



Une société de VINCI 



Travaux routiers | Matériaux routiers et industries | Environnement

RECHERCHES ET EVOLUTIONS EN COURS

Bernard ECKMANN

Colloque de formation
RETRAITEMENT A FROID DES CHAUSSEES SOUPLES
Montreal – 4-6 décembre 2007





RETRAITEMENT A FROID RECHERCHES & EVOLUTIONS

SOMMAIRE

➤ SCORE – Etude du fraisage

Influence des conditions de fraisage sur la granulométrie du fraisat

➤ SCORE – Propriétés mécaniques en laboratoire

- Evolution du module de rigidité selon deux procédures de mûrissement
- Courbes maîtresses de module

➤ Programme EUROVIA de validation in-situ

- Chantiers de référence
- Etudes de laboratoire
- Comparaison laboratoire / in-situ : résultats disponibles à ce jour



RETRAITEMENT A FROID LE PROJET SCORE

SCORE : Superior COLD REcycling

- Optimisation des techniques existantes
- Développement de nouvelles méthodes de formulation et d'évaluation des produits
- Développement de nouveaux produits
- Un partenariat diversifié

Sociétés privées



PROBISA (Espagne)
AB NYNAS Petroleum (Suède)
EUROVIA (France)
Stavby Silnic a Zelznic
(République Tchèque)
PRODUKTION (Suède)

Laboratoires



LCPC (France)
CEDEX (Espagne)

Universités



Université Joseph Fourier
(France)

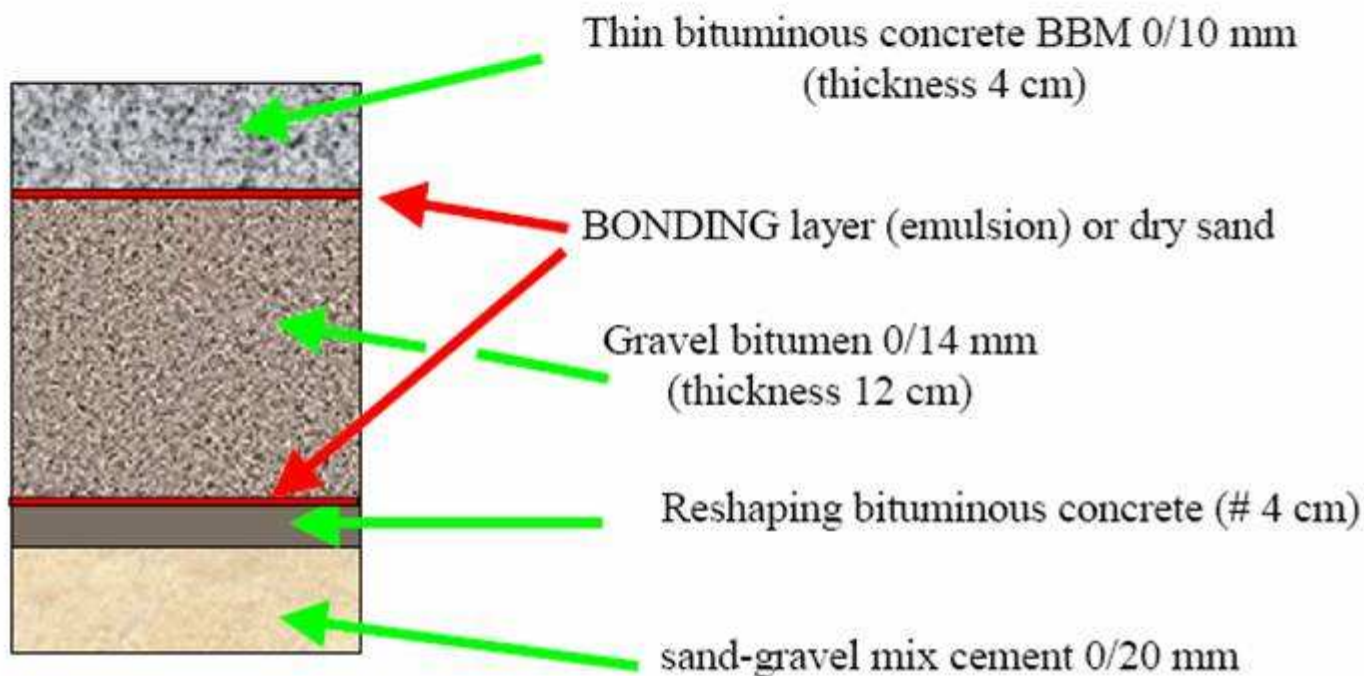
- Un effort important : 281 hommes-mois sur 3 ans (2002 – 2005)



RECYCLAGE A FROID SCORE – ETUDE DU FRAISAGE

Section d'essai N°1

- Incidence de la vitesse de translation (~ 2 à 12 m/min)
- Incidence de la profondeur de fraisage (7 et 12 cm)
- Incidence du collage de l'interface (collé ou décollé)

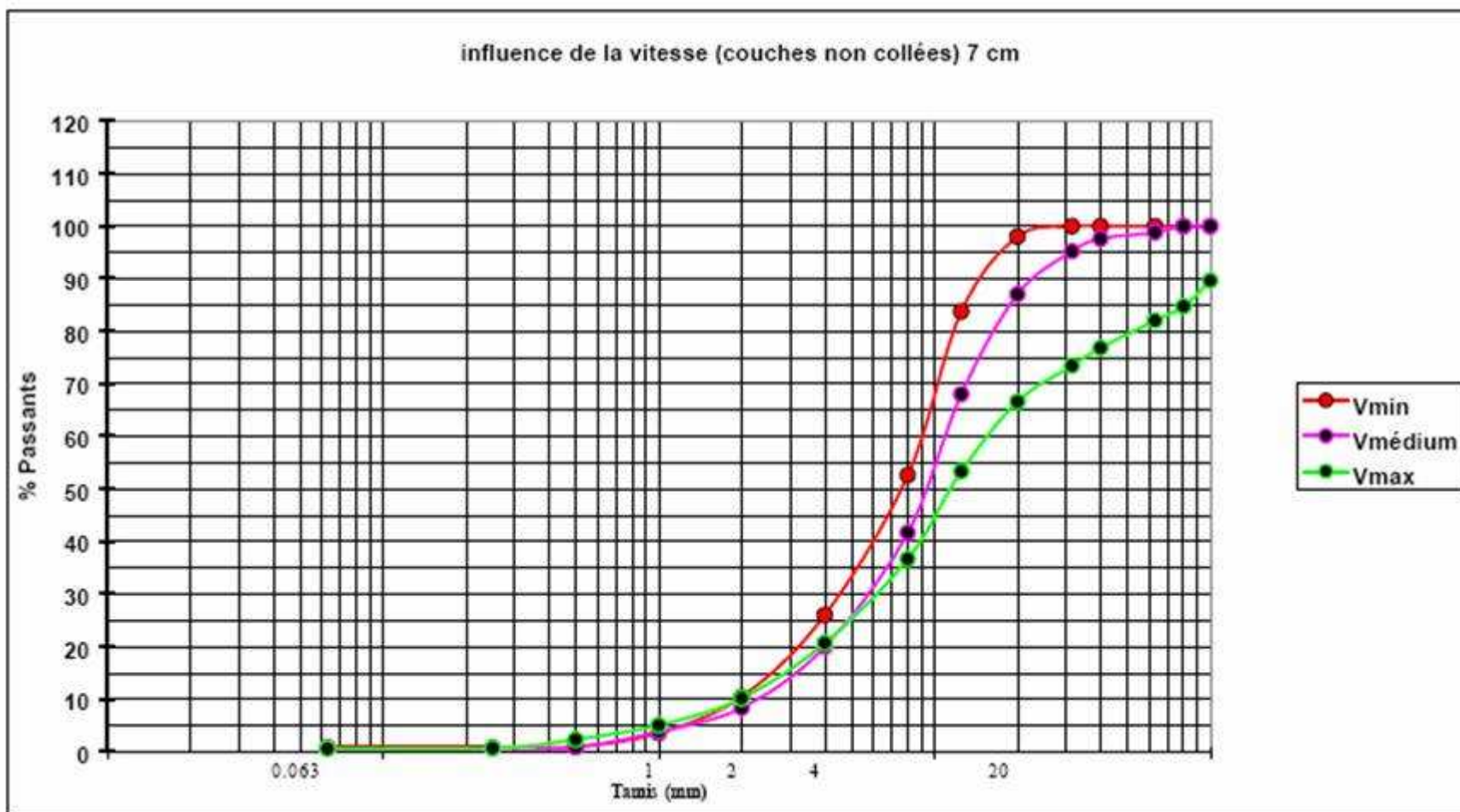




RECYCLAGE A FROID SCORE – ETUDE DU FRAISAGE

Influence de la vitesse :

- Profondeur 7 cm
- Couches non collées

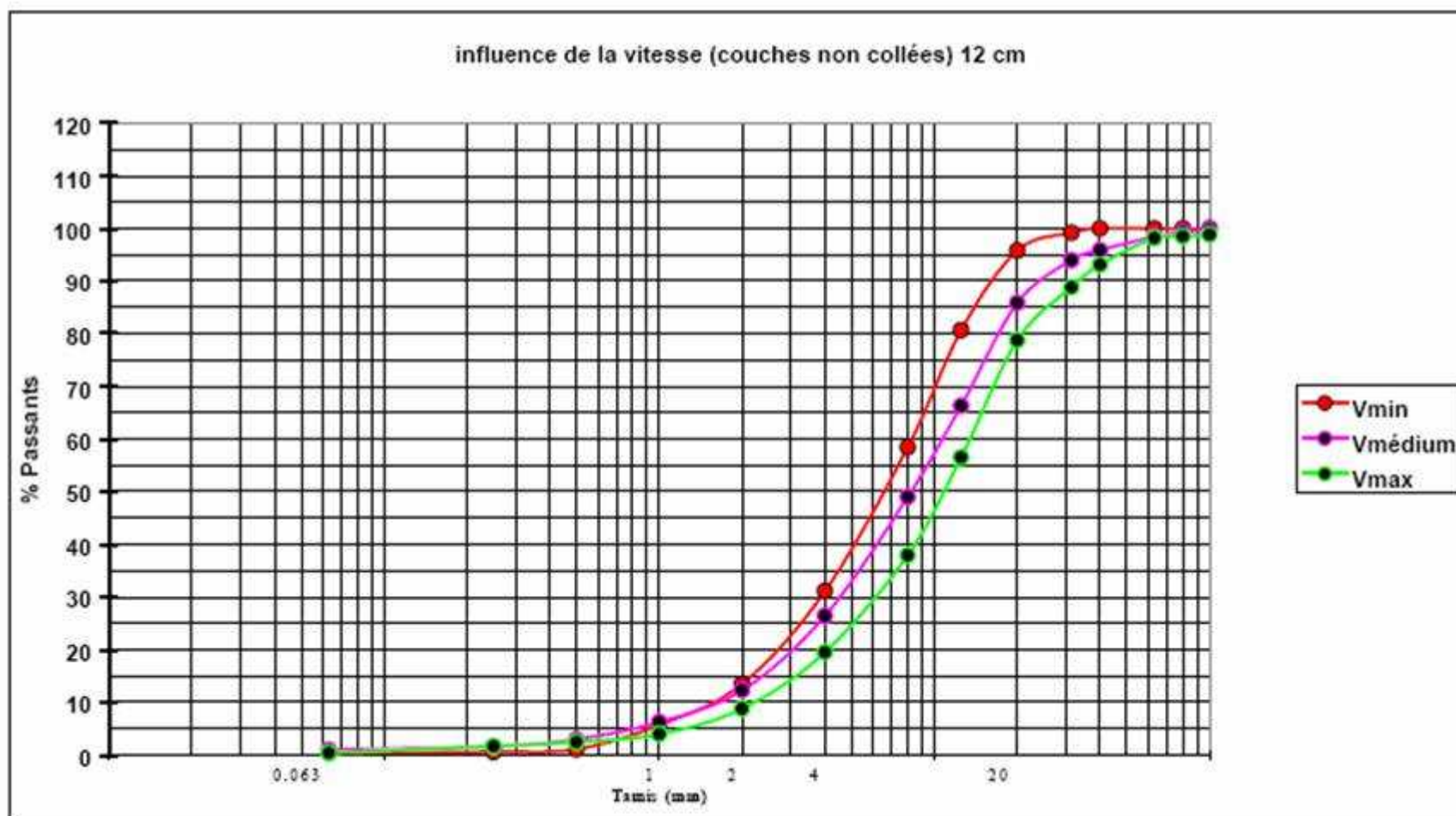




RECYCLAGE A FROID SCORE – ETUDE DU FRAISAGE

Influence de la vitesse :

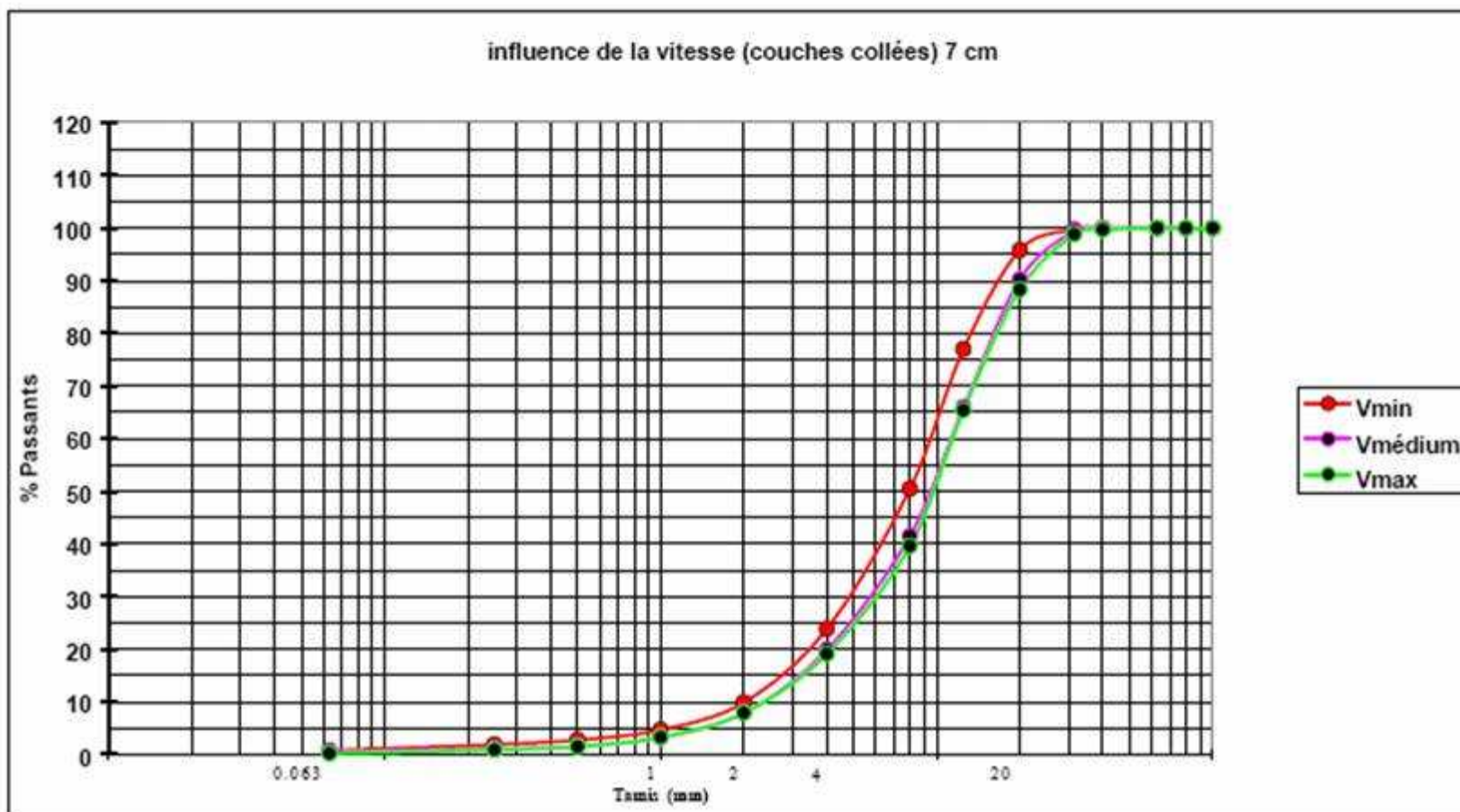
- Profondeur 12 cm
- Couches non collées





RECYCLAGE A FROID SCORE – ETUDE DU FRAISAGE

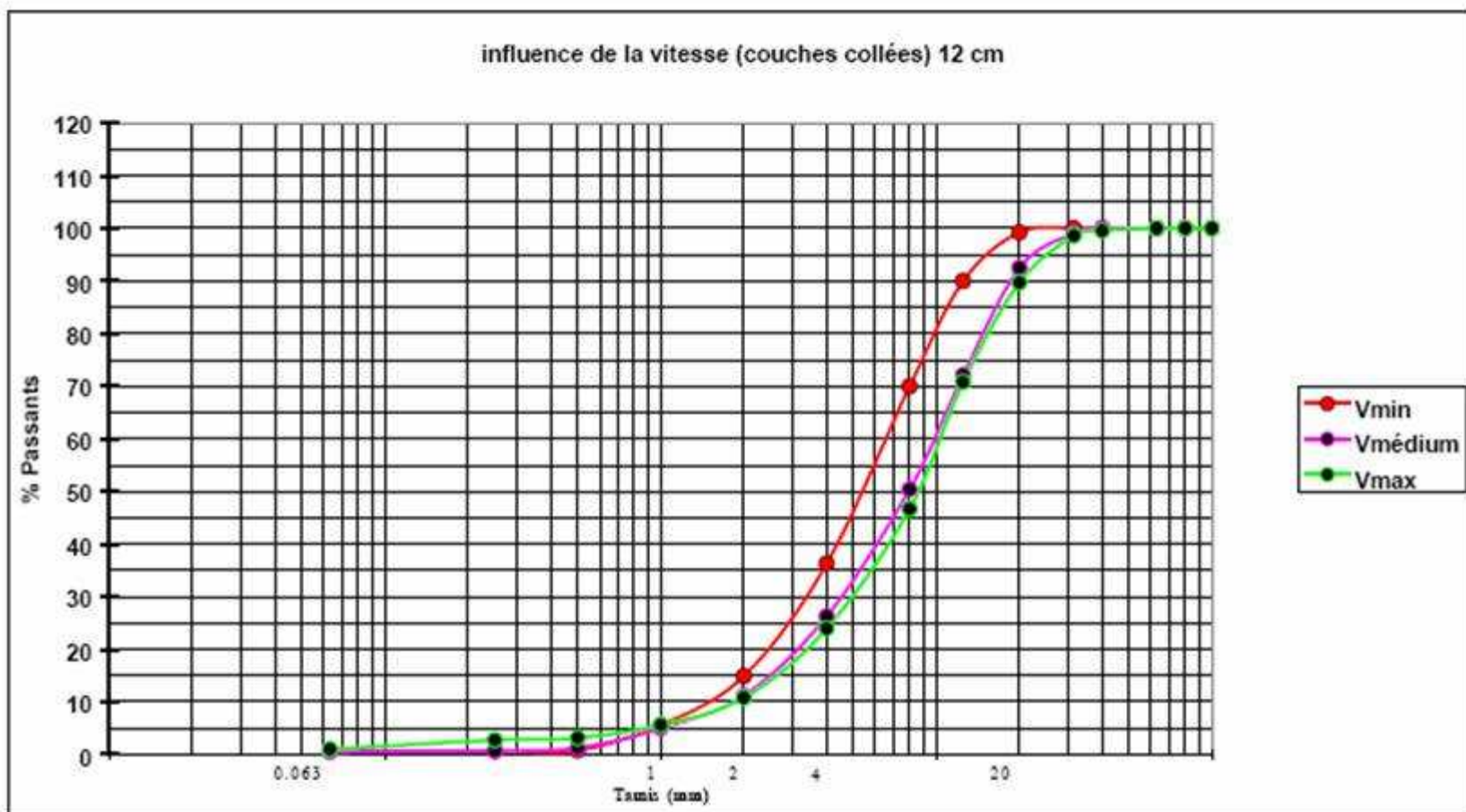
Influence de la vitesse :
- Profondeur 7 cm
- Couches collées





RECYCLAGE A FROID SCORE – ETUDE DU FRAISAGE

Influence de la vitesse :
- Profondeur 12 cm
- Couches collées

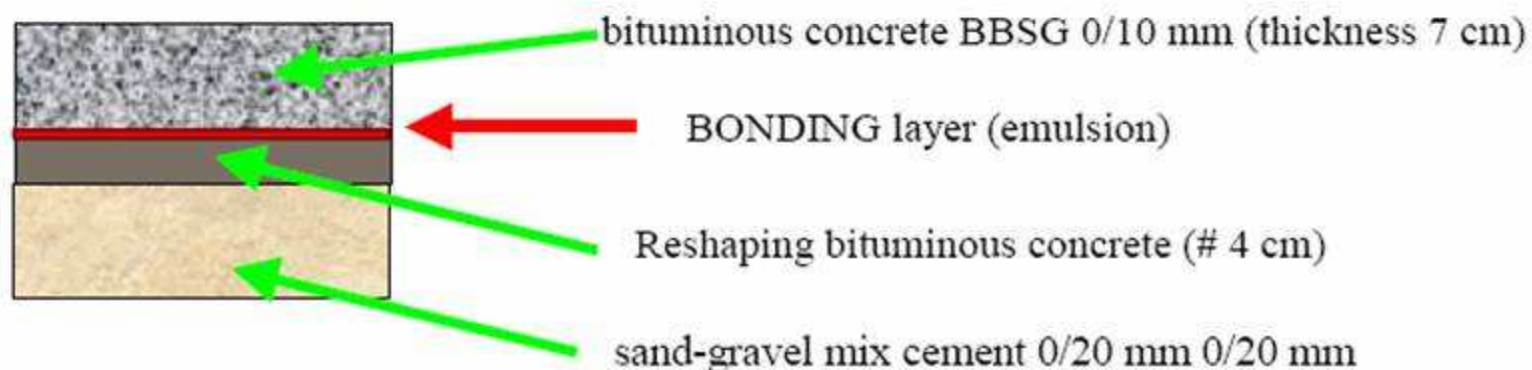




RECYCLAGE A FROID SCORE – ETUDE DU FRAISAGE

Section d'essai N°2

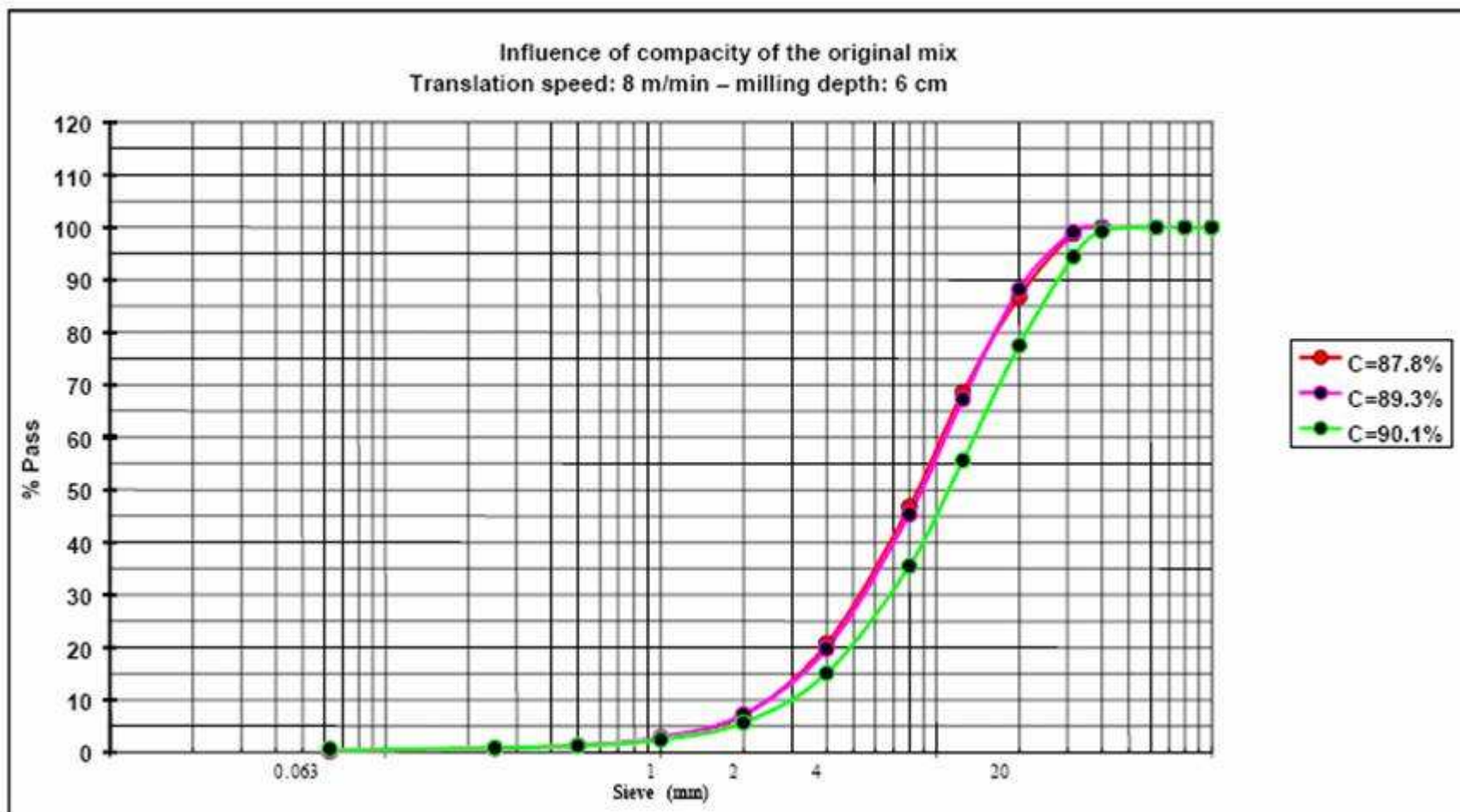
- Incidence de la compacité de la couche d'enrobés
- Profondeur de fraisage : 6 cm
- Vitesse de translation : 8 m/min





RECYCLAGE A FROID SCORE – ETUDE DU FRAISAGE

Influence de la compacité





RECYCLAGE A FROID SCORE – ETUDE DU FRAISAGE

Conclusions

- Incidence de la vitesse de translation
 - Granulométries d'autant plus fines que la vitesse est faible
 - * Affecte principalement les fractions $> 2 - 4 \text{ mm}$*
 - * L'incidence de la vitesse décroît lorsque la vitesse augmente*
- Dans le cas des couches collées, la granulométrie reste à peu près constante pour des vitesses supérieures à 8 m/min
- Formation de « plaques » dans le cas des interfaces décollés
 - * Effet d'autant plus important que la profondeur de fraisage est proche de l'interface*
 - * Effet d'autant plus important que la vitesse de translation est élevée*
- Incidence de la compacité
 - Granulométries plus fines lorsque la compacité est plus faible ?



RECYCLAGE A FROID SCORE – PROP. MECANIQUES

Périmètre de SCORE

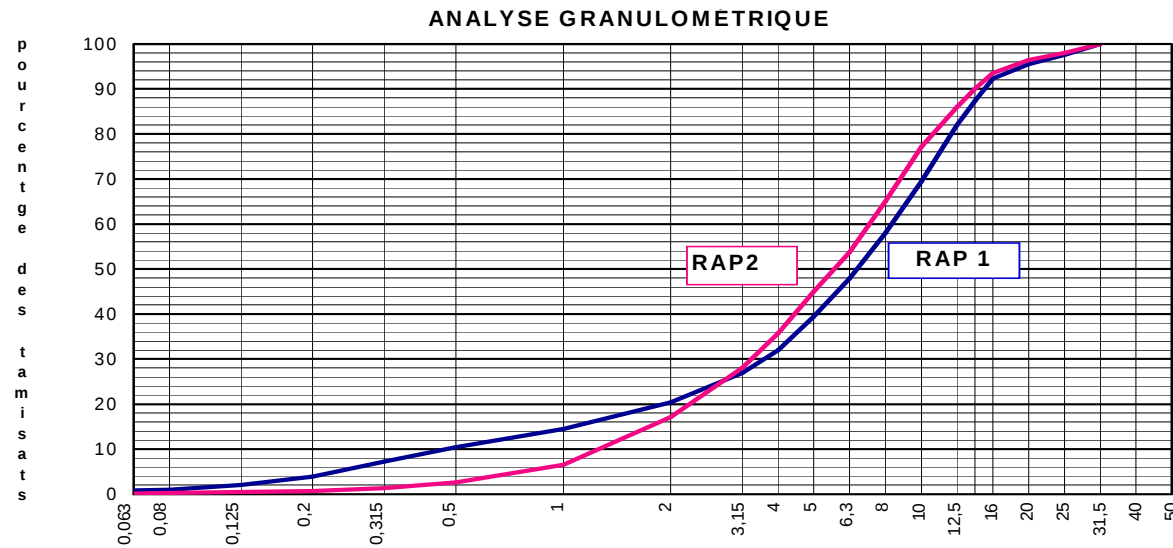
- Recyclage en place de matériaux bitumineux 100%
- Comparaison de différentes techniques de recyclage
 - *A l'émulsion de bitume*
 - *A la mousse de bitume*
 - *Avec des μ -émulsions de bitume (d moyen $\sim 1 \mu m$)*
- Recherche de formulations optimales
- Recherche de procédures de laboratoire mieux adaptées
Evolution du module de rigidité selon un procédé de mûrissement accéléré



RECYCLAGE A FROID SCORE – PROP. MECANQUES

Formulations étudiées

- Essais sur deux fraisats (enrobés bit.) de granulométrie similaire



Teneur en bitume Pen. (mm/10) B&A (°C)

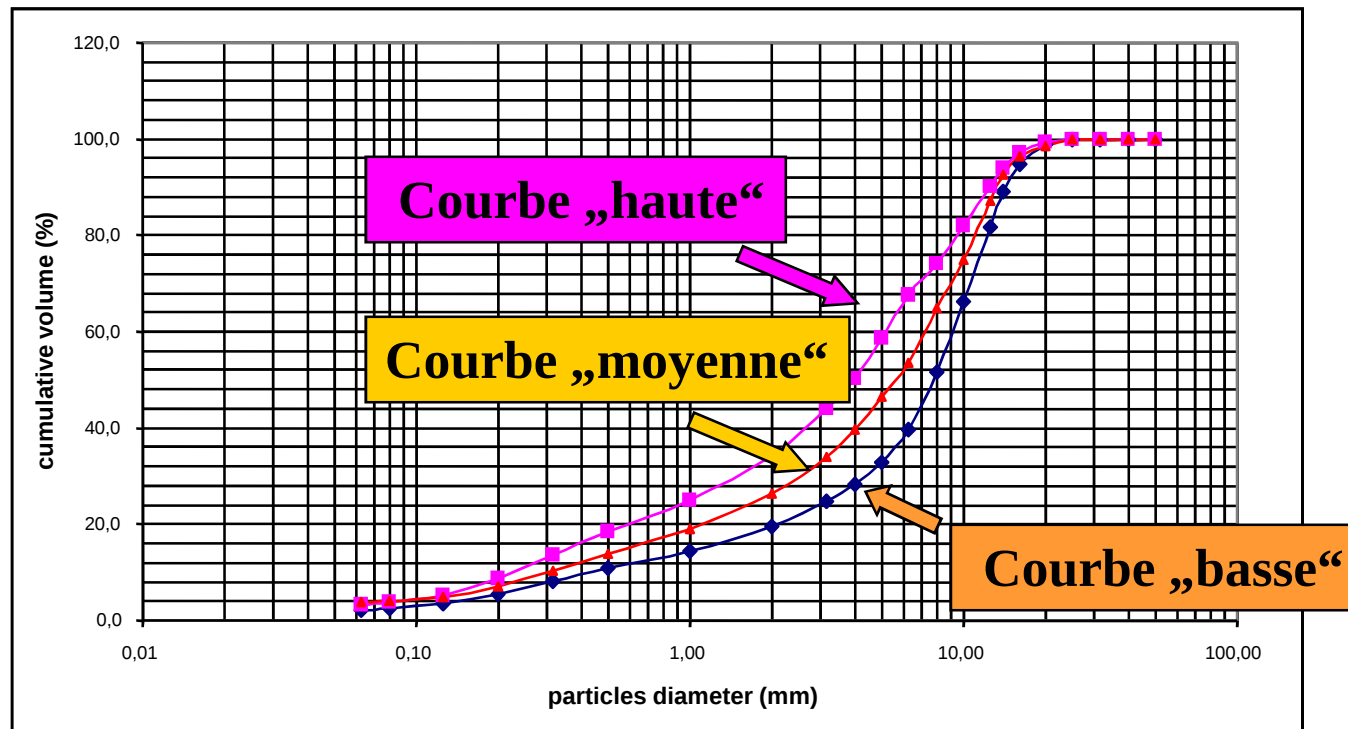
RAP 1 :	4 – 4.2 %	6	> 80
RAP 2 :	5.6 %	21	67



RECYCLAGE A FROID SCORE – PROP. MECANQUES

Formulations étudiées

- Etudes complémentaires : incidence de la granulométrie



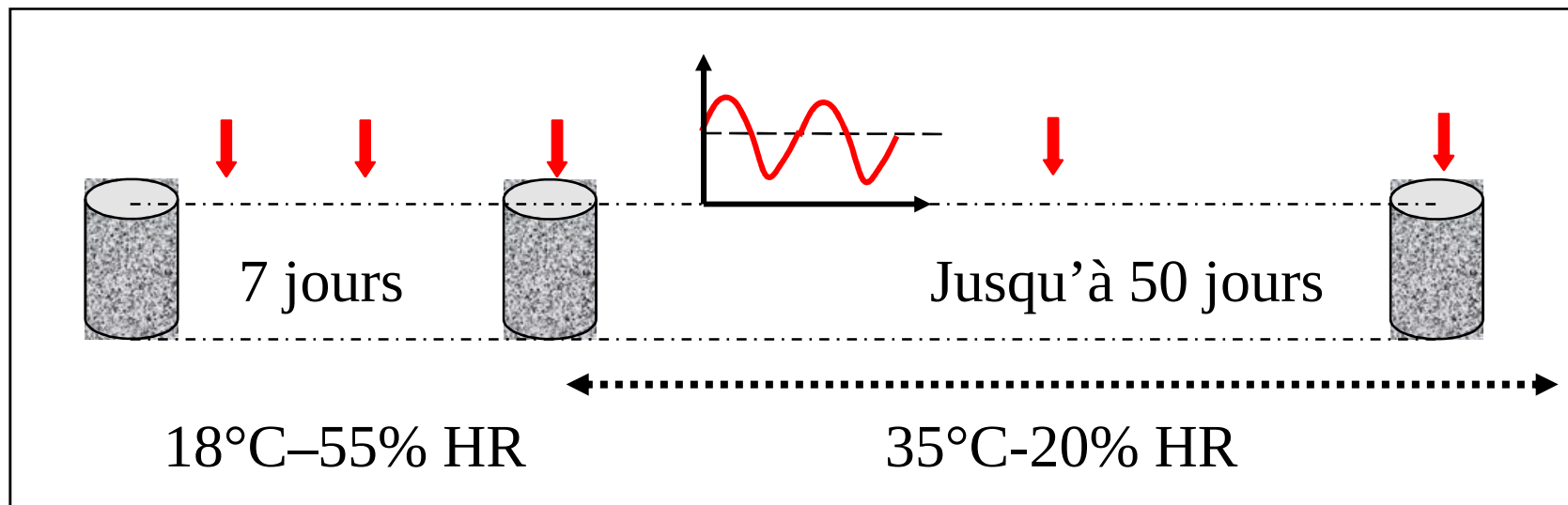
- Incidence du compactage : 10% versus 15% vides



RECYCLAGE A FROID SCORE – PROP. MECANQUES

Module de rigidité : 1^{ère} procédure de mûrissement

- Deux laboratoires (*Mousse // Emulsion / μ -Emulsion*)
- Compactage PCG (*F/H : 160/150 mm ou 150/115 mm*)
- Teneur en vides constante visée : env. 15%
- Modules par compression dynamique **axiale** à 15°C (10 Hz)
- Procédure de mûrissement accéléré :

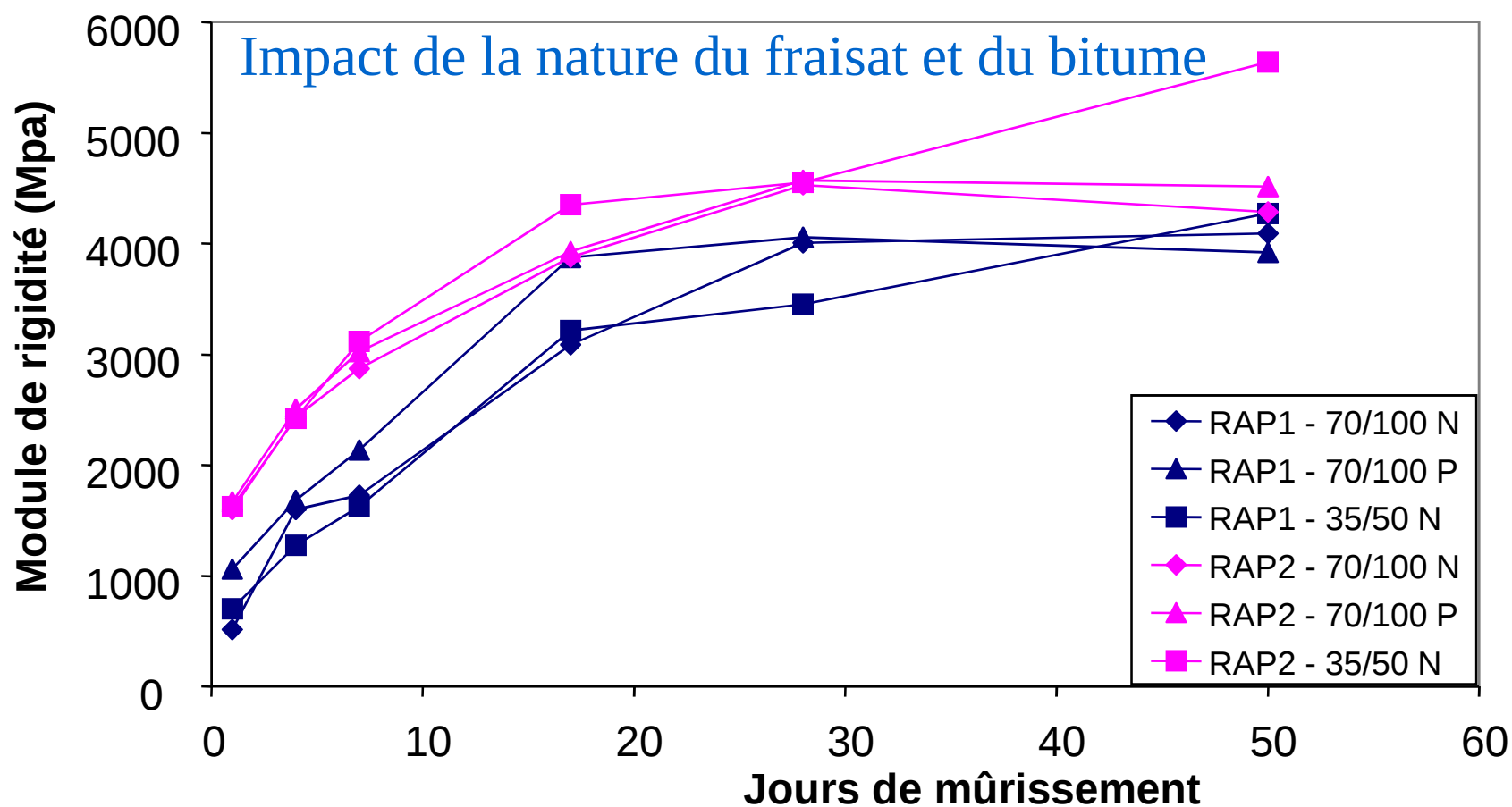




RECYCLAGE A FROID SCORE – PROP. MECANQUES

Module de rigidité : 1^{ère} procédure de mûrissement

RECYCLAGE A LA MOUSSE DE BITUME

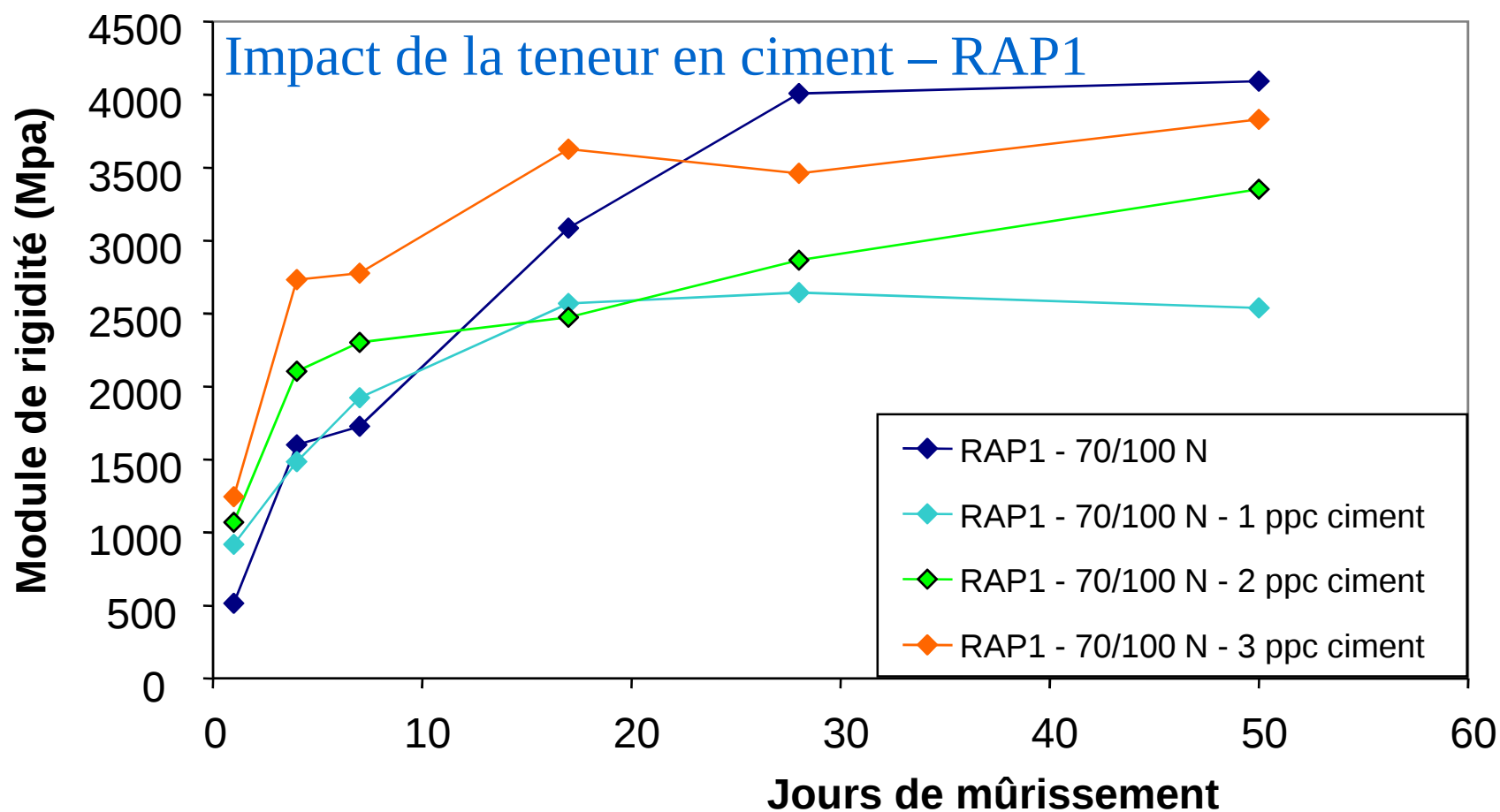




RECYCLAGE A FROID SCORE – PROP. MECANQUES

Module de rigidité : 1^{ère} procédure de mûrissement

RECYCLAGE A LA MOUSSE DE BITUME

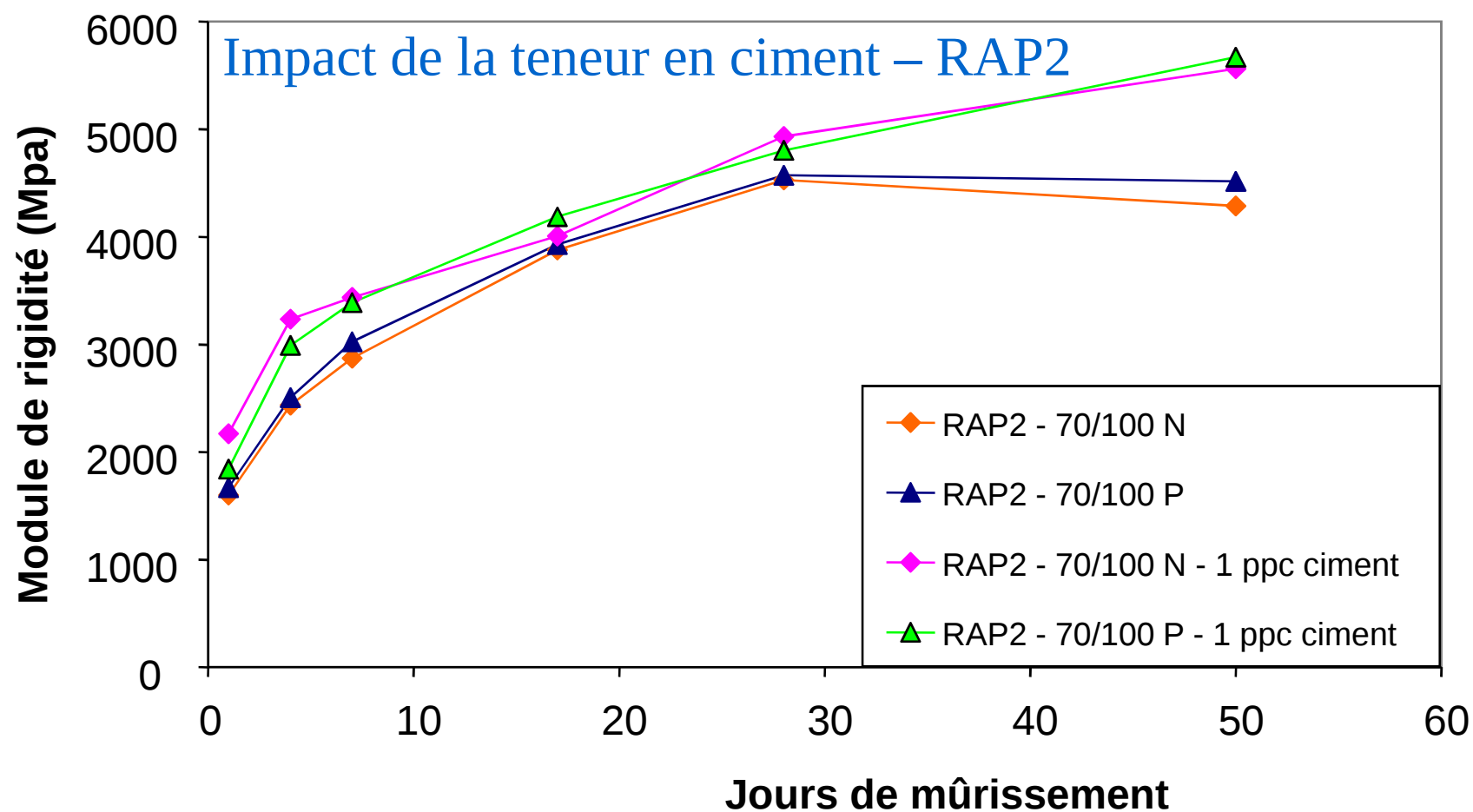




RECYCLAGE A FROID SCORE – PROP. MECANQUES

Module de rigidité : 1^{ère} procédure de mûrissement

RECYCLAGE A LA MOUSSE DE BITUME

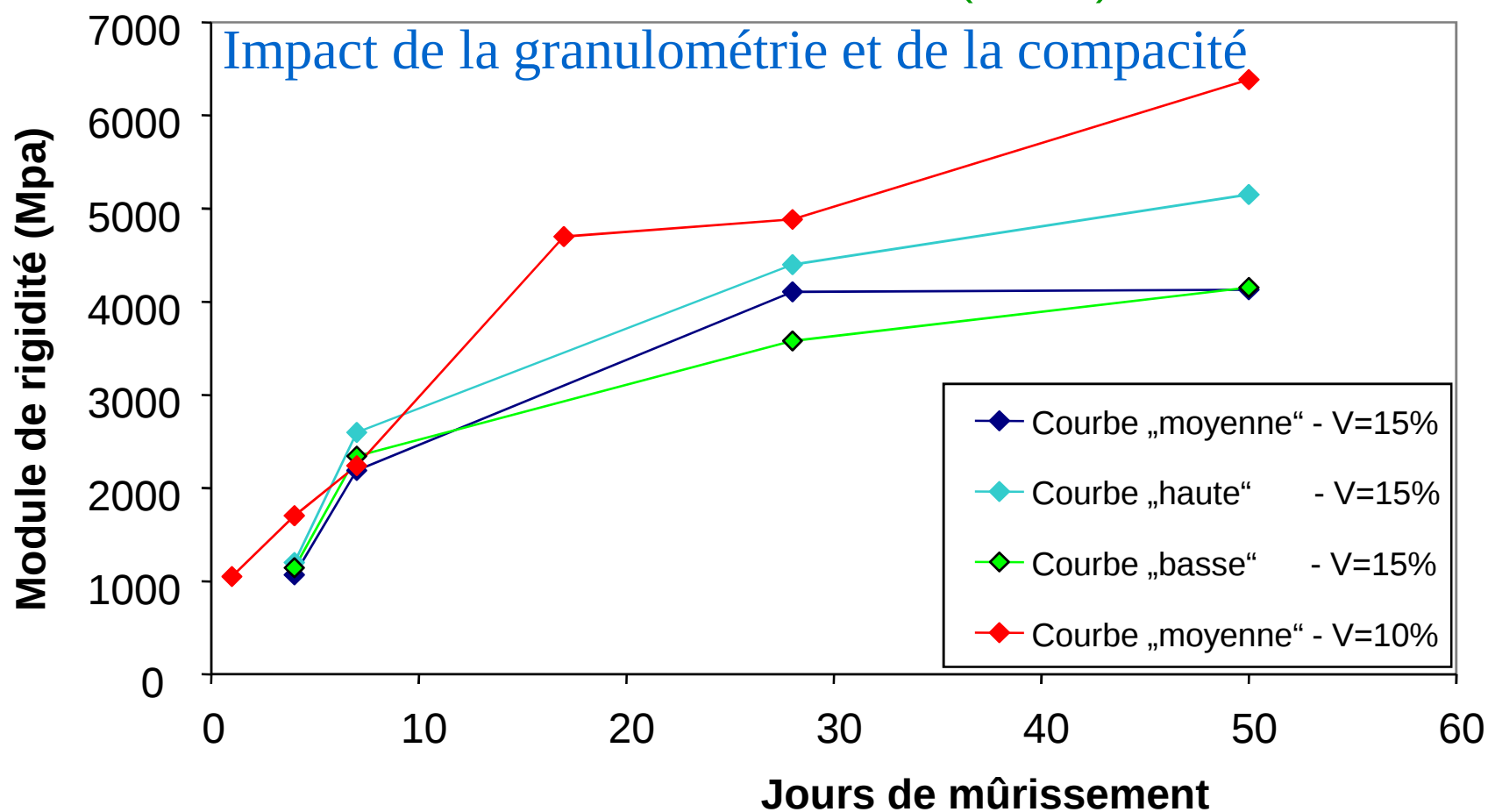




RECYCLAGE A FROID SCORE – PROP. MECANQUES

Module de rigidité : 1^{ère} procédure de mûrissement

RECYCLAGE A LA MOUSSE DE BITUME (RAP1)

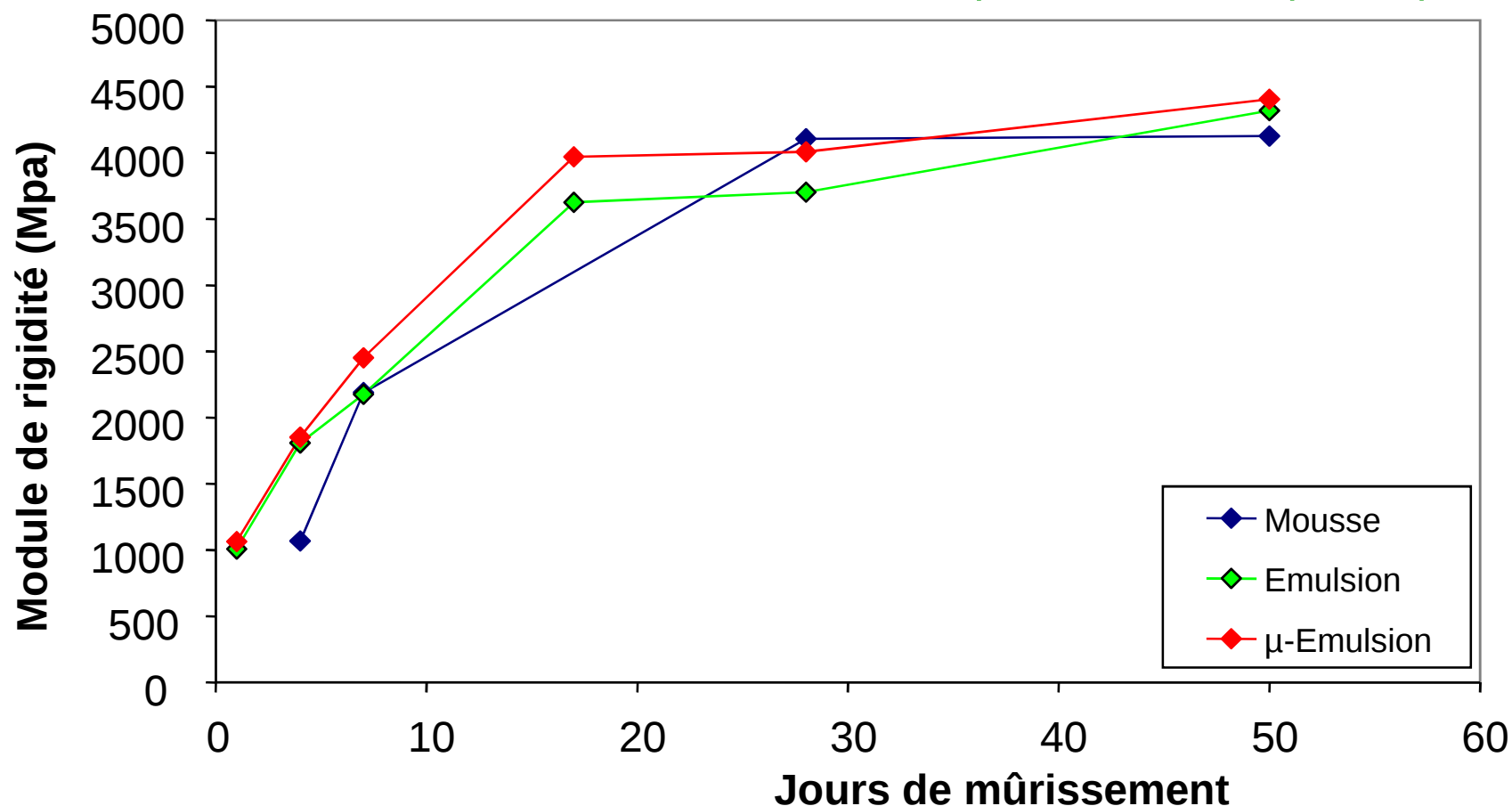




RECYCLAGE A FROID SCORE – PROP. MECANQUES

Module de rigidité : 1^{ère} procédure de mûrissement

COMPARAISON MOUSSE / EMULSION / μ -EMULSION (RAP1)

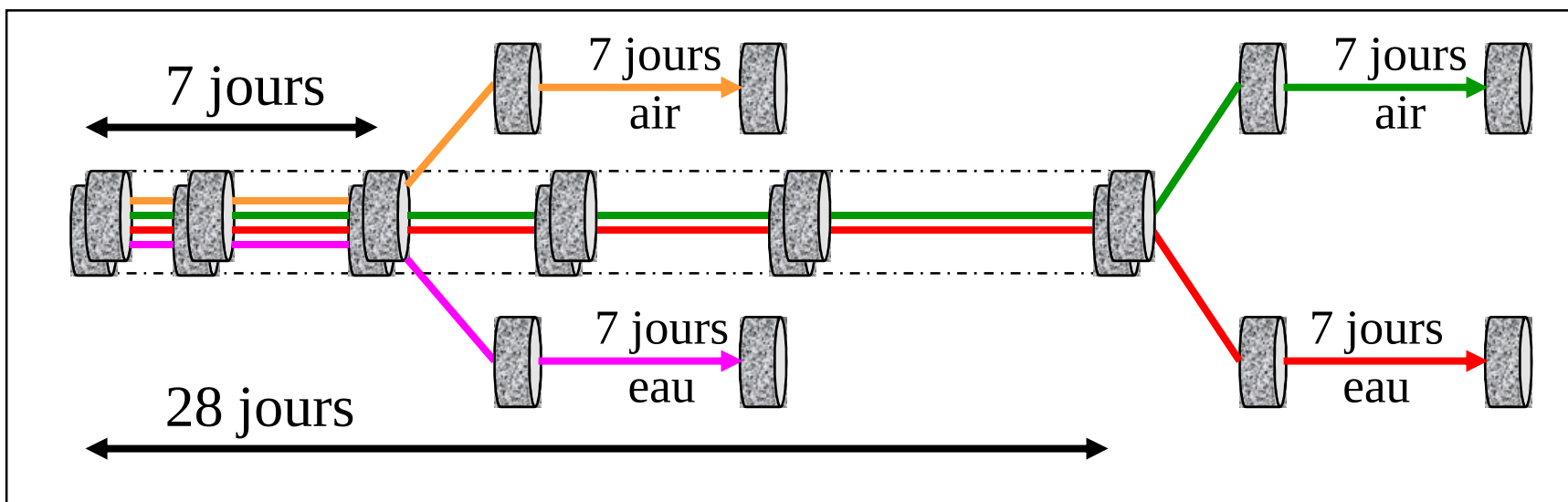




RECYCLAGE A FROID SCORE – PROP. MECANQUES

Autre procédure de mûrissement et d'essais

- Un seul laboratoire, traitement à l'émulsion seulement
- Bitume d'ajout : 2.5 ppc par rapport au fraisat
- Epreuves PCG (1.2 kg, $\Phi = 100$ mm), 85 girations
- module diamétral « NAT » à 15°C + Ind. Tens. Strength
- Mûrissement à 35°C - 20% RH

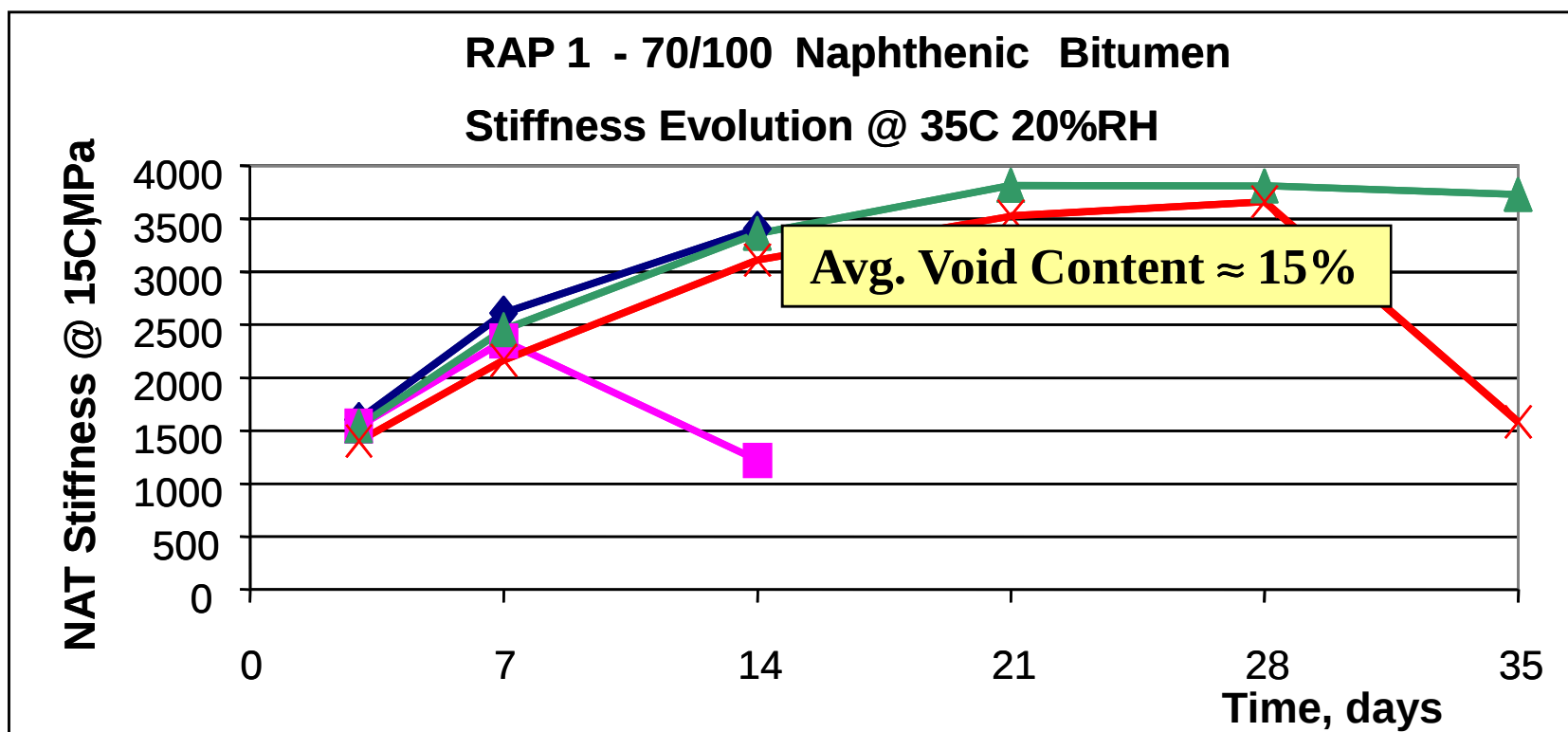




RECYCLAGE A FROID SCORE – PROP. MECANQUES

Autre procédure de mûrissement et d'essais

MODULE DIAMETRAL SUR RAP1



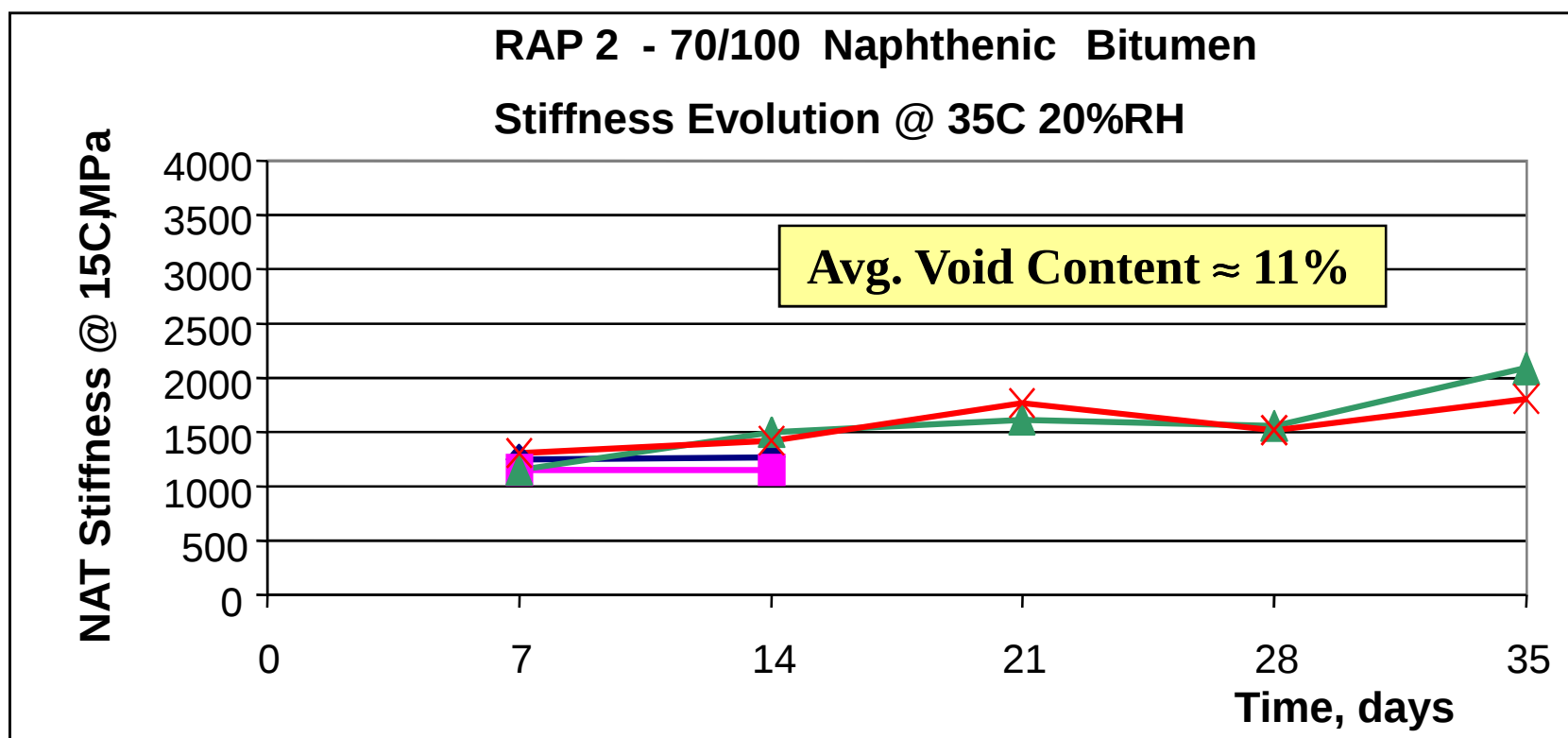
- ◆ Curing 7 days, then 18C air 7 days
 ■ Curing 7 days, then 18C immersed 7 days
- ▲ Curing until stable, then 18C air 7 days
 ✕ Curing until stable, then 18C immersed 7 days



RECYCLAGE A FROID SCORE – PROP. MECANQUES

Autre procédure de mûrissement et d'essais

MODULE DIAMETRAL SUR RAP2



- ◆ Curing 7 days, then 18C air 7days
- ◆ Curing 7 days, then 18C immersed 7days
- ◆ Curing until stable, then 18C air 7 days
- ◆ Curing until stable, then 18C immersed 7 days



RECYCLAGE A FROID SCORE – PROP. MECANQUES

Autre procédure de mûrissement et d'essais

➤ Etude de la sensibilité à l'eau

Performances nettement meilleures dans le cas du RAP2

- Caractéristiques du fraisat (teneur en liant)
- Meilleures compacités obtenues avec le RAP2

➤ Des différences par rapport à l'étude précédente

Rigidités nettement plus faibles dans le cas du RAP2

- Teneur totale en liant (fraisat + apport) trop forte ?
- Incidence de la méthode d'essai ?
 - * Traction indirecte versus compression diamétrale
 - * Dimensions des éprouvettes, amplitude des sollicitations

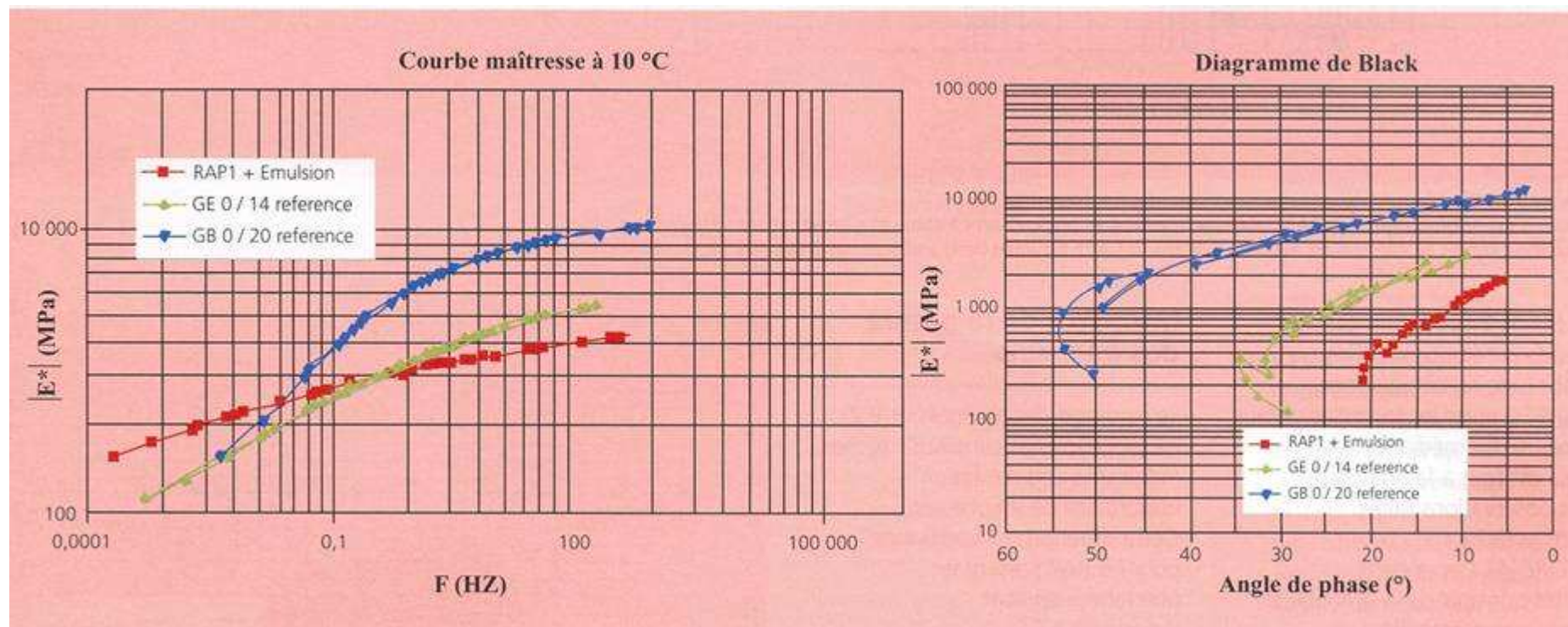


RECYCLAGE A FROID SCORE – PROP. MECANQUES

Courbes maîtresses du module complexe

Flexion 2 Pts. Sur barreaux après 14j à 35°C – 20% H R

/// COMPARAISON AVEC DES MATERIAUX DE REFERENCE



- Module de rigidité similaire à la Grave-Emulsion
- Faible susceptibilité thermique du matériau recyclé (RAP1)

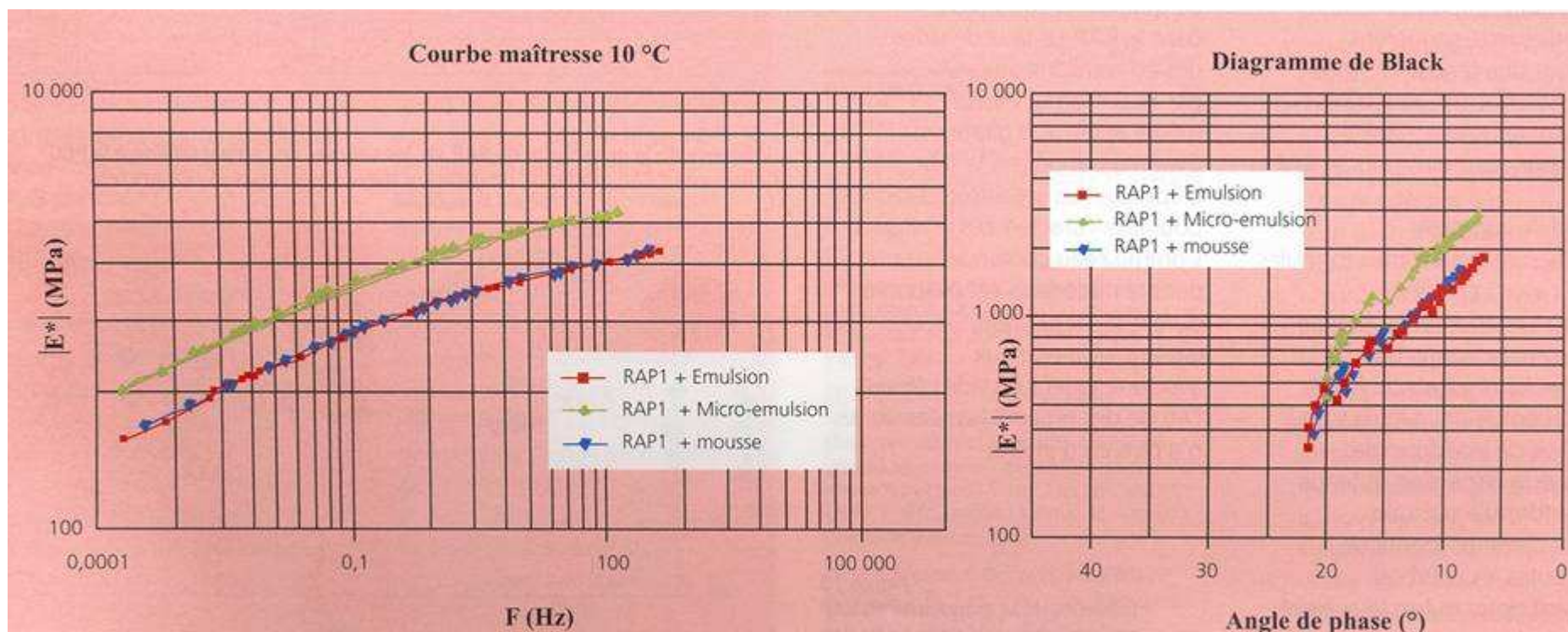


RECYCLAGE A FROID SCORE – PROP. MECANQUES

Courbes maîtresses du module complexe

Flexion 2 Pts. Sur barreaux après 14j à 35°C – 20% H R

COMPARAISON DES DIFFERENTES TECHNIQUES



- Similitude de comportement entre mousse et émulsion
- Résultats légèrement meilleurs avec la μ -émulsion



RECYCLAGE A FROID SCORE – PROP. MECANQUES

Quelques conclusions

- Les paramètres ayant l'incidence la plus significative sur la rigidité :
 - *Caractéristiques du fraisat*
 - *Compacité*
 - *Formulation de l'émulsion (Emulsion vs μ -émulsion)*
 - *La procédure d'essai (compression axiale vs diamétrale) !*
- Incidence de l'addition de ciment :
 - *Importance de l'effet sans doute tributaires d'interactions complexes selon la technique (mousse, émulsion, μ -émulsion)*
 - *Conditions de mûrissement*
- Comparaison entre les techniques à la mousse et à l'émulsion :
 - *Modules de rigidité du même ordre de grandeur*
 - *Il reste sans doute des possibilités d'optimisation, notamment avec l'émulsion*
 - *Optimisation sans doute plus facile avec la mousse dans le cas des retraitements « mixtes » (noir + blanc)*



RECYCLAGE A FROID SCORE – PROP. MECANQUES

Propositions pour une méthodologie de formulation

- Basée sur le module diamétral et la résistance à la traction indirecte
 - *Permet de travailler sur des échantillons de taille réduite (carottes de chantier)*
 - *Induit des déformations de traction ainsi qu'une propriété à la rupture (ITS)*
 - Echantillons compactés à énergie de compactage constante
 - *Permet de mettre en évidence l'aptitude intrinsèque au compactage*
 - *Procédure à ajuster sur base de matériaux de référence pour obtenir des compacités « réalistes »*
 - Procédure de mûrissement en deux étapes
 - *Première étape sous conditions ambiantes pour caractéristiques initiales*
 - *Deuxième étape accélérée (35°C-20% HR) pour obtention des propriétés finales*
- Mais point d'interrogation : formules riches en liants hydrauliques ?*



RECYCLAGE A FROID PROP. MECANQUES IN-SITU

Programme Eurovia de validation in-situ

➤ Equipment :

- Wirtgen 2200 CR
- Recyclage à l'émulsion ou à la mousse
- Addition de ciment ou de chaux



➤ Suivi de chantiers de référence :

- *Evolution du module de rigidité avec le temps (sur carottes extraites)*
- *Comparaison avec des résultats sur matériaux fabriqués et mûris en laboratoire*



RECYCLAGE A FROID PROP. MECANQUES IN-SITU

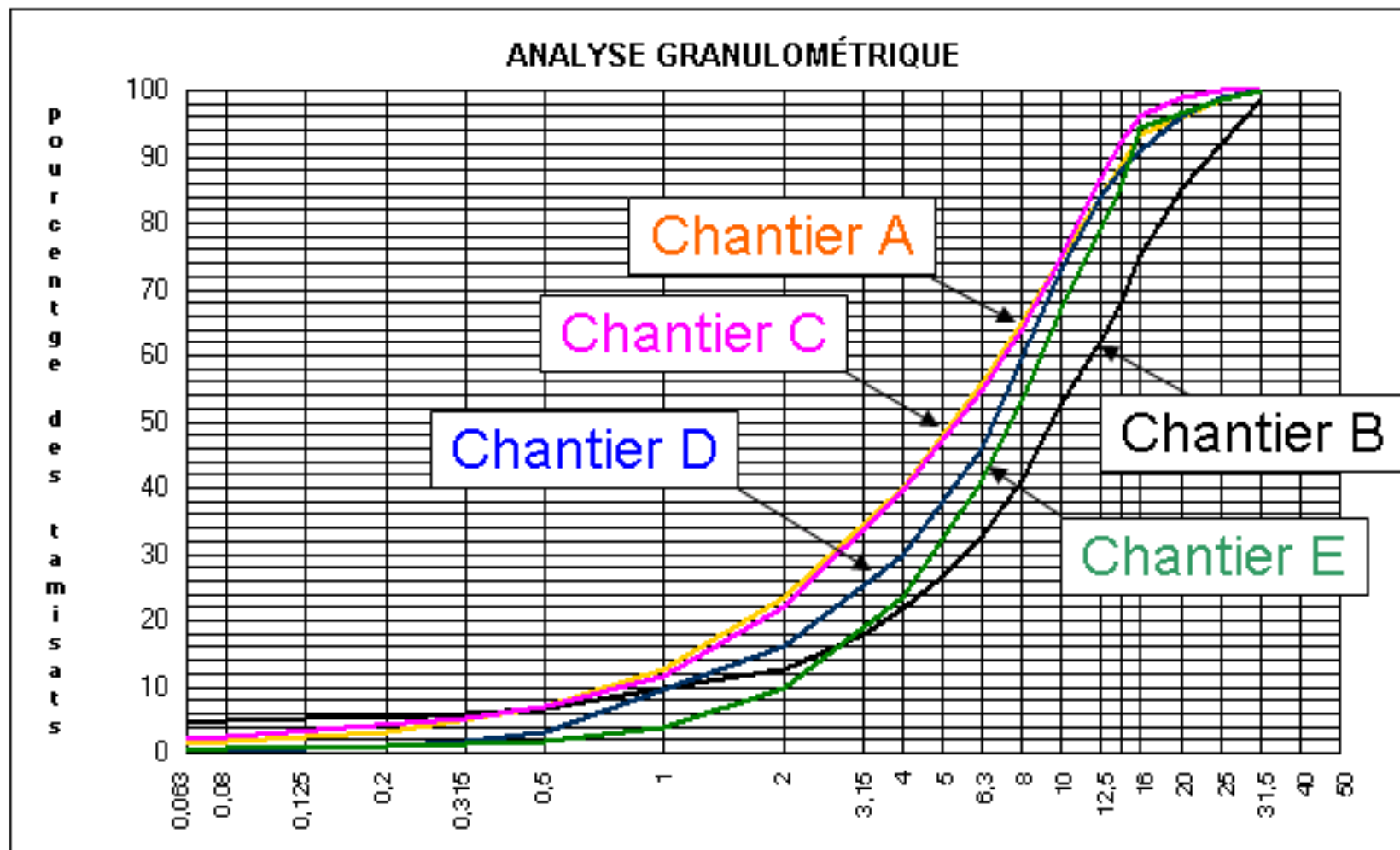
Chantiers de référence

Chantier Classe de retraitement Date du chantier et de l'échantillonnage (2006)	A Classe III 27/06	B Classe I 02/07	C Classe I 21/08	D Classe III 04/09	E Classe III 24/10
Profondeur de travail et nature des matériaux	9 cm	~ 4 cm Enduit	8 cm	7 cm	7 cm
	Enrobé Bit.	~ 11 cm Granulaire non lié	Enrobé Bit.	Enrobé Bit.	Enrobé Bit.
			8 cm Grave Pouzz.		
Teneur en bitume du fraisat (ppc)	5	-	-	5,3	5
Pénétrabilité à 25°C (mm/10)	23	-	-	11	23
Température B&A (°C)	71	-	-	70	61
Bitume d'apport (grade)	160/220	70/100	70/100	160/220	70/100
Bitume d'apport (ppc bitume résiduel)					
Emulsion (60% bitume)	1,8	4	4,2	2	2,3
Mousse de bitume					
Additif minéral d'apport (ppc)					
Ciment	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Chaux éteinte					



RECYCLAGE A FROID PROP. MECANQUES IN-SITU

Chantiers de reference



RECYCLAGE A FROID PROP. MECANQUES IN-SITU

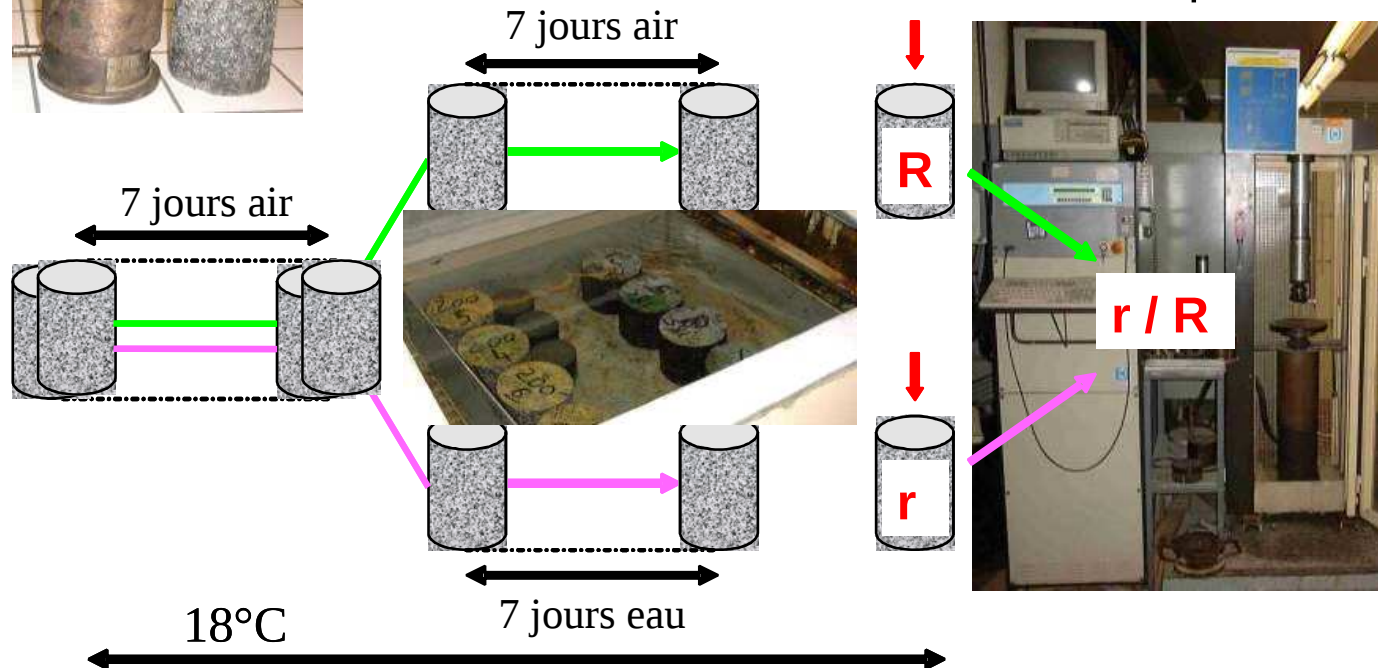
Etudes de laboratoire – Essais DURIEZ

La procédure DURIEZ pour enrobés à froid (NF P 98 252- 4)



Eprouvette ($D > 14 \text{ mm}$) : $\Phi = 120 \text{ mm}$, $M = 3,5 \text{ kg}$
2 modes de compactage statique - 40 kN pendant 300 s
- 120 kN pendant 300 s

Résistance à la compression





RECYCLAGE A FROID PROP. MECANQUES IN-SITU

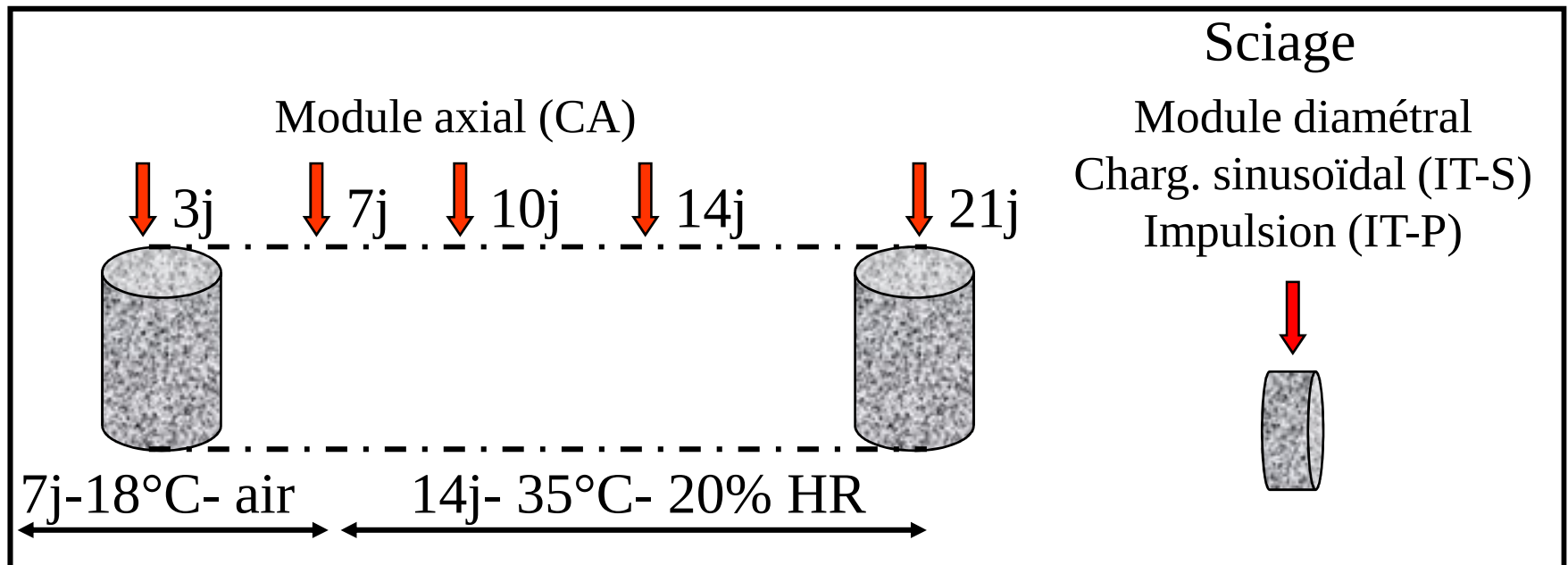
Etudes de laboratoire – Essais DURIEZ

Matériau	CLASSE III			SPECS.	CLASSE I		SPECS.
	A	D	E		B	C	
	Compactage à 120 kN				Compactage à 120 kN		
% vides (paraffine)	7,4	5,4	2,6	≤ 14	11,1	8,5	$\geq 1,5$
Rc (MPa)	7,02	6,15	6,72	≥ 5	4,22	6,15	
rc (MPa)	5,59	4,56	5,56		2,54	3,34	
r/R	0,8	0,74	0,83	$\geq 0,70$	0,6	0,54	$\geq 0,55$
	Compactage à 40 kN				Compactage à 40 kN		
% vides (paraffine)	14,2	11,8	6,7		14,2	13	
Rc (MPa)	3,83	3,34	4,37		2,71	3,86	
rc (MPa)	2,72	2,27	3,37		1,06	1,8	
r/R	0,71	0,68	0,77		0,39	0,47	



RECYCLAGE A FROID PROP. MECANQUES IN-SITU

Etudes de laboratoire – Mûrissement et modules de rigidité





RECYCLAGE A FROID PROP. MECANQUES IN-SITU

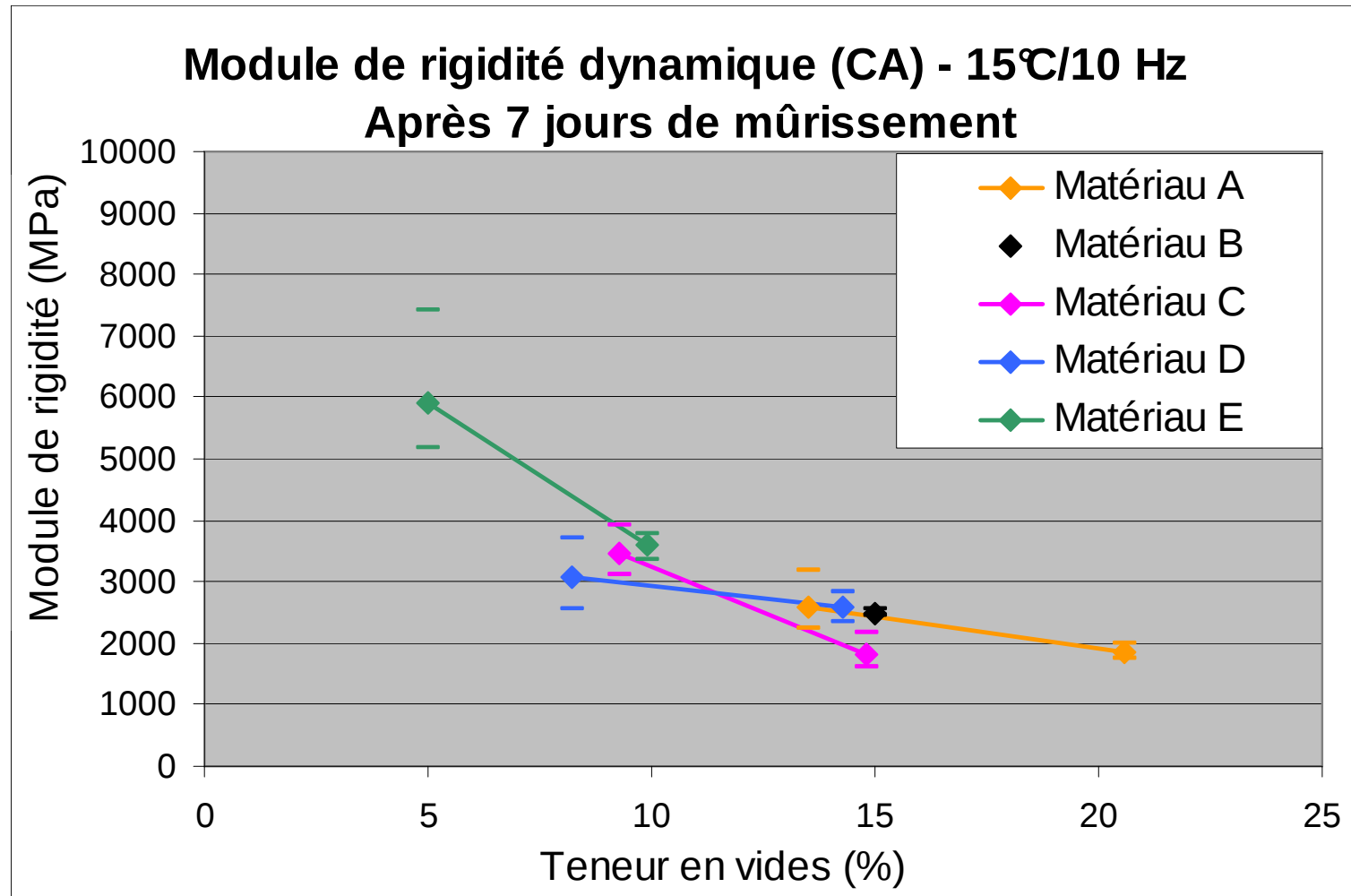
Etudes de laboratoire – Modules ultimes

Matériau	CLASSE III			CLASSE I	
	A	D	E	B	C
Teneur en vides (%)	13,5	8,2	5	-	9,3
Module de rigidité - Charg. sinusoïdal (MPa)					
CA 15°C/10Hz - 21 jours	4 800	4 900	9 200	-	6500
IT-S 15°C/10Hz - 23 à 40 jours	-	4 900	7 800	-	7200
Module de rigidité - Impulsion (MPa)					
IT-P 10°C - 30ms - 25 à 30 jours	7 900	6 500	11 000	-	9 400
IT-P 10°C - 124ms - 25 à 30 jours	5 300	4 900	7 000	-	6 700
Teneur en vides (%)	20,6	14,3	9,9	15	14,8
Module de rigidité - Charg. sinusoïdal (MPa)					
CA 15°C/10Hz - 21 jours	2 500	3 000	4 700	4 800	2 600
IT-S 15°C/10Hz - 23 à 40 jours	-	2 600	4 700	6 400	2 800
Module de rigidité - Impulsion (MPa)					
IT-P 10°C - 30ms - 25 à 30 jours	4 400	3 400	7 700	9 200	3 900
IT-P 10°C - 124ms - 25 à 30 jours	3 100	2 500	5 000	5 900	2 800



RECYCLAGE A FROID PROP. MECANQUES IN-SITU

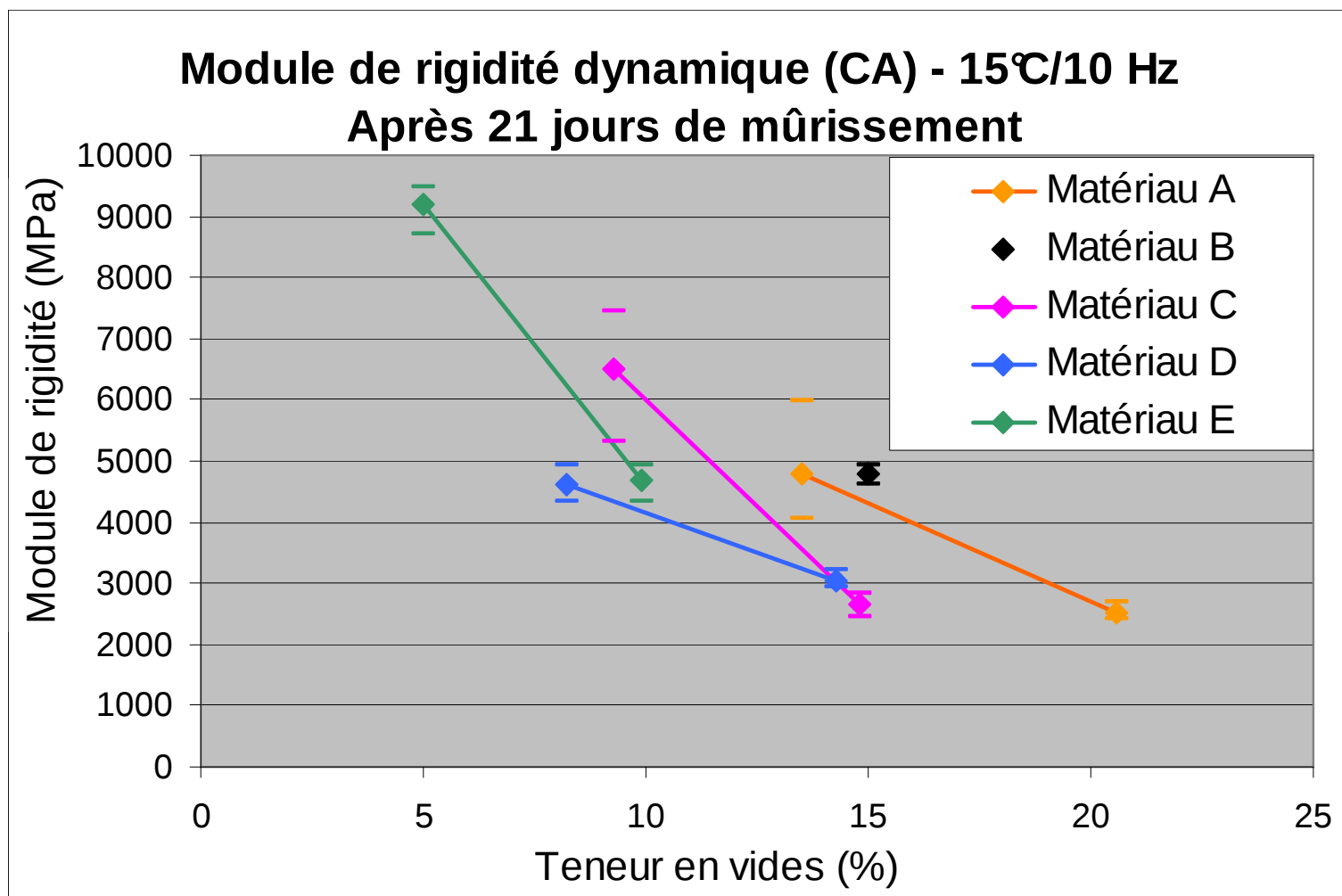
Etudes de laboratoire – Modules après 7 jours de cure





RECYCLAGE A FROID PROP. MECANQUES IN-SITU

Etudes de laboratoire – Modules après 21 jours de cure





RECYCLAGE A FROID PROP. MECANIKES IN-SITU

Etudes de laboratoire – Conclusions

➤ Essais DURIEZ

- Compacités DURIEZ très variables selon la formule
- Forte incidence de la compacité sur les résistances DURIEZ et, dans une moindre mesure, sur le rapport r/R
- Rapports r/R meilleurs dans le cas des recyclages de Classe III

➤ Modules de rigidité

- Très forte incidence de la compacité sur les valeurs de module
- Les valeurs au bout de 21 jours semblent également être très dépendantes de la formule
- Valeurs en CAS à 15°C/10Hz le plus souvent $\approx$ CDS à 15°C/10Hz
- Valeurs en CAS à 15°C/10Hz $\approx$ CD-NAT 10°C – 120 ms



RECYCLAGE A FROID PROP. MECANQUES IN-SITU

Prélèvements de carottes in-situ

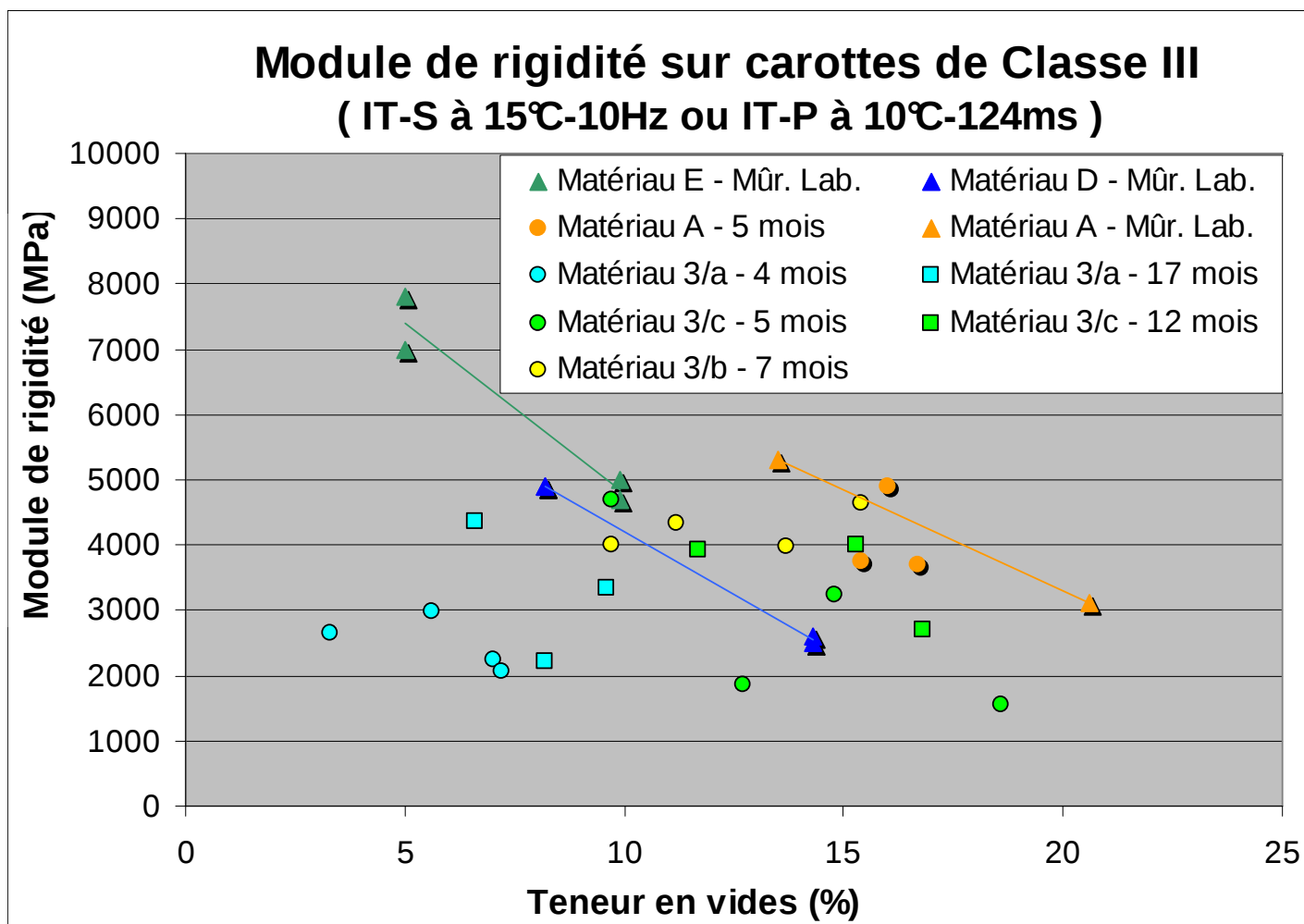
Chantiers de référence + quelques chantiers additionnels

Chantier	Chantiers de retraitement retenus pour le prélèvement de carottes								
	Classe III						Classe I		
	A	D	E	3/a	3/b	3/c	B	C	1/a
Recycling depth and nature of materials	9 cm	7 cm	7 cm	8 cm	8 cm	7 cm	~ 4 cm Surf. Dres.	8 cm	10 cm
	Enrobé Bit.	Enrobé Bit.	Enrobé Bit.	Enrobé Bit.	Enrobé Bit.	Enrobé Bit.	~ 11 cm Granulaire non lié	Enrobé Bit.	Enrobé Bit.
								8 cm Grave Pouzz.	10 cm Grave-laitier
Teneur en bitume du fraisat (ppc)	5	5,3	5	6,2	5,7	5,1	-	2,9	2,2
Pénétrabilité à 25°C (mm/10)	23	11	23	30	23	28	-	33	-
Température B&A (°C)	71	70	61	60	65	67	-	62	-
Bitume d'apport (grade)	160/220	160/220	70/100	160/220	160/220	160/220	70/100	70/100	70/100
Bitume d'apport (ppc bitume résiduel)									
Emulsion (60% bitume)	1,8	2		2,3	1,5	1,8		4,2	4
Mousse de bitume			2,3				4		
Additif minéral d'apport (ppc)									
Ciment	0,5	0,5		0,5	0,5	0,5			
Chaux éteinte			0,5				0,5	0,5	0,5



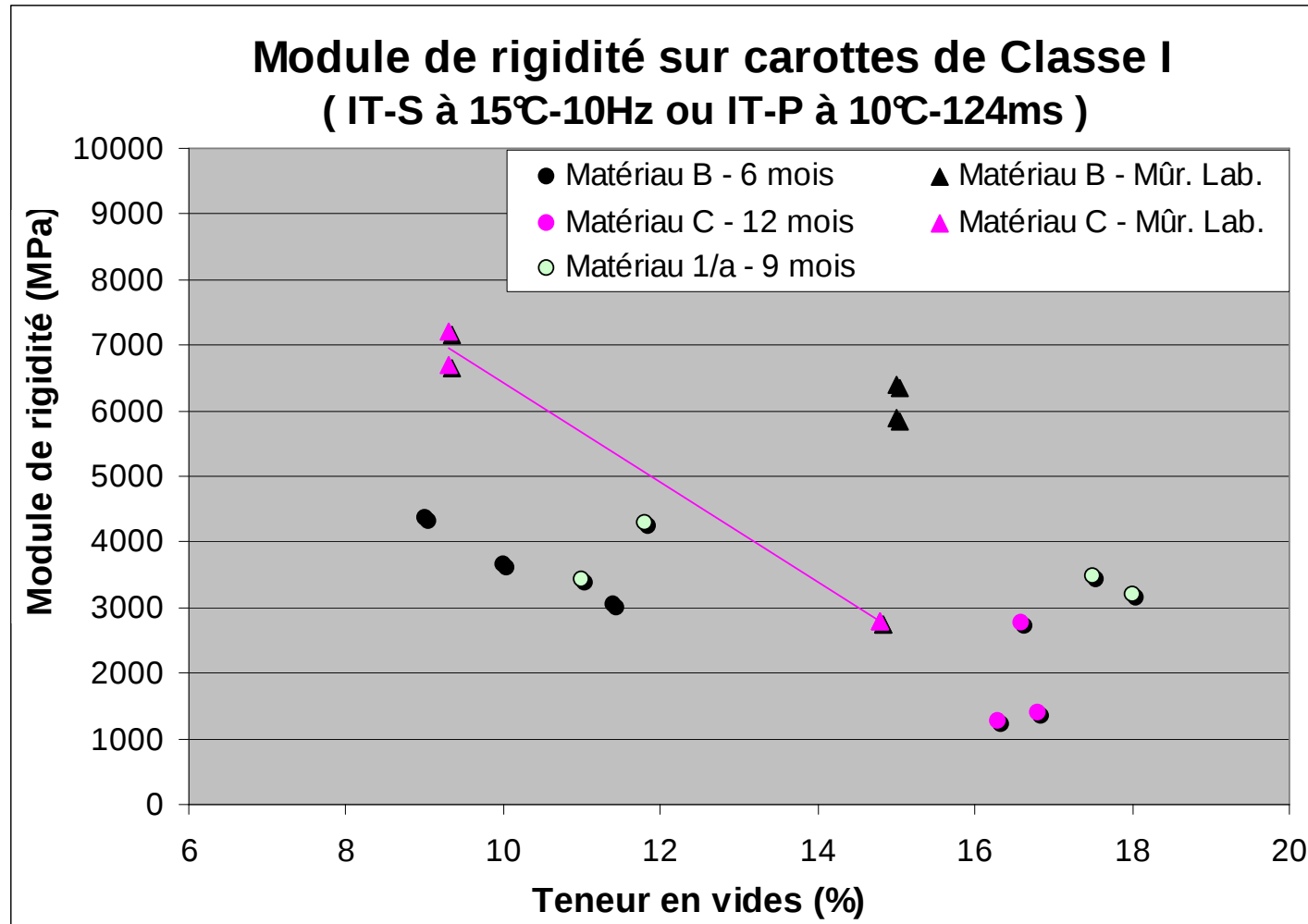
RECYCLAGE A FROID PROP. MECANQUES IN-SITU

Comparaison Laboratoire / In-situ : Chantiers de Classe III



RECYCLAGE A FROID PROP. MECANQUES IN-SITU

Comparaison Laboratoire / In-situ : Chantiers de Classe I





RECYCLAGE A FROID PROP. MECANQUES IN-SITU

Propriétés in-situ – Conclusions

- Très forte variabilité des compacités
 - Hétérogénéité des matériaux
 - Variabilité de portance des structures sous-jacentes
- Corrélation Module de Rigidité / Teneur en vides
 - Moins forte que dans le cas des études de laboratoire
 - Hétérogénéité des compositions ?
- Obtention des valeurs maximales in-situ
 - Durées d'obtention des valeurs maximales variables selon les formulations
 - Les valeurs maximales semblent devoir être obtenues plus rapidement pour les matériaux de Classe III
 - Accord avec mûrissement en laboratoire à confirmer



RETRAITEMENT A FROID RECHERCHES & EVOLUTIONS

QUELQUES CONCLUSIONS

- Une recherche active
 - Intérêt économique et environnemental du retraitement in-situ
 - Rentabilisation d'un investissement lourd
 - Recherche d'un avantage compétitif
- Une recherche multi-forme
 - Caractérisation des matériaux
 - Optimisation des matériaux
 - Optimisation des matériels et procédés (cf. perspectives de développement)
- Des évolutions en perspective
 - Amélioration des performances
 - Extension du domaine d'application : trafic, période de mise en oeuvre



RETRAITEMENT A FROID RECHERCHES & EVOLUTIONS

