



Une société de VINCI 



Travaux routiers | Matériaux routiers et industries | Environnement

PERFORMANCES MECANQUES ET DIMENSIONNEMENT

Bernard ECKMANN

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



SOMMAIRE

➤ Performances mécaniques

- Caractéristiques usuelles, module de rigidité
- Limites des méthodes d'essai classiques
- Evolution des procédures : fabrication des éprouvettes, mûrissement accéléré,...

➤ Dimensionnement

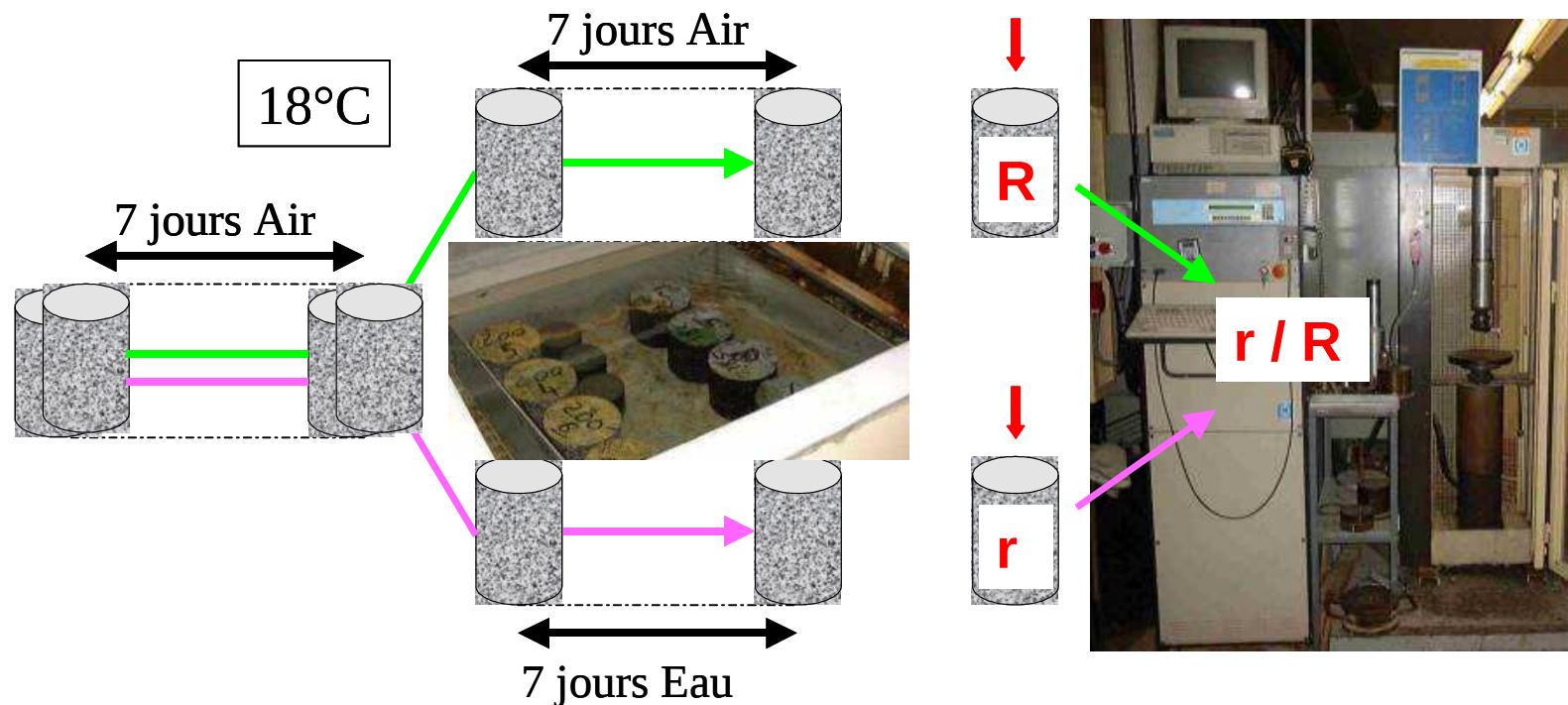
- Recommandations du Guide français du Retraitement en place à froid
- Méthodes suggérées par le « Cold Recycling Manual » de WIRTGEN
 - * *Approche par « Coefficients Structurels »*
 - * *Approche « Mécanistique »*
 - * *Calculs faisant appel à des « Contraintes Limites »*

RETRAITEMENT A FROID PERFORMANCES MECANQUES

Résistance en compression simple ou stabilité Marshall

Rapport « immersion/compression » → Tenue à l'eau, durabilité

Exemple : Procédure DURIEZ (NF P 98 254-1)





RETRAITEMENT A FROID PERFORMANCES MECANIQUES

Résistance en compression diamétrale

Rapport « immersion/compression » → Tenue à l'eau, durabilité

Exemple : Système de classification établi en Afrique du Sud pour les matériaux traités à la mousse de bitume [1]

		Résistance en compression diamétrale à 25°C (kPa)	
		100 - 300	300 - 500
Résistance en compression simple à 25°C (kPa)	700 - 1400	FB4	FB3
	1400 - 2000	FB2	FB1



RETRAITEMENT A FROID PERFORMANCES MECANIQUES

Module de rigidité

Peut être estimé à partir des caractéristiques de résistance en compression ou en traction indirecte

→ Ex. Guide français du Retraitement en place [2]

Peut être mesuré directement :

- Exemples :
- Module en compression diamétrale
 - Module en compression axiale
 - Module résilient par essais triaxiaux

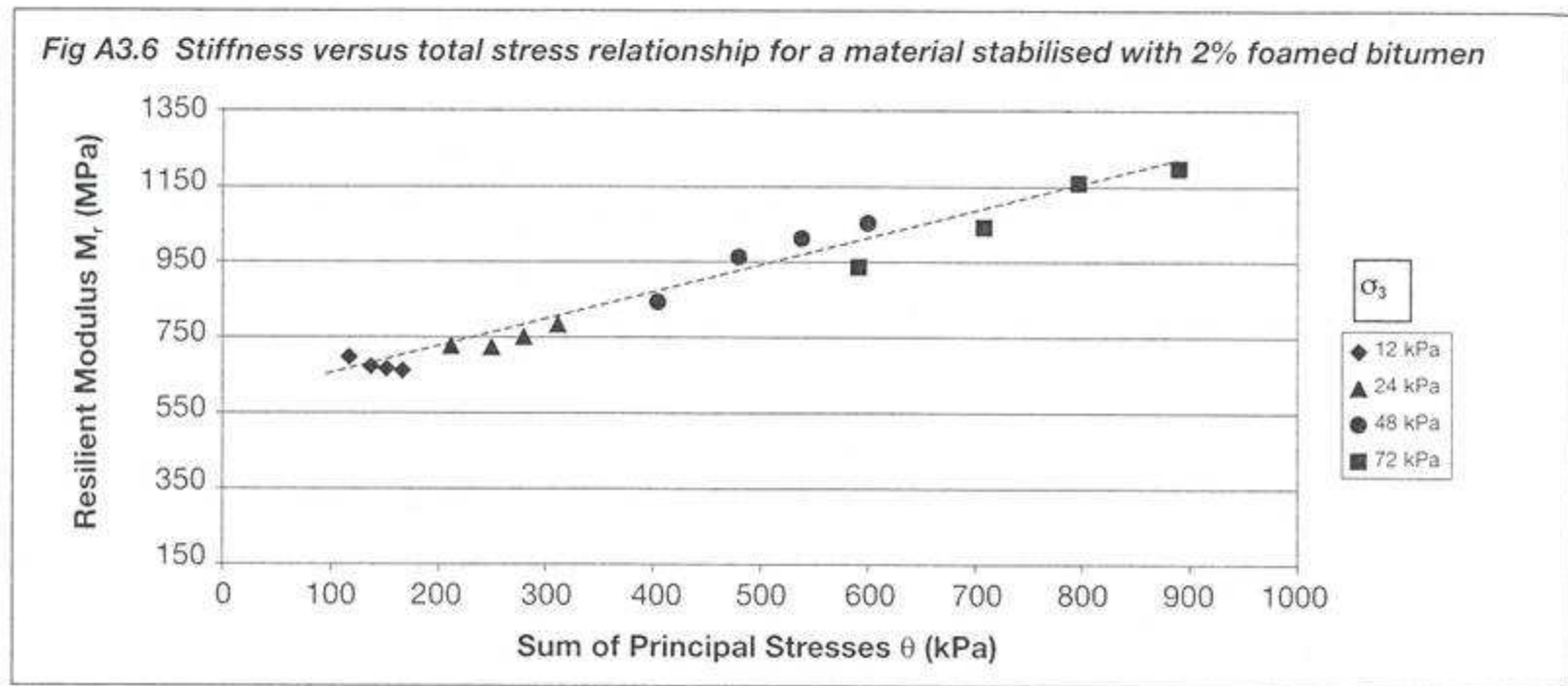


RETRAITEMENT A FROID PERFORMANCES MECANQUES

Module de rigidité par essais triaxiaux

Module résilient en fonction du champ des contraintes principales

- Nécessite un grand nombre d'essais
- Utilisé dans des modélisations „fines“
(matériaux dépendant du champ des contraintes, calculs par éléments finis) [3]



Limites des méthodes d'essai classiques

➤ Procédures de compactage mal adaptées

- * Pression de compactage statique trop forte

 - ➔ Teneurs en vides trop faibles par rapport au chantier

- * Evacuation de l'eau à prévoir (essai PCG, ...)

➤ Matériau évolutif

Rupture et coalescence de l'émulsion, mûrissement

- * Cohésion initiale faible : ➔ problèmes de fabrication des éprouvettes d'essai

 - ➔ problèmes opératoires pour des essais au jeune âge

- * Nécessité d'introduire une procédure de mûrissement accéléré

RETRAITEMENT A FROID PERFORMANCES MECANQUES

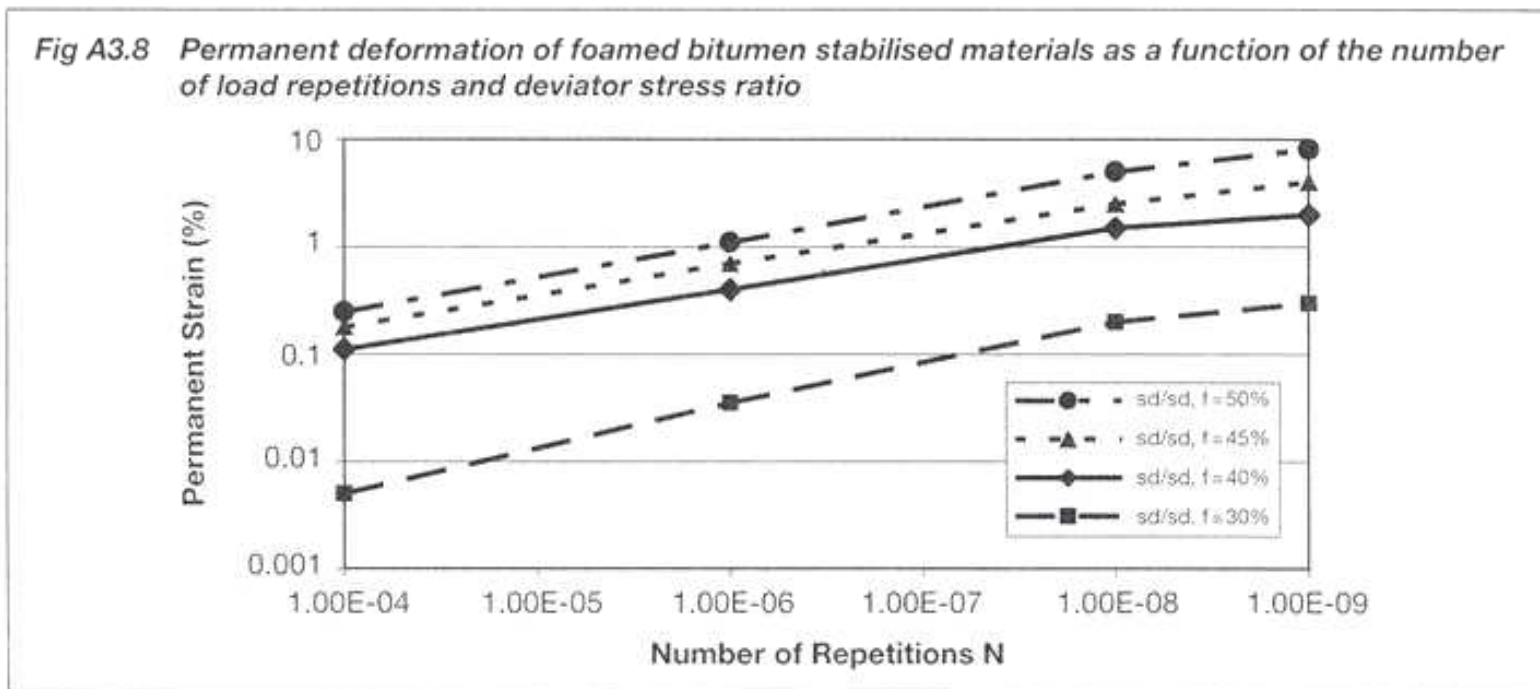
Limites des méthodes d'essai classiques

➤ Essais d'endommagement « classiques » peu applicables

* Orniérage

* Fatigue

➔ Essais triaxiaux : comportement en déformation permanente [3]





RETRAITEMENT A FROID PERFORMANCES MECANIQUES

Limites des méthodes d'essai classiques

➤ Essais d'endommagement « classiques » peu applicables

➔ On se rabat sur des « fonctions de transfert » issues d'essais sur manège ou du suivi de sections expérimentales [3]

$$N_{EF} = 10^{[6.499 - 0.708 (\varepsilon/\varepsilon_b)]}$$

[Equation A 3.2]

$$N_{PD} = \frac{1}{30} \times 10^{[-1.951 + 11.938 \times RD + 0.0726 \times PS - 1.628 \times SR + 0.68 \times (\text{cem/bit})]}$$

[Equation A 3.3]

where:

RD	=	Dry Density / Apparent Density = 2145 / 2600 = 0.825
PS	=	Percentage strain = Allowable rut/Layer Thickness = 18 / 200 x 100 = 9 %
SR	=	Stress Ratio = $(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_{1,max} - \sigma_3) = (685 - 167) / (\sigma_{1,max} - 167) = 0.257$
$\sigma_{1,max}$	=	$[(1 + \sin\phi) \times \sigma_3 + 2C \times \cos\phi] / (1 - \sin\phi) = 2180 \text{ kPa}$
Cem/bit	=	1/2.25 = 0.444



RETRAITEMENT A FROID PERFORMANCES MECANQUES

D'importants efforts de recherche

- Au niveau des entreprises
- Au niveau de la profession (USIRF)
- Au niveau européen
 - * Programme **OPTEL** : Emulsions pour enrobés à froid
 - * Programme **SCORE** : Recyclage en place à froid
 - 100% fraisats bitumineux*
 - Mousse de bitume / Emulsion / μ -Emulsion*
- Confrontation Laboratoire / Chantier



RETRAITEMENT A FROID PERFORMANCES MECANIQUES

Exemples d'évolution des méthodes d'essai

- Méthodes de compactage mieux adaptées
Pour se rapprocher des compacités obtenues sur chantier
 - Diminution de la charge appliquée lors du compactage DURIEZ
 - ➔ Introduction d'une 2^{ème} modalité (charge statique divisée par 3)
 - Utilisation de la PCG (arrêt à l'obtention de la compacité souhaitée)
Enregistrement des pertes en eau au cours du compactage
- Introduction de procédures de mûrissement accéléré
 - ➔ Suivi du module de rigidité tout au long du processus de mûrissement



RETRAITEMENT A FROID PERFORMANCES MECANQUES

Essai DURIEZ – Incidence de la pression de compactage

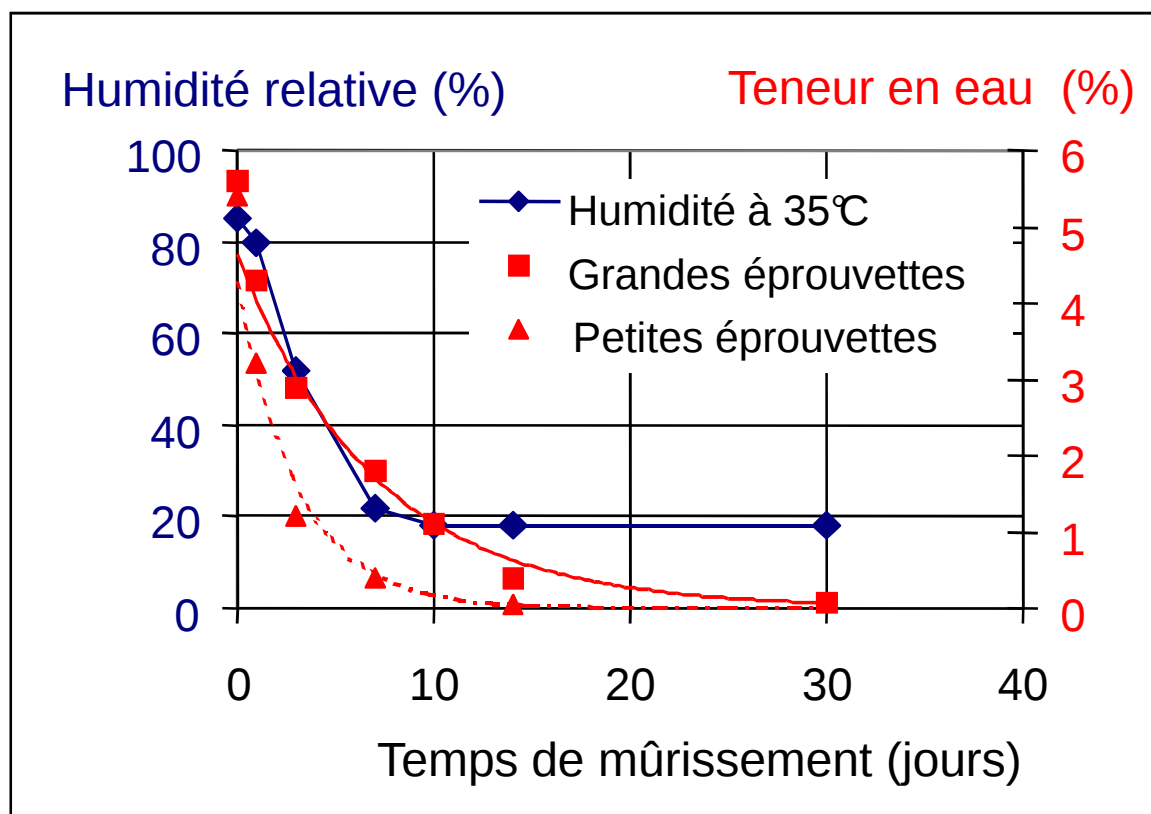
Exemple : Etudes DURIEZ effectuées pour différents chantiers

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 ≥ 5 ≥ 0,70	11,1	8,5	≥ 1,5 ≥ 0,55
Rc (MPa)	7,02	6,15	6,72		4,22	6,15	
rc (MPa)	5,59	4,56	5,56		2,54	3,34	
r/R	0,8	0,74	0,83		0,6	0,54	
	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	

RETRAITEMENT A FROID PERFORMANCES MECANQUES

Méthode de mûrissement accéléré

14 jours – 35°C – 20 % Humidité relative



Serfass, J.P., Henrat, J.P., Carbonneau, X. - Eurobitumes&Eurasphalt Congress, Vienna 2004, Paper 113

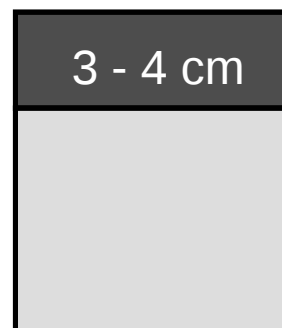


RETRAITEMENT A FROID DIMENSIONNEMENT

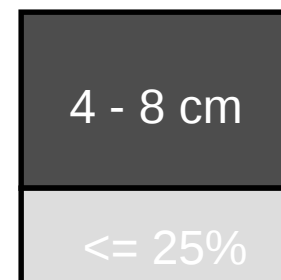


« Guide français du Retraitement en place à froid des anciennes chaussées » (2003) [2]

Classe I



Classe II



Classe III



	Classe I	Classe II	Classe III
Objectif	Renforcement Struct.	Rénovation de la couche de roulement	
Type de bitume (Emulsion)	Bitume pur 70/100 ou 160/220	Bitume pur ou de régénération	Bitume de régénération
Bitume d'ajout	3 à 5%	1 à 3%	jusqu'à 2%



RETRAITEMENT A FROID DIMENSIONNEMENT

« Guide du Retraitement en place à froid »

Caractéristiques exigées du matériau retraité (recyc.à l'émulsion)

	Classe I	Classe II	Classe III
Procédure DURIEZ (Modalité 1)			
Teneur en vides		$\leq 15\%$	$\leq 14\%$
Résistance à la compression (air) R	$\geq 1,5 \text{ MPa}$	$\geq 3 \text{ MPa}$	$\geq 5 \text{ MPa}$
Tenue à l'eau r/R	$\geq 0,55$	$\geq 0,65$	$\geq 0,70$
Compactage gyratoire (PCG)			
Teneur en vides à 100 gyrations		$\leq 25\%$	$\leq 25\%$
Diminution de la Temp. B&A		5 à 15 °C	5 à 15 °C

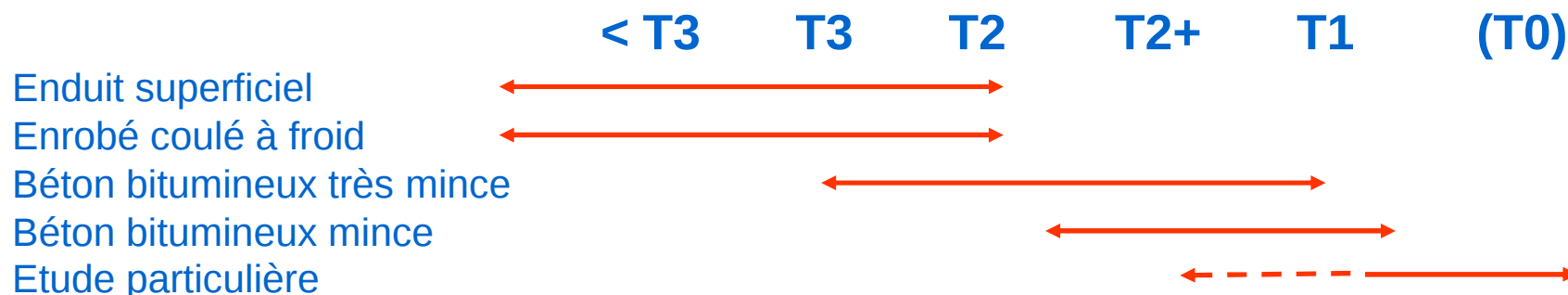


RETRAITEMENT A FROID DIMENSIONNEMENT

« Guide du Retraitement en place à froid »

Principes de dimensionnement

- Etude de dimensionnement non systématique
 - Chaussées de trafic supérieur à T3 (150 PL/j/s)
 - En cas d'insuffisance structurelle majeure
- Choix de la couche de roulement en fonction du trafic



- Modules de rigidité : Valeurs « minimales » définies en fct. des résistances en compression
- Critères d'endommagement :
 - Déformations permanentes du sol support
 - Déformations permanentes du matériau retraité
 - Fatigue éventuelle de la couche de couverture



RETRAITEMENT A FROID DIMENSIONNEMENT

« Guide du Retraitement en place à froid »

Principes de dimensionnement

Modules de rigidité et critères de dimensionnement préconisés

	Module à considérer		Critère de dimensionnement
Classe I	1,5 MPa < R < 2,2 MPa 2,2 MPa < R < 3 MPa	1 500 MPa 2 500 MPa	ϵ_z sur sol support
Classe II 75 à 90% de fraisat bitumineux	R < 4 MPa R >= 4 MPa	2 000 MPa 3 000 MPa	ϵ_z sur sol support et sur la couche retraitée
plus de 90% de fraisat bitumineux	R < 4 MPa R >= 4 MPa	3 000 MPa 4 000 MPa	ϵ_t à la base de la couverture bitumineuse si e >= 4cm
Classe III		4 000 MPa	ϵ_z du sol support ϵ_t à la base de la couverture bitumineuse si e >= 4cm

ϵ_z admissible : loi de type $\epsilon_{zadm} = \alpha N^\beta$

ϵ_t admissible : loi de fatigue des enrobés (déformation contrôlée)



RETRAITEMENT A FROID DIMENSIONNEMENT

« Manuel WIRTGEN » [3]

Exposé de 3 « niveaux » de méthodes de dimensionnement

- Trafics faibles ($< 5 \times 10^6$ ESALs) ou études préliminaires
 - ➔ Méthode basée sur la méthode AASHTO des „Coefficients structurels“
- Trafics moyens à forts ($5 \times 10^6 < < 10 \times 10^6$ ESALs)
 - ➔ Approche mécanistique, comme par ex. la méthode Sud-Africaine
 - ➔ Modélisation de la structure et des matériaux
 - ➔ Lois de comportement exprimées en fonction des contraintes et déformations calculées
- Trafics forts ($> 10 \times 10^6$ ESALs)
 - ➔ Exemple : recherche effectuée aux Pays-Bas (TU Delft) ou en Afrique du Sud [4, 5]
 - ➔ Prise en compte de la dépendance du module de rigidité envers l'état des contraintes, définition des états limites (enveloppe des cercles de Mohr-Coulomb) par essais triaxiaux.
 - ➔ Comparaison de l'état des contraintes généré dans la structure et des états limites (modélisation par éléments finis)



RETRAITEMENT A FROID DIMENSIONNEMENT

« Manuel WIRTGEN » *Suggested structural layer coefficients for foamed bitumen stabilised material*

Coefficients
structurels

Matériau recyclé

« Structural layer coefficient »
(/ cm ou / inch)

Données mécaniques
(ITS, ITSR, ...)

Caractéristiques de composition

per cm	0.051		0.063	0.083	0.103	0.120	0.140
per inch	0.13		0.16	0.21	0.26	0.30	0.35
STRUCTURAL LAYER COEFFICIENTS AFTER STABILISATION							
INDICATIVE FIELD STIFFNESS							
Initial Stiffness Phase 1 (MPa)	500		750	1000	1500	2000	3000
Steady Stiffness Phase 2 (MPa)	250		450	600	800	1000	1500
Indirect Tensile Strength (kPa)	100		150	200	300	400	500
ANTICIPATED MATERIAL CHARACTERISTICS (AFTER STABILISATION) Note: 1. For design traffic greater than 300 000 ESALs the Indirect Tensile Strength (ITS) value should always be obtained from the foamed bitumen mix design. 2. See table below for appropriate Tensile Strength Ratio (TSR)							
EXPECTED APPLICATION RATE OF FOAMED BITUMEN FOR STABILISATION (% by mass)							
	4 1/2	4	3 1/2	3	2 1/2		



RETRAITEMENT A FROID DIMENSIONNEMENT

« Manuel WIRTGEN »

Méthode des coefficients structurels

- Chaque couche de la structure envisagée est définie par :
 - Son coefficient structurel a_i (dépend des caractéristiques du matériau)
 - Son épaisseur envisagée h_i
 - Un coefficient de drainage d_i (dépend de la nature de la couche et de l'environnement)
- Nombre Structurel Requis pour la chaussée réhabilitée (SN_{req}) :
Défini selon le trafic et le niveau de performance (PSI) souhaités
- Principe du dimensionnement

Connaissant les coefficients structurels des différents matériaux et du matériau recyclé, on ajuste les épaisseurs (matériau recyclé + éventuellement celle de la couverture bitumineuse) jusqu'à ce que :

$$SN_{act} = \sum a_i \times h_i \times d_i \geq SN_{req}$$



RETRAITEMENT A FROID DIMENSIONNEMENT

« Manuel WIRTGEN »

Approche mécanistique

- Prise en compte de deux phases de comportement in-situ

PHASE 1 : Mise en place („Seating-in“)

- ➔ Après l'augmentation de module due au mûrissement et stabilisation de la teneur en eau
- ➔ Le matériau « travaille » : Perte progressive de rigidité et un peu de déformation permanente
Notion de « fatigue effective »

PHASE 2 : Phase stabilisée

- ➔ Stabilisation du module à une valeur inférieure à celle obtenue après mûrissement mais supérieure à celle d'un matériau non traité
- ➔ Endommagement par déformation permanente sous l'effet des contraintes



RETRAITEMENT A FROID DIMENSIONNEMENT

« Manuel WIRTGEN »

Approche mécanistique

- Module Résilient du matériau retraité

Valeurs établies à partir d'essais de traction indirecte (ITS, TSR) et de compression axiale (UCS)

PHASE 1:

$$MR_{\text{Phase 1}} = (\log (ITS_{\text{equ}}) \times 3950 - 7000) \times \text{TSR} \times F_{\text{drainage}}$$

Equation 1

PHASE 2:

$$MR_{\text{Phase 2}} = \frac{M_{\text{Phase 1}} \times \text{TSR}}{(0.5 \times \text{UCS}_{\text{equ}}) + 0.7}$$

Equation 2

where:

$MR_{\text{Phase 1}}$	= Resilient Modulus during Phase 1	[MPa]
ITS_{equ}	= ITS at equilibrium moisture content	[kPa]
TSR	= tensile strength retained (ratio of soaked to unsoaked ITS values)	
F_{drainage}	= Drainage factor determined from Table 4.9	
$MR_{\text{Phase 2}}$	= Steady State Resilient Modulus	[MPa]
UCS_{equ}	= UCS at equilibrium moisture content	[MPa]



RETRAITEMENT A FROID DIMENSIONNEMENT

« Manuel WIRTGEN »

Approche mécanistique

- Exemples de Modules Résilient du matériau retraité en Phase 1

<i>Table 4.7 Typical indirect tensile strengths of bitumen stabilised materials</i>			
<i>Material Type</i>	<i>100 mm dia Marshall briquettes</i>		<i>150 mm dia Proctor briquette</i>
	<i>ITS_{dry} (kPa)</i>	<i>TSR (ratio)</i>	<i>ITS_{equ} (kPa)</i>
RAP/crushed stone (50:50)	250 to 600	0.8 to 1.0	120 to 250
Graded crushed stone	200 to 500	0.6 to 0.9	120 to 200
Gravel (PI < 10, CBR < 30)	150 to 450	0.3 to 0.75	80 to 150

On en déduit (Equation 1) :

<i>Material Type</i>	Valeurs de MR _{Phase 1} (MPa)
RAP/crushed stone (50:50)	~ 850 - 3000
Graded crushed stone	~ 650 - 2500
Gravel (PI < 10, CBR < 30)	~ 100 - 1500



RETRAITEMENT A FROID DIMENSIONNEMENT

« Manuel WIRTGEN »

Approche mécanistique

- Exemples de Modules Résilient du matériau retraité en Phase 2

<i>Table 4.10 Resilient Moduli ranges for bitumen stabilised material after reaching the steady state (Phase 2)</i>		
<i>Material type</i>	<i>Foamed bitumen added (%)</i>	<i>Resilient Modulus $MR_{Phase\ 2}$ (MPa)</i>
100 % RAP	1.5 to 2.0	1000 to 2500
RAP / crushed stone (50:50 blend)	2.0 to 2.5	800 to 2000
Graded crushed stone	2.0 to 3.0	600 to 1500
Natural gravel (PI < 10, CBR > 45)	2.0 to 3.5	400 to 800
Natural gravel (PI < 10, CBR > 25)	2.5 to 4.0	300 to 600
Non-plastic sands	3.0 to 5.0	200 to 500



RETRAITEMENT A FROID DIMENSIONNEMENT

« Manuel WIRTGEN »

Approche mécanistique

- Critères de dimensionnement

- ϵ_t à la base de la couverture bitumineuse (enrobé neuf), loi de fatigue de l'enrobé
- Matériau retraité en PHASE 1 :
 - * ϵ_t à la base de la couche
 - * « Loi de fatigue » (N_{EF})
- Matériau retraité en PHASE 2 :
 - * Contraintes σ_1, σ_3 à $\frac{3}{4}$ dans la couche
 - * « Loi de déformation permanente » (N_{PD})

$$N_{EF} = 10^{[6.499 - 0.708 (\epsilon/\epsilon_b)]}$$

[Equation A 3.2]

$$N_{PD} = \frac{1}{30} \times 10^{[-1.951 + 11.938 \times RD + 0.0726 \times PS - 1.628 \times SR + 0.68 \times (cem/bit)]}$$

[Equation A 3.3]



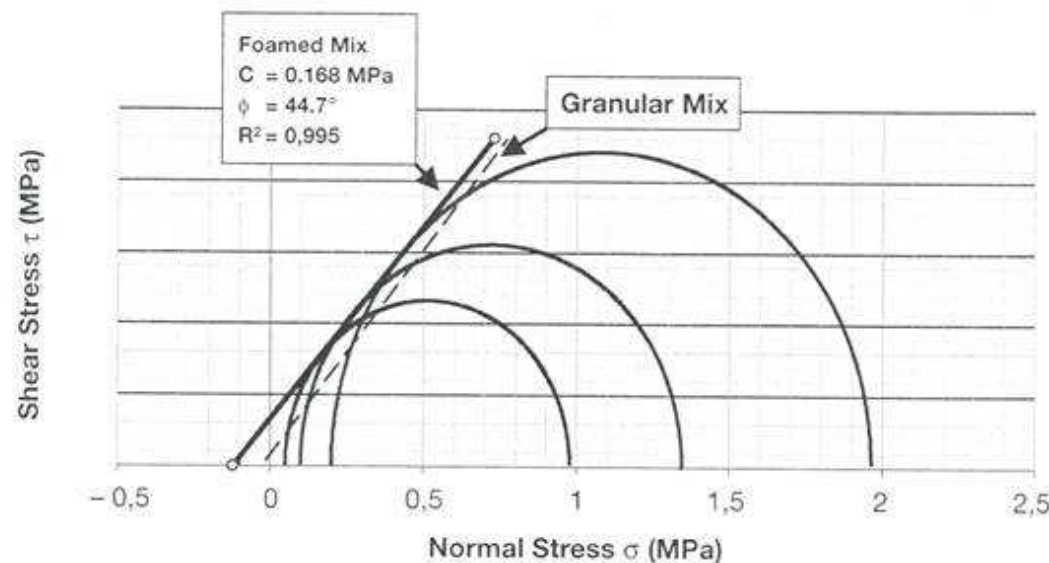
RETRAITEMENT A FROID DIMENSIONNEMENT

« Manuel WIRTGEN »

Méthode des « Ratios de contraintes »

- Définition des caractéristiques de rupture (C, Φ) du matériau retraité
(cf. mat. granulaires : enveloppes de rupture des cercles de Mohr-Coulomb)

Fig A3.5 Typical Mohr-Coloumb plot of shear parameters for graded crushed stone, unstabilised and stabilised with 2% foamed bitumen and 1% cement



➔ Contraintes limites :

$$\sigma_{1,f} = \frac{(1 + \sin\phi) \sigma_3 + 2 \times C \times \cos\phi}{(1 - \sin\phi)}$$



RETRAITEMENT A FROID DIMENSIONNEMENT

« Manuel WIRTGEN »

Méthode des « Ratios de contraintes »

- Mesure du Module Résilient en fonction de l'état des contraintes par essais triaxiaux

$$M_r = k_1 \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^{k_2}$$

$$M_r = k_5 \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^{k_6} \left(1 - k_7 \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{d,f}} \right)^{k_6} \right)$$

where:	M_r	= Resilient Modulus	[MPa]
	θ	= sum of principal stresses = $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$	[kPa]
	θ_0	= reference value (= 1 kPa)	
	σ_3	= minor principal stress	[kPa]
	σ_d	= deviator stress ($\sigma_1 - \sigma_3$)	[kPa]
	$\sigma_{d,f}$	= deviator stress at failure ($\sigma_{1,f} - \sigma_{3,f}$)	[kPa]
	$k_1 \dots k_8$	= regression coefficients	



RETRAITEMENT A FROID DIMENSIONNEMENT

« Manuel WIRTGEN »

Méthode des « Ratios de contraintes »

- Module Résilient en fonction de l'état des contraintes : exemples

Table A3.14 Typical M_r coefficients for granular materials and equivalent foamed bitumen mixes

<i>Material</i>	<i>Model</i>	k_1	k_2	R_2		
Foamed bitumen treated granular base	$M_r - \theta$	132.5	0.319	0.94		
<i>Material</i>	<i>Model</i>	k_5	k_6	k_7	k_8	R_2
Granular Base	$M_r - \sigma_3 - \sigma_1/\sigma_{1,f}$	350.0	0.300	0.600	0.100	0.69
Foamed bitumen treated granular base	$M_r - \theta - \sigma_1/\sigma_{1,f}$	30.0	0.600	0.700	1.000	0.89
Foamed bitumen treated granular base	$M_r - \theta - \sigma_d/\sigma_{d,f}$	48.0	0.500	0.500	1.200	0.90



RETRAITEMENT A FROID DIMENSIONNEMENT

« Manuel WIRTGEN »

Méthode des « Ratios de contraintes »

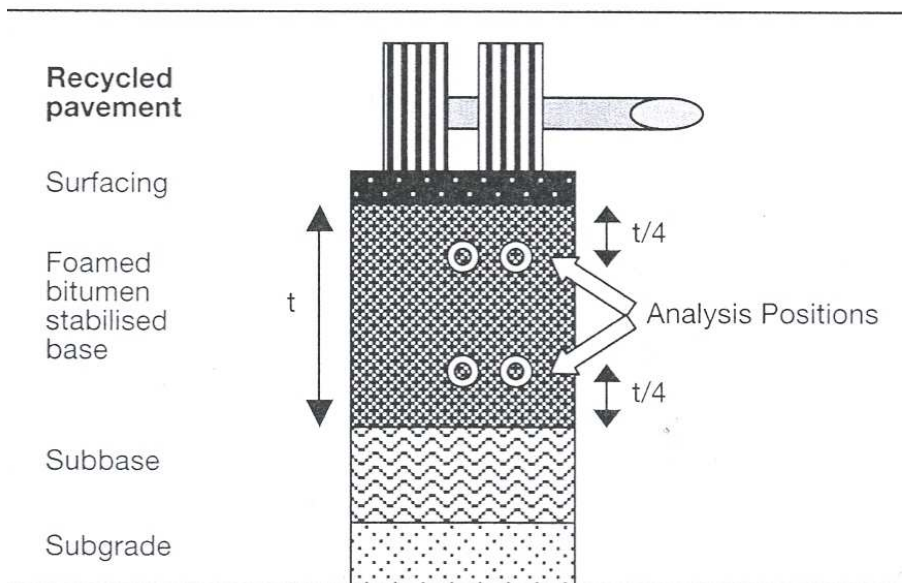
- Calcul de l'état des contraintes au sein de la structure envisagée

- ➔ Calcul de l'état des contraintes à différents niveaux
- ➔ Mise en adéquation des contraintes calculées et du Module Résilient

- * Subdivision en plusieurs sous-couches
- * Calculs itératifs ou par éléments finis

➔ Définition, à différents niveaux, des ratios :

$$\frac{\text{Contraintes}}{\text{Contraintes limites}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{1,f} - \sigma_3}$$





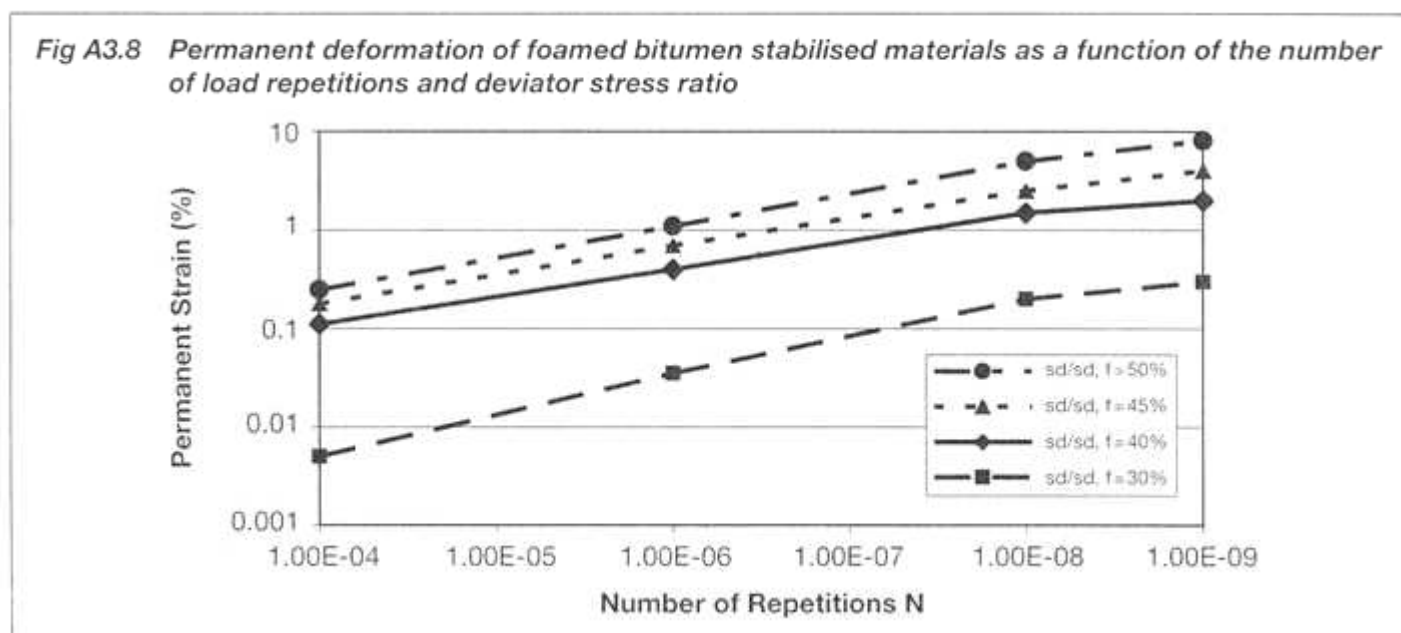
RETRAITEMENT A FROID DIMENSIONNEMENT

« Manuel WIRTGEN »

Méthode des « Ratios de contraintes »

- Calcul de l'endommagement par déformation permanente

→ A chaque niveau, calcul de la déformation permanente en fonction du ratio contraintes/contraintes limites ($sd/sd,f$)



→ Somme des déformations sur l'ensemble de la structure

QUELQUES CONCLUSIONS

➤ Performances mécaniques

- Un matériau «intermédiaire» entre les matériaux liés et les matériaux granulaires
- Un matériau évolutif
- Des efforts importants engagés dans la caractérisation mécanique :
 - * *Procédures de fabrication des éprouvettes, méthodes de mûrissement*
 - * *Résistances mécaniques, module de rigidité*
- Des efforts à poursuivre dans la caractérisation des modes d'endommagement

➤ Dimensionnement

- Prise en compte des différentes phases de comportement
- Nécessité de disposer de « lois de comportement » pertinentes
- Nécessité de trouver un compromis entre précision et applicabilité pratique



RETRAITEMENT A FROID MATERIAU & DIMENSIONNEMENT

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Recyclage des chaussées
Guide du retraitement en place à froid à l'émulsion ou à la mousse de bitume
Comité Technique AIPCR C7/8 – "Chaussées Routières" - 2003
PIARC Committee C7/8 – "Road Pavements"
- [2] Guide technique – Retraitement en place à froid des anciennes chaussées
CFTR – SETRA juillet 2003
- [3] Wirtgen Cold Recycling Manual
Wirtgen Group – 2004
- [4] Performance Prediction of Cold Foamed Bitumen Mixes
Jenkins, Van de Ven, Molenaar, de Groot, 9th ICAP, Copenhagen, Denmark, 2002
- [5] The Design and Use of Foamed Bitumen Treated Materials
Interim Technical Guideline TG2, Asphalt Academy Pretoria, South Africa, 2002



RETRAITEMENT A FROID MATERIAU & DIMENSIONNEMENT

