

Volumétrie et méthode de formulation Marshall

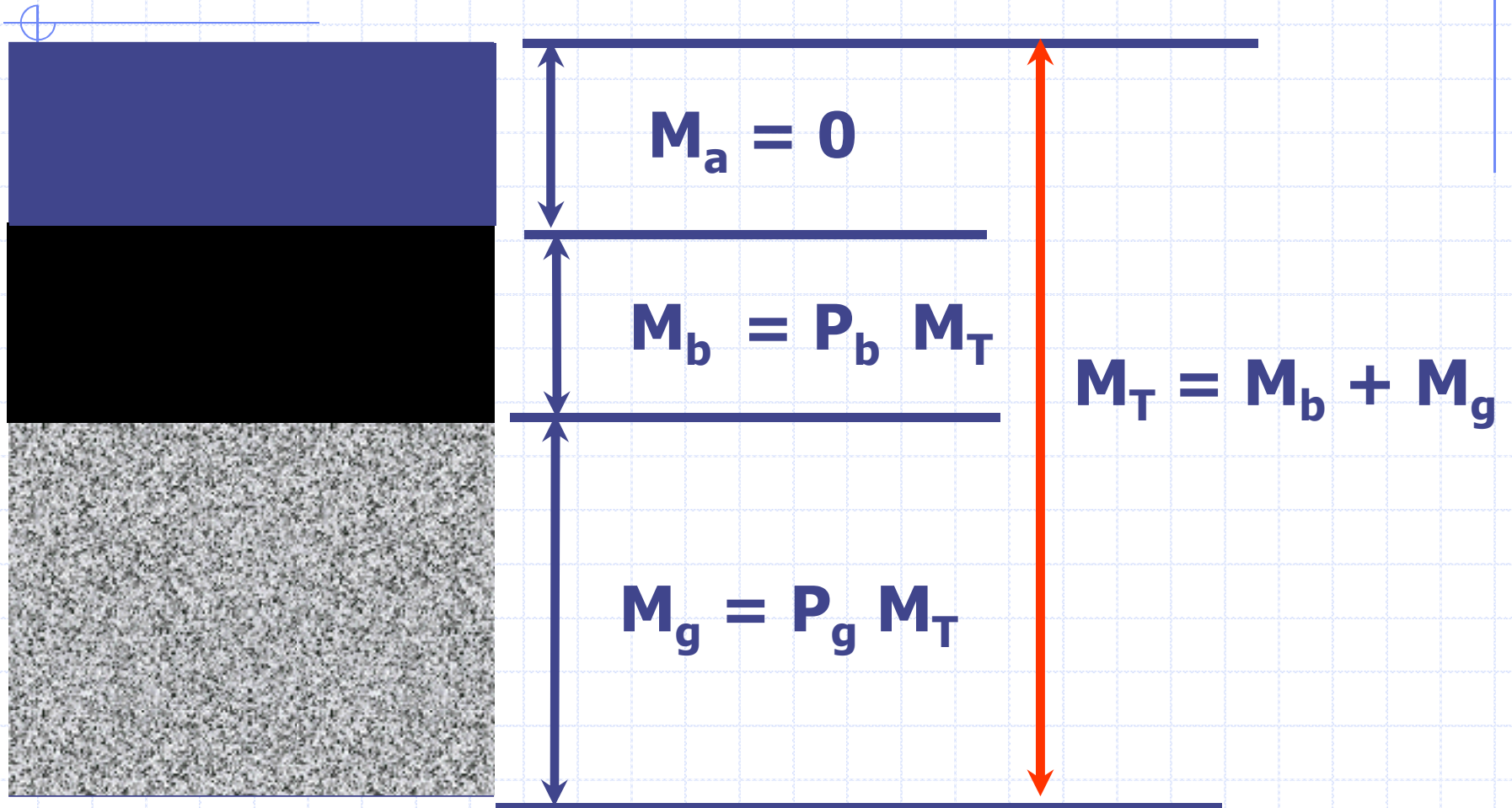


Pierre Langlois, M. ing.

Pourquoi travailler en volume?

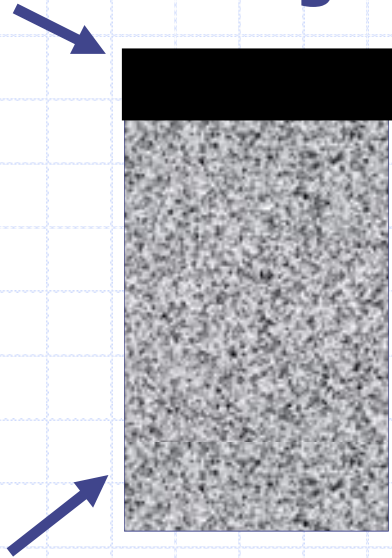
- ◆ Les granulats ont des densités variées;
- ◆ Pour un même volume d'enrobé, les rapports de masses sont variables.

Rapport de masses



Rapport de **masse** et de volume

Bitume = 110 Kg



Granulats = 2200 Kg

- Densité du bitume = 1,020
- Densité brute des granulats = 2,800

$$\% \text{ bit.} = \frac{M_b}{M_b + M_g} \times 100$$

$$\% \text{ bit.} = \frac{110}{110 + 2200} \times 100$$

$$\% \text{ bit} = 4,76\%$$

Rapport de **masse** et de volume

Bitume = 110 Kg



Granulats = 2098 Kg



- Densité du bitume = 1,020
- Densité brute des granulats = 2,670

Pour un **même volume**,
la masse du granulat
sera de:

$$\frac{2200 \times 2,670}{2,800} = 2098 \text{ Kg}$$

Rapport de **masse** et de volume

Bitume = 110 Kg



Granulats = 2098 Kg

- Densité du bitume = 1,020
- Densité brute des granulats = 2,670

$$\% \text{ bit.} = \frac{M_b}{M_b + M_g} \times 100$$

$$\% \text{ bit.} = \frac{110}{110 + 2098} \times 100$$

$$\% \text{ bit} = 4,98\%$$

Rapport de masse et de volume

- Densité du bitume = 1,020

Bitume = 110 Kg

Cas 1: Densité brute des granulats = 2,800



$$\% \text{ bit.} = \frac{V_b}{V_b + V_g} \times 100$$

$$\% \text{ bit.} = \frac{110/1,02}{110/1,02 + 2200/2,800} \times 100$$

Granulats = 2200 Kg

% bit = 12,1%

Rapport de masse et de volume

- Densité du bitume = 1,020

Bitume = 110 Kg

Cas 2: Densité brute des granulats = 2,670



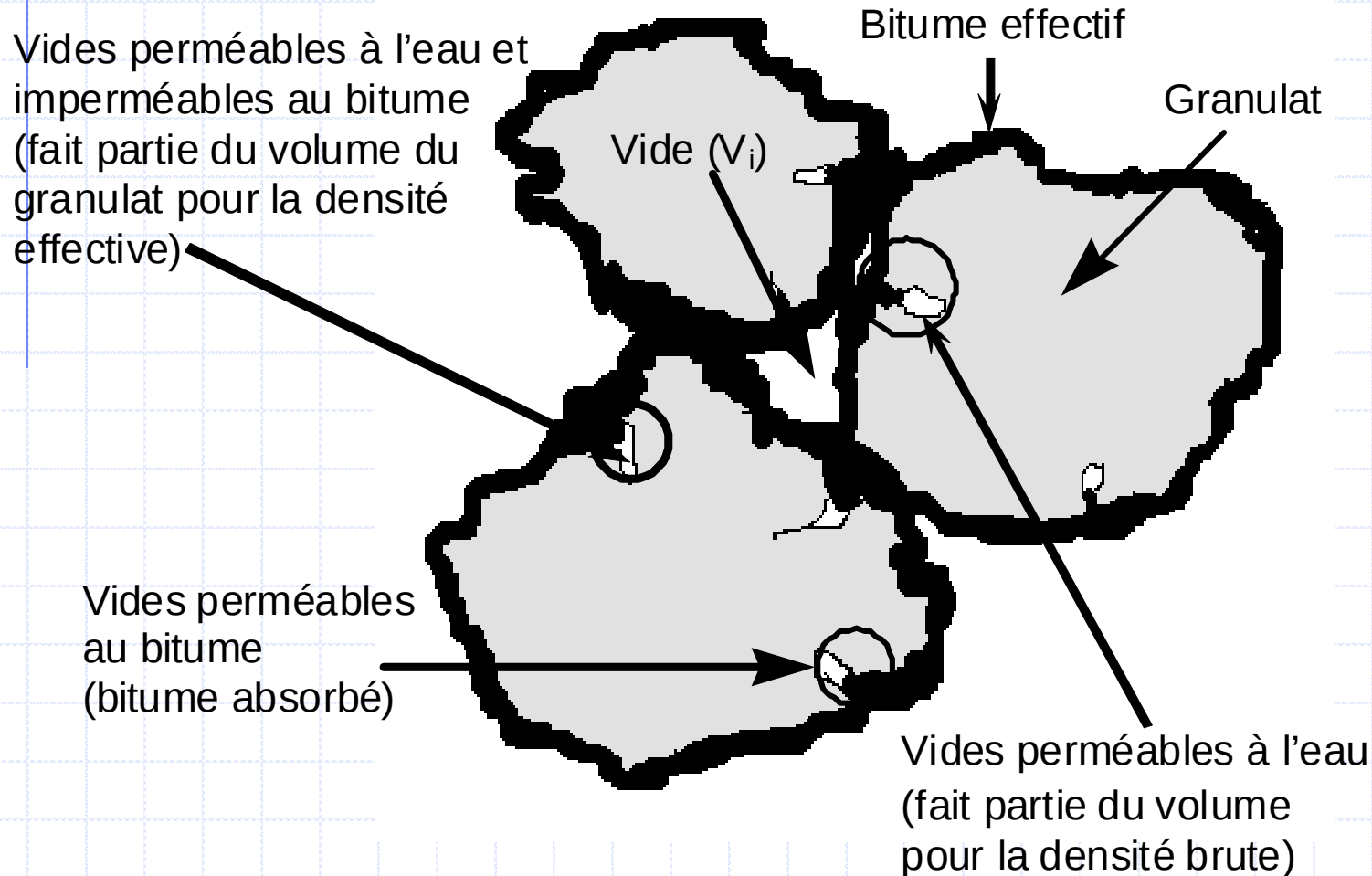
$$\% \text{ bit.} = \frac{V_b}{V_b + V_g} \times 100$$

$$\% \text{ bit.} = \frac{110/1,02}{110/1,02 + 2200/2,670} \times 100$$

Granulats = 2098 Kg

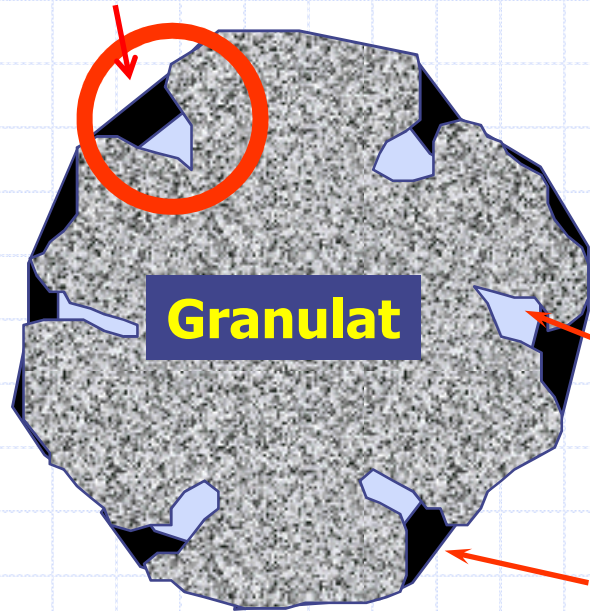
% bit = 12,1%

Terminologie volumétrique des enrobés



Volume effectif du granulat

Vides en contact avec la surface



Granulat

**Vol. des vides perméables à l'eau
non remplis par le bitume**

Bitume absorbé

**Volume effectif = volume du granulat incluant les vides
perméables à l'eau - les vides perméables au bitume**

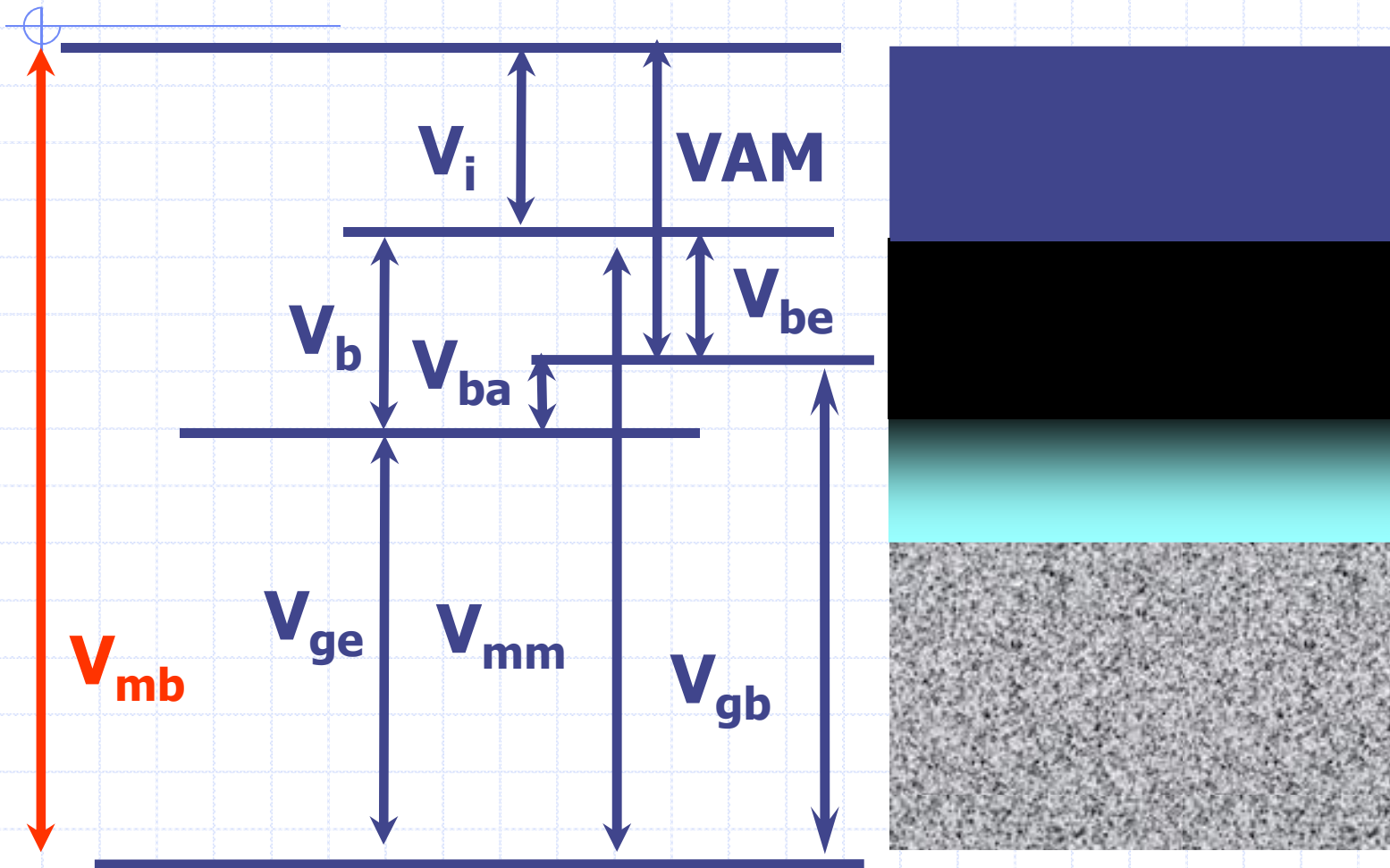
Volume brut du granulat

Vides en contact avec la surface



Volume brut = volume du granulat incluant les vides perméables à l'eau + les vides perméables au bitume

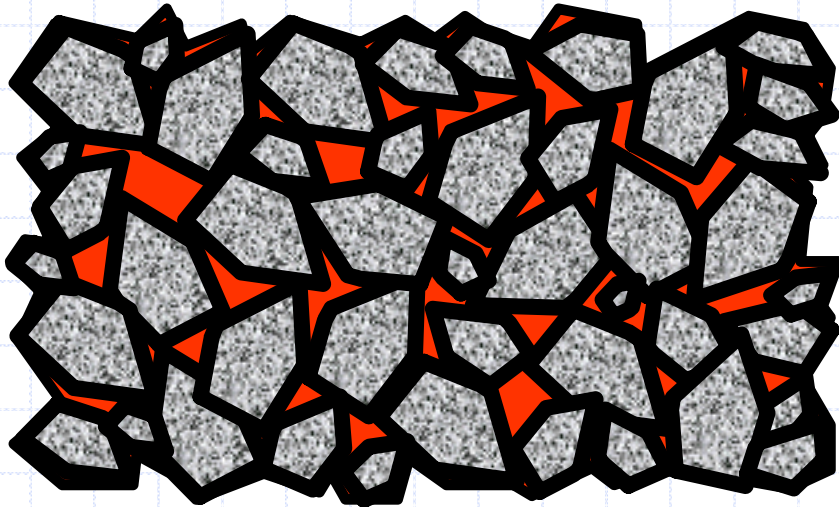
Rapports volumétriques



Densité brute de l'enrobé compacté

- ◆ Bitume et granulats mélangés et compactés pour former une éprouvette

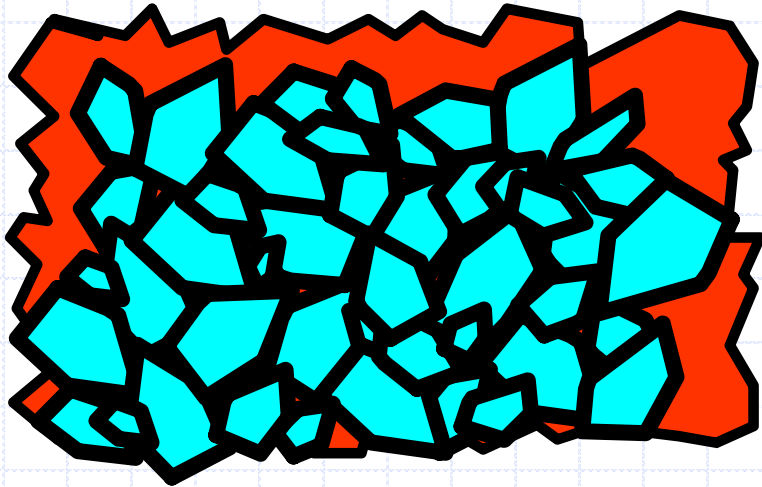
$$D_{mb} = \frac{\text{Masse gra. et bitume}}{\text{Vol.eff. gra., bitume, vides}}$$



Densité maximale

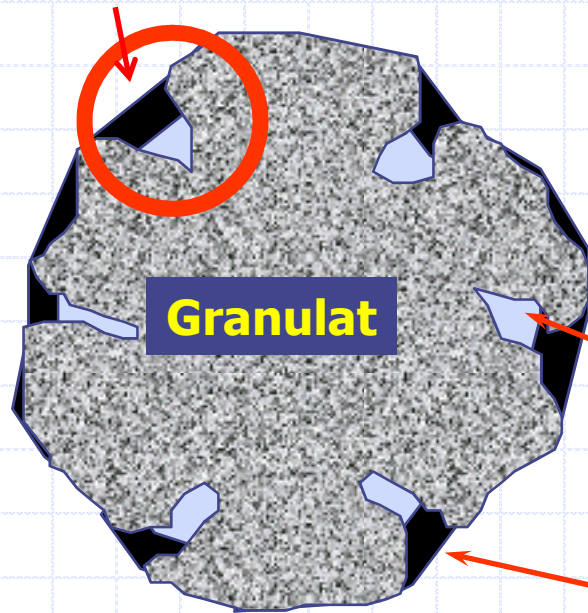
- Mélange compacté (vides = 0)

$$D_{mm} = \frac{\text{Masse gra. et bitume}}{\text{Vol.eff. gra. et bitume}}$$



Densité effective

Vides en contact avec la surface



$$D_{ge} = \frac{\text{Masse sèche}}{\text{Volume effectif}}$$

Vol. des vides perméables à l'eau
non remplis par le bitume

Bitume absorbé

Volume effectif = volume du granulat incluant les vides perméables à l'eau - les vides perméables au bitume

Critères de bases de la formulation

- La classe de bitume appropriée
 - Fonction de la fissuration de fatigue, la fissuration thermique et de la stabilité.
- Le bon choix de granulats
 - En regard de la stabilité, la durabilité, du désenrobage et de l'adhérence.
- Les bonnes proportions volumétriques
 - En regard de la stabilité, la durabilité, du désenrobage, du ressuage et de l'adhérence.

CONSTRUCTION NEUVE - RECONSTRUCTION

GB-20 • ESG-14 • EG-10¹ • ESG-10 • EGA-10² • SMA-10² • EB-20 • EB-14 • EB-10S • EB-10C³

Choix des composants • Recommandations

Type de route	Débit de circulation**		Couche de roulement							Couche de base						
			Bitume			Gros granulats		Granulats fins	Essais spéciaux	Bitume			Gros Granulats		Granulats fins	Essais spéciaux
	DJMA	ECAS annuel	Zone 1 PG	Zone 2 PG	Zone 3 PG					Zone 1 PG	Zone 2 PG	Zone 3 PG				
Autoroute	> 20 000	> 1 000 000	70-28	64-34	S.O.	1	a	1	Orniéreur, CPP	64-28	64-34	S.O.	2	c	1	Orniéreur
	< 20 000	< 1 000 000	70-28	64-34	S.O.	1	a	1	Orniéreur, CPP	64-28	58-34	S.O.	3	c	1	Orniéreur
	> 5 000	> 500 000	70-28	64-34	S.O.	1	a	1	Orniéreur, CPP	64-28	58-34	S.O.	3	c	1	Orniéreur
Nationale	< 5 000	< 500 000	70-28	64-34	S.O.	2	b	1	Orniéreur, CPP	64-28	58-34	S.O.	3	c	2	Orniéreur
	> 20 000	> 500 000	70-28	64-34	58-40	1	a	1	Orniéreur, CPP	64-28	58-34	52-40	3	c	1	Orniéreur
	< 20 000	< 500 000	70-28*	64-34*	58-40	2	b	2	Orniéreur*, CPP	64-28	58-34	52-40	3	c	2	Orniéreur*
Régionale et collectrice	> 5 000	> 300 000	64-28	58-34	58-40	3	c	2		58-28	58-34	52-40	3	c	2	
	< 20 000	< 300 000	70-28*	64-34*	58-40*	3	b	2	Orniéreur*	64-28*	58-34	52-40	3	c	2	Orniéreur*
	> 5 000	> 150 000	64-28	58-34	52-40	3	c	2		58-28	58-34	52-40	3	c	2	

* Réseau de camionnage.

** Lorsque les valeurs de DJMA et de l'ECAS de la route ne correspondent pas à la même ligne dans le tableau, sélectionner la ligne qui correspond aux conditions les plus sévères.

Notes

1. Seuls les bitumes PG 70-28 et PG 64-34 peuvent être utilisés pour l'enrobé EG-10.
2. Seuls les bitumes PG 58-28 et PG 58-34 peuvent être utilisés pour les enrobés EGA-10 et SMA-10.
3. Les caractéristiques (classes de bitumes et de granulats) de la couche de roulement sont applicables à la couche de correction.

Lorsque la présence d'ornières justifie une intervention sur la couche d'usure, l'essai de résistance à l'orniérage est recommandé.

L'utilisation d'un bitume différent en couche de base n'est pas recommandée si la quantité d'enrobé de cette couche est inférieure à 1 000 tonnes.

ECAS annuel : ECAS cumulé pour la durée de vie au moment de la conception, divisé par le nombre d'années correspondant, de la voie la plus sollicitée.

Avril 2006

CONSTRUCTION NEUVE - RECONSTRUCTION

Tableau 1
Catégories de gros granulats selon leurs caractéristiques intrinsèques de résistance à l'usure et aux chocs

Caractéristiques intrinsèques	Méthodes d'essai	Catégories de gros granulats					
		1	2	3	4	5	6
Micro-Deval (MD)	LC 21-070	≤ 15	≤ 20	≤ 25	≤ 30	≤ 35	≤ 40
Los Angeles (LA)	LC 21-400	≤ 35	≤ 45	≤ 50	≤ 50	≤ 50	≤ 50
(MD+LA)		≤ 40	≤ 55	≤ 70	≤ 75	≤ 80	≤ 85

Tableau 2
Catégories de gros granulats selon leurs caractéristiques de fabrication

Caractéristiques de fabrication	Méthodes d'essai	Catégories de gros granulats				
		a	b	c	d	e
Fragmentation (%)	LC 21-100	100	≥ 75	≥ 60	≥ 60	≥ 50
Particules plates (%)	LC 21-265	≤ 25	≤ 25	≤ 25	≤ 30	–
Particules allongées (%)	LC 21-265	≤ 40	≤ 40	≤ 45	≤ 50	–

Tableau 3
Catégories de granulats fins selon leurs caractéristiques intrinsèques de résistance à l'usure et de friabilité et selon leurs caractéristiques de fabrication

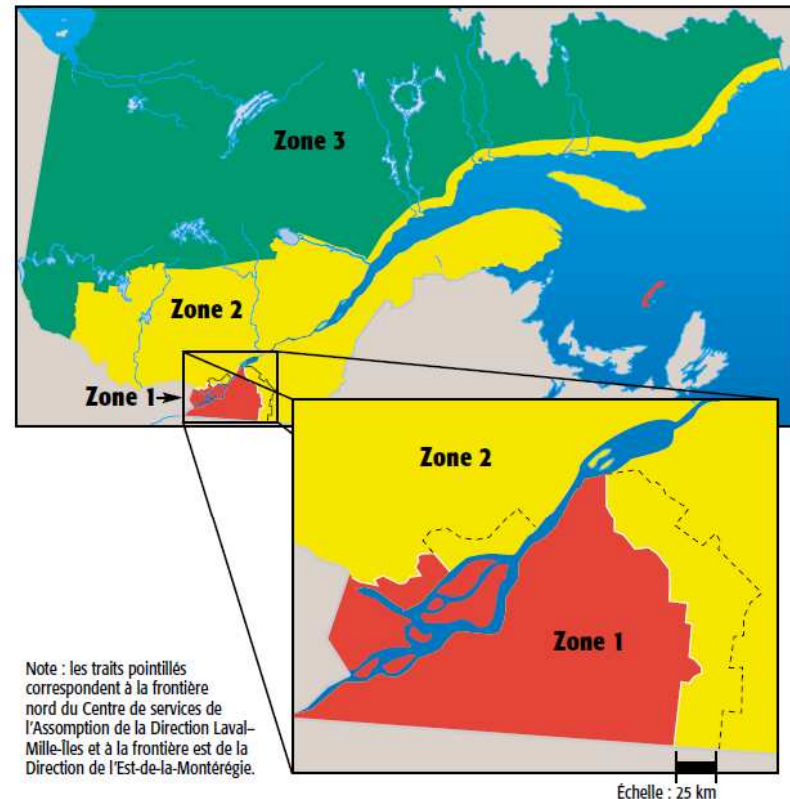
Caractéristiques intrinsèques	Méthodes d'essai	Catégories de granulats fins		
		1	2	3
Micro-Deval (MD)	LC 21-101	≤ 30	≤ 35	≤ 35
Friabilité (%)	LC 21-080	≤ 40	≤ 40	–

Tableau 4
Caractéristiques complémentaires des granulats pour enrobés à chaud selon les usages

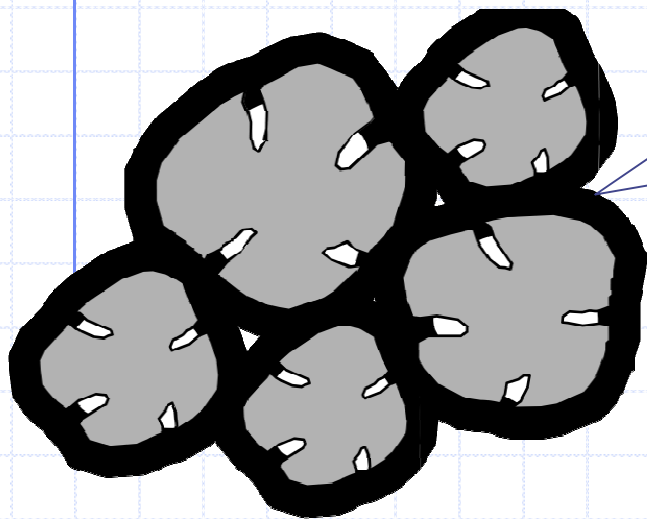
Caractéristiques complémentaires		Méthodes d'essai	Couche de base	Couche de roulement
Gros granulats	Propreté (particules < 80 µm) (% max.) ¹ (gravière et sablière)	CSA-A23.2-5A	≤ 1,0	≤ 1,0
	Propreté (particules < 80 µm) (% max.) ¹ (carrière)	CSA-A23.2-5A	≤ 1,5	≤ 1,5
	Coefficient de polissage par projection (minimum) ²	LC 21-102	–	≥ 0,45
Granulats fins	Teneur en mottes d'argile (% max.)	CSA-A23.2-3A	≤ 2,0	≤ 2,0
	Coefficient d'écoulement ³	LC 21-075	≥ 80	≥ 80
	Teneur en particules inférieures à 5 µm (% max.) ⁴	NQ 2501-025	≤ 4	≤ 4

- Notes**
1. Cette caractéristique s'applique à chaque classe granulaire.
 2. Uniquement pour les gros granulats de caractéristiques intrinsèques de catégorie 1 ou 2.
 3. Pour des granulats fins de catégorie 1 uniquement.
 4. Le pourcentage est établi par rapport au passant 5 mm.
- Les exigences contenues dans ces tableaux sont conformes à la norme NQ 2560-114/2002 « Travaux de génie civil – Granulats ».

Zones climatiques

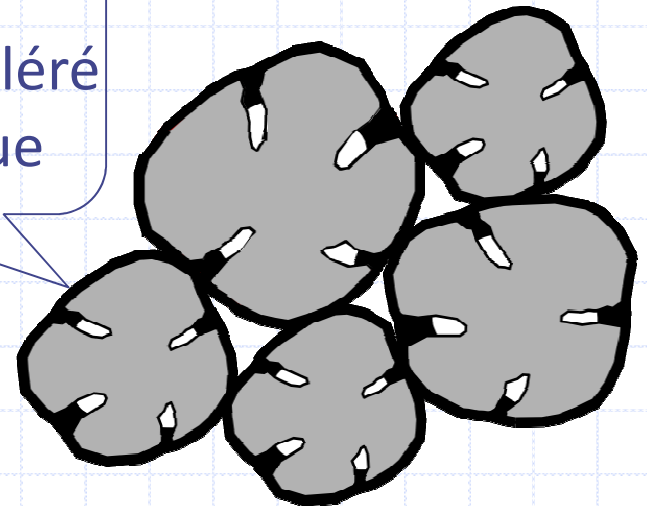


Les bonnes proportions volumétriques

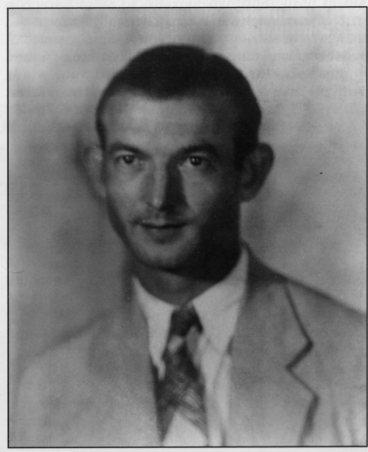


Ressuage
Faible stabilité
Mélange maniable

Désenrobage
Vieillissement accéléré
Fissures de fatigue



Méthode Marshall

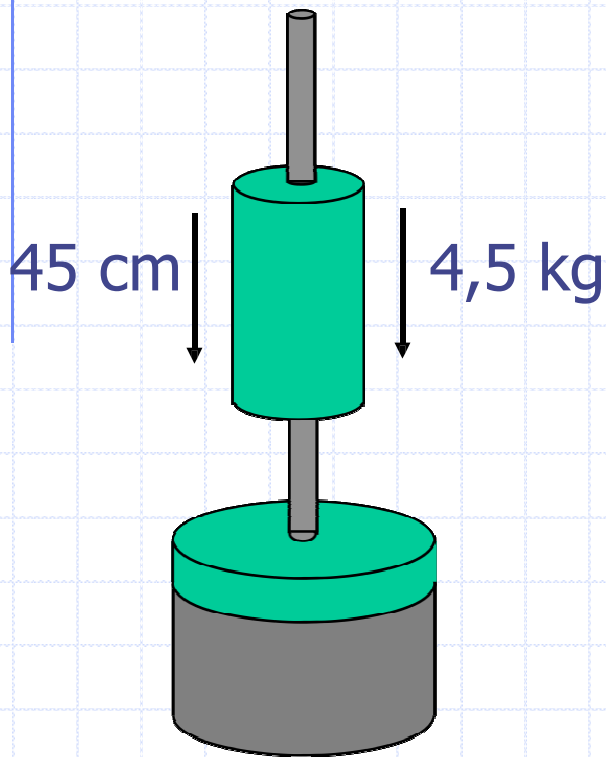


- ◆ Élaborée par Bruce Marshall pour le 'Mississippi Highway Department' à la fin des années 30
- ◆ Améliorations par le 'U.S. Army Corps of Engineers' par la suite
 - Évaluation de l'effort de compactage
 - Nombre de frappes, forme de la dame, etc.
 - Fixation de la masse à 10 lb., 50 coups/face
 - 4% de vides après circulation
- ◆ Les critères initiaux furent établis et modifiés pour tenir compte des augmentations de pression des pneumatiques et des charges

Les étapes de la formulation Marshall

- ◆ Sélection et caractérisations des granulats
- ◆ Sélection et caractérisation du bitume
 - Établissement des températures de malaxage et de compactage
- ◆ Préparation de mélanges d'essai
 - Chauffage et malaxage des granulats et du bitume
 - Compactage d'éprouvettes (100 mm de diamètre)

La formulation Marshall

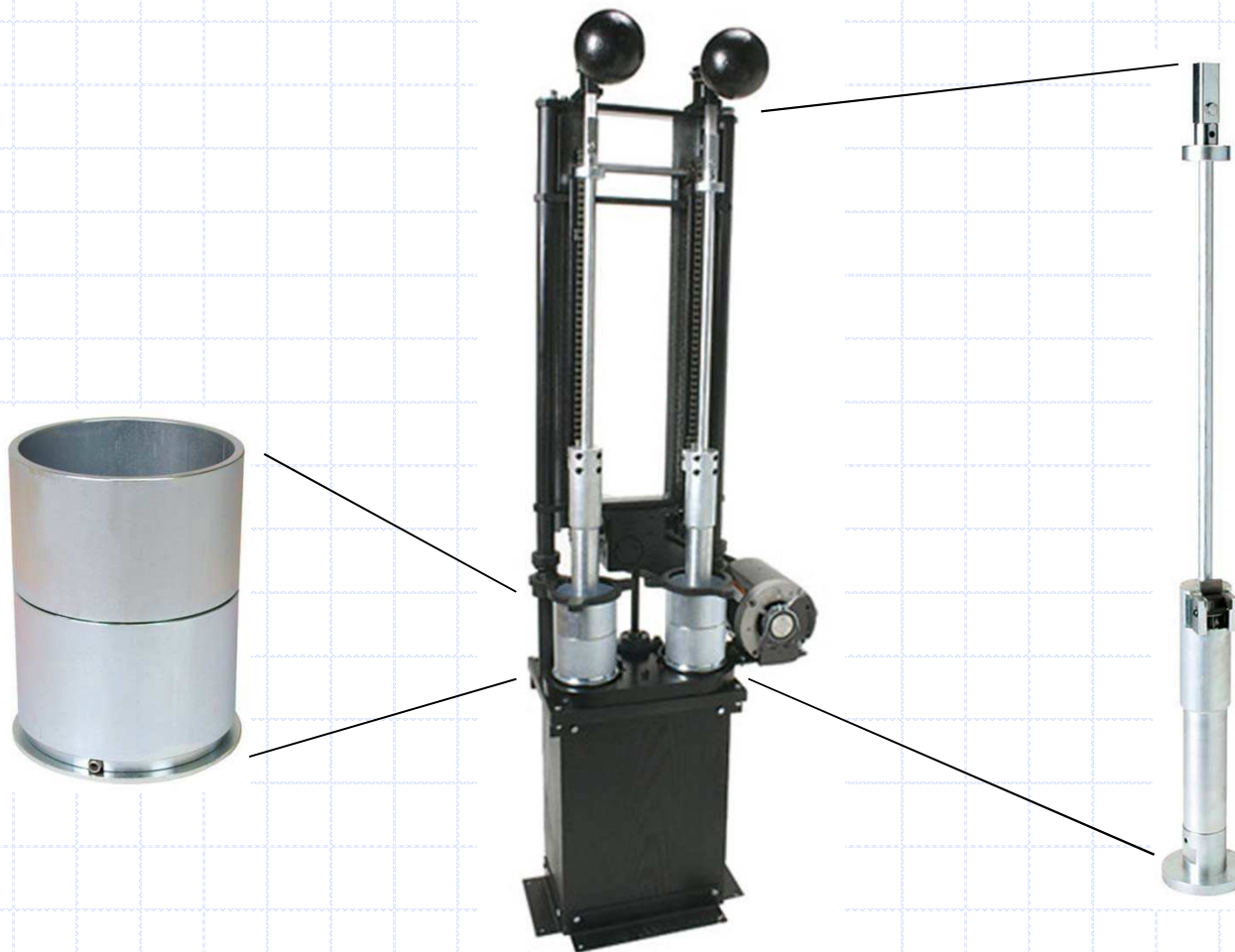


Séries de 3 éprouvettes à 5 teneurs en bitume différentes

Éprouvettes Marshall

Trafic	coups / Coté
Léger	35
Moyen	50
Élevé	75

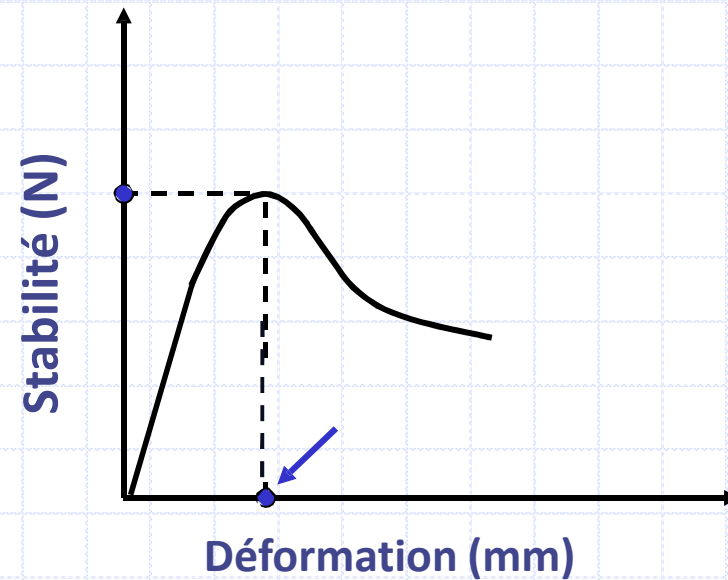
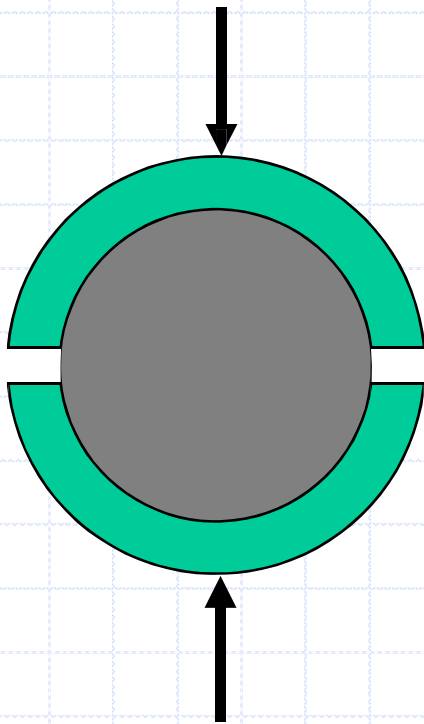
Marteau Marshall



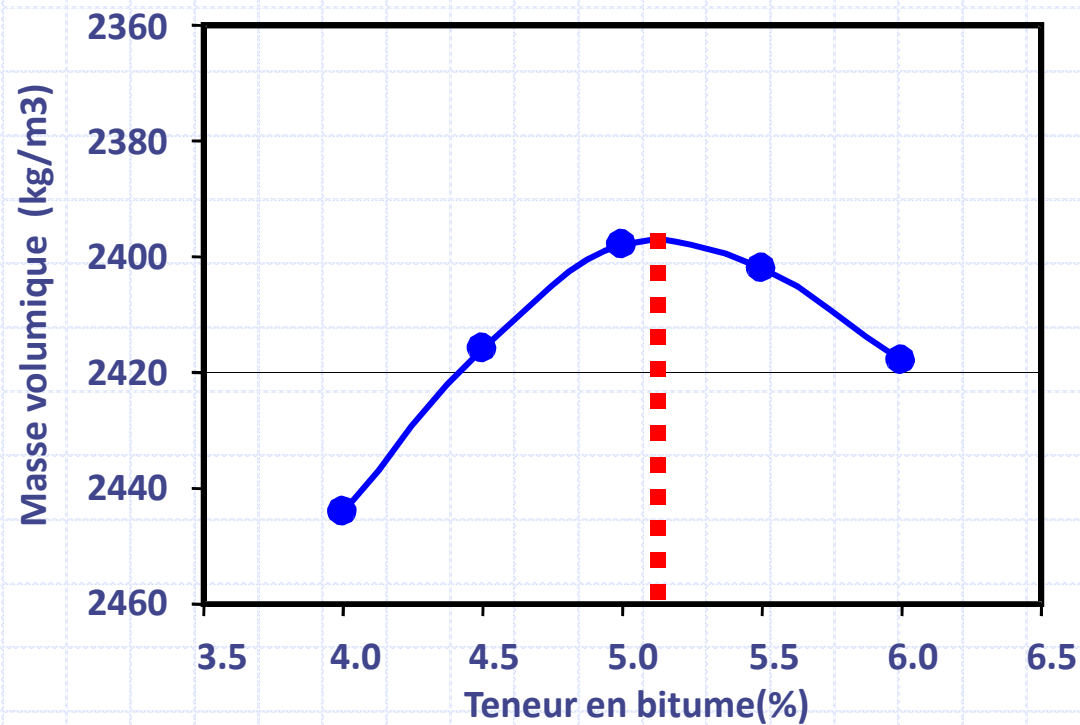
Presse Marshall



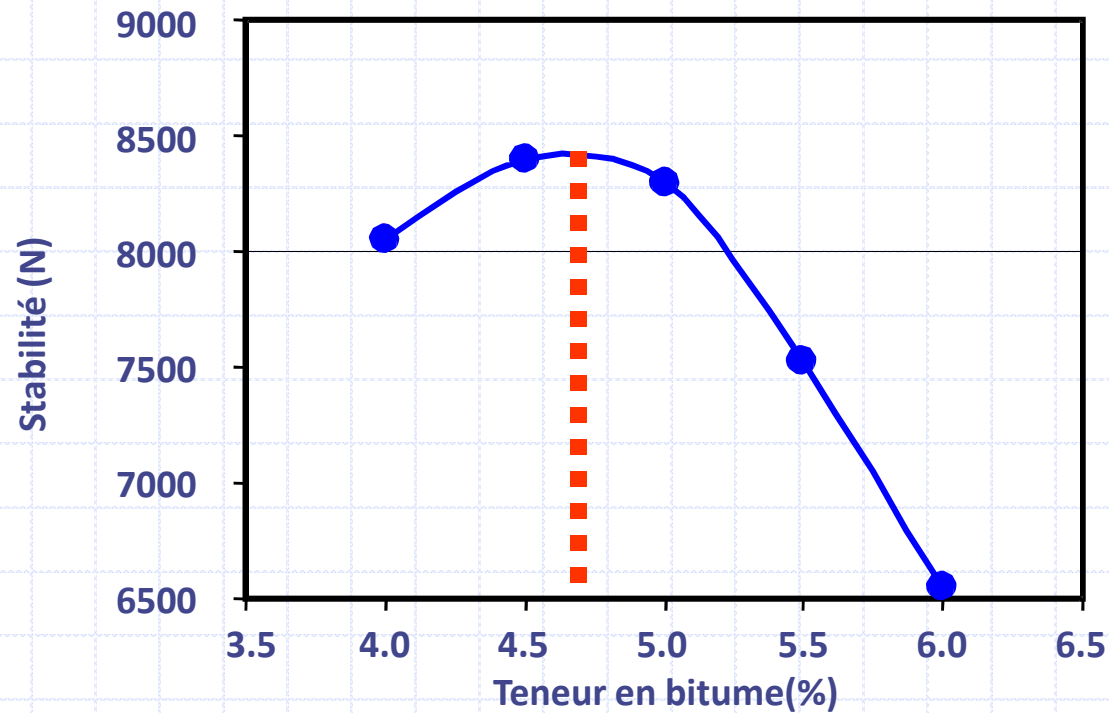
Stabilité et déformation (fluage)



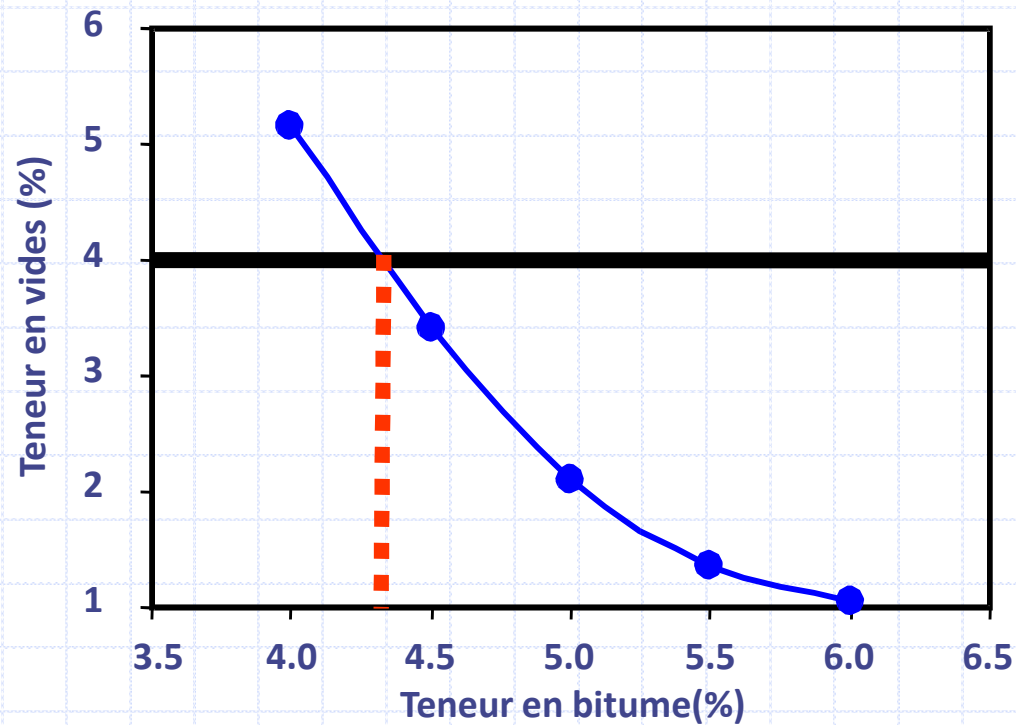
Interprétation des résultats



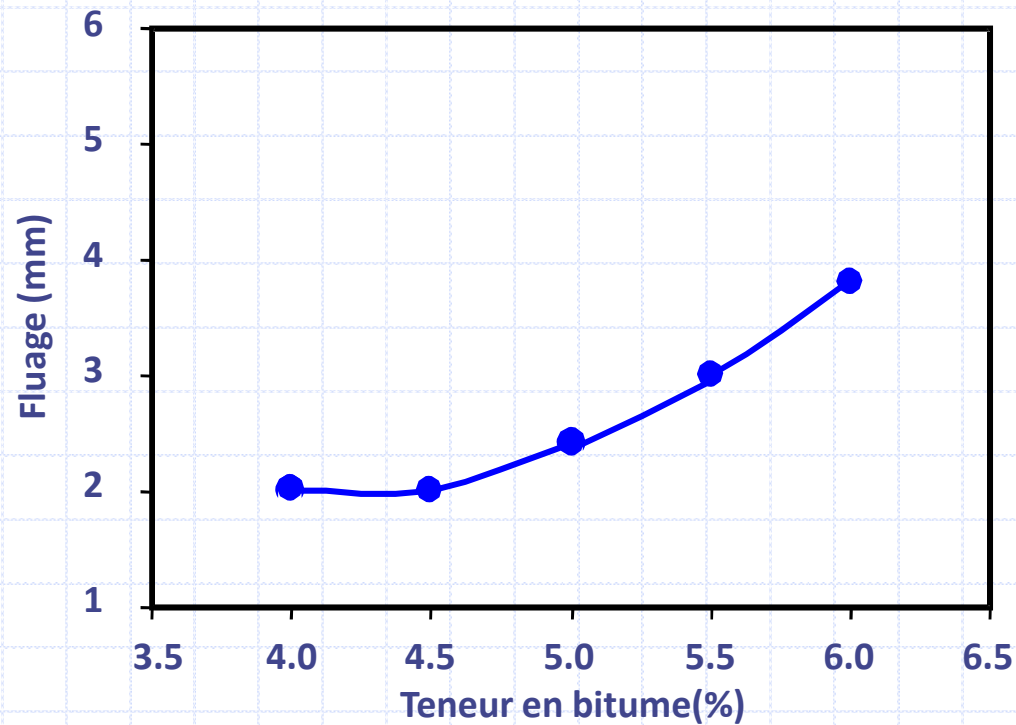
Interprétation des résultats



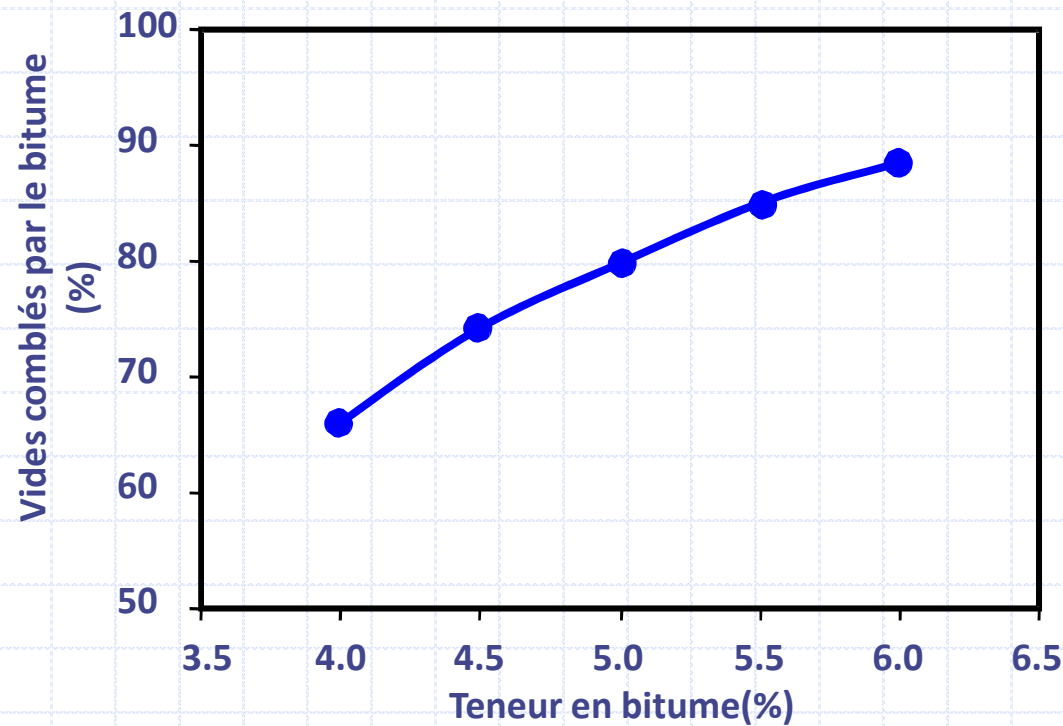
Interprétation des résultats



Interprétation des résultats



Interprétation des résultats



Méthode de l'Asphalt Institute

Masse volumique
maximale

Stabilité
maximale

Teneur en
vides de 4%

$$\% \text{ bit.} = \frac{5,1 + 4,7 + 4,3}{3} = 4,7\%$$

Méthode de la NAPA

Masse volumique
maximale

Stabilité
maximale

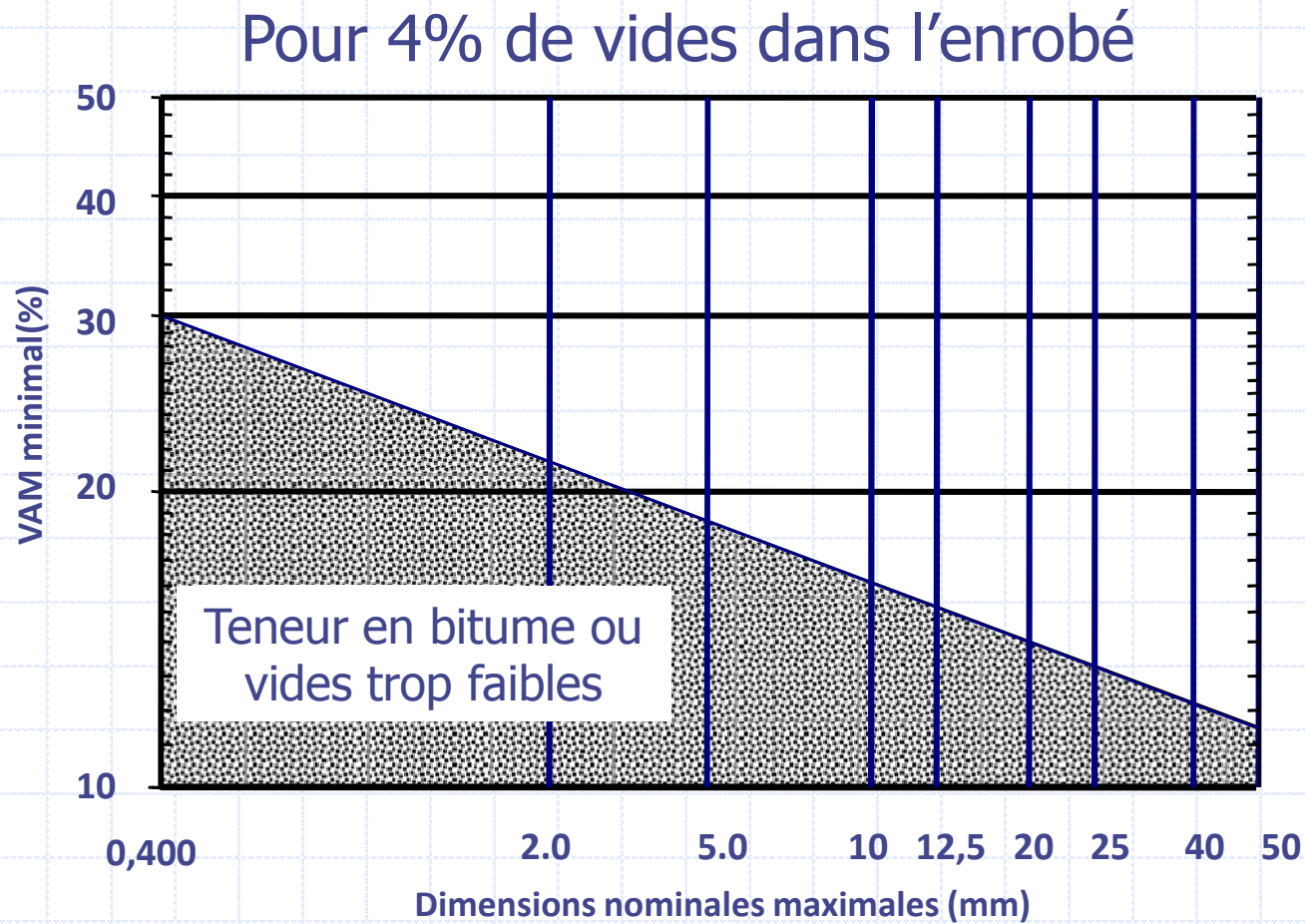
Teneur en
vides de 4%

$$\% \text{ bit.} = \frac{\cancel{5,1} + \cancel{4,7} + 4,3}{3} = 4,3\%$$

Critères de l'Asphalt Institute

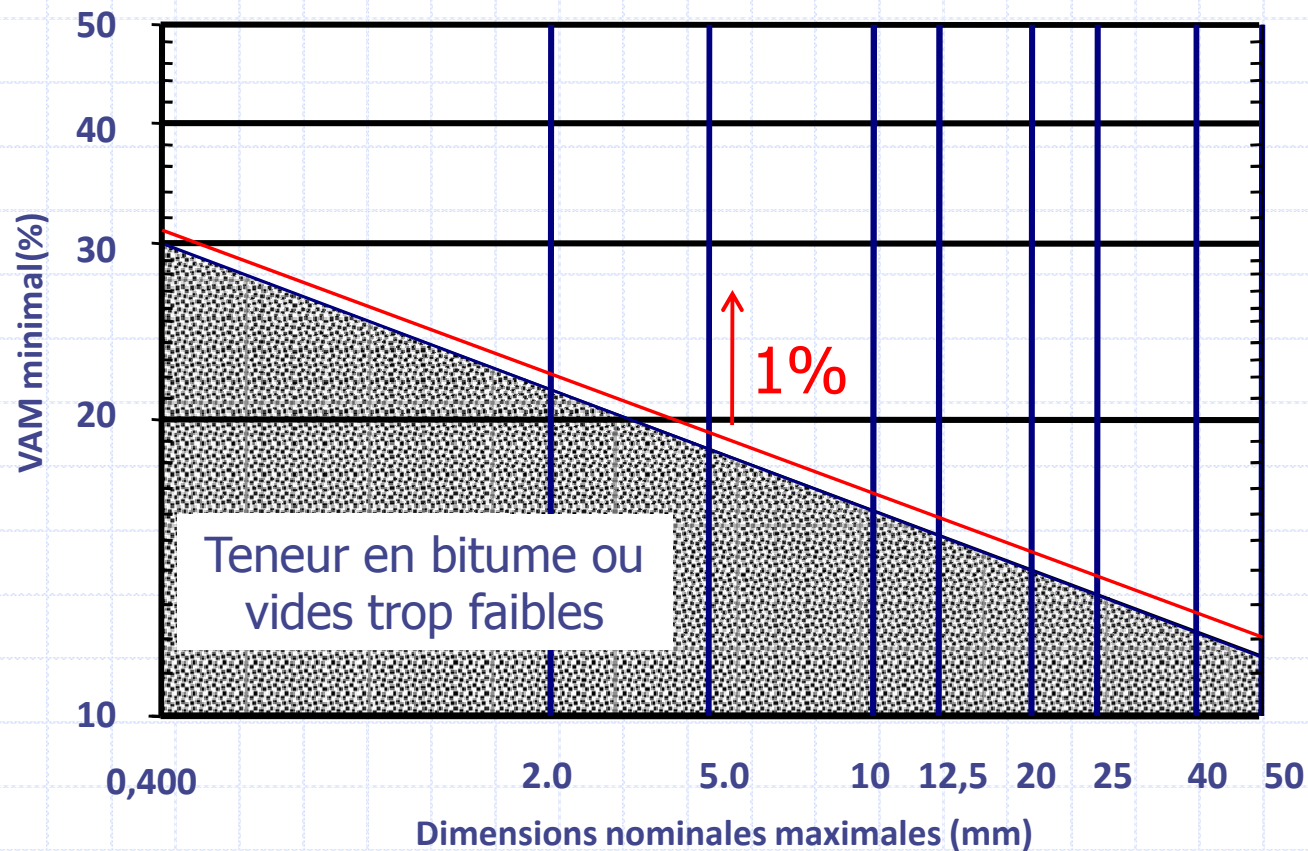
	Trafic léger		Trafic moyen		Trafic lourd	
Critères	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Nombre de coups	35		50		75	
Stabilité (N)	3350		5350		8000	
Fluage (mm)	2	4,5	2	4	2	3,5
Vides(%)	3	5	3	5	3	5
VCB (%)	70	80	65	78	65	75

Critères du VAM



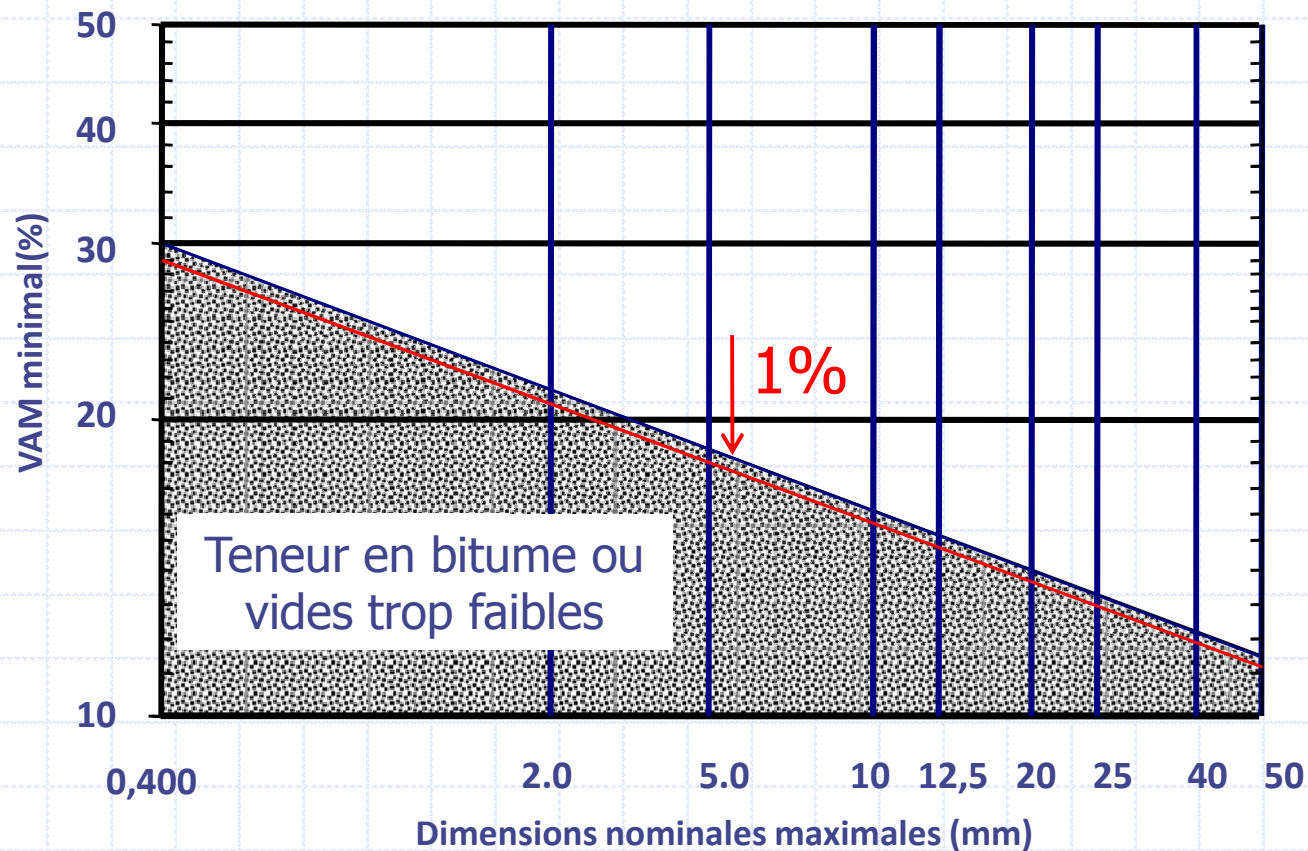
Critères du VAM

Pour 5% de vides dans l'enrobé

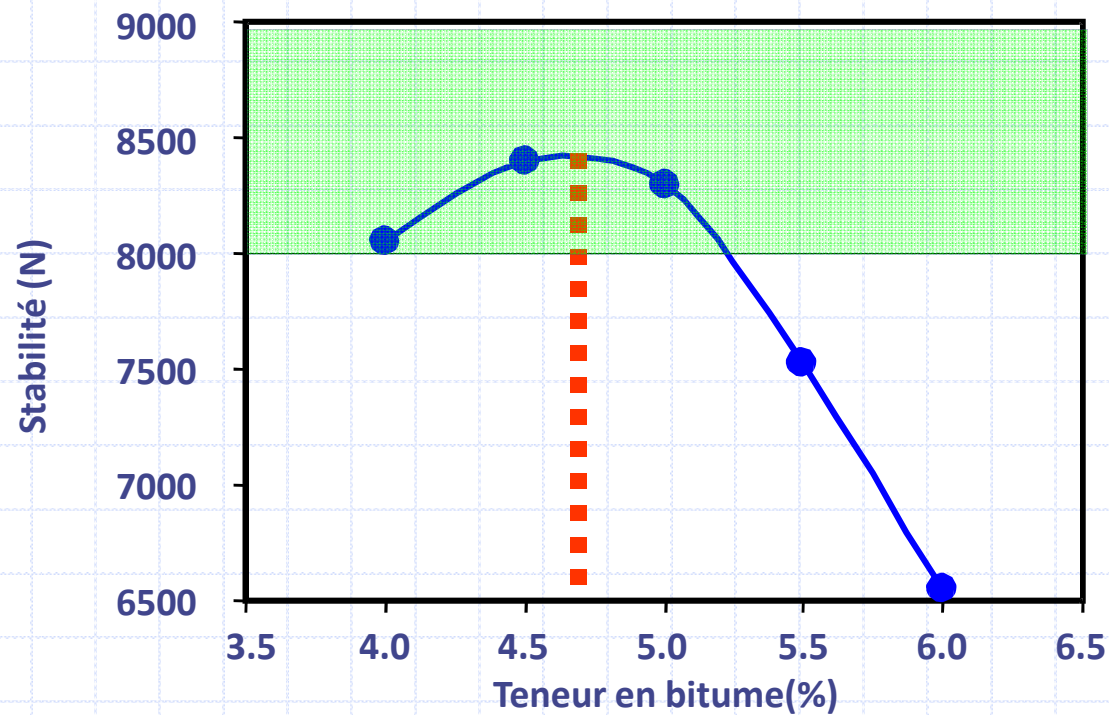


Critères du VAM

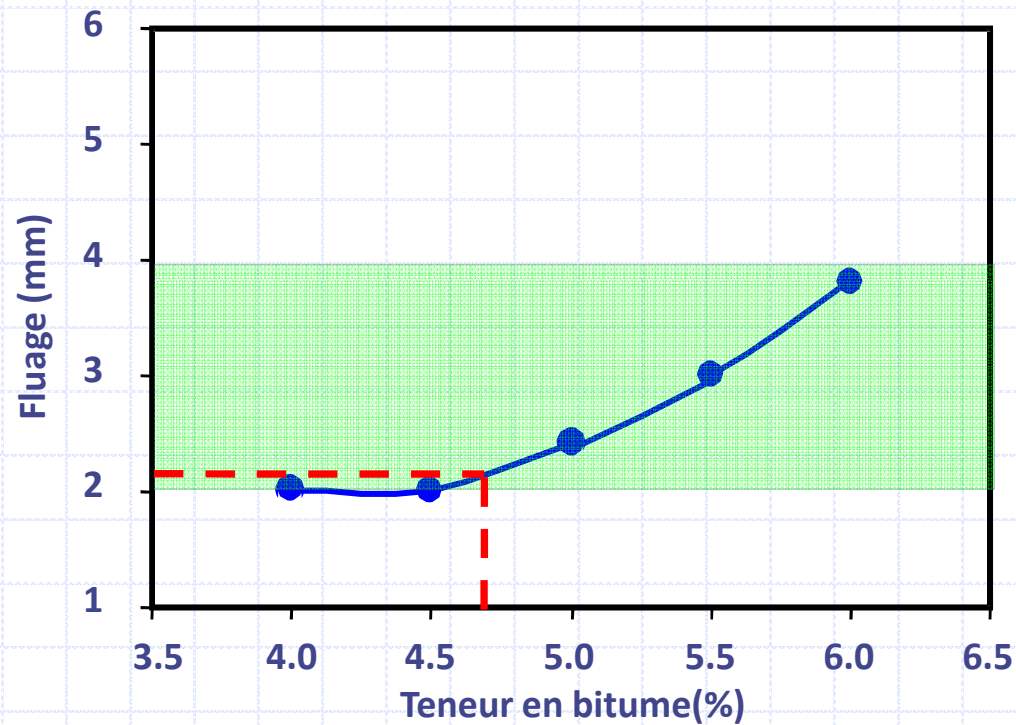
Pour 3% de vides dans l'enrobé



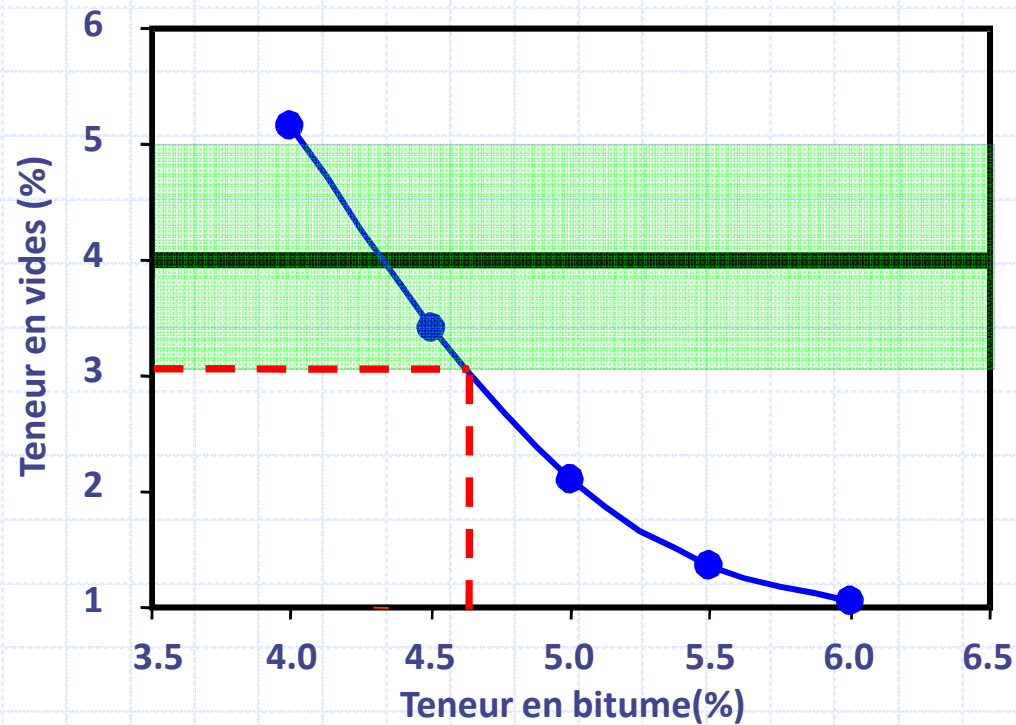
Interprétation des résultats



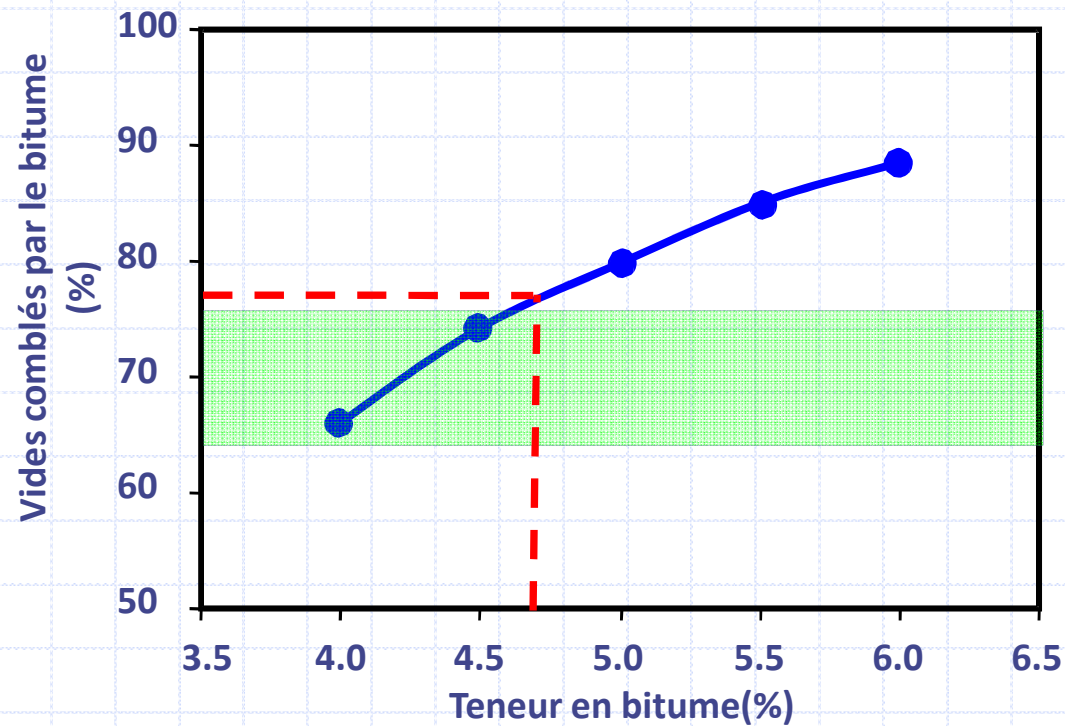
Interprétation des résultats



Interprétation des résultats

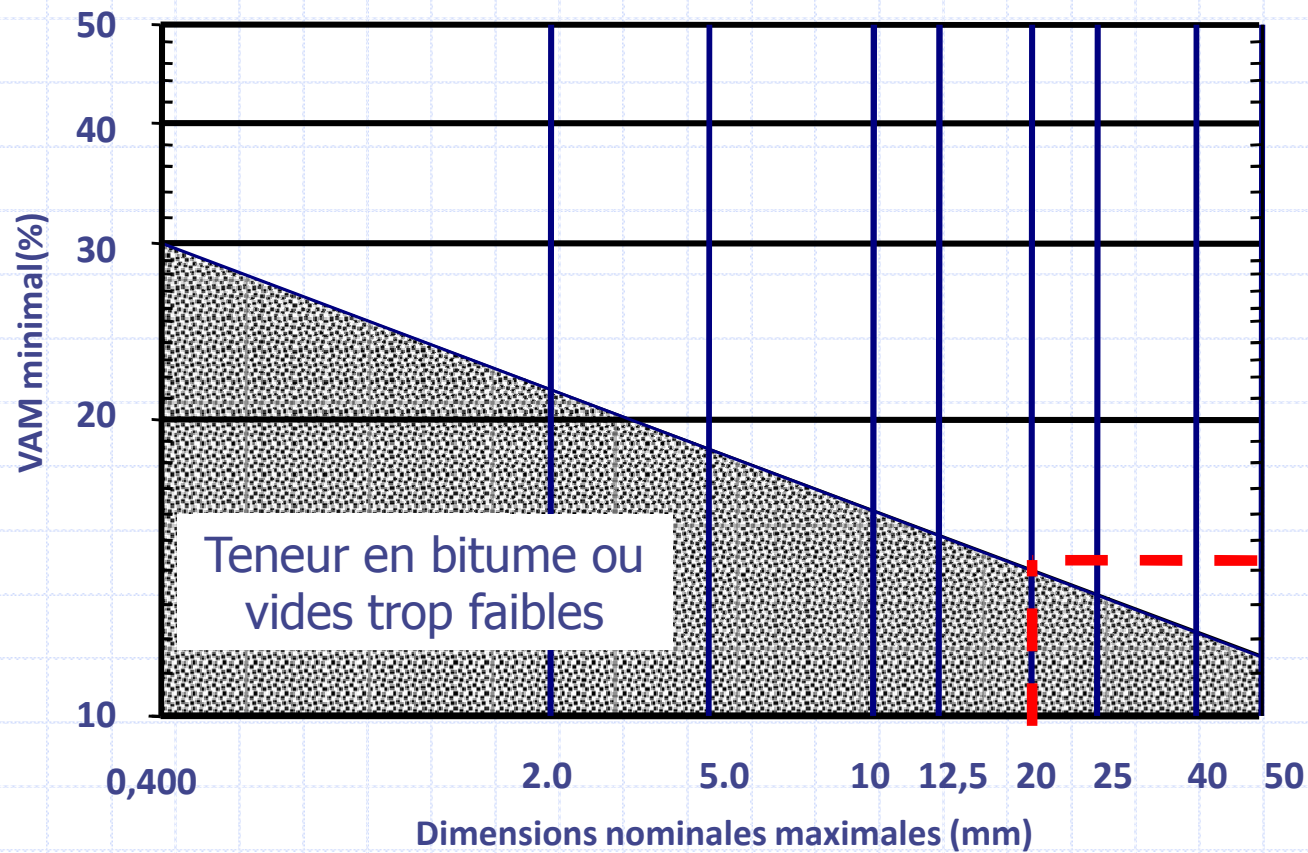


Interprétation des résultats

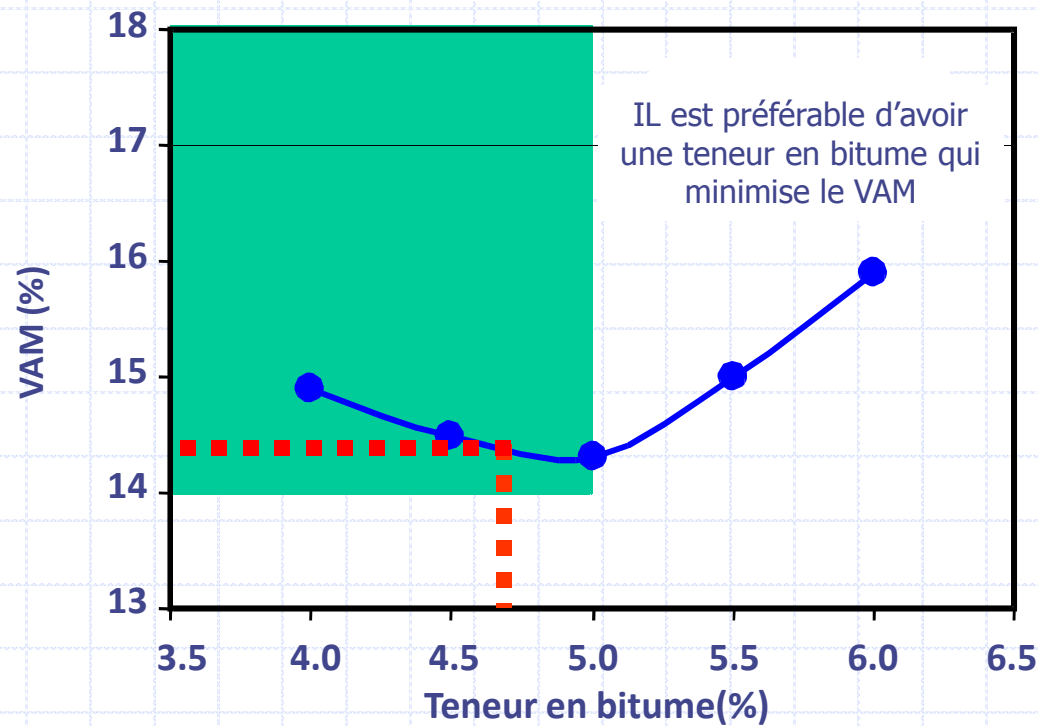


Critères du VAM

Pour 4% de vides dans l'enrobé



Interprétation des résultats



Comment augmenter le VAM

1. Diminuer les fines;
2. Utiliser des granulométries ouvertes (EG);
3. Utiliser des granulométries discontinues (SMA);
4. Utiliser du sable concassé;
5. Réduire les particules plates et allongées.

Le feuil de bitume?

◆ Sauf au MTQ, le feuil de bitume ne fait pas partie des exigences pour les enrobés « Marshall »

◆ POURQUOI?

Le feuil de bitume?

- ◆ La norme LC26-900 du MTQ fait référence à la brochure MS-2 de l'Asphalt Institute.

Le feuil de bitume?

<i>Dimension des tamis Brochure MS-2</i>	<i>Dimension des tamis Norme LC26-900</i>	<i>Facteur SS (m²/kg) montré dans les 2 documents de référence</i>
9,5 mm	10 mm	0,41
4,75 mm	5 mm	0,41
2,36 mm	2,5 mm	0,82
1,18 mm	1,25 mm	1,64
600 mm	630 mm	2,87
300 mm	315 mm	6,14
150 mm	160 mm	12,29
75 mm	80 mm	32,77

Dans la brochure MS-2 (annexe 2) de l'Asphalt Institute, il est spécifiquement mentionné au paragraphe 6.05 ainsi qu'au bas du tableau 6.1 que « **si des dimensions différentes de tamis sont utilisées, des facteurs SS différents doivent être utilisés** ».

Le feuil de bitume?

- ◆ De plus, il est également indiqué en caractères gras à la page 81 de la brochure MS-2 (annexe 2) de l'Asphalt Institute que même si la mesure du feuil de bitume effectif peut donner une indication relative quant à la durabilité des enrobés, « ***il est fortement recommandé de ne pas comparer cette mesure calculée avec des exigences d'enrobés à cause de son imprécision*** ».

Questions

