



Rhéologie des Bitumes Prédiction des performances mécaniques des enrobés bitumineux sur la base des caractéristiques rhéologiques des bitumes mesurées à l'aide du Rhéomètre à Cisaillement Dynamique (DSR)

SOUS LE THÈME
Quels rôles de l'infrastructure
routière dans le nouveau modèle
de développement économique
et social du Maroc ?

تحت شعار
أية مكانة لتطوير البنية التحتية
الطرقية في تنزيل النموذج
الجديد للتنمية الإقتصادية
و الإجتماعية بالمغرب ؟

M. OUQLANI – LPEE/CERIT
Chef de la Division Développement
Technologique et Appui aux Régions

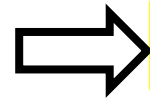
 ouqlani@lpee.ma

PLAN DE L'EXPOSE

- 1/ Présentation**
- 2/ Description du principe de fonctionnement du Rhéomètre D.S.R.**
- 3/ Résultats de caractérisation rhéologique des bitumes en corrélation avec certaines performances mécaniques des enrobés bitumineux**
- 4/ Synthèses et commentaires sur les caractéristiques rhéologiques des bitumes usuels au Maroc.**
- 5/ Conclusions**

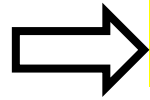
Essais de Rhéologie sur Bitumes

- G^* (Module complexe en cisaillement dynamique)
- δ (Angle de phase)
- μ (Viscosité dynamique)
- S (Module de Rigidité en flexion à basse Tempér.)



Bitume original

Et / Ou



Bitume après vieillissement artificiel



NF EN 14770 (G^* , δ)
NF EN 13302 (μ)

DSR Mode dynamique
Mode rotationnel



NF EN 14771 (S)

BBR



NF EN 12607-1

RTFOT
Vieillessement
Court termes



NF EN 14769

PAV
Vieillessement
Long termes

D S R ?

ynamic shear rheometer

Rhéomètre à Cisaillement Dynamique



Le Rhéomètre D.S.R fonctionne en mode rotationnel ou en mode dynamique. Il permet de mesurer certaines caractéristiques rhéologiques des bitumes telles que :

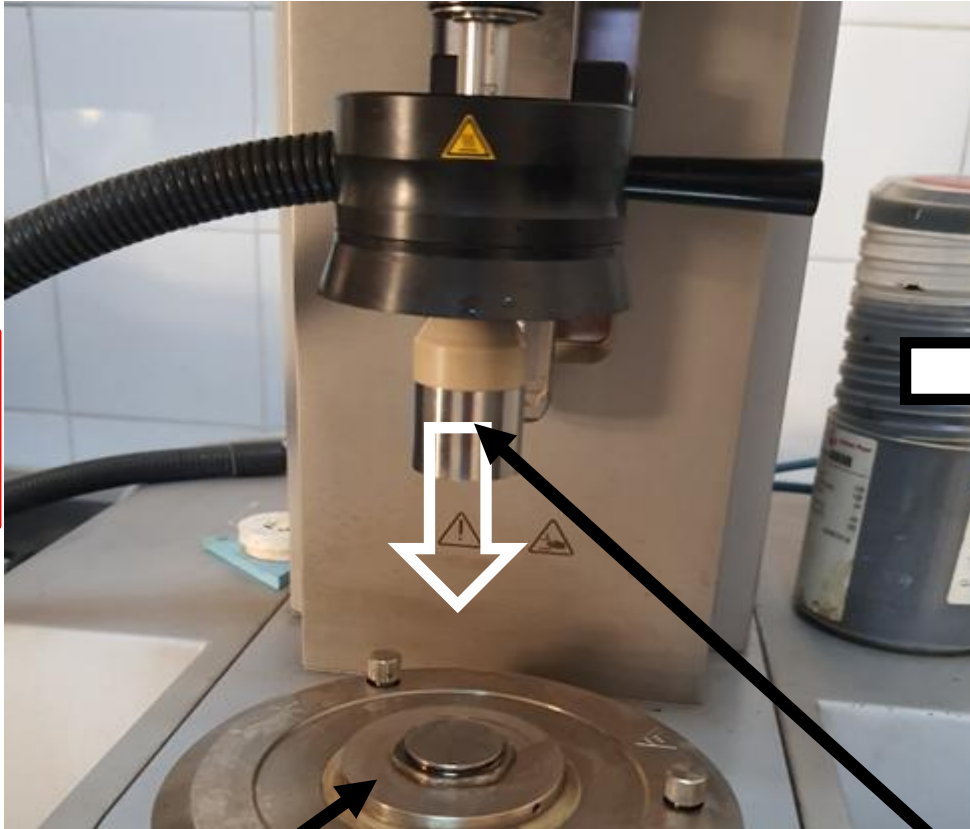
- La viscosité dynamique μ en mode rotationnel
- Le Module complexe en cisaillement dynamique G^*
- L'angle de phase δ en mode cisaillement dynamique

Comment sont mesurés G^* et δ ?

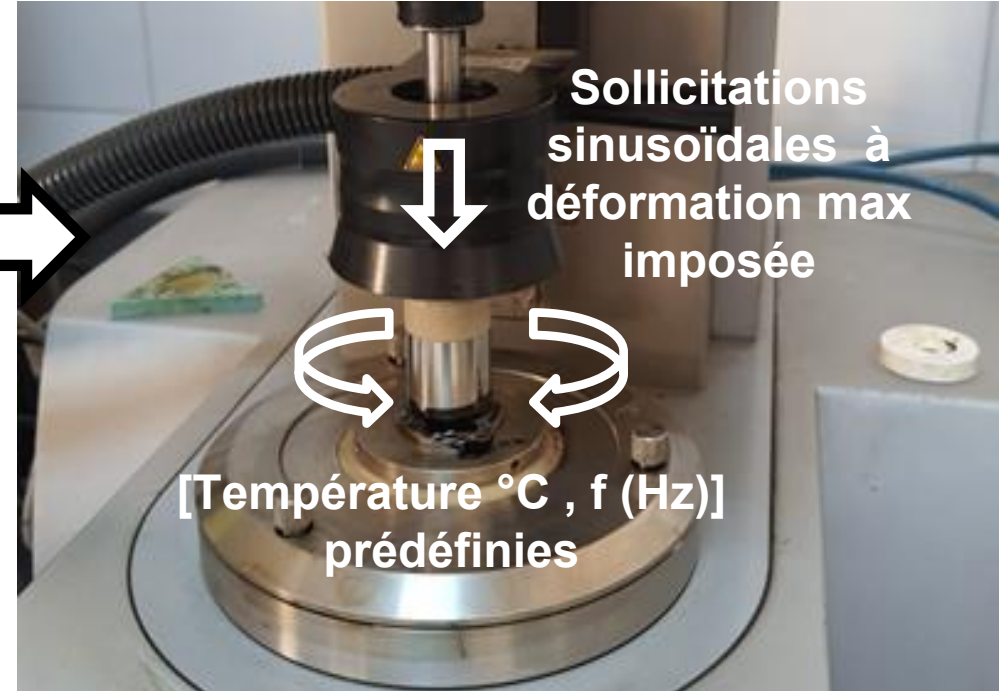
Echantillon de bitume



D=8mm / h=2mm
Ou
D=25mm / h=1mm



Plateau inférieur fixe



Sollicitations
sinusoïdales à
déformation max
imposée

[Température °C , f (Hz)]
prédéfinies

Plateau supérieur rotatif mobile

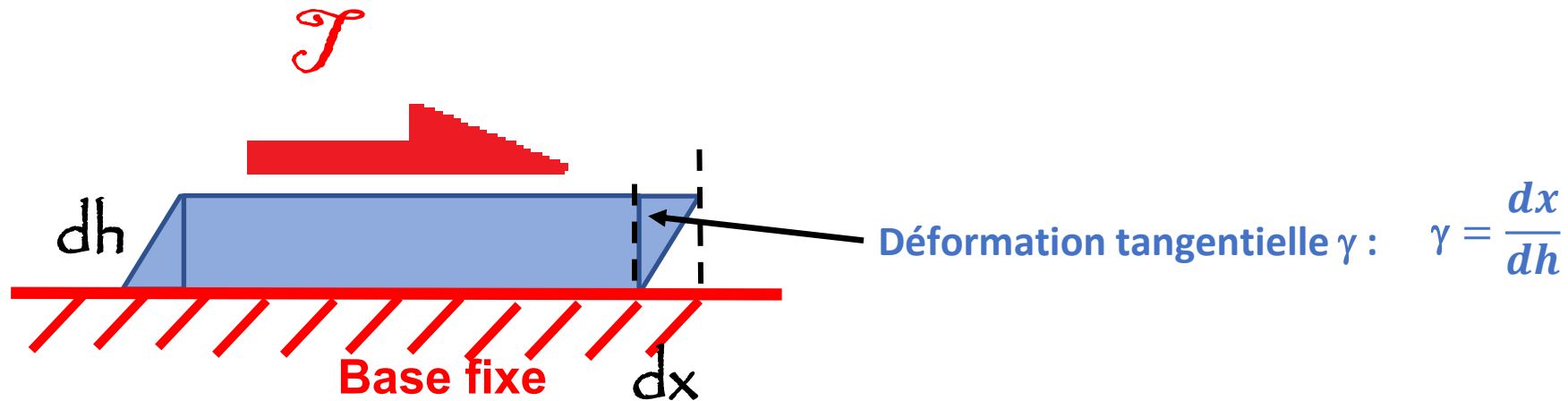
PREVIOUS RESULTS

Fichier des résultats

- Result 1: This sample passed at 58.0 °C with $|G^*|/\sin(\delta) = 23.0264$ kPa
- Result 2: This sample passed at 64.0 °C with $|G^*|/\sin(\delta) = 12.6479$ kPa
- Result 3: This sample passed at 70.0 °C with $|G^*|/\sin(\delta) = 7.0012$ kPa
- Result 4: This sample passed at 76.0 °C with $|G^*|/\sin(\delta) = 3.9327$ kPa
- Result 5: This sample passed at 82.0 °C with $|G^*|/\sin(\delta) = 2.2660$ kPa
- Result 6: This sample passed at 88.0 °C with $|G^*|/\sin(\delta) = 1.3673$ kPa
- Result 7: This sample failed at 94.0 °C with $|G^*|/\sin(\delta) = 0.8640$ kPa

Rappel de quelques notions de la mécanique

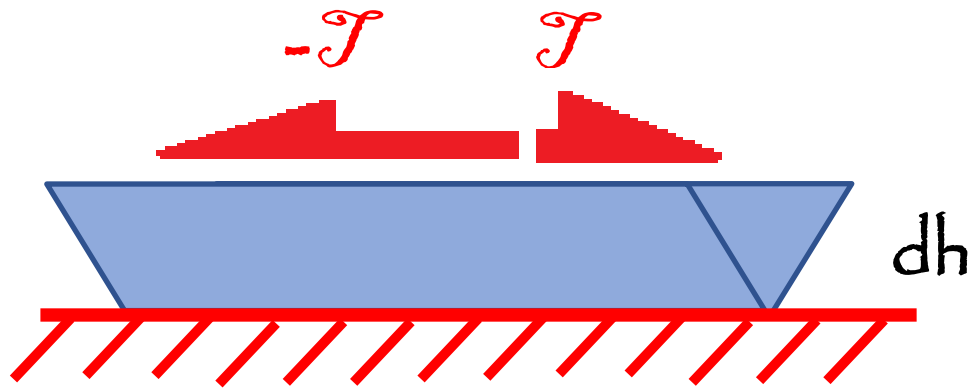
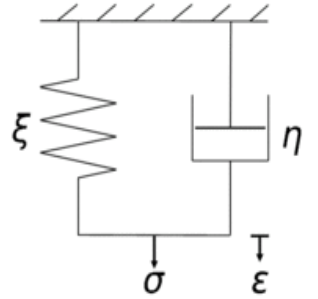
COMPORTEMENT PUREMENT ÉLASTIQUE EN PETITES DÉFORMATIONS CONSTANTES



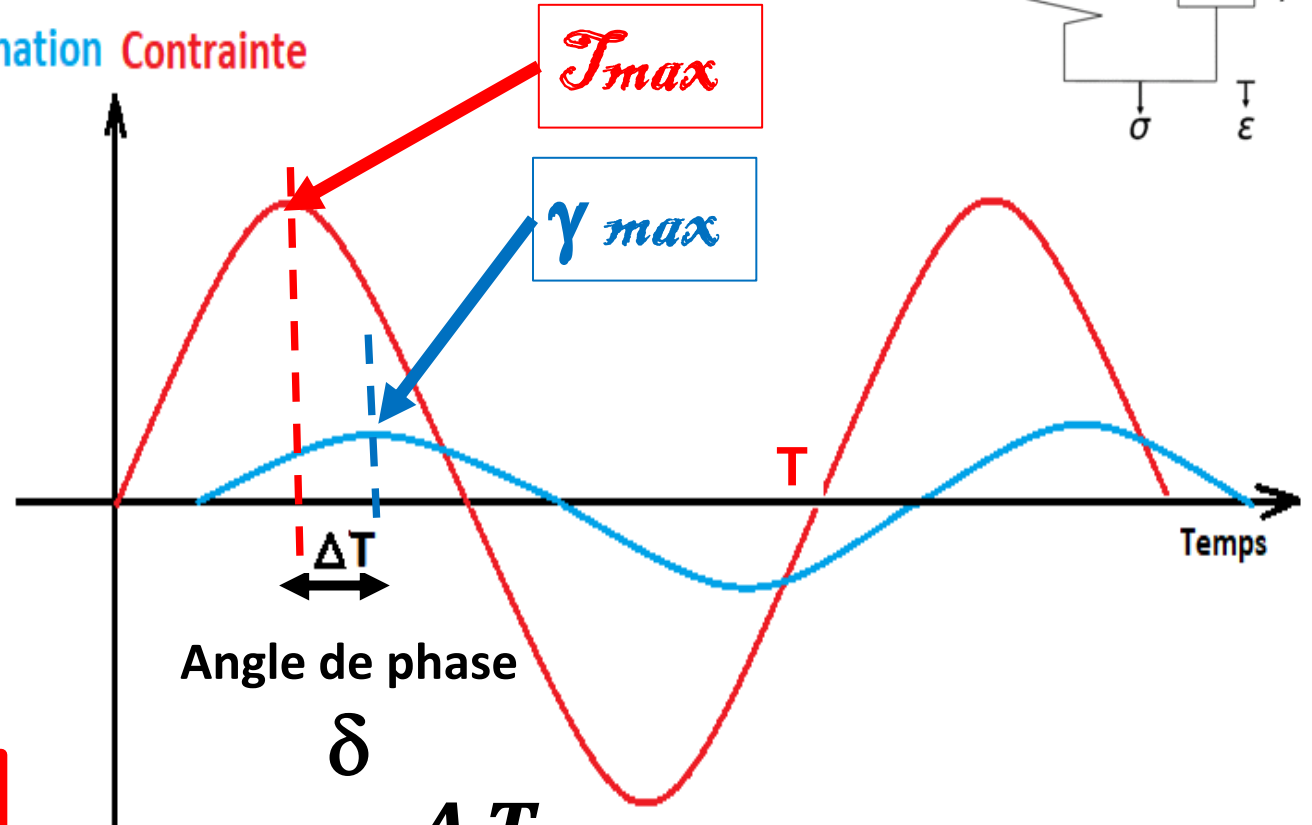
$$G = \frac{T}{\gamma}$$

Module de cisaillement

Rappel de quelques notions de la mécanique COMPORTEMENT VISCOÉLASTIQUE LINEAIRE EN PETITES DÉFORMATIONS (CAS DU BITUME)



Déformation Contrainte



$$G^* = \underline{\hspace{2cm}}$$

A retenir

G^* : Module complexe en cisaillement dynamique
 δ : Angle de Phase $0 < \delta < 90^\circ$

$$\delta = 2\pi \frac{\Delta T}{T}$$

3/ Résultats de caractérisation rhéologique des bitumes en corrélation avec certaines performances mécaniques des enrobés bitumineux

On va aborder ce paragraphe par des cas pratiques pour montrer l'utilité de la prise en considération des caractéristiques rhéologiques des bitumes.

1^{er} cas : Formulations reprises plusieurs fois bien que la PNE et TBA conforme.....

Formule n°	Bitume		Enrobé
	PENE (25°C)	TBA	E (15°C, 10Hz)
1	✓	✓	✗
2	✓	✓	✗
3	✓	✓	✗
4	✓	✓	✓ ↓
	Viser un $G^* > \text{Seuil}$ ✓		

Solution ?



Il existe donc une relation directe entre E et G^*
Quelle démarche pour rechercher cette relation

3/ Résultats de caractérisation rhéologique des bitumes en corrélation avec certaines performances mécaniques des enrobés bitumineux

Comment rechercher cette corrélation entre E et G* ?

Essais G* et δ (DSR): NF EN 14770



G*

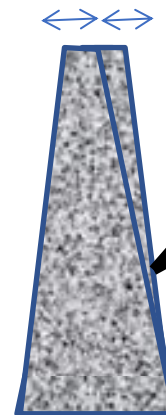
Petites déformations sinusoïdales

T = 15°C
f = 10 Hz

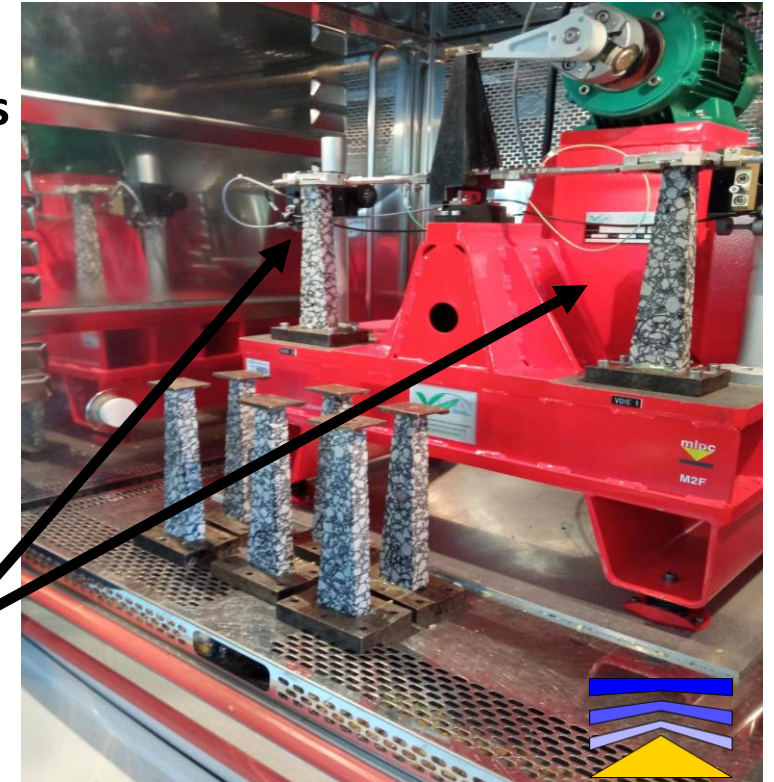
E

Petites déformations sinusoïdales

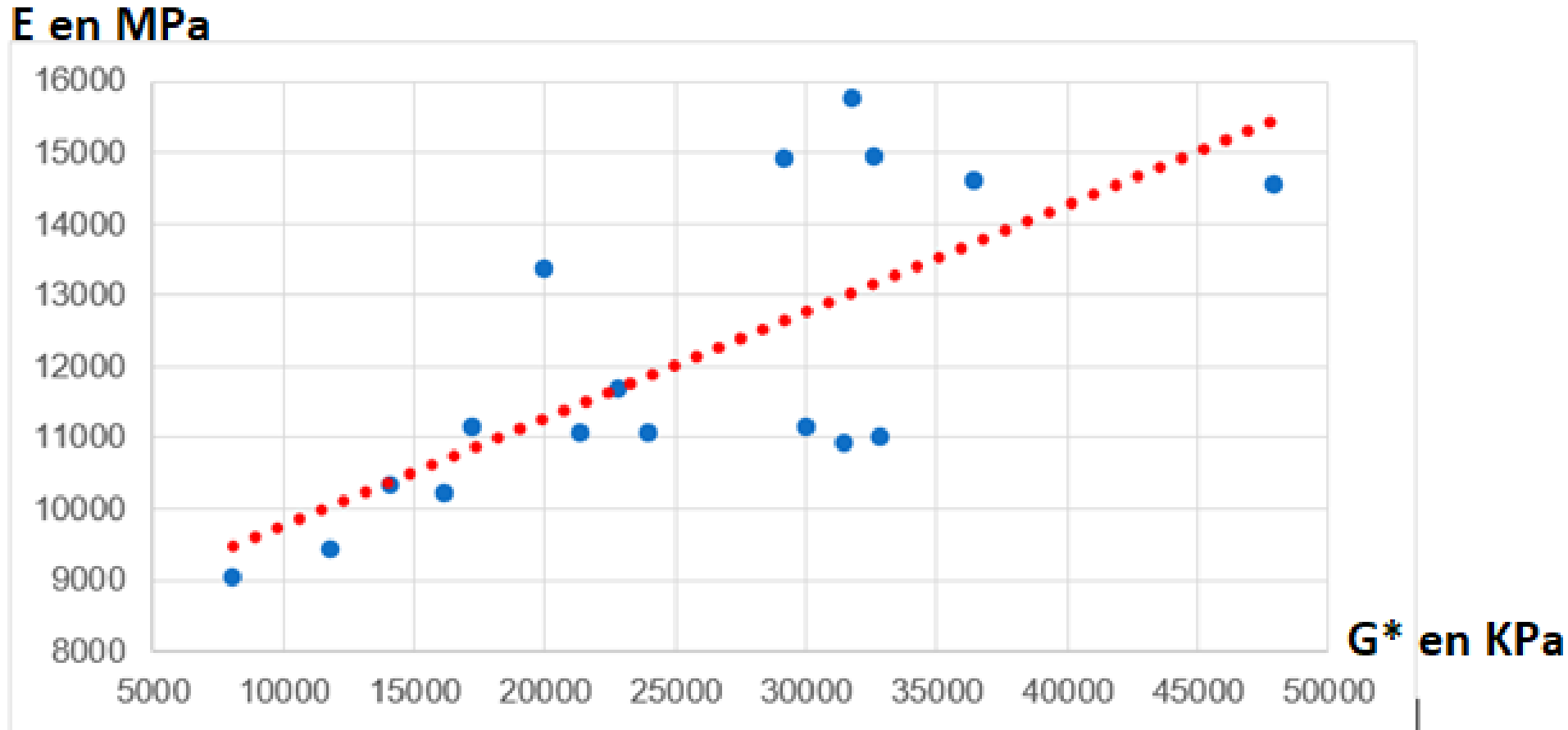
T = 15°C
f = 10 Hz



Essais de module complexe E: NM EN 12697-26



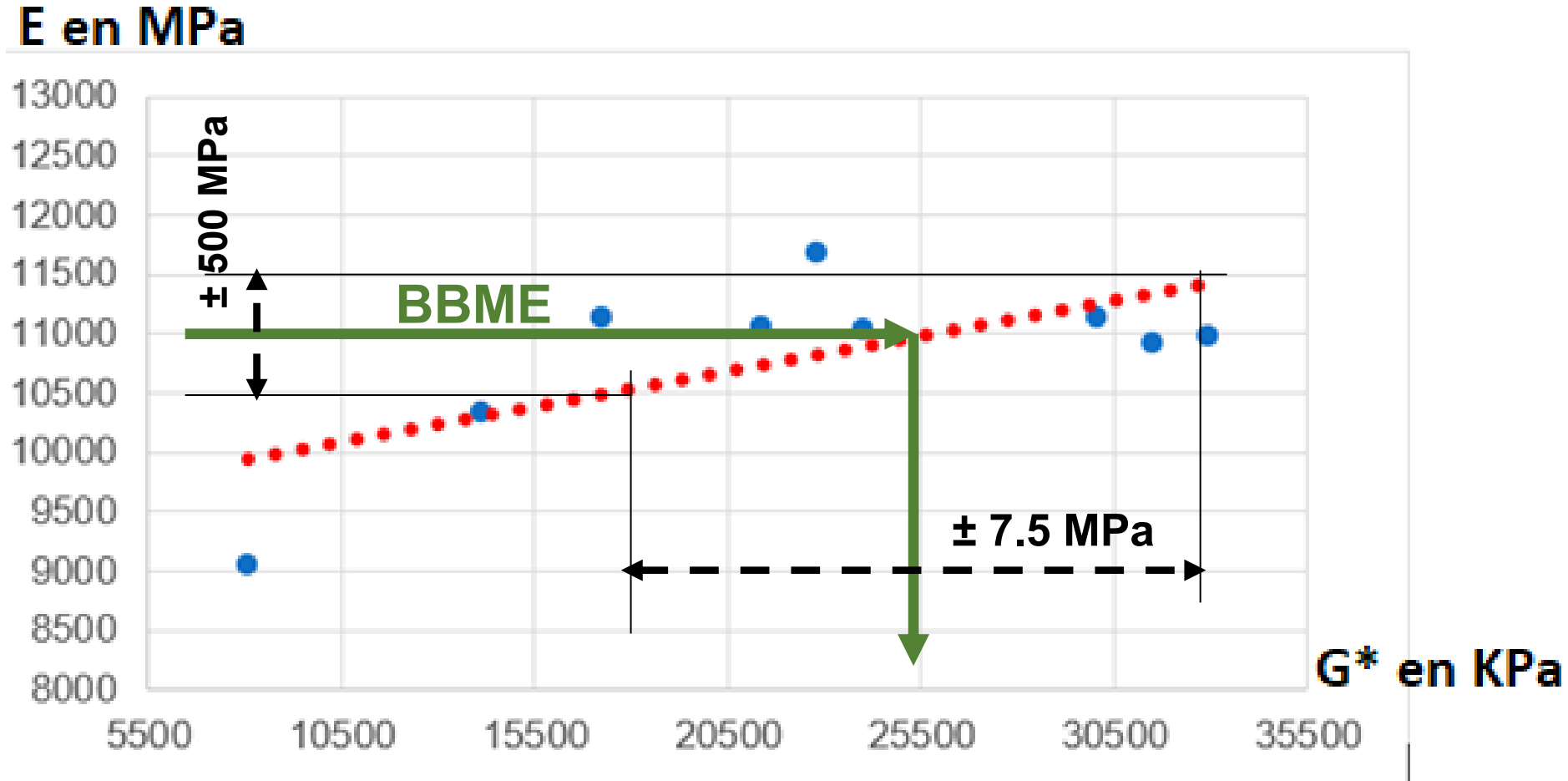
3/ Résultats de caractérisation rhéologique des bitumes en corrélation avec certaines performances mécaniques des enrobés bitumineux



Corrélation entre E (15°C , 10 Hz) et G* (15°C , 10 Hz)

(Tous types de bitumes et de mélanges minéraux)

3/ Résultats de caractérisation rhéologique des bitumes en corrélation avec certaines performances mécaniques des enrobés bitumineux



Corrélation entre E (15°C , 10 Hz) et G*(15°C , 10 Hz)

Bitume modifié et tous types de mélanges minéraux

3/ Résultats de caractérisation rhéologique des bitumes en corrélation avec certaines performances mécaniques des enrobés bitumineux

2^{ème} cas réel : Essai d'orniérage NM EN 12697-22+A1
(Température de réalisation de l'essai = 60°C)

Que faire si la température réelle de la chaussée > 60°C !

Pour répondre à cette question, des pratiques sous forme de dérogations à la norme, et qui sont d'ailleurs bien réfléchies, ont été adoptées au niveau de certains CPS, mais.....

Dérogation n°	Dérogation par rapport à la norme	Difficulté
1	Essai à 80°C	Chauffage du Matériel ...
2	Augmenter le nombre de cycles de l'essai	Nombre et conformité...?
3	Réduire le seuil exigé par la norme	Seuil et conformité...?

Y a-t-il une solution alternative en relation avec la Rhéologie des bitume ?



$G^* / \sin\delta$ minimal

AASHTO (M320)

3/ Résultats de caractérisation rhéologique des bitumes en corrélation avec certaines performances mécaniques des enrobés bitumineux

Classification PG ? / ?

AASHTO (M320)

Caractéristique que le bitume doit satisfaire selon son grade PG

Paramètre d'orniérage ($G^* / \text{Sin}\delta$)

Adopté au Maroc sur certains chantiers autoroutiers pour 70°C en complément à l'essai normalisé d'orniérage

Paramètre de fatigue ($G^* \times \text{Sin}\delta$)

Dans la classification PG, le grade du bitume est défini sur la base de deux limites de la température de chaussée : Température Max et température Min.....

TABLE 9.3 Performance Graded Asphalt Binder Specifications (Table 1 of AASHTO M 320)

Performance Grade	PG 46-			PG 52-						PG 58-				PG 64-							
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40
Average seven-day maximum pavement design temperature, °C	<46			<52						<58				<64							
Minimum pavement design temperature, °C	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40
Original Binder																					
Flash point temperature: minimum, °C	230																				
Viscosity, ASTM D4402: maximum, 3 Pa.s. test temperature, °C	135																				
Dynamic Shear: $G^*/\sin \delta$, minimum, 1.00 kPa test temperature @ 10 radians/seconds, °C	46			52						58				64							
Rolling Thin-Film Oven Residue																					
Mass loss, maximum, percent	1.00																				
Dynamic Shear: $G^*/\sin \delta$, minimum, 2.20 kPa test temperature @ 10 radians/seconds, °C	46			52						58				64							
Pressure-Aging Vessel (PAV) Residue																					
PAV aging temperature, °C	90			90						100				100							
Dynamic Shear: $G^* \cdot \sin \delta$, maximum, 5000 kPa test temperature @ 10 radians/seconds, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
Creep stiffness: S, maximum, 300 MPa, m-value, minimum, 0.300 test temperature @ 60s, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30
Direct tension: failure strain, minimum, 1.0% test temperature @ 1.0 mm/minutes, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30

PG 82-?

G^*
 $\sin(\delta)$
Paramètre d'orniérage

$G^* \times \sin(\delta)$
Paramètre de fatigue

S: Module de rigidité en flexion à basse température

$(64-40)/2+4=16$

$T = 4^\circ\text{C} + (T_{\text{max}} + T_{\text{min}})/2$

$T = 10^\circ\text{C} + T_{\text{min}}$

$(-34) + 10 = (-24)$



3/ Résultats de caractérisation rhéologique des bitumes en corrélation avec certaines performances mécaniques des enrobés bitumineux

PRÉDICTION DE LA RESISTANCE A L'ORNIERAGE AASHTO (M320)

Indicateur de prédiction vis-à-vis de l'orniérage: $G^*/\sin \delta$ A maximiser

Une bonne résistance à l'orniérage

G^* ↑ Suffisamment Rigide
 δ ↓ Suffisamment Elastique
 $\frac{1}{\sin(\delta)}$ ↑

$$\frac{G^*}{\sin(\delta)} \uparrow$$

Minimisation de la quantité d'énergie transformée en orniérage sous l'action d'un cycle de chargement

$$W = \pi \sigma^2 \left(\frac{1}{\sin(\delta)} \frac{G^*}{\sin(\delta)} \right)$$

A minimiser

Dynamic Shear: <u>$G^*/\sin \delta$</u> , minimum, 1.00 kPa test temperature @ 10 radians/seconds, °C
Mass loss, maximum, percent
Dynamic Shear: <u>$G^*/\sin \delta$</u> , minimum, 2.20 kPa test temperature @ 10 radians/seconds, °C

3/ Résultats de caractérisation rhéologique des bitumes en corrélation avec certaines performances mécaniques des enrobés bitumineux

PRÉDICTION DE LA RESISTANCE A LA FATIGUE AASHTO (M320)

Indicateur de prédiction vis-à-vis de l'orniérage: $G^* \times \sin \delta$

A minimiser

Une bonne résistance à la fatigue

G^* ↓ Suffisamment Souple
Suffisamment Elastique
 δ ↓ $\sin(\delta)$ ↓

$G^* \times \sin(\delta)$ ↓

Minimisation de la quantité d'énergie transformée en fissurations sous l'action d'un cycle de chargement

$$W = \pi \sigma^2 [G^* \times \sin(\delta)]$$

A minimiser

Dynamic Shear: $G^* \cdot \sin \delta$, maximum, 5000 kPa test temperature @ 10 radians/seconds, °C

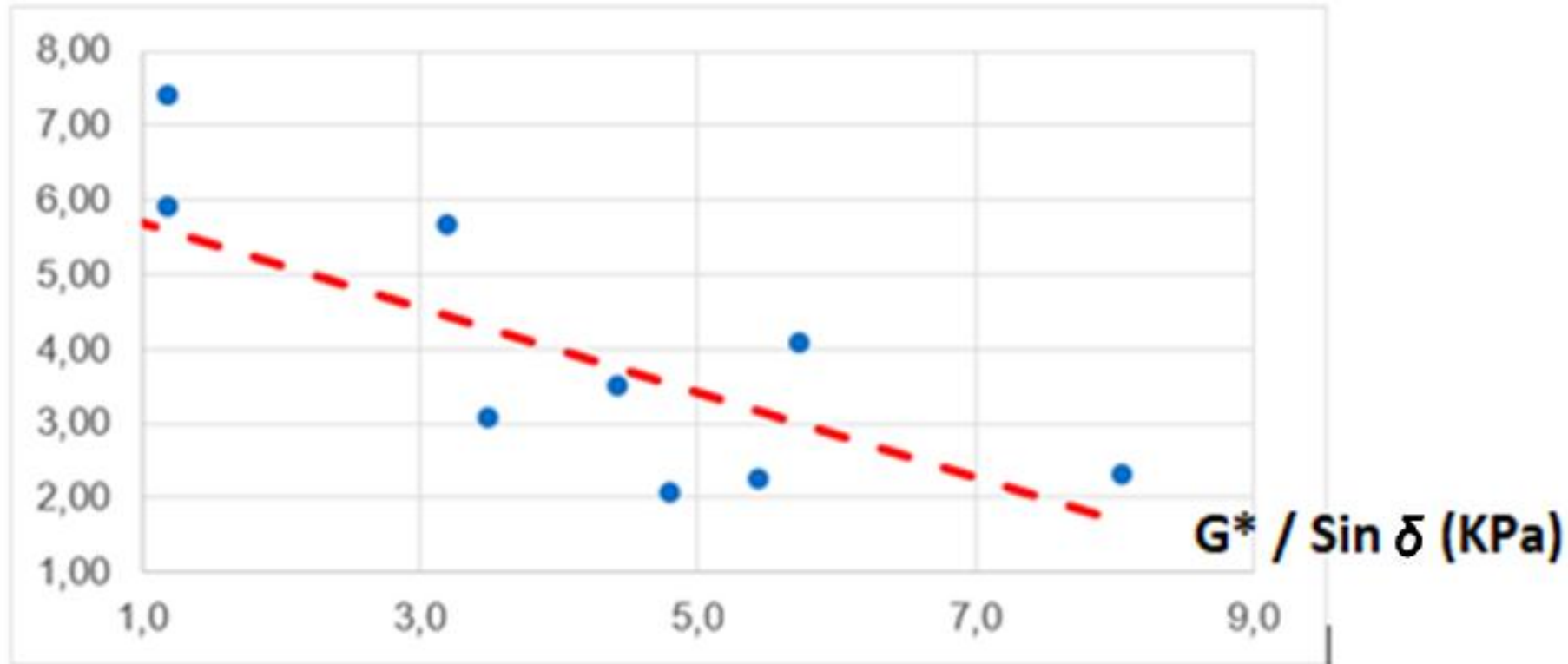
3/ Résultats de caractérisation rhéologique des bitumes en corrélation avec certaines performances mécaniques des enrobés bitumineux

	G* /Sin δ (en KPa) [avec T = 70°C et f = 10 rad/s (1.59 Hz)]	
Bitume Pur 35-50	Nombre d'essais	17
	Maximum	7,0
	Moyenne	1,8
	Minimum	0,9
	Ecart type	1,9
	1.64xEcart type	3,09
Bitume Pur 20-30	Nombre d'essais	12
	Maximum	5,7
	Moyenne	3,3
	Minimum	2,2
	Ecart type	0,9
	1.64xEcart type	1,40
Bitume Pur 35-50 Modifié aux élastomères	Nombre d'essais	35
	Maximum	13,0
	Moyenne	6,6
	Minimum	2,5
	Ecart type	2,8
	1.64xEcart type	4,62

3/ Résultats de caractérisation rhéologique des bitumes en corrélation avec certaines performances mécaniques des enrobés bitumineux

Profondeur

Ornière en %



Corrélation entre la profondeur d'ornière et $G^* / \text{Sin } \delta$ à 70°C
Tous types d'enrobés

4/ Synthèses et commentaires sur les caractéristiques rhéologiques des bitumes usuels au Maroc

ANALYSE DES PARAMÈTRES RHÉOLOGIQUES DES BITUMES AU MAROC

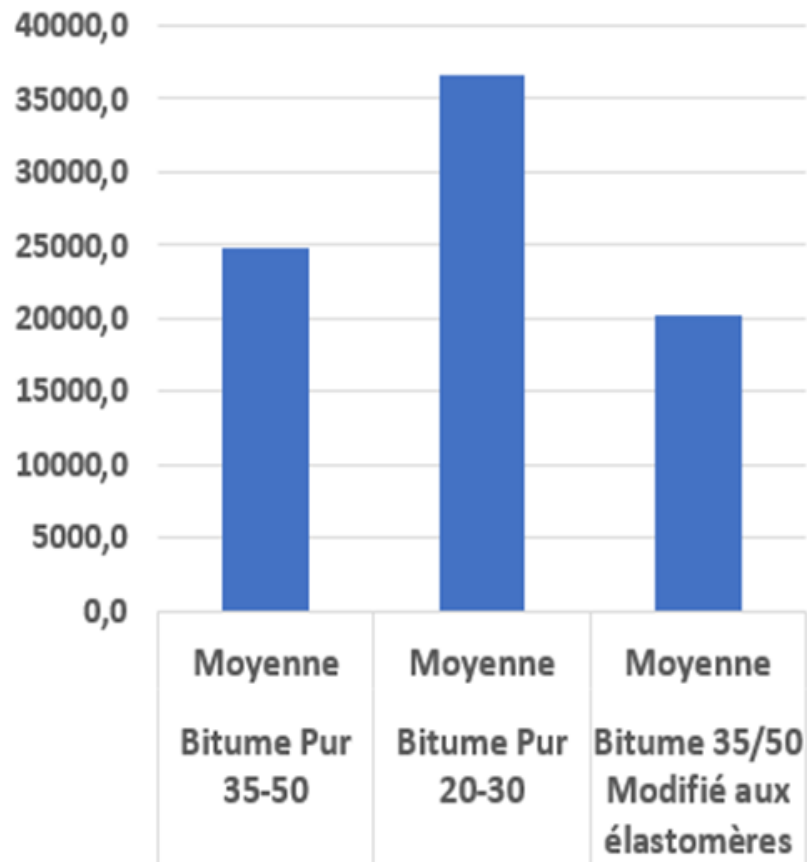
$$(G^*, \delta) \quad \frac{G^*}{\sin(\delta)} \quad G^* \times \sin(\delta)$$

4/ Synthèses et commentaires sur les caractéristiques rhéologiques des bitumes usuels au Maroc

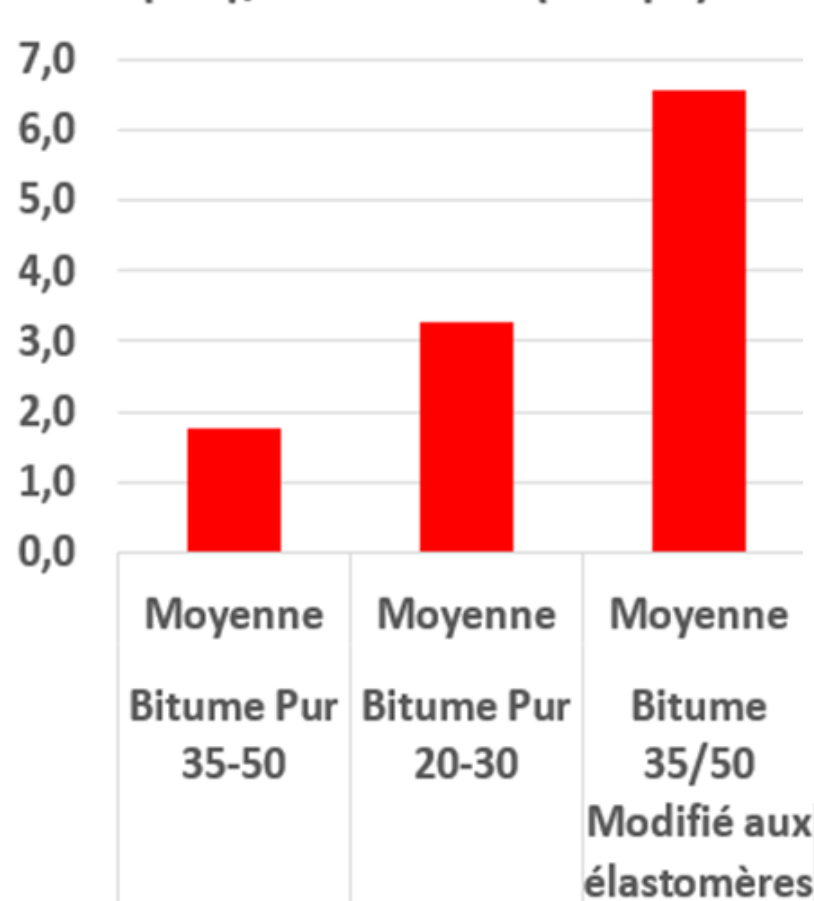
		T = 15°C et f = 10 Hz	
		G* (en KPa)	Angle de phase δ (Degré)
Bitume Pur 35-50	Nombre d'essais		28
	Maximum	48432,0	53,1
	Moyenne	24745,6	43,2
	Minimum	5776,0	36,5
	Ecart type	9292,6	4,4
	1.64xEcart type	15284,9	7,24
Bitume Pur 20-30	Nombre d'essais		26
	Maximum	71416,6	51,7
	Moyenne	36692,9	39,1
	Minimum	18538,1	29,9
	Ecart type	11191,5	4,7
	1.64xEcart type	18408,3	7,76
Bitume Pur 35-50 Modifié aux élastomères	Nombre d'essais		22
	Maximum	32937,4	62,8
	Moyenne	20245,0	39,1
	Minimum	6769,2	29,2
	Ecart type	7142,7	7,4
	1.64xEcart type	11748,7	12,14

4/ Synthèses et commentaires sur les caractéristiques rhéologiques des bitumes usuels au Maroc

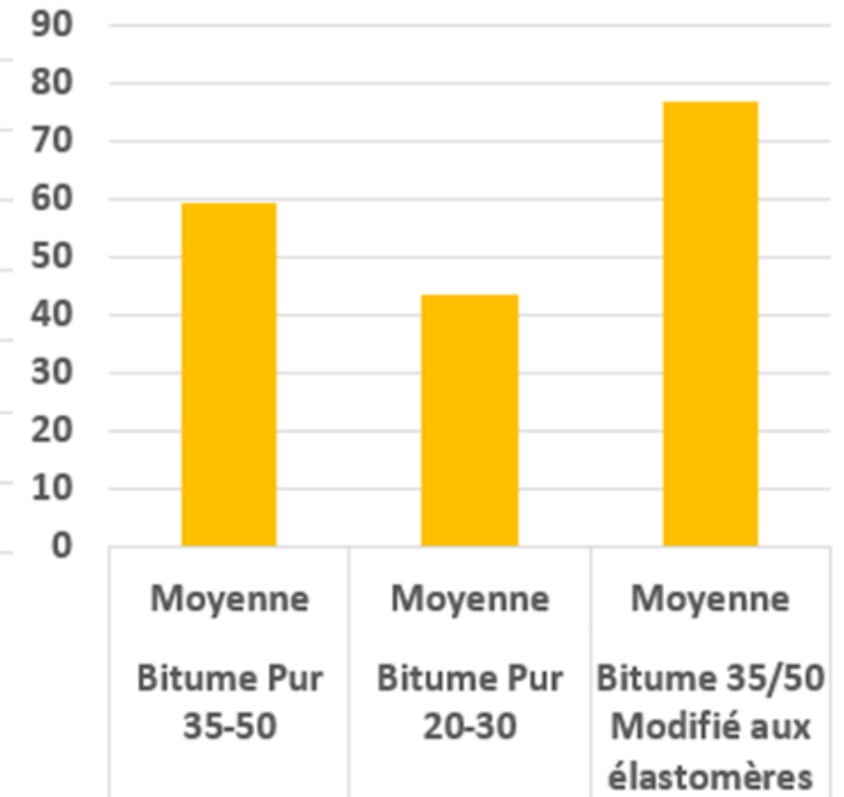
$|G^*|$ à 15°C
(en Kpa)



Paramètre d'ornièrage
 $|G^*|/\sin \delta$ à 70°C (en Kpa)



Paramètre Fatigue
 $1 / (|G^*| \times \sin \delta)$ à 15°C
[G* en 10^6 Kpa]



5/ Conclusions

5-1/ Corrélation entre E (15°C, 10Hz) et G* (15°C, 10Hz)

Le module complexe E (15°C, 10Hz) des enrobés bitumineux est étroitement lié au module complexe en cisaillement dynamique des bitumes G* (15°C, 10Hz).

Les corrélations entre E et G* constituent des outils pour :

- ✓ **Le choix convenable du bitume en fonction du module complexe E requis.**
- ✓ **La définition des tolérances admissibles, à exiger dans les cahiers de charges, autour du G* retenu lors d'une étude de formulation pour maîtriser les variations induites sur le module E des enrobés.**

5-2/ Pertinence de l'indicateur de prédiction Orniérage $G^*/\text{Sin } \delta$

La pertinence de l'indicateur de prédiction $G^*/\text{Sin } \delta$ est confirmée à travers l'exploitation des résistances à l'orniérage mesurées réellement sur les enrobés bitumineux lors des études de formulation.

5-3/ Caractérisation rhéologique des bitumes usuels au Maroc

Nous disposons actuellement d'une base de données intéressante sur les caractéristiques rhéologiques des bitumes usuels au Maroc

Ces données pourront être exploitées et affinées d'avantage dans un but de prédiction des performances mécaniques des enrobés bitumineux, en prenant en considération l'impact de deux paramètres déterminants pour le bon comportement d'une chaussée bitumineuse:

- ✓ **l'impact des températures réelles extrêmes annuelles (maximales et minimales).**
- ✓ **l'impact des poids lourds à faible vitesse de circulation.**

تحت الرعاية السامية لحامى الجلالة الملك محمد السادس
Ο ΞΟΛΞ ΞΗΗΞΙ | Θ.Θ | ΛΙΛΛΞΟ ΞΗΗΞΑ ΓΞΧΞΑ ΛΙΞ ΘΞΞΘ
SOUS LE HAUT PATRONAGE DE SA MAJESTÉ LE ROI MOHAMMED VI

11^{ème} المؤتمر الوطني للطرق
ΞΟ.Λ.Ξ.Θ | ΞΘΟΞΛΙ
Congrès National de la Route

MERCI

SOUS LE THÈME

Quels rôles de l'infrastructure
routière dans le nouveau modèle
de développement économique
et social du Maroc ?

تحت شعار

أية مكانة لتطوير البنية التحتية
الطرقية في تنزيل النموذج
الجديد للتنمية الاقتصادية
و الاجتماعية بالمغرب ؟

10 / 12
نوفبر NOV
DAKHLA 2022

الداخلة
DAKHLA