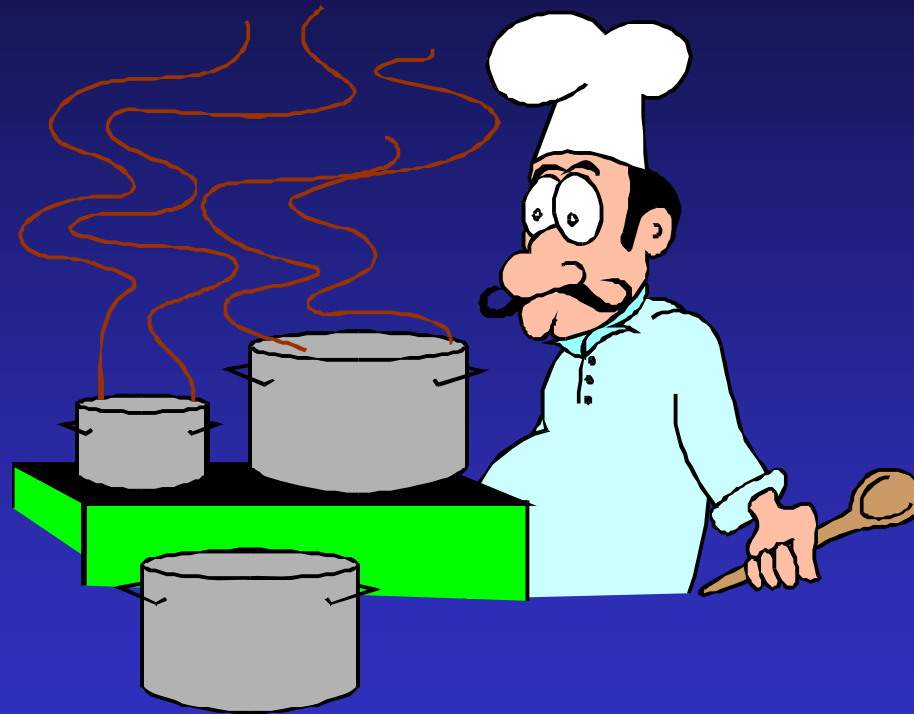


Formulation des enrobés Méthode LC



Pierre Langlois, ing.



Les enrobés bitumineux : formulation, fabrication, mise en place. – Montréal 2006.

Méthode LC

- **Plusieurs entreprises d'enrobés du Québec œuvrent en Ontario, Nouveau-Brunswick et Nouvelle-Angleterre (USA).**
- **Ces provinces et états utilisent la méthode Superpave.**

Méthode LC

- **Méthode superpave**
 - L'enrobé obtenu peut être faible en bitume, donc de performance discutable;
 - Une teneur en bitume trop élevée peut être obtenue dans certains cas, augmentant les risques d'orniérage.

Au Québec, les modifications apportées à la méthode superpave ont conduit à la méthode LC

Méthode LC

- **Objectifs**
 - Utilisable en laboratoire mobile
 - Méthode de compactage en relation avec celles utilisées en chantier
 - Possibilités d'utilisation de granulats de dimensions importante
 - Mesure de la compactibilité
 - Prendre en compte la durabilité
 - Teneur en bitume
 - Performance générale de l'enrobé

Méthode LC

- Objectifs (suite)
 - Méthode proche de la méthode superpave, facilitant ainsi les échanges avec les autres organismes
 - Appareillage identique
 - Enrobés produits respectant les principaux critères superpave (granulométrie, VAM, VCB, vides)

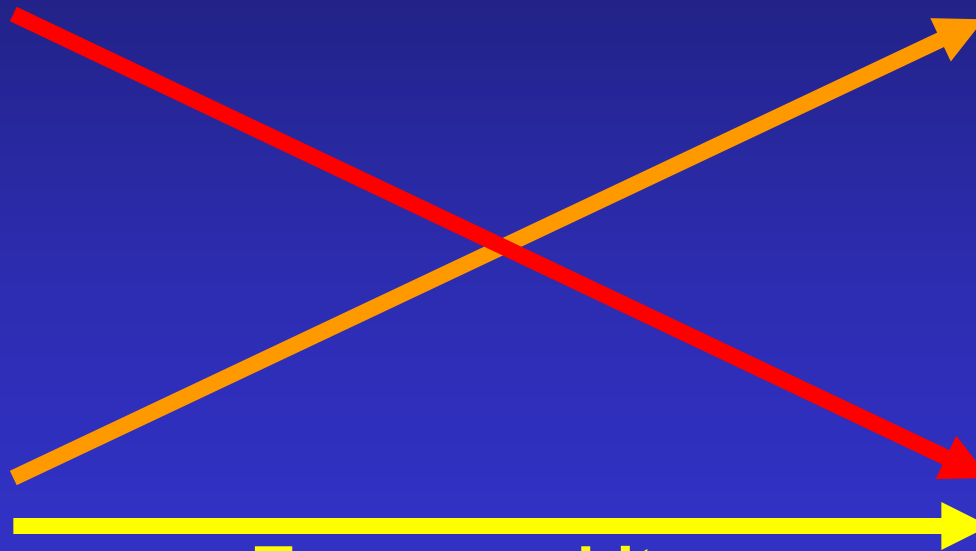
Méthode LC

- **La méthode de formulation fait appel aux méthodes d'essais suivantes:**
 - **LC 26-003 « Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud à la presse à cisaillement giratoire »;**
 - **LC 26-004 « Formulation des enrobés à l'aide de la presse à cisaillement giratoire selon la méthode du laboratoire des chaussées».**

Méthode LC

Résistance à
l'orniérage

Résistance à la fissuration,
arrachement et désenrobage



Teneur en bitume

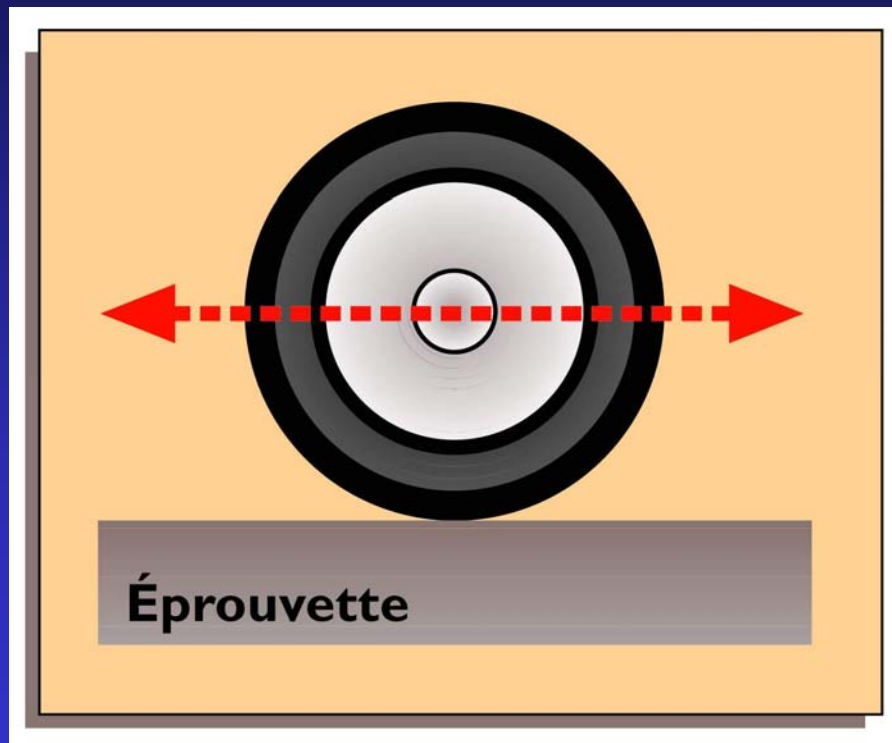
Méthode LC

- **Etude de formulation**
 - **teneur en bitume la plus élevée possible tout en résistant à l'orniérage.**

Orniéreur de laboratoire

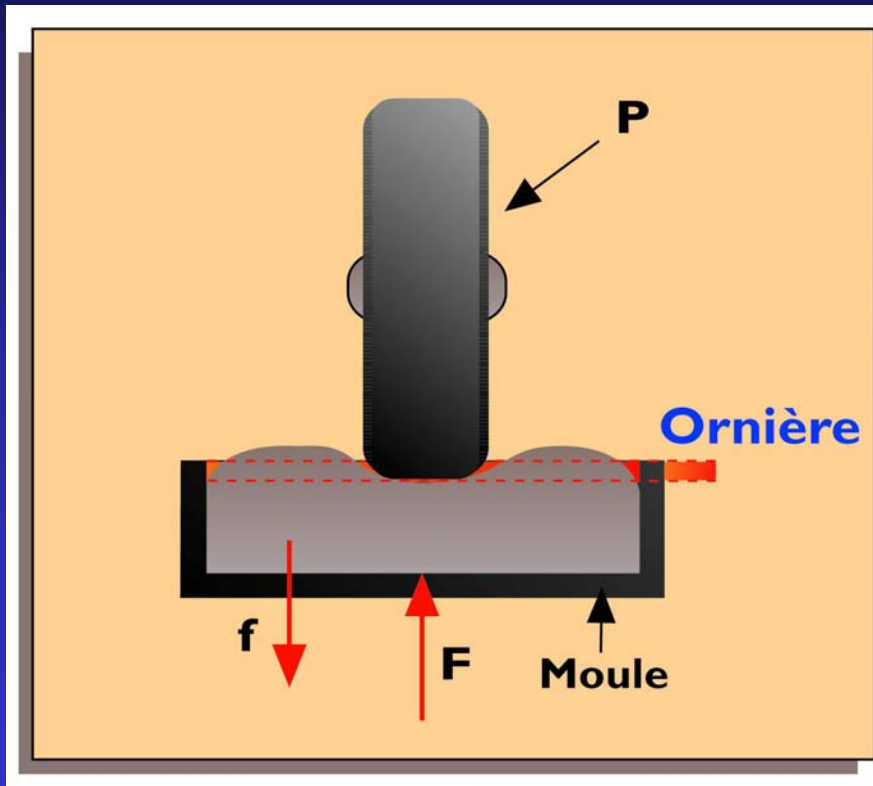


Ornièreur de laboratoire



Vitesse: 1 cycle / sec
Température: 60°C.

Ornièreur de laboratoire



AFNOR 98-253-1

P = pression de gonflage
du pneu = 600 kPa

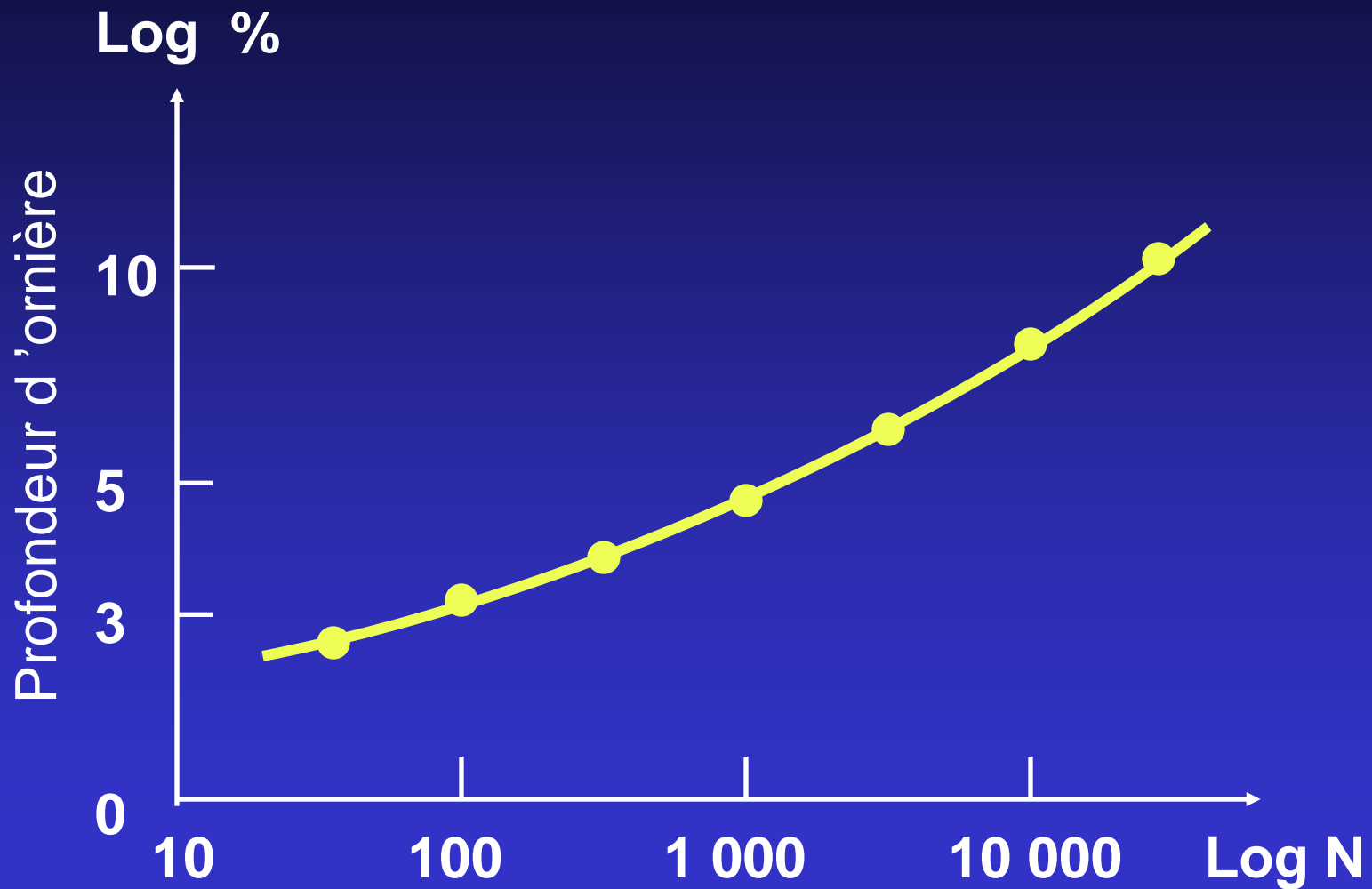
f = charge produite par
l'éprouvette et le
support

$(F-f)$ = charge roulante
appliquée = 5000 N

Ornièreur de laboratoire



Ornièreur de laboratoire



Essais à l'orniéreur



5,4%



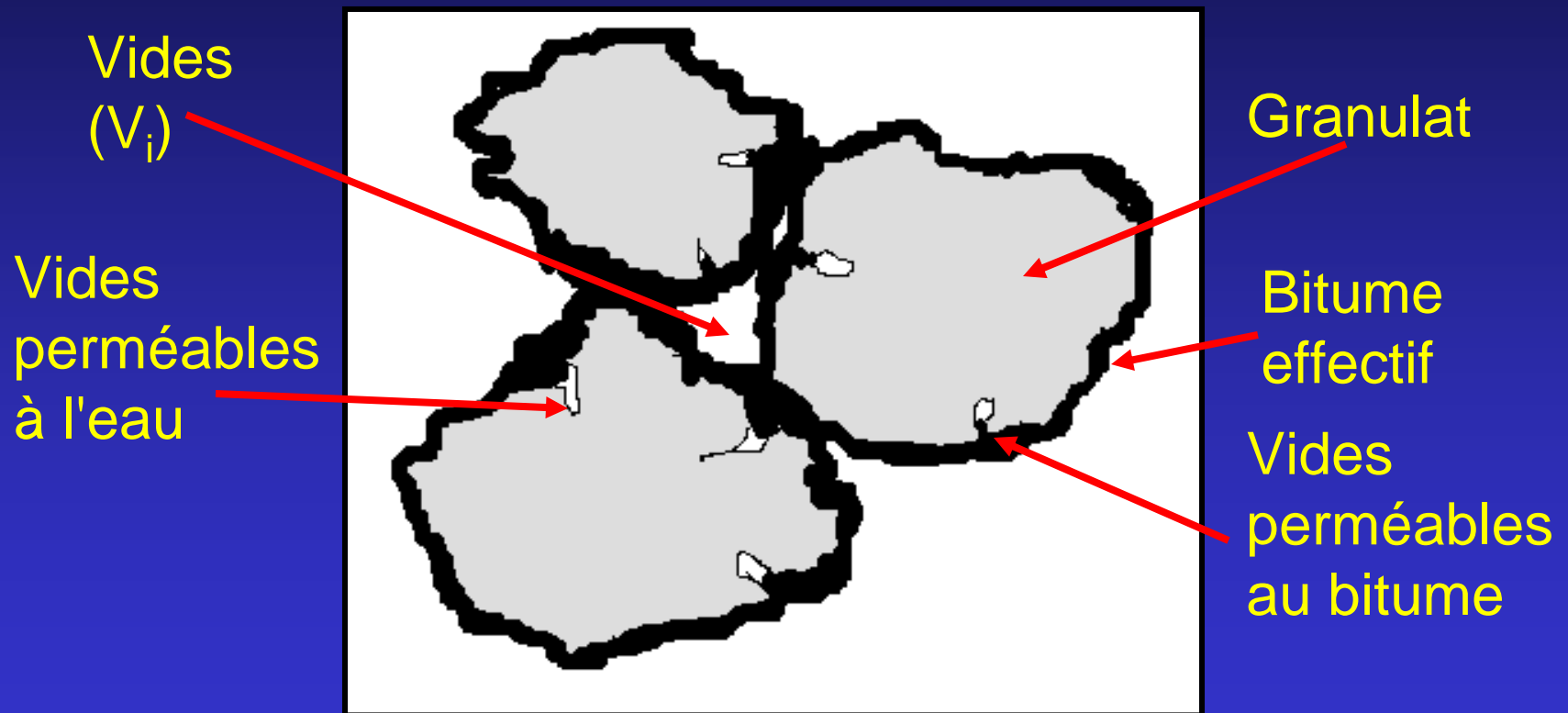
5,6%



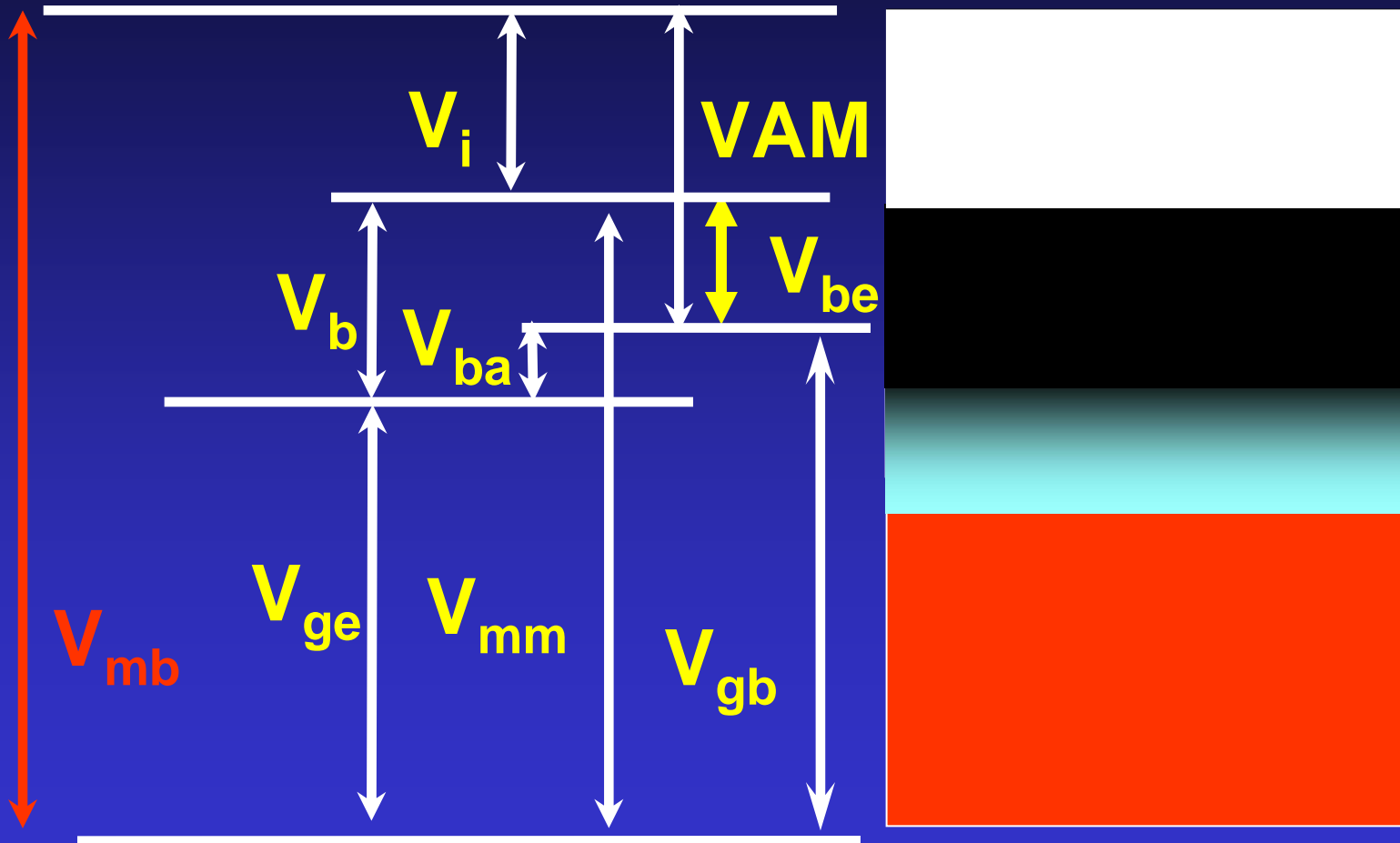
5,8%

Teneur en bitume

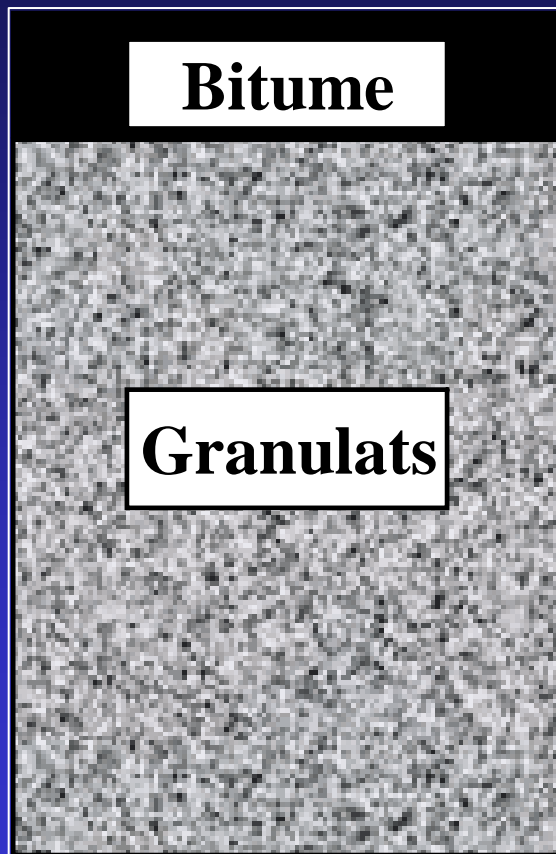
Volumes dans les enrobés



Volumes dans les enrobés



Volumes dans les enrobés



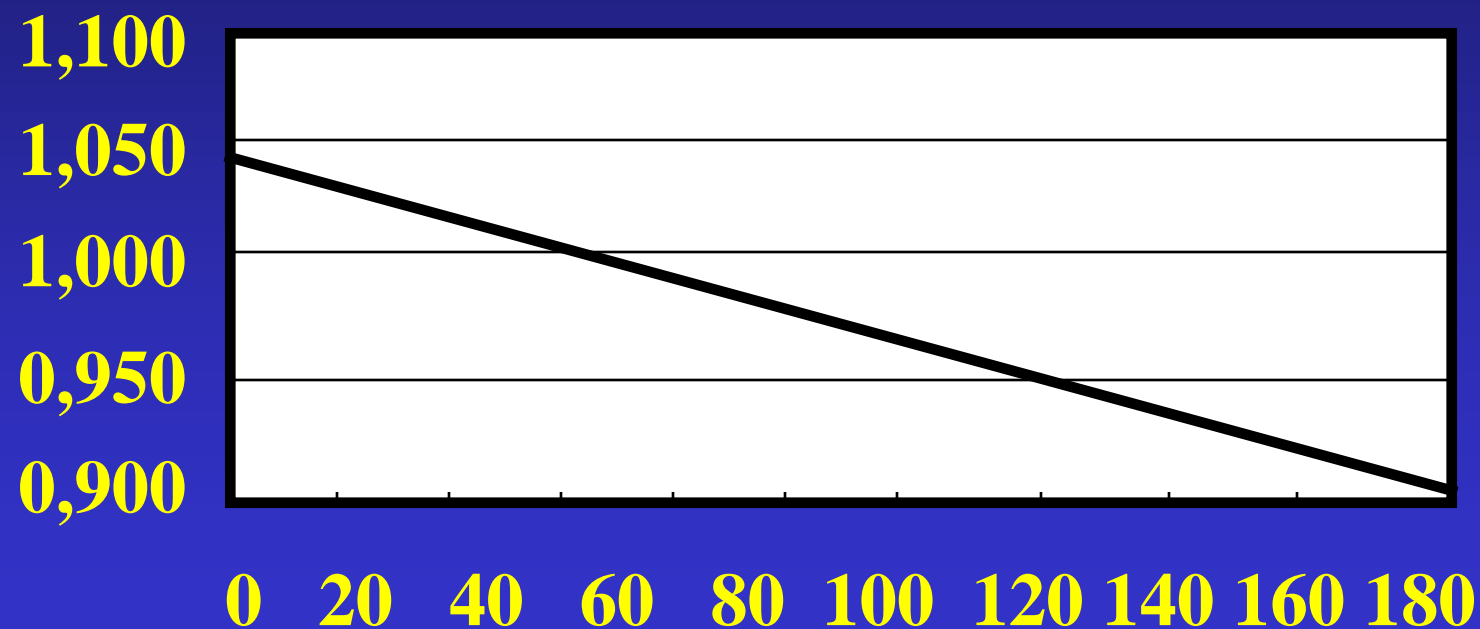
$$D_b = 1,020$$

$$\text{Cas 1: } D_{gb} = 2,800$$

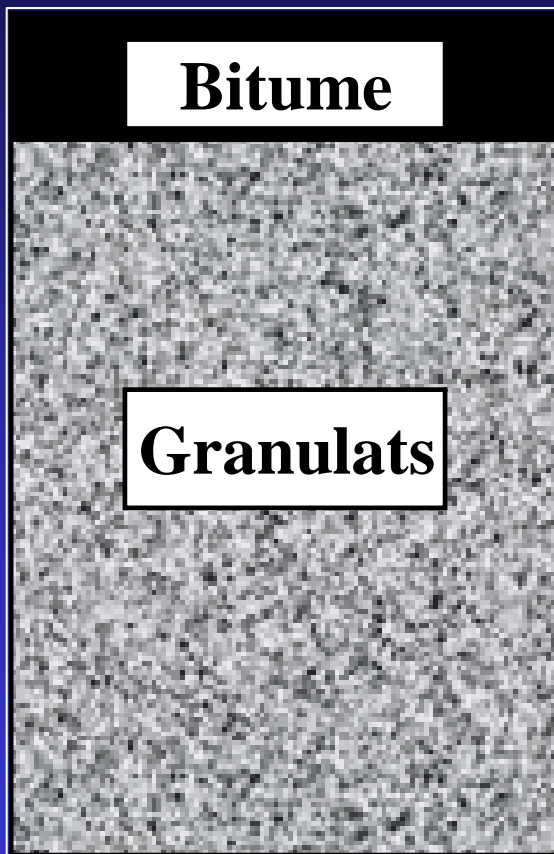
$$\text{Cas 2: } D_{gb} = 2,670$$

Densité du bitume D_b

- La densité du bitume D_b est déterminée selon la norme ASTM D 70 à 25 °C.
 D_b est fonction de la température.



Volumes dans les enrobés



$$D_b = 1,020$$

$$\text{Cas 1: } D_{gb} = 2,800$$

$$M_b = 110 \text{ kg}$$

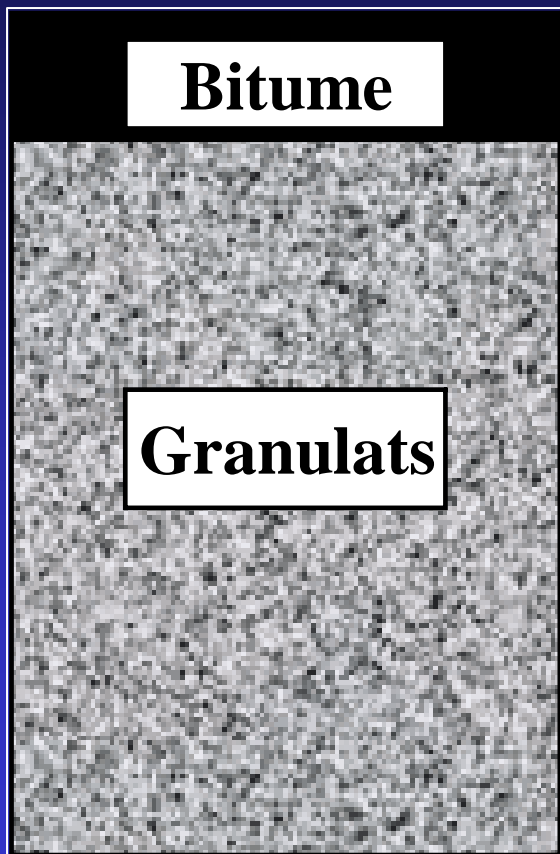
$$M_g = 2200 \text{ kg}$$

$$\% \text{ bit} = M_b / (M_b + M_g) \times 100$$

$$\% \text{ bit} = 110 / (110 + 2200) \times 100$$

$$= 4,76 \%$$

Volumes dans les enrobés



$$D_b = 1,020$$

$$\text{Cas 2: } D_{gb} = 2,670$$

$$M_b = 110 \text{ kg}$$

$$M_g = \text{XXXX} \text{ kg}$$

$$M_g = 2200 \times 2,670 / 2,800 = 2098 \text{ kg}$$

$$\% \text{ bit} = M_b / (M_b + M_g) \times 100$$

$$\% \text{ bit} = 110 / (110 + 2098) \times 100$$

$$= 4,98 \%$$

Volumes dans les enrobés

$$\begin{aligned}\text{Cas 1: \% bit} &= V_{\text{bit}} / (V_{\text{bit}} + V_{\text{g}}) \times 100 \\ &= \frac{110 / 1,02}{110 / 1,02 + 2200 / 2,800} \times 100 \\ &= 12,1 \%\end{aligned}$$

Volumes dans les enrobés

$$\begin{aligned}\text{Cas 2: \% bit} &= V_{\text{bit}} / (V_{\text{bit}} + V_{\text{g}}) \times 100 \\ &= \frac{110 / 1,02}{110 / 1,02 + 2098 / 2,670} \times 100 \\ &= 12,1 \%\end{aligned}$$

Méthode LC

- **Méthode volumétrique**
 - **Enrobé grenu 10mm: $V_{be} = 12,4\%$**
 - **Enrobé semi grenu 10mm: $V_{be} = 12,2\%$**

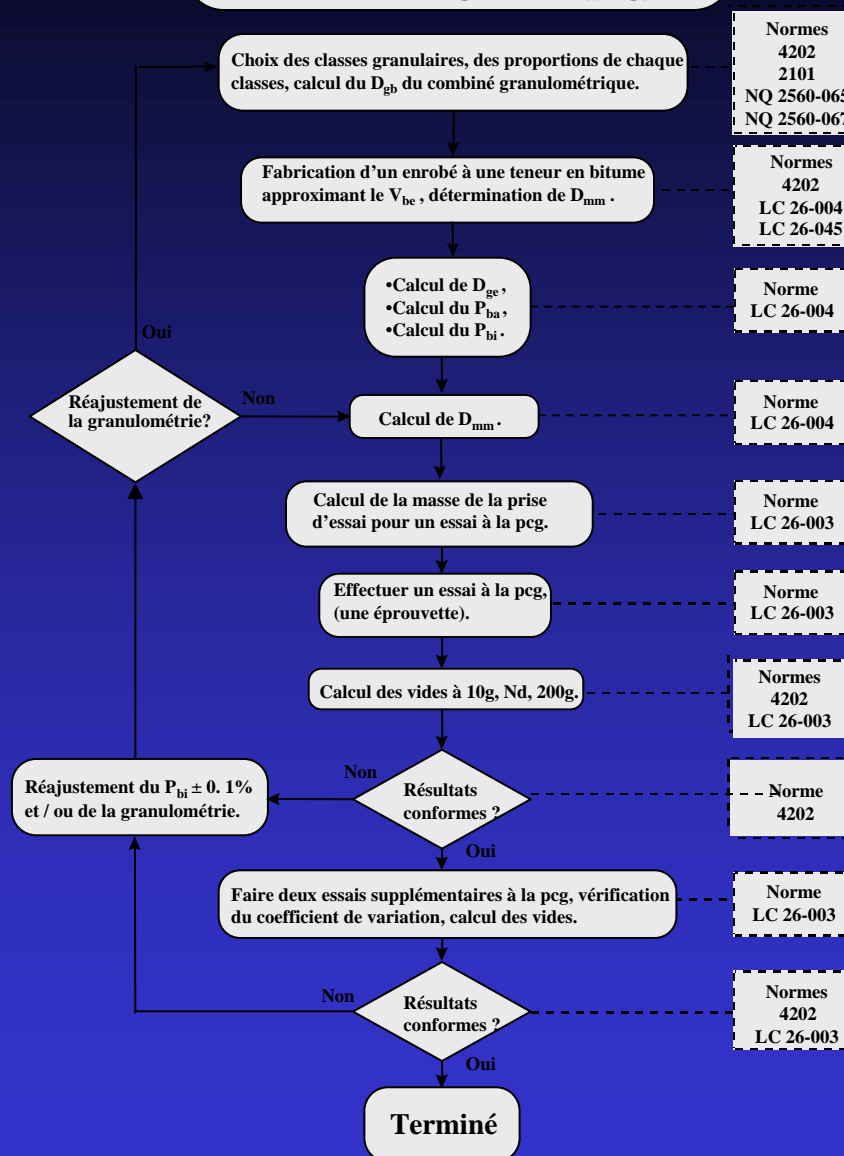
Note: Le V_{be} est calculé par rapport à V_{mm}

Méthode LC

Historique

- **1991: Etudes sur la méthode française**
- **1993: Etudes sur la méthode superpave**
 - **Premier enrobé de type LC (EG-12,5)**
- **1994 - 1995: Mise au point de la méthode LC, combinaison des méthodes française et Superpave.**
 - **Enrobés EG-10 et EGA-10**
- **1996: Enrobés ESG-10 et ESG-14**
- **1997: Normalisation de la méthode LC**
- **Par la suite, développement de nouveaux enrobés tels les EG-5, ESG-5, SMA-10, GB-20, EC-10**

Méthode LC 26-004 Formulation des enrobés à la presse à cisaillement giratoire (pcg).

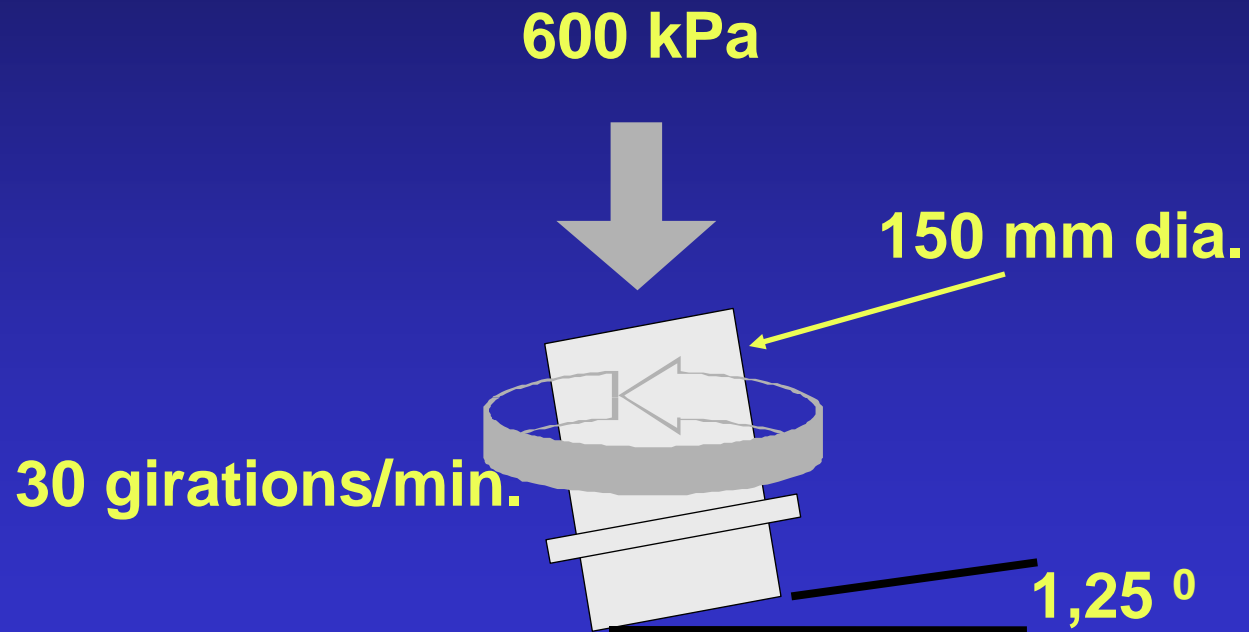


Méthode LC

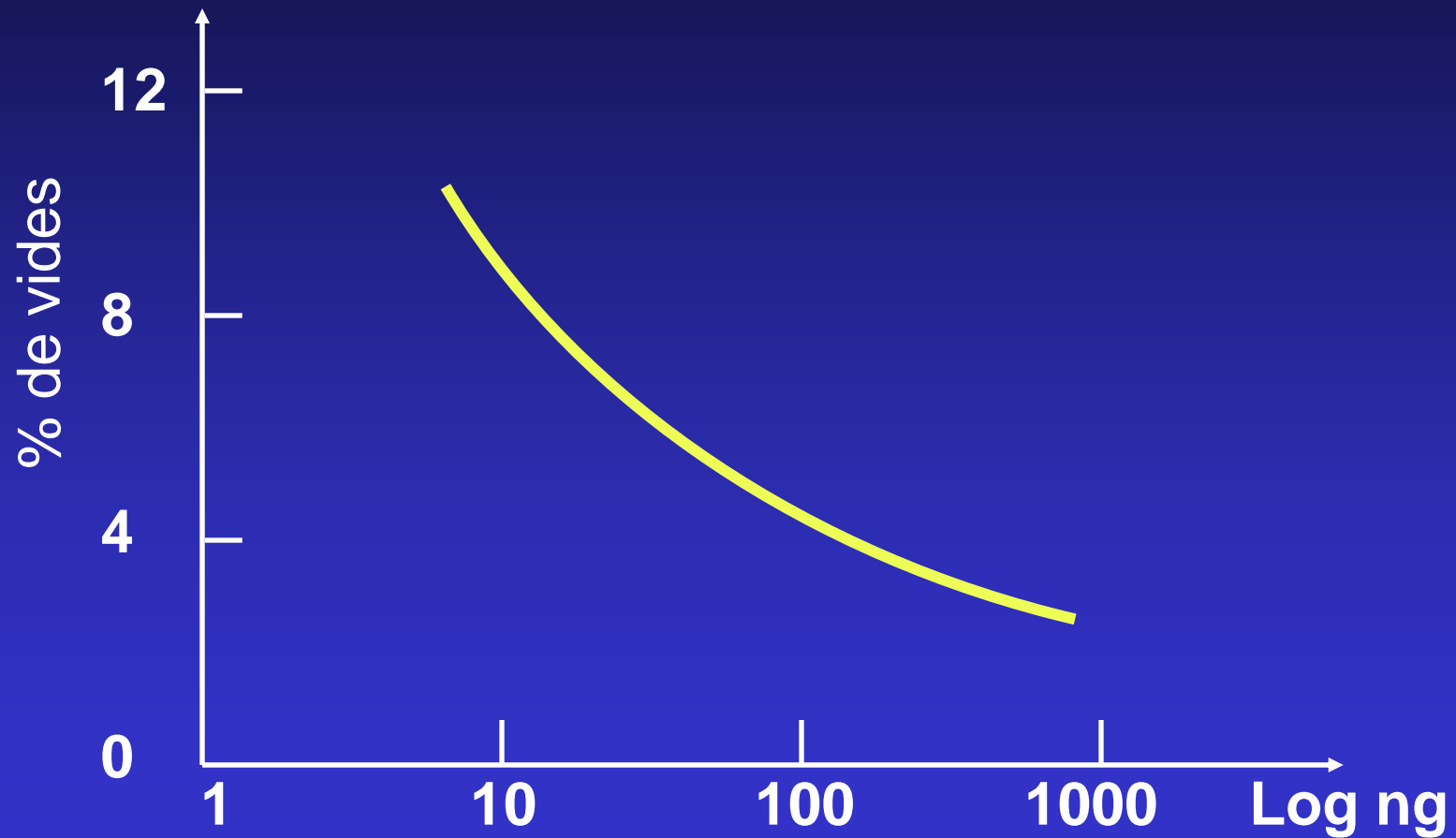
- **Méthode de formulation à deux niveaux**
 - **Niveau 1: Maniabilité à la Presse à cisaillement giratoire**
 - **Niveau 2: Essais de résistance à l'orniérage**

Méthode LC, niveau 1

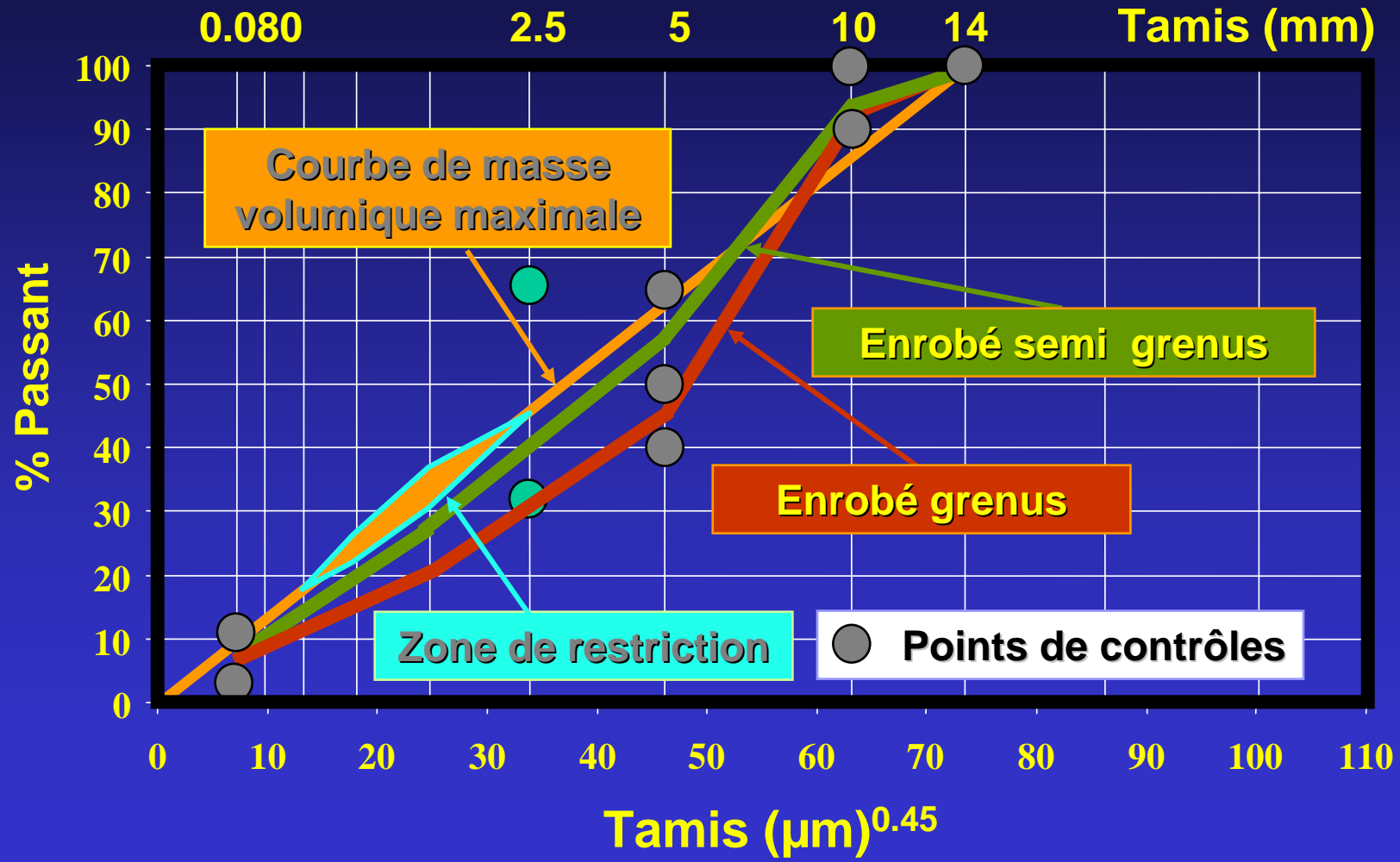
- Presse à cisaillement giratoire superpave



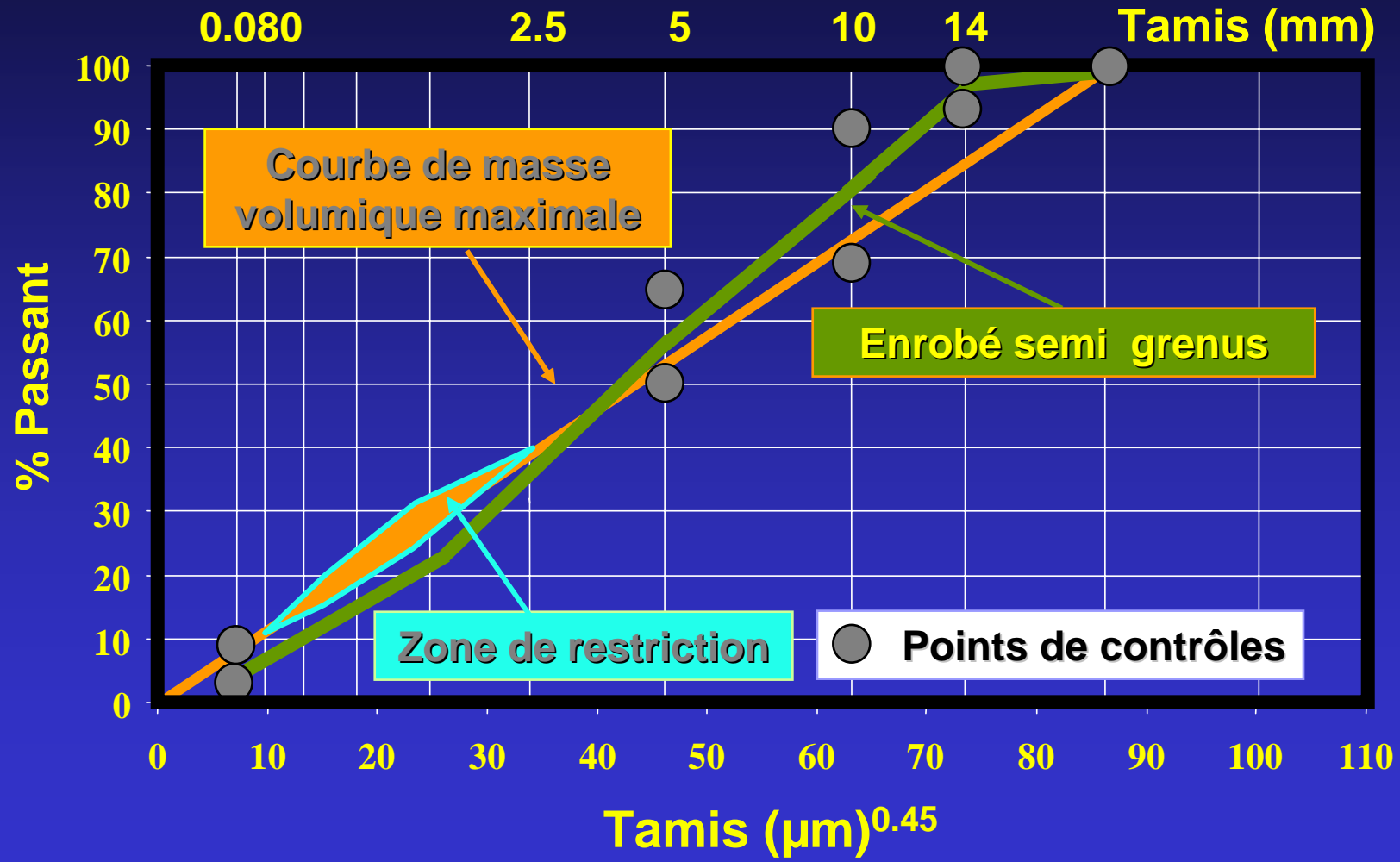
Presse à cisaillement giratoire



Enrobés 10mm



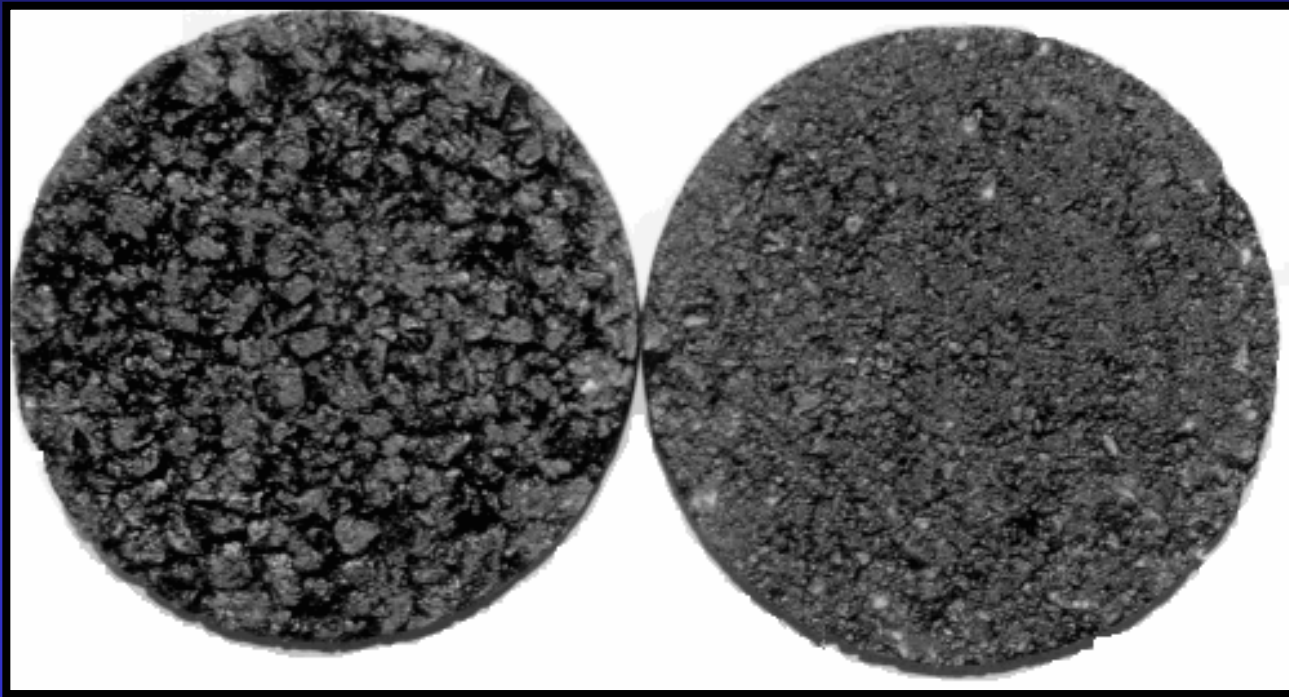
Enrobé 14mm



Enrobés 10mm

Grenu

Semi-grenu



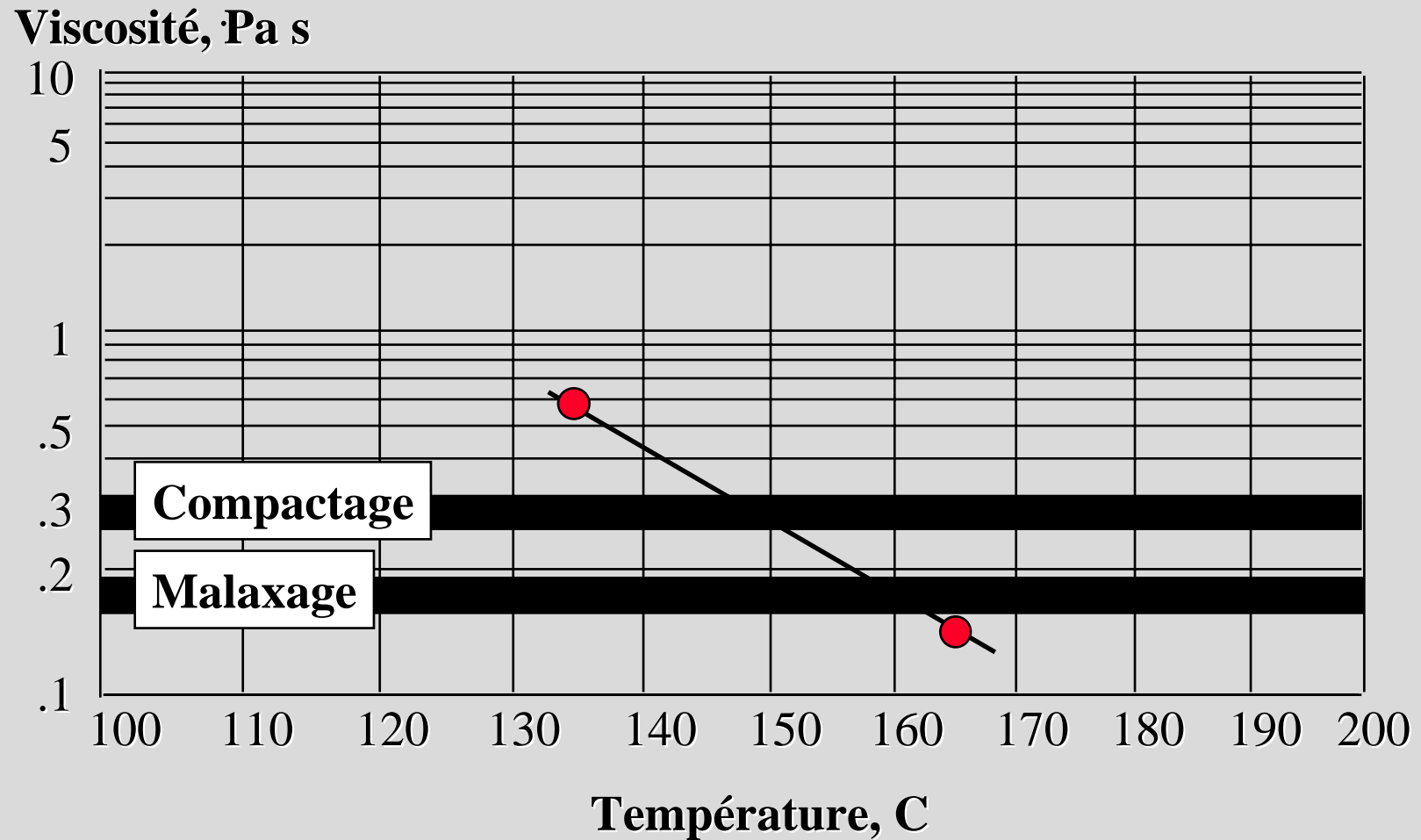
Méthode LC

- Les éléments différents de la méthode Superpave sont:
 - les températures des composants, de malaxage et de compactage;
 - la température et le temps de curage des échantillons d'enrobés;
 - la masse de la prise d'essai;
 - la détermination de la densité brute de l'enrobé;
 - le calcul des vides V_i ;
 - la validité de l'essai à la pcg.

Préparation des composantes

- Les températures de malaxage et compactage en laboratoire;
 - Les températures de chauffage pour le malaxage et de chauffage pour le compactage sont fonction de la classe de bitume (PG);

Préparation des composantes



Préparation des composantes

Classes de bitume (PG)	Températures de chauffage pour le malaxage (°C)	Températures de chauffage pour le compactage (°C)
52-34	140 ± 2	130 ± 2
52-34 ⁽¹⁾	145 ± 2	135 ± 2
58-28	150 ± 2	135 ± 2
58-28 ⁽¹⁾	155 ± 2	140 ± 2
52-40	145 ± 2	135 ± 2
58-34	155 ± 2	140 ± 2
58-40	168 ± 2	150 ± 2
64-34	168 ± 2	160 ± 2
70-34	168 ± 2	160 ± 2

1. Enrobés additionnés de fibres d'amiante.

2. Utiliser la température associée à la viscosité si elle diffère de plus de 5 deg. de celle du tableau.

Note: Vérifier les températures selon les normes les plus récentes.

Méthode LC, niveau 1

- **Détermination des caractéristiques des granulats**
 - Proportions des classes granulaires;
 - Fabrication de l'enrobé à une teneur en bitume avoisinant celle du V_{be} ;
 - Détermination de la densité maximale de l'enrobé D_{mm} .

Classes granulaires recommandées

TAMIS	0/2,5	0/5	0/10	0/14	0/20
28					100
20				100	85-100
14			100	85-100	
10		100	85-100		
5	100	85-100			
2,5	85-100				
1,25					
D	2,5	5	10	14	20
d < 2,5 mm	0	0	0	0	0

Classes granulaires recommandées

TAMIS	2,5/5	2,5/10	2,5/14	2,5/20	5/10	5/14	5/20	10/14	10/20	14/20
28				100			100		100	100
20			100	85-100		100	85-100	100	85-100	80-100
14		100	85-100		100	85-100		80-100	25-75	0-20
10	100	85-100	33-66	33-66	85-100	33-66	33-66	0-20	0-15	< 3
5	85-100	33-66			0-15	0-15	0-15	< 3	< 3	
2,5	0-15	0-15	0-15	0-15	< 3	< 3	< 3			
1,25	< 5	< 3	< 3	< 3						
D	5	10	14	20	10	14	20	14	20	20
d	2,5	2,5	2,5	2,5	5	5	5	10	10	14
$D/d \geq 1,4$	2	4	5,6	8	2	5,6	4	1,4	2	1,4

Enrobés LC - Norme 4202

Types d'enrobés	GB-20	ESG-14	ESG-10	EG-10	EGA-10	SMA-10	ESG-5
28 mm	100						
20 mm	95 – 100	100					
14 mm	67 – 90	95 - 100	100	100	100	100	
10 mm	52 – 75	70 - 90	92 - 100	90 - 100	90 - 100	90 - 100	100
5 mm	35 – 50	40-60	52 - 65	40 - 48	40 - 50	25 - 35	50 - 70
2,5 mm *	-	39,2	46,1	46,1	46,1	18 - 28	-
1,25 mm *	-	25,7	30,7 - 36,7	30,7 - 36,7	30,7 - 36,7	-	-
630 um *	-	19,1 - 23,1	22,8 - 26,8	22,8 - 26,8	22,8 - 26,8	-	-
315 um *	-	15,4	18,1	18,1	18,1	-	-
160 um	-	-	-	-	-	-	-
80 um	4 - 8	3 - 8	4 - 10	4 - 10	4 - 10	8 - 11	4 - 12
Fibres (%)		-	-	-	1,3	-	-
V _{be} (%)	10,2	11,4	12,2	12,4	14,6	14,8	13,5

* Zone de restriction recommandée

Proportions de classes granulaires à utiliser

	0 - 2,5 mm	2,5 - 5 mm	0 - 5 mm	5 - 10 mm	10 - 14 mm	14 - 20 mm
ESG-14	*	*	57	23	20	-
ESG-10	*	*	57	43	-	-
EG-10	*	*	45	55	-	-
EGA-10	*	*	45	55	-	-
SMA-10	30	-	-	70	-	-
GB-20	*	*	45	17	14	24
EC-10	(1)	(1)	72	28	-	-
ESG-5	60	40	-	-	-	-

(1) Les classes 0-2,5m et 2,5-5mm peuvent remplacer le 0-5mm.

Méthode LC, niveau 1

- **Détermination des caractéristiques des granulats**
 - Détermination du D_{gb} du combiné granulométrique;
 - Calcul du D_{ge} ;
 - Calcul du P_{ba} ;
 - Calcul du P_{bi} .

Méthode LC, niveau 1

- Calcul de la densité brute du mélange de granulat:

$$D_{gb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{D_{gb1}} + \frac{P_2}{D_{gb2}} + \dots + \frac{P_N}{D_{gbN}}}$$

Méthode LC, niveau 1

- Fabrication d'un enrobé à une teneur en bitume avoisinant le V_{be} ;
- Détermination de D_{mm} .

Méthode LC, niveau 1

- Calcul de la densité effective du granulat D_{ge}

$$D_{ge} = \frac{P_{mm} - P_{bi \text{ est.}}}{\frac{P_{mm}}{D_{mm}} - \frac{P_{bi \text{ est.}}}{D_b}}$$

Méthode LC, niveau 1

- Calcul de la teneur en bitume absorbé

$$P_{ba} = 100 \frac{(D_{ge} - D_{gb})}{(D_{gb} \times D_{ge})} D_b$$

Méthode LC, niveau 1

- Calcul de la teneur en bitume P_{bi}

$$P_{bi} = \left\{ \frac{V_{be} D_b + P_{ba} D_{gb} (100 - V_{be}) / 100}{D_{gb} (100 - V_{be}) + V_{be} D_b + P_{ba} D_{gb} (100 - V_{be}) / 100} \right\} \times 100$$

Méthode LC, niveau 1

- Calcul de la densité maximale de l'enrobé à la teneur en bitume P_{bi}

$$D_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_g}{D_{ge}} + \frac{P_{bi}}{D_b}}$$

Compaction

- La masse nécessaire à la fabrication d'une éprouvette est celle requise pour obtenir une éprouvette de 115mm de hauteur et de 100% de compacité.

$$m = D_{mm} \times \rho \times \frac{\Pi \times \varnothing^2 \times h(\text{min})}{4}$$

$$h(\text{min}) = 115 \text{ mm}$$

$$\rho = 1 \text{ g/cm}^3$$

Préparation de l'éprouvette

Les granulats chauds sont placés dans le bol et le bitume est ajouté



Malaxage

**Mélanger jusqu'à ce que les granulats
soient bien enrobés**



Vieillissement à court terme

- L'enrobé est déposé dans un plat et mis à l'étuve pour simuler le vieillissement à court terme
- Une fois la température atteinte, la durée du chauffage minimale est de 30 min et ne doit jamais excéder deux heures



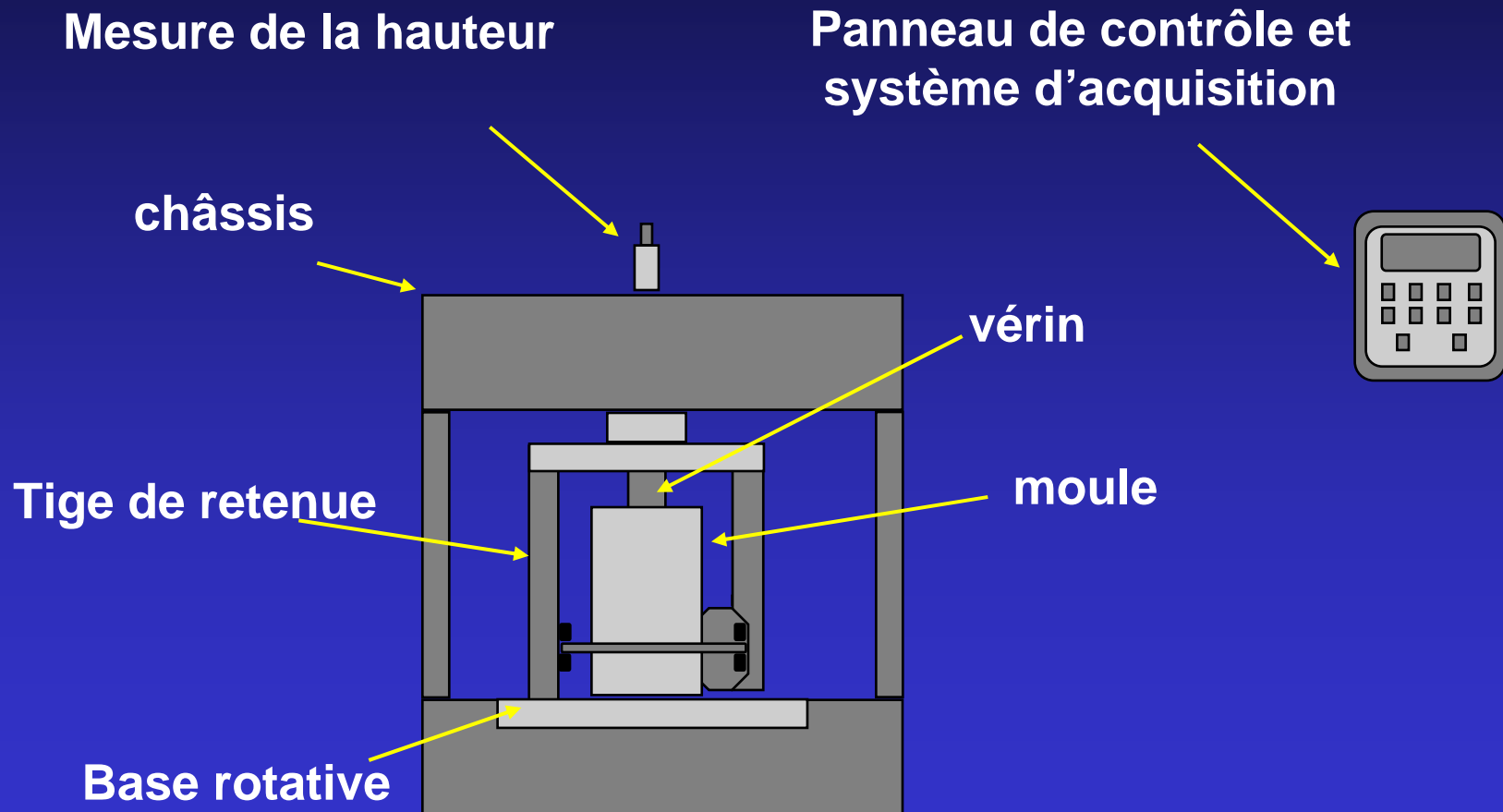
Compactage

Exemple de compacteurs



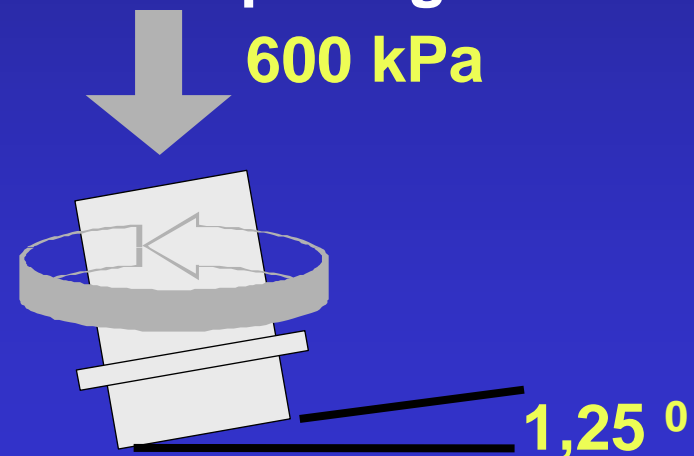
Compactage

Éléments principaux de la presse à cisaillement giratoire



Compactage

- Presse à cisaillement giratoire
 - Force axiale et effet de cisaillement dans l'enrobé
 - moule de 150 mm de diamètre
 - Dimension des granulats jusqu'à 40 mm
 - Mesure de la hauteur durant le compactage
 - Les vides interstitiels dans l'enrobé peuvent être mesurés durant le compactage



Compactage

Après vieillissement, sortir l'enrobé et le moule de l'étuve. Placer un papier dans le fond du moule.



Compactage

**Placer un entonnoir sur le moule et mettre
l'enrobé dans le moule.
Prendre garde à la ségrégation.**



Compactage

Placer une autre rondelle de papier sur l'enrobé et placer le moule dans la presse.



Compactage

Après compactage, l'éprouvette est extraite du moule.



Compactage

Enlever le papier et identifier les éprouvettes.

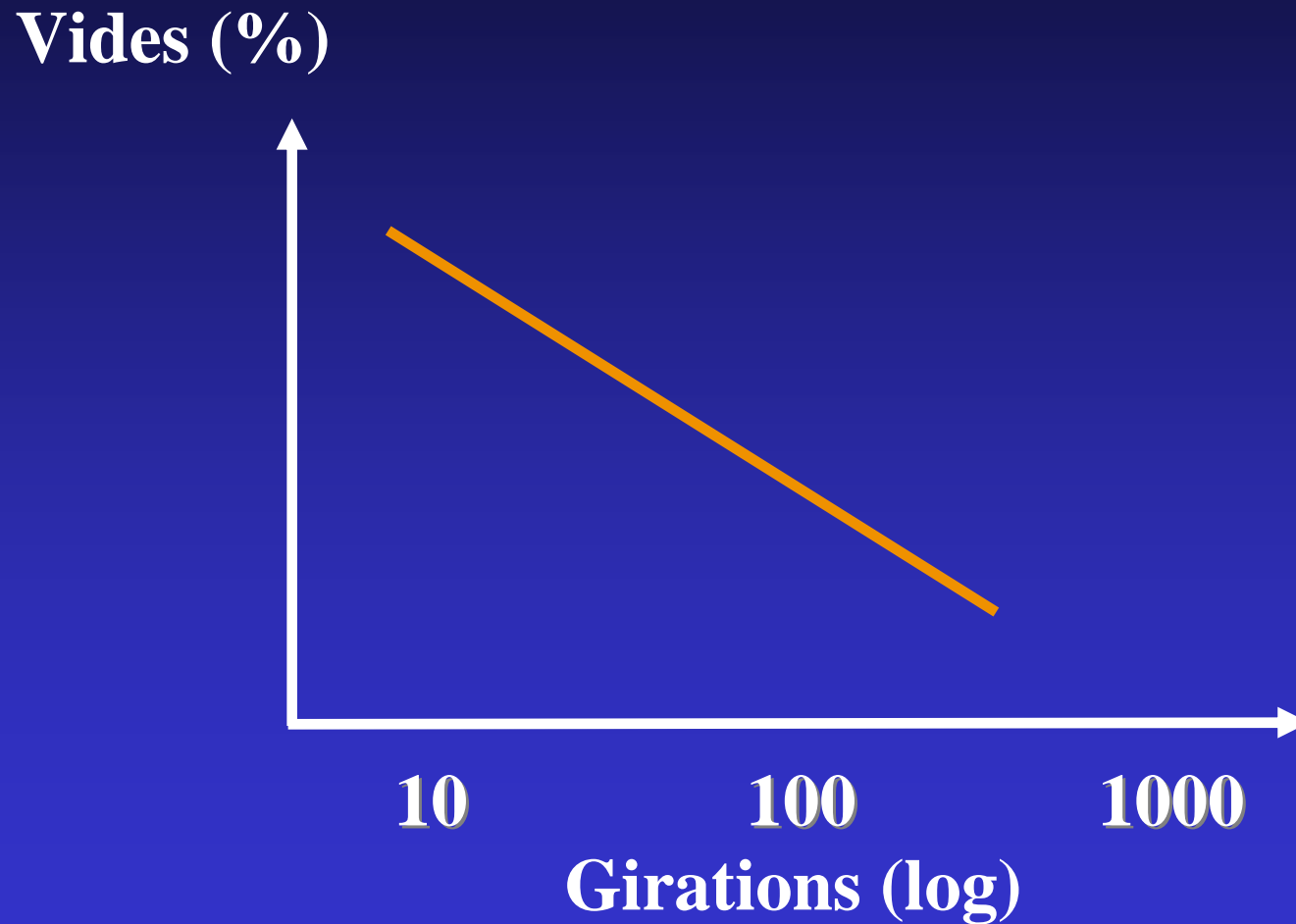


Résultats de l'essai à la PCG

- Détermination des vides V_i dans l'enrobé

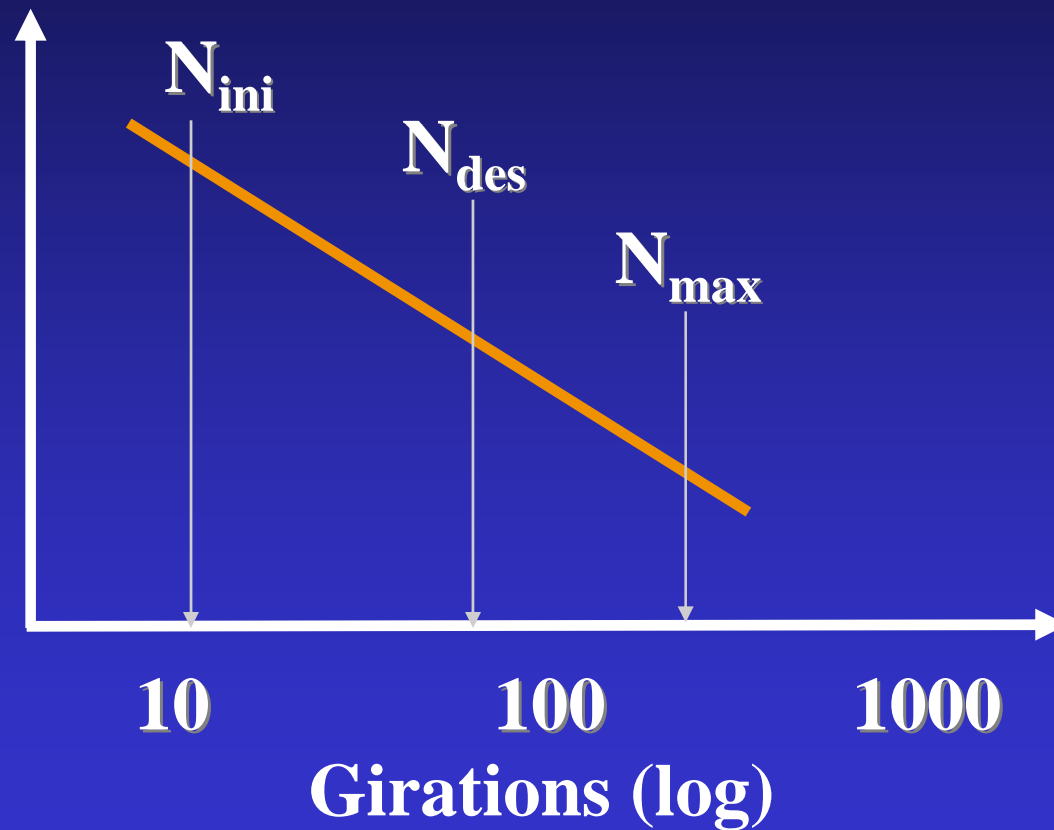
$$V_i = 100 \times \frac{H(\text{ng}) - h(\text{min})}{H(\text{ng})}$$

Résultats de l'essai à la PCG



Points importants des résultats à la PCG

Vides (%)



Maniabilité requise à la pcg

	NOMBRE DE GIRATIONS		
ENROBÉ	N_{ini}	N_{des.}	N_{max}
	V_i >= 11%	V_i = 4 à 7%	V_i >= 2%
ESG-14	10	100	200
ESG-10	10	80	200
EG-10	10	80	200
EGA-10	10	80	200
GB-20	10	120	200
ESG-5	10	50	75
SMA-10	10	60	200

Vérifications des vides V_i

- Pour chacun des nombres de girations requis (10g, N_{des} , 200g), les vides V_i doivent être conformes aux exigences.
 - Si conformes, l'essai est complété en réalisant deux autres éprouvettes;
 - Si non conformes, l'enrobé est modifié (teneur en bitume et/ou granulométrie) et on reprend la formulation à l'étape appropriée.

Vérifications des vides V_i

- L'essai est complété en réalisant deux éprouvettes supplémentaires. Si l'étendue des vides ($X_{\max} - X_{\min}$) est égale ou inférieure à l'étendue critique ($CR = 0,8$) au niveau de probabilité de 95%, on procède à l'acceptation des vides. Sinon on rejette l'éprouvette qui ne répond pas au critère d'acceptabilité et on refait une ou trois éprouvettes de façon à respecter l'étendue critique.

Vérifications des vides V_i

	V_i (%)			Validation de l'essai
Nombre de girations	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Étendue
10	12,6	12,0	11,9	0,7
80	6,1	5,5	5,3	0,8
200	3,8	3,2	3,0	0,8

Dans cet exemple, l'essai est conforme

Vérifications des vides V_i

- Pour chacun des nombres de girations requis, déterminer les % de vides moyens.
 - Vérifier le respect des exigences.
- Calculer les valeurs du VAM et de VCB à 4% de vides.
 - Vérifier les valeurs (VAM et VCB) obtenues par rapport aux critères recommandés.

Optimisation de la formule d'enrobé

Grosseur nominale maximale	VAM minimal (%)
10 mm	15,0
14 mm	14,0
20 mm	13,0
28 mm	12,0

Calcul du VAM

$$VAM = \frac{V_{be} \times (100 - V_i)}{100} + V_i$$

Calcul du V_{be}

$$V_{be} = 100 \times \left(\frac{\left(100P_{ba}D_{gb}\right) - \left(100P_bD_{gb}\right) - \left(P_{ba}D_{gb}P_b\right)}{\left(100P_bD_b\right) - \left(100P_bD_{gb}\right) - \left(P_{ba}D_{gb}P_b\right) - \left(100^2D_b\right) + \left(100P_{ba}D_{gb}\right)} \right)$$

Calcul du VCB

$$\text{VCB} = 100 \times \frac{\text{VAM} - V_i}{\text{VAM}}$$

Optimisation de la formule d 'enrobé

Niveau de circulation	Critères de VCB (%)
Faible	70 - 80
Moyen	65 - 78
Fort	65 - 75

Optimisation de la formule d 'enrobé

- V_i près du minimal de 4,0%
 - Épaisseur de pose minimale;
 - Moins bonne résistance à l'orniérage;
 - Meilleure résistance à la fissuration;
 - Meilleure imperméabilité.

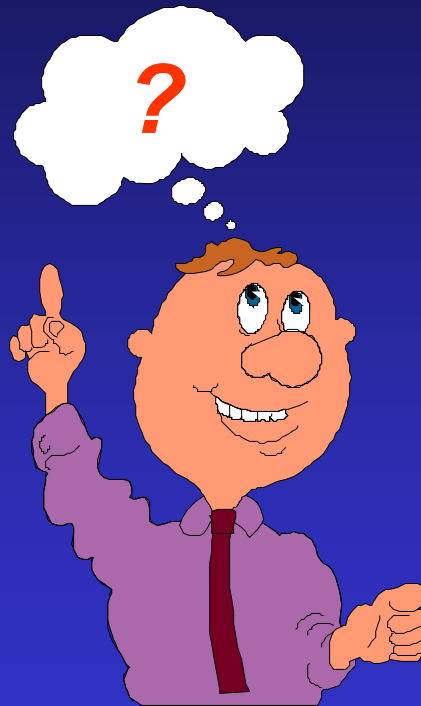
Optimisation de la formule d 'enrobé

- V_i près du maximale de 7,0%
 - Épaisseur de pose maximale;
 - Meilleure résistance à l'orniérage;
 - Résistance à la fissuration plus faible;
 - Texture plus ouverte.

Tenue à l'eau

- **Effectuer l'essai de tenue à l'eau selon la méthode LC 26-001**
- LC 25-009 (projet pilote: évaluation de la résistance d'un liant bitumineux au désenrobage)

Questions



Les enrobés bitumineux : formulation, fabrication, mise en place. – Montréal 2006.