15	72	7,1	14,9
Échantillon compacté après vieillissement long terme [(4h, 135°C) + (9j, 85°C)]	18	67	4,7	12,1

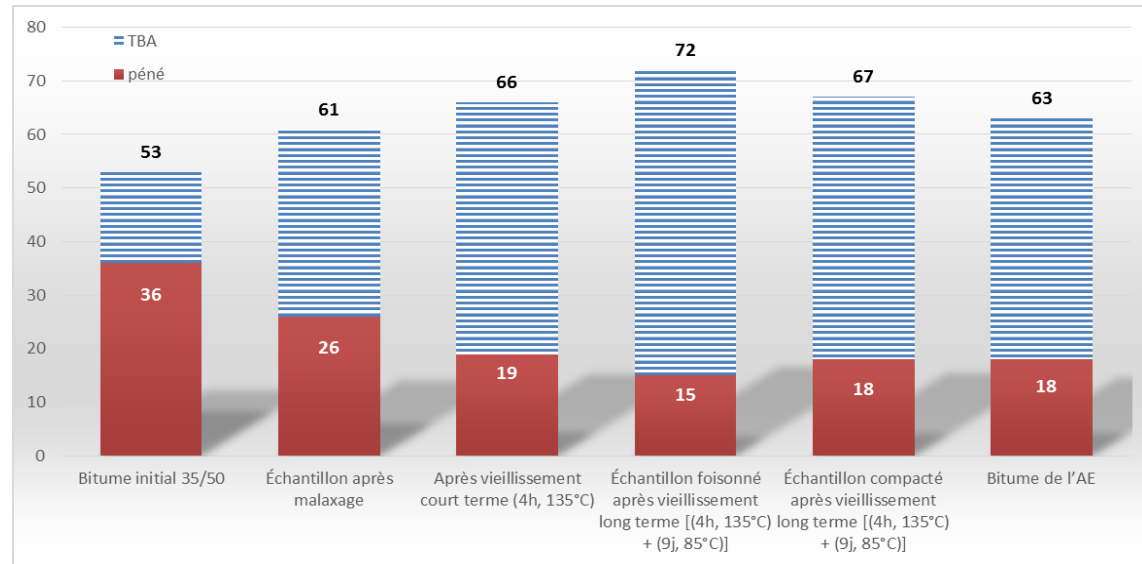


# 4.1 Simulation du vieillissement en laboratoire



## Évaluation de la méthode de vieillissement Rilem\_ETB

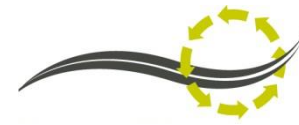
### Conclusions



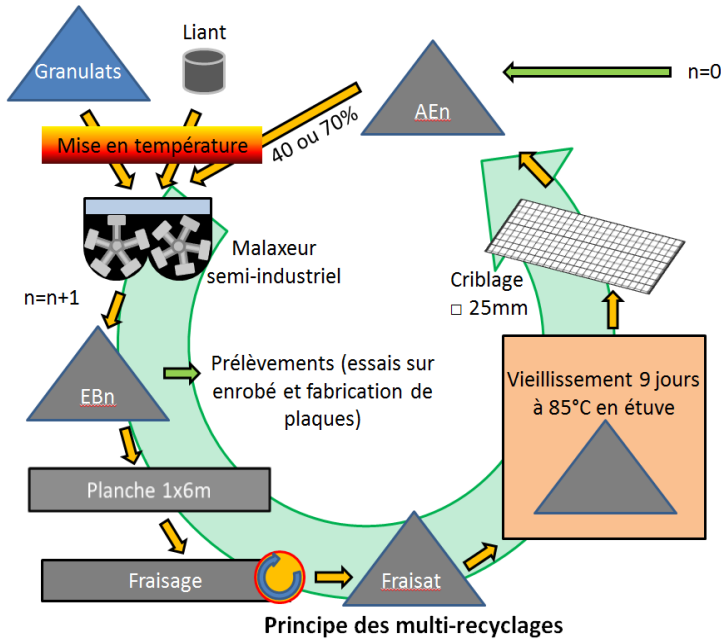
La méthode Rilem\_EBT semble a priori présenter un intérêt limité dans son protocole de vieillissement long terme, puisque le cœur de l'échantillon ne vieillit pas, seule la surface de l'échantillon d'enrobé vieillit à long terme.

Dans le cadre d'un essai de fatigue ou de module complexe, l'idée de faire vieillir la plaque d'enrobé compactée ne fera pas beaucoup vieillir les échantillons de fatigue ou de module qui sont extraits du cœur de la plaque. Dans la mesure où le vieillissement oxydatif agit essentiellement en surface d'un enrobé compacté, il sera préférable de faire vieillir directement les échantillons de module complexe ou de fatigue, après découpe dans la plaque.

# 4.1 Simulation du vieillissement en laboratoire

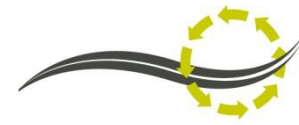


## Application de la méthode Rilem\_AE aux AE d'Improvmure



Vieillessement long terme de la méthode Rilem\_AE  
- en étuve  
- en couches minces

# 4.1 Simulation du vieillissement en laboratoire



## Application de la méthode Rilem\_AE aux AE d'Improvmure

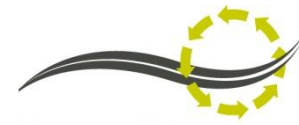
### Résultats

enrobé	péné	différence	péné	agrégat
LH40-0	17	-8	9	AE-LH40-0
	67.2	9.2	76.4	
LH70-0	12	-6	6	AE-LH70-0
	80.5	9	89.5	
LW40-0	18	-8	10	AE-LW40-0
	66.0	9.4	75.4	
LW70-0	15	-7	8	AE-LW70-0
	70.0	8.8	78.8	
LF40-0	17	-8	9	AE-LF40-0
	64.6	11.8	76.4	
LF70-0	12	-4	8	AE-LF70-0
	75.8	8.2	84.0	

Les résultats des tableaux ci-dessus montrent bien l'effet de la procédure de vieillissement utilisée ici (9 jours, 85°C). Elle permet d'une part de diminuer les valeurs de péné de 4 à 8 [1/10 mm] et d'autre part d'obtenir des valeurs de péné inférieures à 15 [1/10 mm] pour les AE.

La même comparaison est effectuée en termes de TBA. Le vieillissement apporte environ 10°C de TBA à tous les AE.

# 4.1 Simulation du vieillissement en laboratoire



## Conclusion

La méthode de vieillissement Rilem est un vieillissement oxydatif de l'enrobé ou de l'agrégat d'enrobé dans une enceinte ventilée, en 2 étapes:

Vieillissement court terme, 4 heures à 135°C

Vieillissement long terme, 9 jours à 85°C

La méthode Rilem\_AE s'applique sur des AE en couche mince pour obtenir des AE vieillis en laboratoire

La phase phase de vieillissement long terme de la méthode Rilem\_AE a été appliquée à une échelle semi-industrielle

La méthode Rilem\_EBT s'applique aux enrobés compactés pour des essais de module ou de fatigue sur enrobés vieillis

a) fabrication de l'enrobé

b) vieillissement court terme

c) compactage de l'enrobé

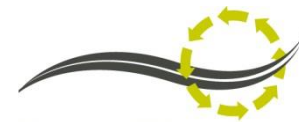
d) vieillissement long terme

→ à appliquer sur échantillons minces

Ces 3 variantes de la méthode Rilem utilisent des matériels de laboratoire classique.

- simplicité de mise en œuvre de la méthode

- reproductibilité, comparaisons interlaboratoires.



**Merci de votre attention !**