



Apport structural des graves traitées aux liants hydrocarbonés, en place et en centrale

Yvan Paquin, ing.

Directeur Technique
Construction DJL inc.

23 novembre 2010



Contenu de la présentation

- ◆ Intérêt des graves traitées
- ◆ Rappel sur la Formation 2007
- ◆ Principe de dimensionnement
- ◆ Comportement des matériaux
- ◆ À considérer pour la conception
- ◆ Conclusion

Intérêt des graves traitées

◆ Monétaire

- Matériaux sur place sont déjà la propriété du client
- Moins d'enrobés à chaud dont le prix unitaire est plus élevé, à design équivalent

◆ Développement durable

- Recyclage à fort taux
- Traitement à froid
- Traitement en place réduit les transports de matériaux

◆ Polyvalence

- En place : Réhabilitation
- En centrale : Réhabilitation, Reconstruction, Construction neuve, Recyclage du béton de ciment

◆ Performances

- Remontée de fissures lente ou nulle
- Orniérage quasi nul (matériaux très frottants et apport de ciment)

Rappel sur la Formation 2007

◆ « *Le retraitement à froid des chaussées souples* »

◆ 4 chartes

- 1-Vocabulaire (Types I, II ou III)
- 2-Processus décisionnel (Retraitement en place)
- 3-Dosages types selon épaisseurs
 - ◆ Émulsion ou mousse, ciment
- 4-Exemples de dimensionnement
 - ◆ Route/Autoroute en milieu rural
 - ◆ Boulevard urbain

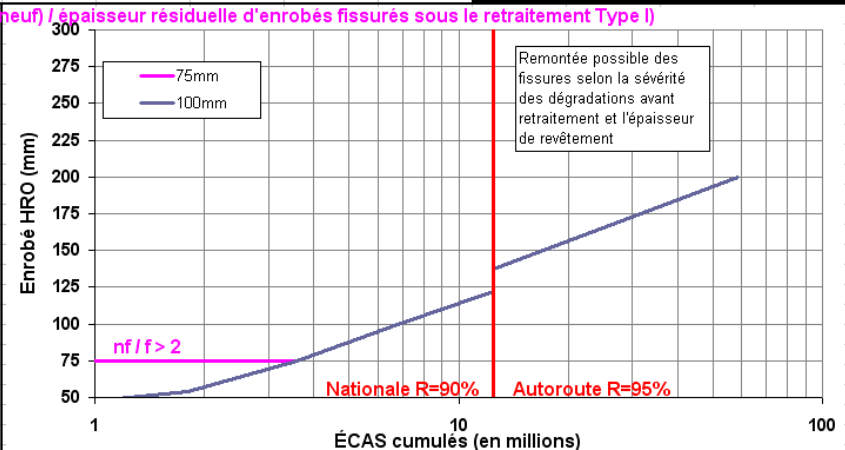
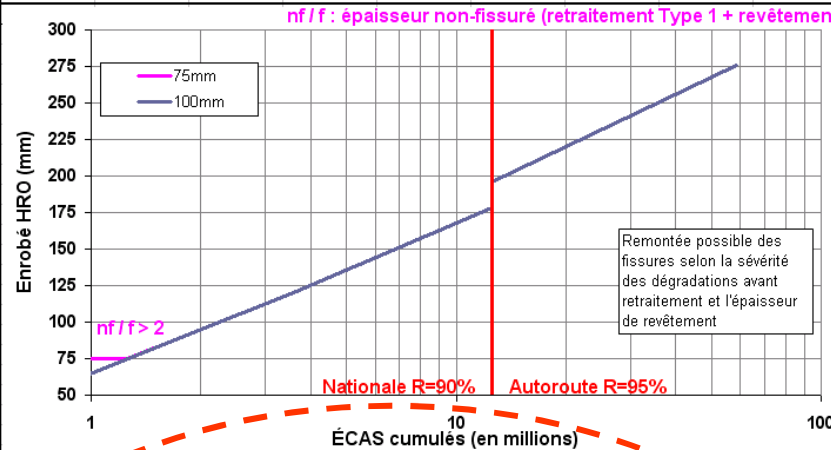
Charte #3 : Dimensionnement de chaussée souple avec retraitement

Épaisseur* requise d'enrobé HRO au-dessus du retraitement

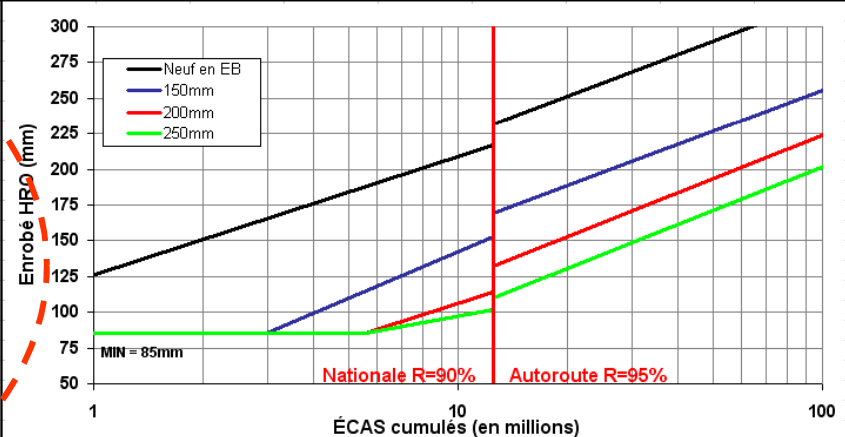
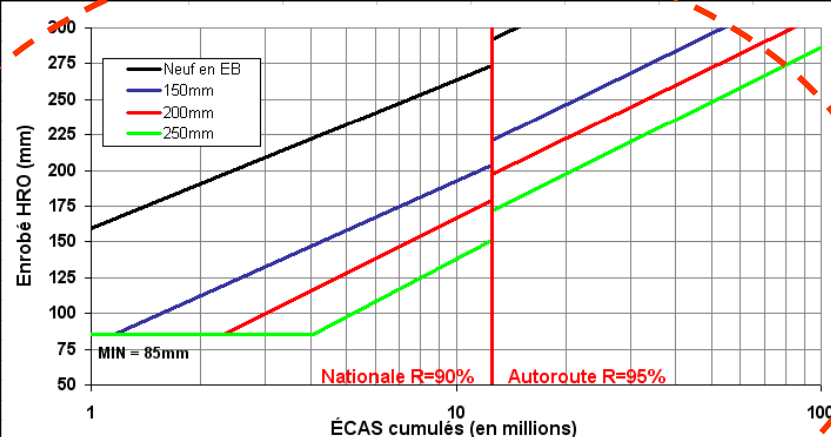
* : à titre indicatif pour des conditions données, un calcul doit être fait

CAS TYPE RURAL

TYPE I (100% EB - ERF émuls. + 0,5% ciment)



TYPE II (50% EB - MR5 émuls. + 1,5% ciment)
TYPE III (50% EB - MR5 émuls. + 1,5% ciment)



SOL DE FAIBLE CAPACITÉ PORTANTE

Silt ou argile inorganique : CH ou MH (IL<0,9), Mr=20MPa

SOL DE CAPACITÉ PORTANTE MOYENNE

Argile : CL avec IP>12 (IL<0,9), Mr=47MPa

Calcul avec Logiciel Chaussée2 du MTQ avec hypothèses types proposées
- So=0,45, R=95% pour ECAS > 12,5 millions (autoroute) et R=90% (nationale)
- PSI initial de 4,25 et PSI final de 2,50
(12,5 millions ECAS cumulés = 500 000 ECAS annuel * 25 ans)

CHAUSSEE RÉSIDUELLE AVANT RETRAITEMENT
ENROBÉS FISSURÉS 150mm Mr=1366MPa
MG-20 200mm Mr=110MPa
MG-112 (fuseau entier) 550mm Mr=74MPa

Types II et III :
Décohesionnement sur 300mm (50% EB)

- Protection au gel partielle selon GEL et abaque GEL 1994 pour un Indice de Gel normal IGn < 975°C*jour (Zone Sud)

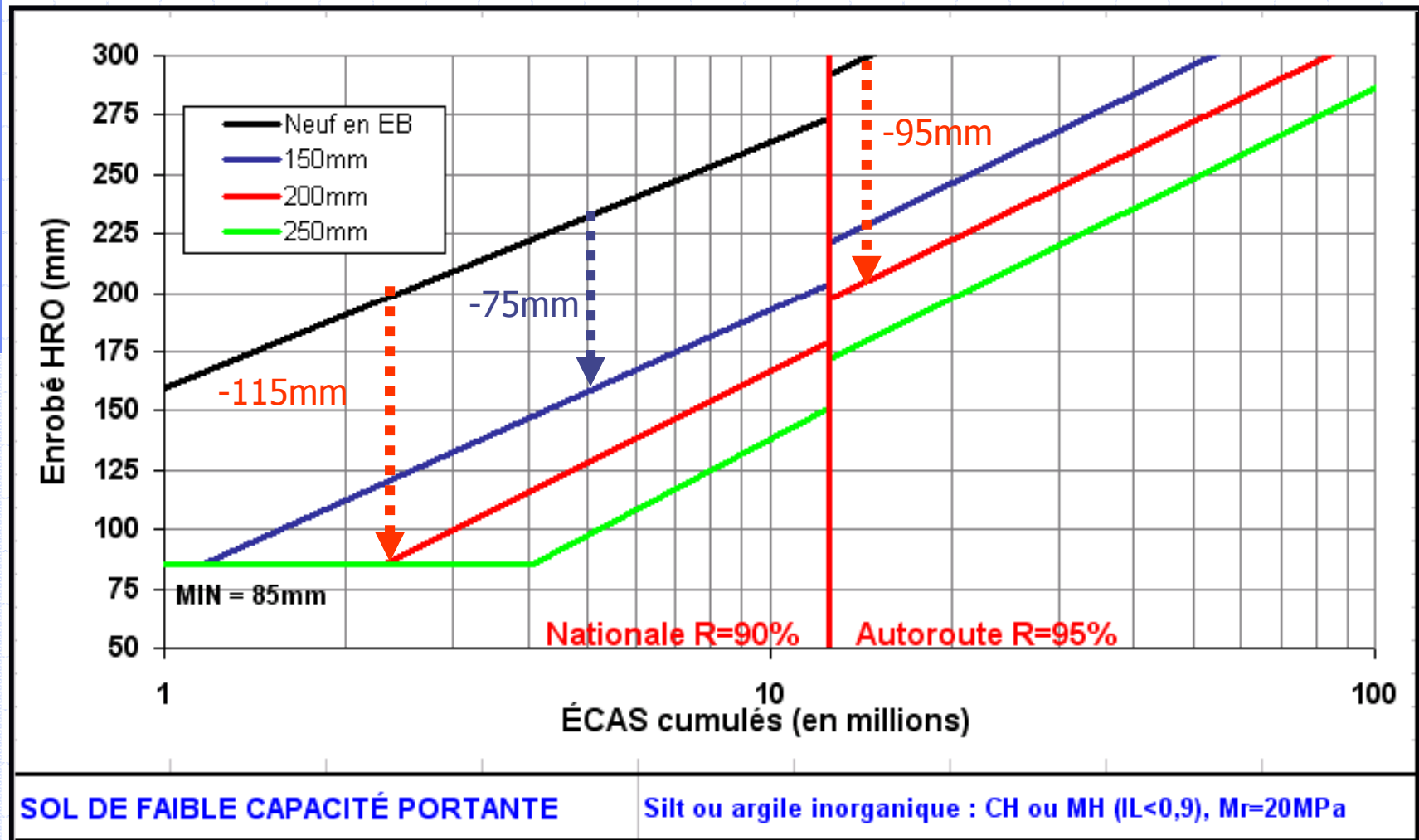
Hypothèses de calcul
Conversions types de PL/jour/voie en ECAS cumulés

Classe de trafic	TEX	TS	TS	T0	T0	T1	T1	T2	T2	T3	T3	T4	T4	T5	T5
Nb PL/jour	> 5001	5000	3000	2001	2000	751	750	301	300	151	150	51	50	26	25
Centre classe (PL/jour/voie)	3000		1200		500		200		85		35		10		
% PL/DJMA	25%	10%	5%	25%	10%	5%	25%	10%	5%	25%	10%	5%	25%	10%	5%
DJMA sur 2x3 voies	40 500	119 300	245 000	14 100	40 400	91 500	5 250	14 800	32 800	1 950	5 250	11 500	825	2 100	4 400
DJMA sur 2x2 voies	32 700	90 900	181 800	11 700	32 700	72 000	4 450	12 300	26 700	1 700	4 450	9 600	715	1 815	3 725
DJMA sur 2x1 voies	24 000	60 000	120 000	9 600	24 000	48 000	4 000	10 000	20 000	1 600	4 000	8 000	680	1 700	3 400
CAM (RURAL)	3,4	2,7	2,1	3,4	2,7	2,1	3,4	2,7	2,1	3,7	3,1	2,1	3,7	3,1	3,1
ÉCAS cumulés 25 ans	111,6	88,6	68,9	44,6	35,4	27,6	18,6	14,8	11,5	8,1	6,8	4,6	3,4	2,9	2,0
ÉCAS cumulés 15 ans	56,9	45,2	35,2	22,8	18,1	14,1	9,5	7,5	5,9	4,1	3,5	2,3	1,8	1,5	1,0

ÉCAS < 1 million : utiliser les épaisseurs minimales des chartes

Exemple pour un cas « X » :

200mm de retraitement Type II : 95 à 115 mm de moins en enrobés HRO pour un dimensionnement équivalent



		100% enrobés	35-85% enrobés / 15-65% granulaire	
EN USINE	Type de matériaux recyclés (BNQ)	MR-7	MR-2 à MR-6 Base stabilisée	
	Opérations	Fraisage + transport + liants + transport + pose Avec finisseur	Combiné fraisats/béton/granulats + liants + transport + pose	
RETRAITEMENT EN PLACE	Bitume Québec	Type I	Type II	Type III (fraisage requis)
	Épaisseurs les plus courantes	75 à 125mm	100 à 250mm	
	USA/Canada	Cold-In-Place Recycling	Full-Depth Recycling	
	Acronyme	CIR	FDR	
	France	Classe III	Classe V	
		50 à 120 mm	100 à 300 mm	
		Émulsion ou Mousse (+ ciment)	Liant composite	
	MTQ (devis)	Recyclage à froid du revêtement de chaussée en enrobé (mai 2007) " RFE "	Retraitement en place de la chaussée avec un liant hydrocarboné (et annexes) (mai 2007)	
	MTQ site web	http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/entreprises/zone_fournisseurs/c_affaires/contrats/documents_contractuels		
	MTQ (Chaussée 2)	2 ERF ém. + 0.5% ciment 110 3 ERF ém. + 0.5% ciment 4 MG 20 4 MG 56 5 MR1 ou MR2 5 MR3 ou MR4 5 MR5 (40 %BB) 6 MR5 (50 % BB) 7 MR5 stabilisé avec émulsion Recommandation : Limitation à 100mm d'épaisseur 2 MR5 stabilisé avec émulsion 150 3 MR1 ou MR2 3 MR3 ou MR4 4 MR5 (40 %BB) 4 MR5 (50 % BB) 5 MR5 stabilisé avec émulsion 5 MR5(150 mm) ém. +0,8 % ciment 6 MR5(150 mm) ém. +1,5 % ciment 6 MR5(200 mm) ém. +1,5 % ciment 7		
Autre nom familier	Train routier	Stabilisation		

3 types de retraitement en place

Type I



Type II



↑ Type III



Retraitement en usine

Excavation
(fraisage
préalable si
requis)



Recyclage
(triage,
concassage
et/ou tamisage)

Recomposition et injection de liants



Mise en oeuvre

Rappel sur la Formation 2007

- ◆ Études préalables (Voir Formation 2007)
 - Évaluation du retour sur investissement (préliminaire) des différentes options
 - Faisabilité selon matériaux existants et configuration géométrique
 - Processus décisionnel (Charte 2)
 - ◆ Choix du matériau
- ◆ Dimensionnement structural
- ◆ Administratif : estimé, solution finale et appel d'offres
- ◆ Exécution (Voir Formation 2007)
 - Contrôle qualité
- ◆ Recouvrement en enrobés (Voir Formations 2006 et 2008)

Principe de dimensionnement

◆ Démarche

- Méthode française
 - ◆ Documents SETRA
- Chaussée 2 issu de l'AASHTO 1993 + expérimentations MTQ

Guide technique

Retraitement des chaussées et recyclage des matériaux bitumineux de chaussées



Tableau 1 : classification des retraitements

Classe de retraitement	Objectif	Matériau à retraiter	Epaisseur	Dosage du Liant
CLASSE I CLASSE II CLASSE III	Renforcement structurel Réhabilitation des couches de surface	Liant bitumineux		
		Ancienne assise + enduits	10 à 15 cm	3 à 5 % (liant résiduel)
		≥ 3/4 noir	5 à 12 cm	1 à 3 % (liant résiduel)
		100 % noir	5 à 12 cm	jusqu'à 2 % (liant résiduel)
CLASSE IV	Renforcement structurel	Liant hydraulique		
		Tout ou partie ancienne chaussée	20 à 30 cm	3 à 6 %
CLASSE V	Renforcement structurel ou réhabilitation couches de surface	Liant composé ¹		
		Ancienne assise ou couches de surface	10 à 30 cm	3 à 7 %

Type I

Types II, III

¹ Liant composé : mélange de bitume sous forme d'émulsion ou mousse de bitume et de liant hydraulique

Guide technique

Retraitement en place à froid des anciennes chaussées



Type I

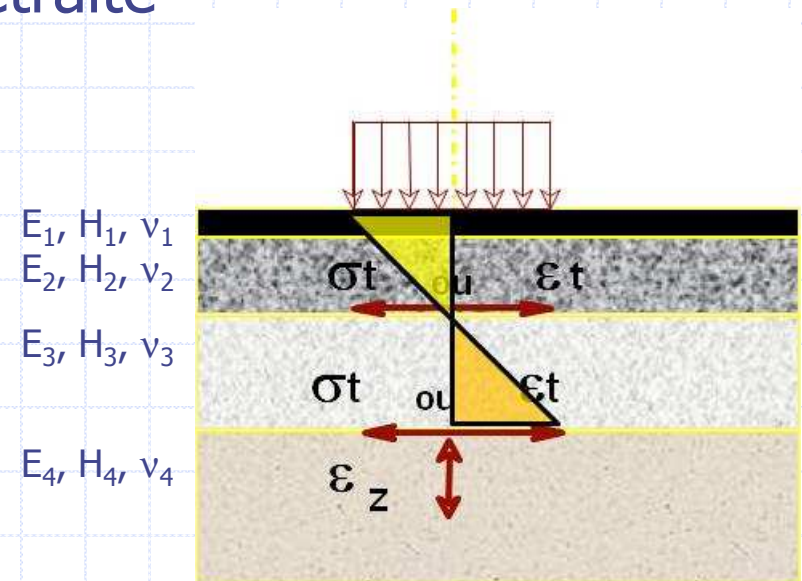
Types II, III

Nature du retraitement	Retraitement à l'émulsion de bitume (livret 1)			Retraitement avec un liant hydraulique (livret 2)	Retraitement un liant comp (livret 3)
	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV	Classe V
Caractéristiques					
Objectif	Renforcement structurel	Réhabilitation des couches de surface		Renforcement structurel	Renforcement structurel ou correction d'un défaut des couch de surface
Principe	Amélioration des caractéristiques mécaniques et géométriques de la chaussée avec plus ou moins d'ancienne assise et éventuellement régénération du bitume dans la classe II		Recyclage de la couverture bitumineuse avec régénération du bitume	Création d'une nouvelle assise ou d'une nouvelle couche de surface (classe V) - avec ou sans matériau d'apport - avec ou sans enlèvement des couches de surface	
Matériaux de l'ancienne chaussée à retraiter	3 à 4 cm de couverture bitumineuse + assise non traitée ou traitée aux liants hydrauliques	4 à 8 cm de couverture bitumineuse + assise non traitée ou traitée aux liants hydrauliques	Uniquement des matériaux bitumineux en intégrant l'interface	Tout ou partie de la couverture bitumineuse. Tout ou partie des assises. Éventuellement partie du support	Tout ou partie de la couverture bitumineuse et tout ou partie des assises
Liant	Emulsion de bitume	Emulsion de bitume pur ou régénérant	Emulsion de bitume régénérant	Ciment ou liant hydraulique routier	Mélange ciment liant hydraulique routier + émulsion de bi
Teneur habituelle en liant d'ajout	3 à 5 % de bitume résiduel	1 à 3 % de bitume résiduel	Jusqu'à 2 % de bitume résiduel	3 à 6 % de liant hydraulique	3 à 7 % de liant composé
Épaisseur de la couche retraitée	10 à 15 cm	5 à 12 cm	5 à 12 cm	20 à 30 cm	10 à 30 cm

Tableau 1 - Classification des retraitements

Principe de dimensionnement

- ◆ Intégration de la méthode mécanistique française (SETRA Décembre 1994)
 - ◆ Module du matériau retraité



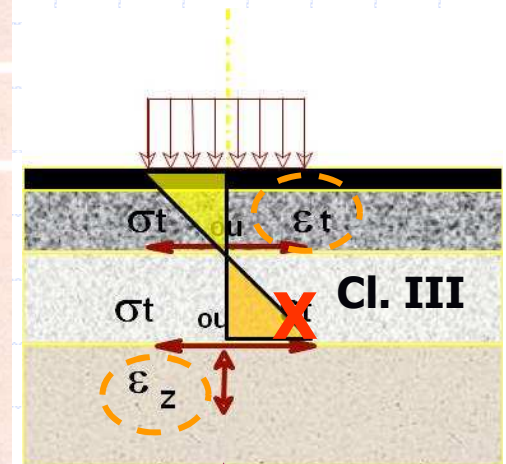
Conditions aux interfaces
(collé ou glissant)

Principe de dimensionnement

- ◆ Type I Bitume Québec = Classe III
 - Certains cas se rapprochent de la Classe II

Classe du retraitement	Module à 15°C et Rc Duriez (14j) à considérer pour le matériau retraité	Critère de dimensionnement
I	E = 1500 MPa si $1,5 < Rc < 2,2$ MPa E = 2500 MPa si $2,2 < Rc < 3$ MPa	Souvent la déformation verticale du sol support (ϵ_z)
II avec 75 à 90 % d'agrégat bitumineux dans le matériau	E = 2000 MPa si $Rc < 4$ MPa E = 3000 MPa si $Rc \geq 4$ MPa	Déformation verticale du sol support (ϵ_z) et de la couche retraitée en vérifiant la déformation en extension ϵ_t à la base de la couche bitumineuse qui couvre le retraitement, en cas d'épaisseur ≥ 4 cm.
II avec plus de 90 % d'agrégat bitumineux dans le matériau	E = 3000 MPa si $Rc < 4$ MPa E = 4000 MPa si $Rc \geq 4$ MPa	
III	E = 4000 MPa	Déformation verticale du sol support (ϵ_z) et déformation horizontale (extension ϵ_t) à la base de la couche bitumineuse qui couvre le retraitement, en cas d'épaisseur ≥ 4 cm.

Fatigue du Cl. III non considéré pour l'instant



Ex : Classe III +
2 couches
d'enrobés

Tableau 3 - Caractéristiques mécaniques du matériau retraité à considérer pour le dimensionnement.

Principe de dimensionnement

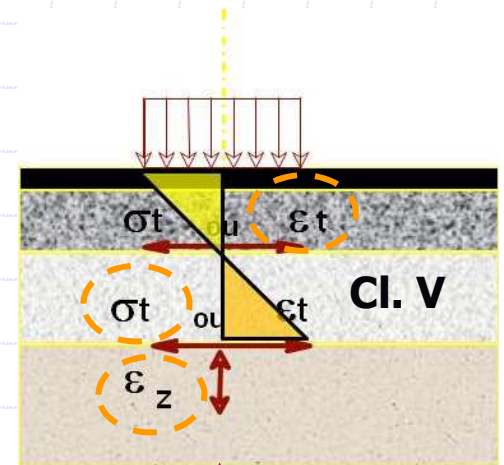
◆ Type I Bitume Québec = Classe III

- Attention : le Guide technique précise :
 - ◆ Interface enrobé résiduel/Classe III : collée
 - Ceci impliquerait une couche d'accrochage entre ces 2 couches (ce qui n'est pas la pratique actuelle généralement, ni en France, ni au Québec)
 - Présentement, il est considéré que le taux de liant est suffisant pour assurer le collage, malgré la poussière résiduelle

Principe de dimensionnement

◆ Type II (ou III) BQ = Classe V

- Matériau se rapprochant du matériau hydraulique
 - ◆ Module E en relation avec les résistances en traction directe à 28j, 90j et 360j
 - ◆ Fatigue (σ_6 et pente de fatigue)



Ex : Classe V +
2 couches
d'enrobés

Principe de dimensionnement

◆ Type II (ou III) BQ = Classe V

■ Démarche :

- ◆ Trafic T3 et moins (<150 poids lourds/voie) et Valeur au bleu < 0,8

Justification = calcul avec valeurs typiques indicatives (Tableau 6) et ne nécessite pas d'études matériaux en labo

Exemples 1 et 2 :
3% émulsion
2% ciment

	80% EB	20% EB
	Exemple 1	Exemple 2
E (MPa)	5500 ⁽¹⁾	14500 ⁽¹⁾
Coefficient de Poisson	0,30	0,25
σ_6 (MPa)	0,33 ⁽²⁾	0,66 ⁽²⁾
Pentes droite de fatigue - 1/b	9,5	13,7

⁽¹⁾ Ces valeurs de module sont déjà minorées de 10 %.

⁽²⁾ Ces valeurs de σ_6 comprennent déjà la minoration de 30 % sur la résistance en traction.

Tableau 6 : Valeurs indicatives.

Principe de dimensionnement

◆ Type II (ou III) BQ = Classe V

■ Démarche :

- ◆ Trafic T2 et plus (> 150 PL/voie) avec Valeur au bleu $< 0,8$
- ◆ Ou si Valeur au bleu $> 0,8$
- ◆ Ou matériaux mal gradués

■ Recouvrement minimal en EB

- ◆ > 4 cm si $150 < \text{PL/voie} < 300$
- ◆ > 6 cm si $\text{PL/voie} > 300$

Principe de dimensionnement

◆ Type II (ou III) BQ = Classe V

■ Démarche

- ◆ Dimensionnement à la française avec des hypothèses encadrées similaires aux cas de renforcement (détails à venir par Laurent Porot)
 - Modules fixés pour les rétrocalculs qui permettent de déterminer la portance du sol support
 - si $H_{EB} \text{ fissuré} \leq 5 \text{ cm}$: $E = 2000 \text{ MPa}$
 - Si $H_{EB} \text{ fissuré} > 5 \text{ cm}$: $E = 2000 \text{ MPa}$ pour les 5 cm inférieurs et $E = 5000 \text{ MPa}$ pour le reste supérieur

Principe de dimensionnement

◆ Type II (ou III) BQ = Classe V

■ Module pour ce matériau « composite »

◆ $E = 0,9 * E_{360}$ (10% d'erreur)

■ On peut approximer E par la relation $E_{t_{28}}/E_{360} = 0,50$

Age	Exemple 1	Exemple 2
$R_{t_{28}}/R_{t_{360}}$	0,48	0,76
$E_{t_{28}}/E_{360}$	0,33	0,68
$R_{t_{90}}/R_{t_{360}}$	0,70	0,82
$E_{t_{90}}/E_{360}$	0,45	0,75

◆ $E = 1,8 * E_{t_{28}}$

Tableau 1 : Valeurs indicatives moyennes des coefficients de correspondance pour l'estimation des performances mécaniques à 360 jours.

Principe de dimensionnement

◆ Type II (ou III) BQ = Classe V

■ Fatigue pour ce matériau « composite »

◆ $\sigma_6 = 0,7 * (\sigma_6 / R_t) * R_{t_{360}}$ (30% d'erreur)

■ On peut approximer R_t par la relation $R_t = 0,8 * R_{tb}$

Age	Exemple 1	Exemple 2
$R_{t_{28}}/R_{t_{360}}$	0,48	0,76
$E_{t_{28}}/E_{360}$	0,33	0,68
$R_{t_{90}}/R_{t_{360}}$	0,70	0,82
$E_{t_{90}}/E_{360}$	0,45	0,75

Tableau 1 : Valeurs indicatives moyennes des coefficients de correspondance pour l'estimation des performances mécaniques à 360 jours.

$$\sigma_6 = 0,85 * R_{t_{28}}$$

Donc 28j minimum

	Exemple 1	Exemple 2
R_t / R_{tB}	0,8	0,8
R_f / R_t	1,5	1,65
σ_6 / R_f	0,43	0,54
σ_6 / R_t	0,53	0,96
- $1/\beta$	10,2	12
- $1/b$	9,5	13,7

Avec R_t Résistance en traction directe
 R_{tB} Résistance en traction avec l'essai "Brésilien"
 R_f Résistance en traction à partir d'un essai de flexion.

Tableau 2 : Valeurs indicatives de paramètres et relations entre paramètres

Principe de dimensionnement

♦ MTQ : AASHTO 1993 et Chaussée 2

- Matériau lié économique avec un module intermédiaire compris entre celui du granulaire et des enrobés

Couches de matériaux		H (mm)		STRUCTUREL GEL GEL (1993)			
Matériau				F Mr	Mr effectif (MPa)	a (po ⁻¹)	m
BB HRO		150		1,00	3592	0,47	1,0
BB		100		1,00	2894	0,43	1,0
BB fissuré		150		1,00	1366	0,3	1,0
ERF ém. + 0,5% ciment		110		1,00	1400	0,3	1,0
MR5(150 mm) ém. +1,5 %		150		1,00	548	0,24	1,0
MR5(150 mm) ém. +0,8 %		150		1,00	337	0,19	1,0
MR5 stabilisé avec émulsio		150		1,00	136	0,09	1,0
MR5 (40 % BB)		150		1,00	92	0,05	0,8
MR5 (50 % BB)		150		1,00	86	0,04	0,8
MG 20		200		1,00	110	0,07	0,8
MG 56		300		1,00	110	0,12	0,8
MG 112 (fuseau entier)		400		1,00	74	0,08	0,8

Type I

Type II (ou III)

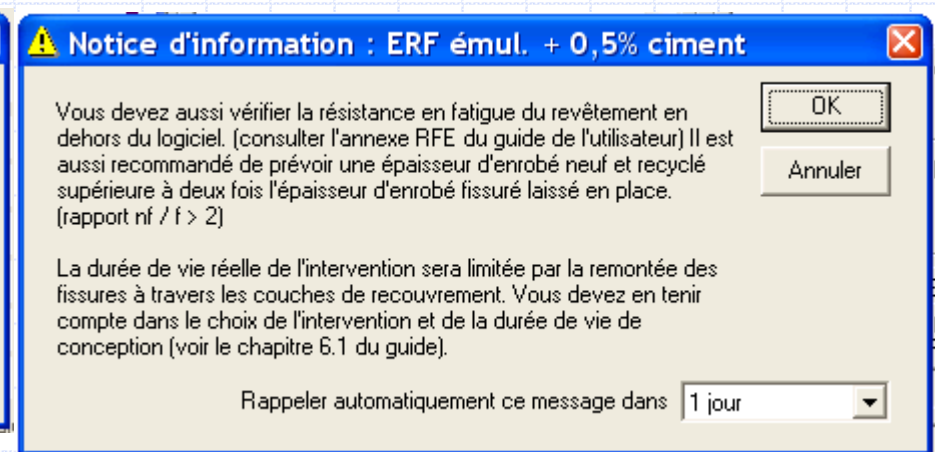
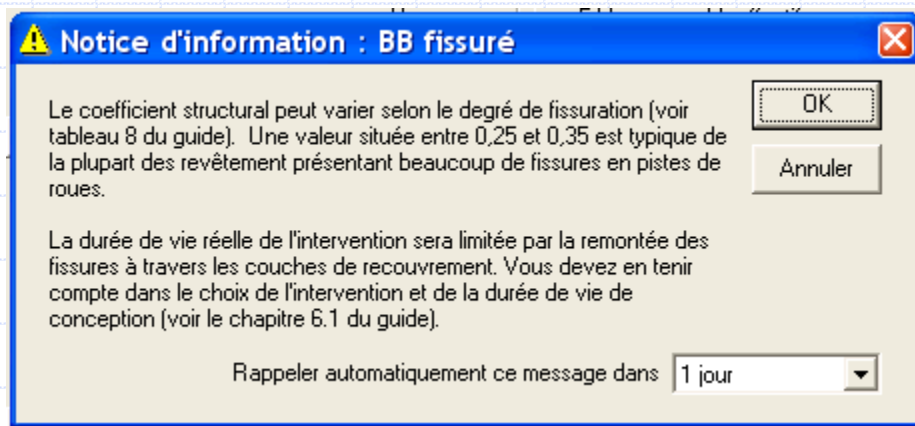
En proportion, le module du Type II est faible par rapport au Type I, si on compare à la démarche française qui considère l'inverse

Principe de dimensionnement

◆ MTQ : AASHTO 1993 et Chaussée 2

■ Particularités pour Type I

- ◆ Module résilient diminué (enrobé fissuré)
- ◆ Notion du Rapport $n_f/f > 2$
 - Prévoir du fraisage au préalable



Comportement des matériaux

Type I (Cl. III)

- ◆ Phénomène de cohésion complexe mais on peut vulgariser le modèle d'évolution à 3 phases :
 - Phase de mûrissement : le matériau prend de la vigueur partant de 500-1000 MPa pour atteindre 3000-4000 MPa, ceci prend de quelques mois à 1 ans environ
 - Phase d'apogée : le matériau travaille avec ses caractéristiques optimales; valeurs de modules de 3000-4000 MPa, le matériau étant en couche de fondation, il va travailler en fatigue (domaine à l'état de la recherche mais concept validé par performances en chantier)
 - Phase dégradée, selon le trafic, le matériau atteint sa limite ultime et perd de son intégrité (fissuration) et le module est pris par défaut à environ 1000 MPa

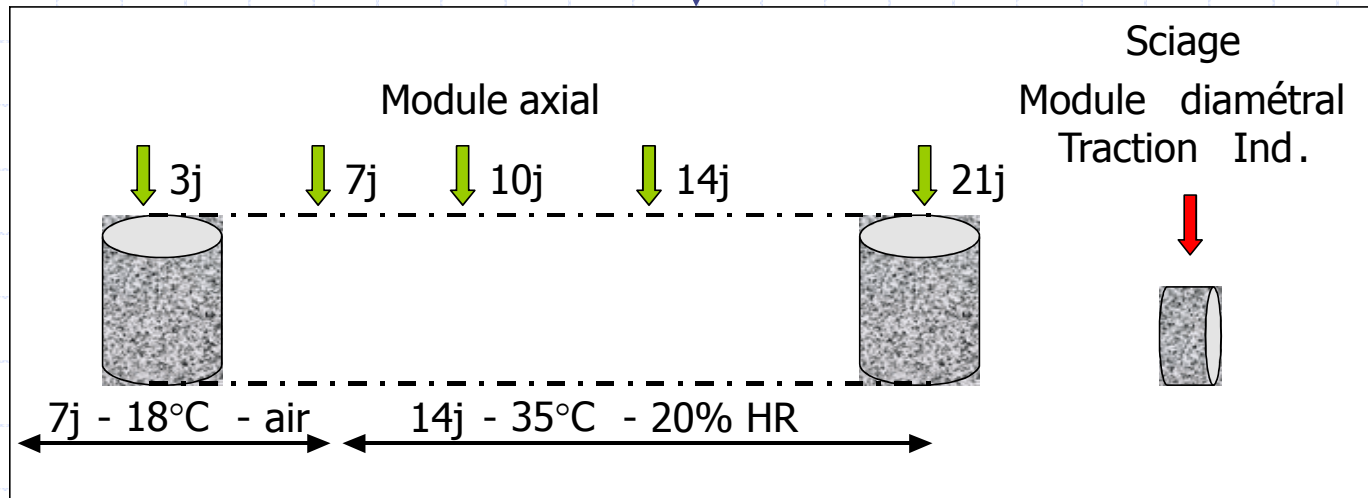
Comportement des matériaux

Type I (Cl. III)

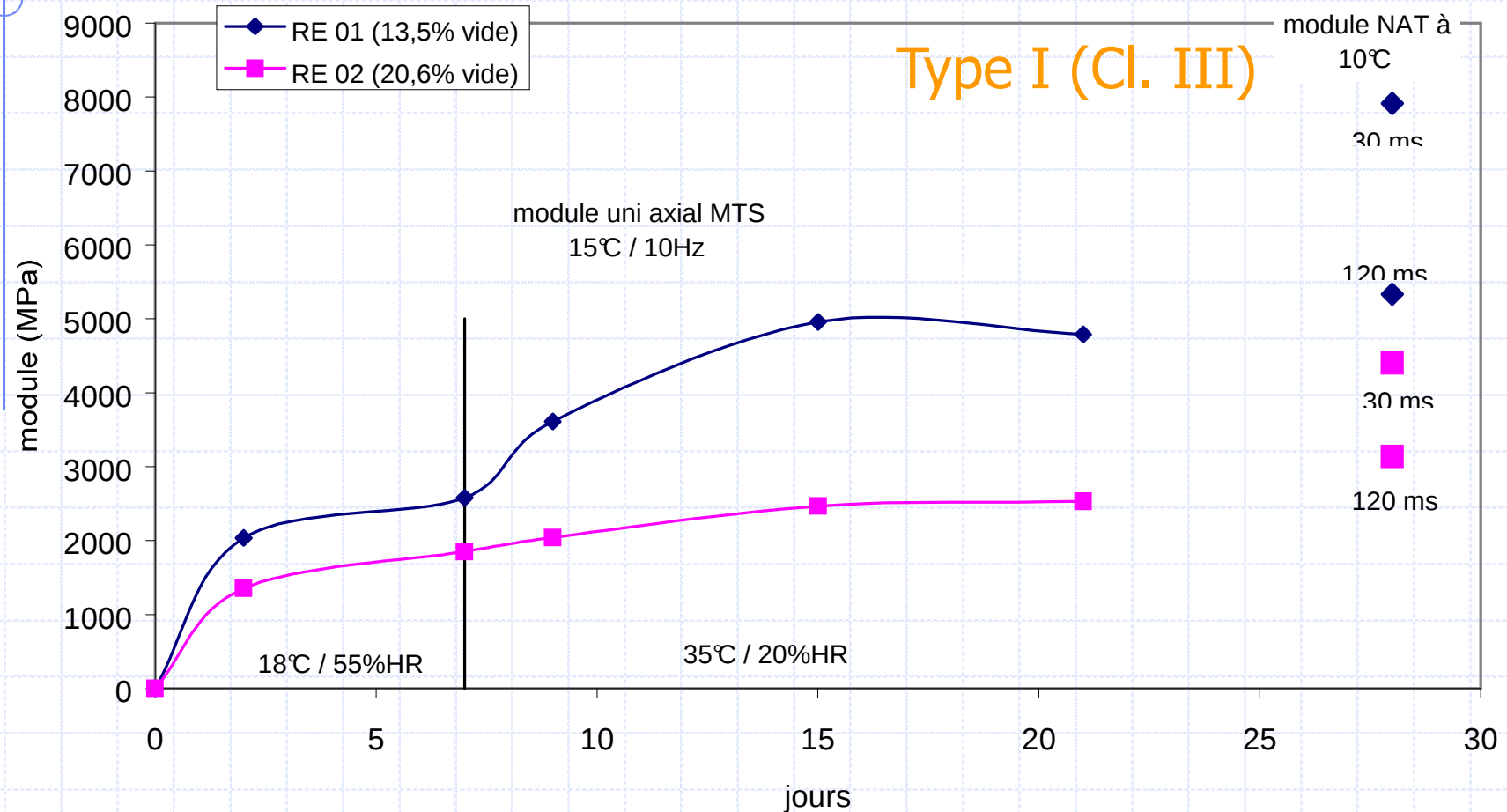
Présentation des essais

Suivi du module des éprouvettes en mûrissement

Fabrication d'éprouvettes PCG à deux % de vides différents



Comportement des matériaux



Représentation graphique de l'évolution du module dans le temps en fonction du mûrissement

Comportement des matériaux

◆ Exemple de grave traitée en usine

- 40% de fraisats de planage tamisé
- 40% de béton de ciment concassé
- 20% de criblure 0-2.5mm

Similaire à Type II (Cl. V)

◆ Donc 80% de matériaux recyclés

- ◆ 3.8% de liant composite anhydre(ciment + bitume résiduel de l'émulsion)
- ◆ 4.1% de bitume total(bitume résiduel de l'émulsion + bitume des fraisats)
- ◆ Dosage en ciment près de 2%
- ◆ Influence significative de la réhydratation du ciment provenant du béton concassé

Comportement des matériaux

◆ Mesure du module

■ Compression Diamétrale Sinusoïdale-CDS

- ◆ 2 éprouvettes par vibrocompression
- ◆ $D = 16 \text{ cm}$, $H = 8 \text{ cm}$
- ◆ Cohésion suffisante pour le sciage après 3 jours de cure

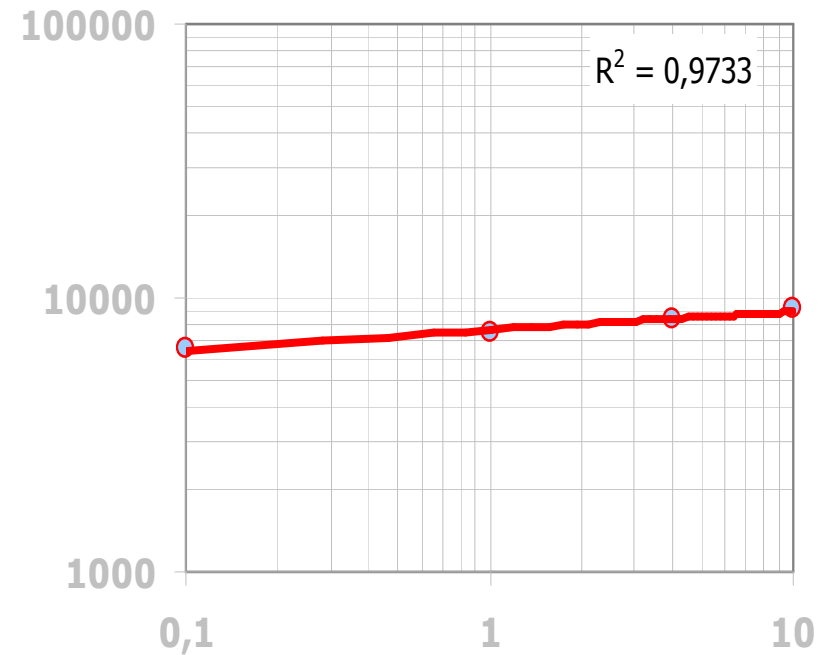


Comportement des matériaux

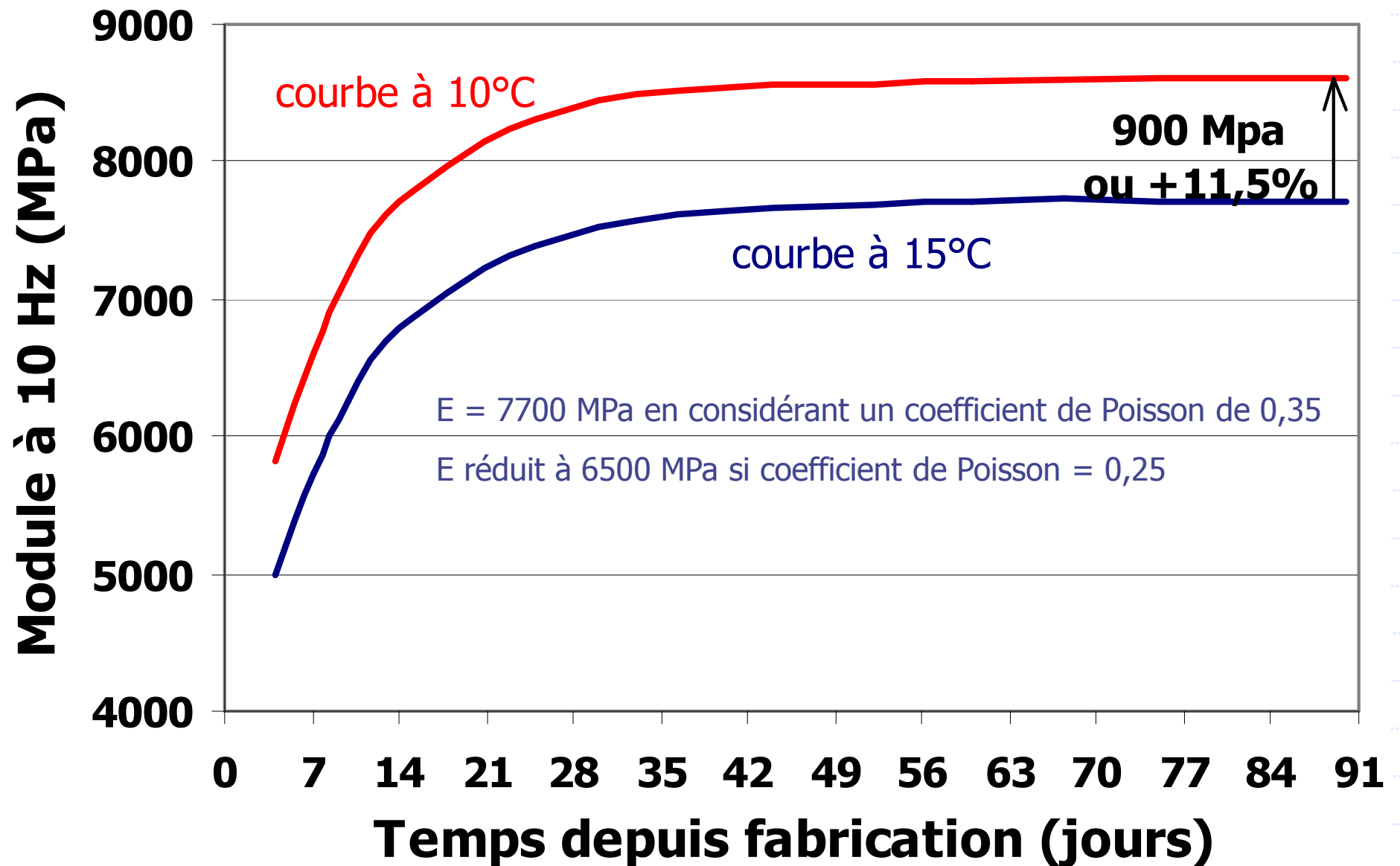
◆ Mesure du module

■ Compression Diamétrale Sinusoïdale-CDS

- ◆ Évolution du module avec le temps de charge
- ◆ Peu sensible au temps de charge (courbe aplatie)
- ◆ On conserve le module à 10 Hz



Évolution du module en CDS

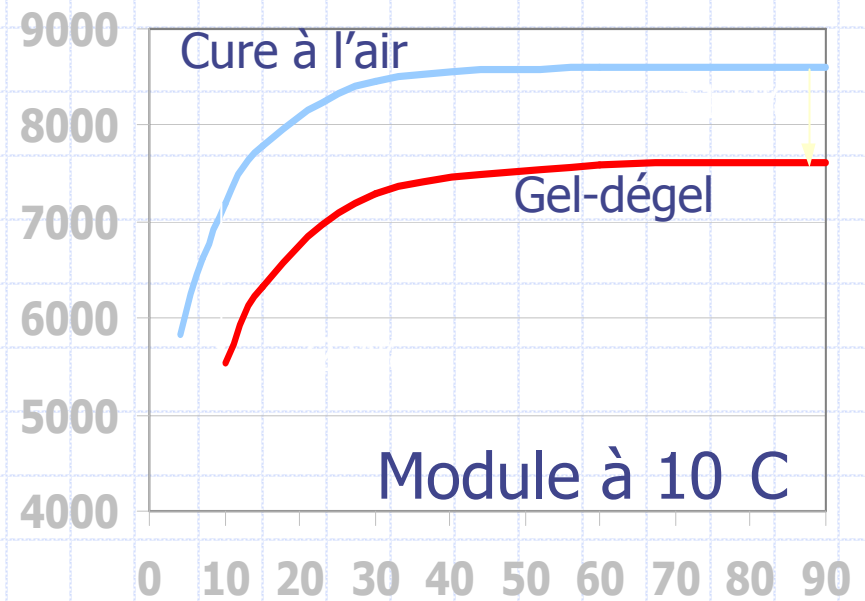
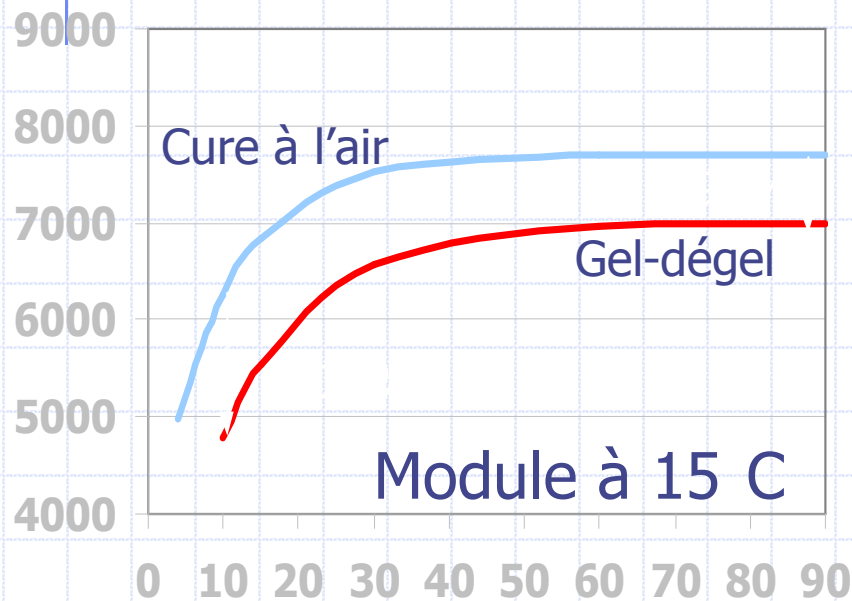


Comportement des matériaux

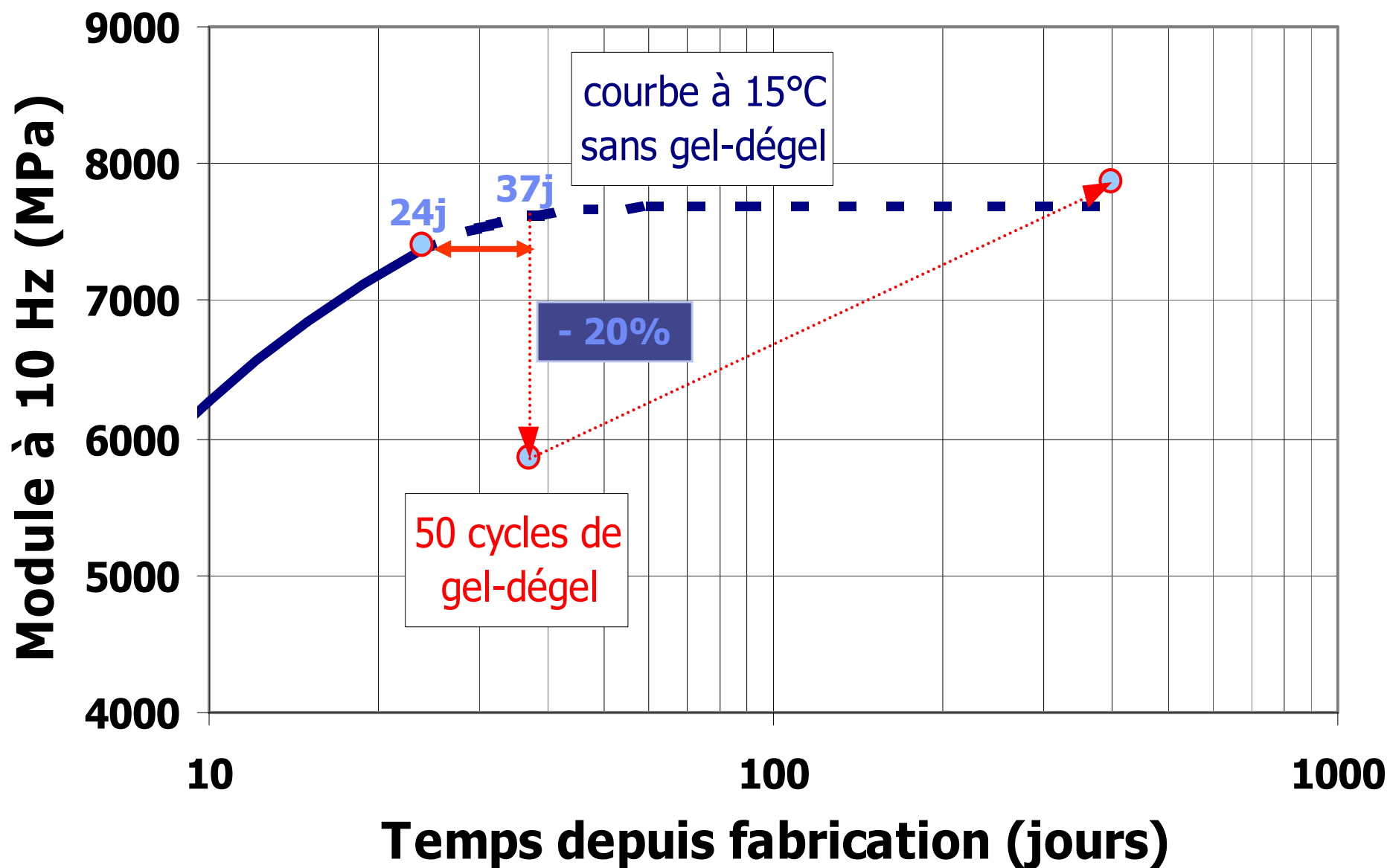
◆ Mesure du module

■ Compression Diamétrale Sinusoïdale-CDS

◆ Gel-dégel au jeune âge → Évolution du module à 10 Hz



Effet des 50 cycles de gel-dégel après cure initiale



Comportement des matériaux

- ◆ Considérer le temps de cure et les conditions climatiques et si maintien du trafic
 - Été :
 - ◆ Type I : Jusqu'à pose de l'enrobé (3j à 3 semaines)
 - ◆ Type II : 3 jours sont suffisants si ajout de 1,5% ciment
 - Prévoir temps plus long si moins de ciment ou temps pluvieux
 - Automne :
 - ◆ $> 10\text{ C}$ le jour ET $> 2\text{ C}$ la nuit suivante
 - ◆ Précipitations abondantes et ensoleillement minimal augmente le temps de cure
 - ◆ Risque de gel : le matériau se détériore au passage des véhicules
- ◆ Considérer un recouvrement minimal en enrobé :
 - Municipal (CERIU) : 85mm (55mm de ESG-14 + 30mm EB-10C)
 - Routes (MTQ) : 100mm (60mm de ESG-14 + 40mm ESG-10)

À considérer pour la conception

- ◆ Intervention préalables pour respect des seuils ou dégagement minimal sous structures
 - Fraisage
 - Décohésionnement plus profond pour excaver un surplus de MR-5 avant retraitement de Type II
- ◆ Configuration géométrique (giratoire, cul-de-sac, intersections...) demande une logistique particulière selon le type d'équipements utilisé
- ◆ Éviter les surdosages de ciment (généralement $<2\%$)
 - Stabilités Marshall $> 30\ 000\ N$
 - Fissures transversales de retrait
- ◆ Collage des couches
 - Sous retraitement de Type I
 - Au-dessus du retraitement de Type II

Conclusion

- ◆ Le retraitement à froid permet de réduire l'épaisseur d'enrobés
 - Matériau à module intermédiaire
 - Ordre de grandeur de la réduction d'enrobés
 - ◆ Retraitement Type II ou III de 200 mm : -100 à -125 mm
 - ◆ Retraitement Type II ou III de 150 mm : -50 à -75 mm
- ◆ Recyclage de 50 à 100% des matériaux traités à froid (GES)
- ◆ Il existe une méthode de dimensionnement basée sur l'approche française
 - Module OK, Fatigue plus difficile à mesurer
- ◆ AASHTO ne considère pas directement la fatigue
 - Fatigue difficile à caractériser sur ce genre de matériau mais le comportement long terme démontre les performances
- ◆ Le gel ne semble pas altérer significativement le matériau (sans trafic)