



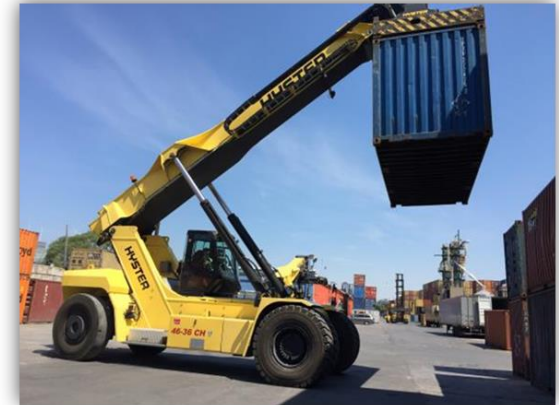
Usages et Applications des Enrobés à Modules Élevés pour Chaussées Fortement Sollicitées et Industrielles

- Congrès Infra 2022- Cériu
- Marc Proteau, CTA - Eurovia
- Amélie Griggio, CTA - Eurovia

Usages et Applications des Enrobés à Modules Élevés pour Chaussées Fortement Sollicitées et Industrielles

SOMMAIRE DE LA PRÉSENTATION

1. DÉVELOPPEMENT DES ENROBÉS BITUMINEUX HAUTES PERFORMANCES
 2. EXIGENCES RELATIVES À LA PLATE-FORME DE CHAUSSÉE
 3. UTILISATION DE L'APPROCHE DE CONCEPTION MÉCANIQUE DES CHAUSSÉES
 4. EXEMPLE DE CONCEPTION DE CHAUSSÉE
 5. EXEMPLE DE CONCEPTION DE CHAUSSÉE INDUSTRIELLE
 6. AVANTAGES ENVIRONNEMENTAUX
- CONCLUSION

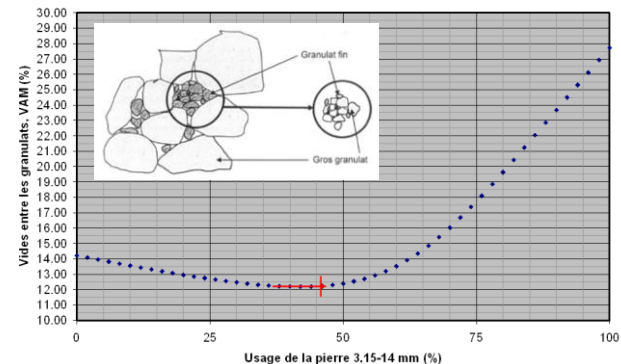


1. DÉVELOPPEMENT ENROBÉS BITUMINEUX HAUTES PERFORMANCES

— LES CONCEPTIONS DE MÉLANGE À MODULE ÉLEVÉ SONT BASÉES SUR LES GRANDS PRINCIPES SUIVANTS:

- Optimisation de la structure granulaire, avec une modélisation prédictive de son agencement et de sa porosité (vides dans l'agrégat minéral, VAM);
- Utilisation de bitumes hautes performances;
- Performances techniques basées sur l'analyse rhéologique (module de rigidité, résistance à la fatigue, résistance à l'orniérage et autres);
- Possibilité d'utiliser des Granulats Bitumineux Recyclés (GBR);
- Utilisation d'additifs spéciaux;
- Adéquation (mélanges équilibrés) entre les performances mécaniques les plus élevées, en corrélation avec des environnements à très basse température.

Optimisation du VAM (sans bitume) sur un combiné de granulats de 3,15-14 mm et de 0-3,15 mm Vs usage de la pierre 3,15-14 mm



Essai de fatigue TC sous sollicitation sinusoïdale cyclique

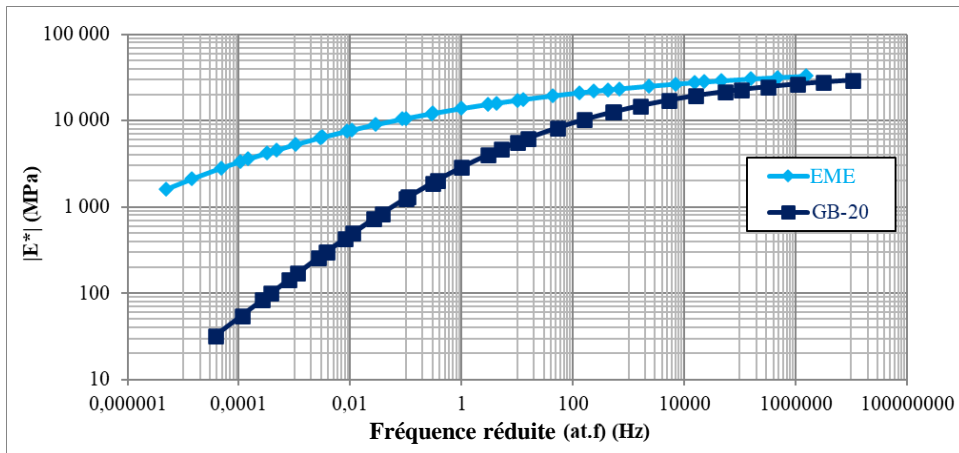
1. DÉVELOPPEMENT ENROBÉS BITUMINEUX HAUTES PERFORMANCES

EXEMPLE DE SPÉCIFICATIONS ENROBÉS À MODULES ÉLEVÉS

DESCRIPTION	RÉGIONS			REFÉRENCES
	VANCOUVER TORONTO USA	MONTRÉAL	RÉGINA	NF EN 13108-1 EME CLASSE 2
Module Complexe, E* (MPa) <ul style="list-style-type: none"> 15°C, 10 Hz 10°C, 10 Hz 5°C, 10 Hz 	> 14,000 -- --	> 11,000 > 14,000 --	> 11,000 > 14,000	> 14,000 Enrobés Conventionnels • Module 10 °C – 10 Hz : 6,000-7,000 MPa • Fatigue 10 °C – 10 Hz : 90-100 µdef
Fatigue, 10⁶ cycles (µm/m) <ul style="list-style-type: none"> 10°C, 10 Hz, TC 10°C, 25 Hz, 2 PB 	> 100 --	> 135 --	> 150 --	-- > 130
Résistance à l'orniérage, 30,000 cycles (%) <ul style="list-style-type: none"> 60 °C, 100 mm 	< 5.0	< 5.0	< 7.5	< 7.5
Résistance à l'Humidité, TSR (%)	> 80	> 80	> 85	--
Résistance au retrait thermique, TSRST (°C)	< -16 or < -22 (dépendant de la zone climatique)	< -28	< -28	---

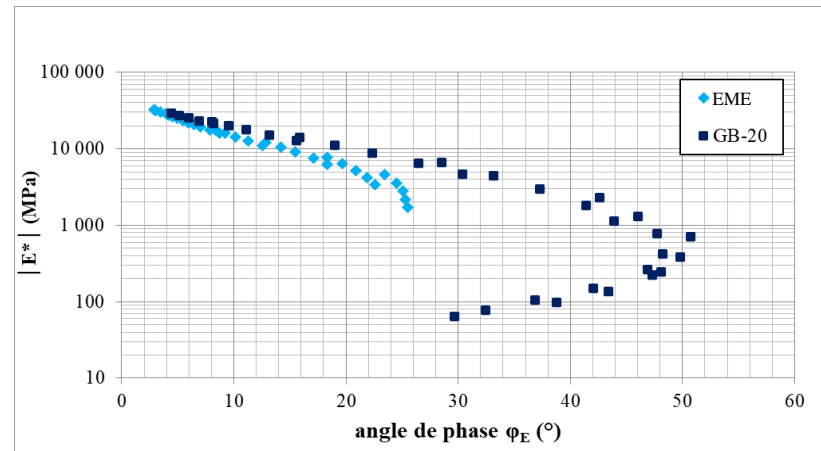
1. DÉVELOPPEMENT ENROBÉS BITUMINEUX HAUTES PERFORMANCES

COMPARAISON ENTRE GB-20 ET EME AVEC MÊME SOURCE GRANULAIRE



Courbe Maître à 10 °C - Modélisation selon Witzcak

- Pour la chaussée et les Blv. Industriels, zones de fréquences normales, module complexe EME significativement supérieur au module complexe GB-20.

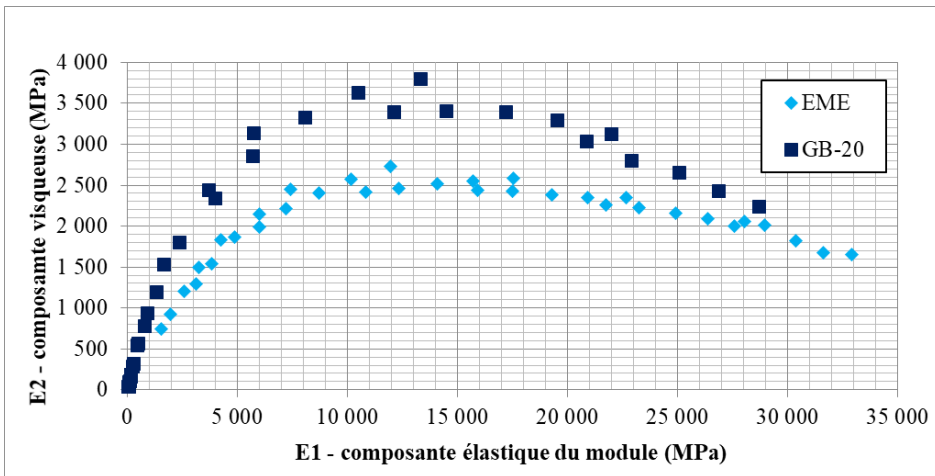


Module Complexe dans l'espace de Black

- Angle de phase EME \ll Angle de phase GB-20 : meilleur comportement élastique,
- GB-20: Diminution de l'angle de phase (résultats correspondant à des essais de module complexe à 30°C et 40°C) Comportement du bitume mou.

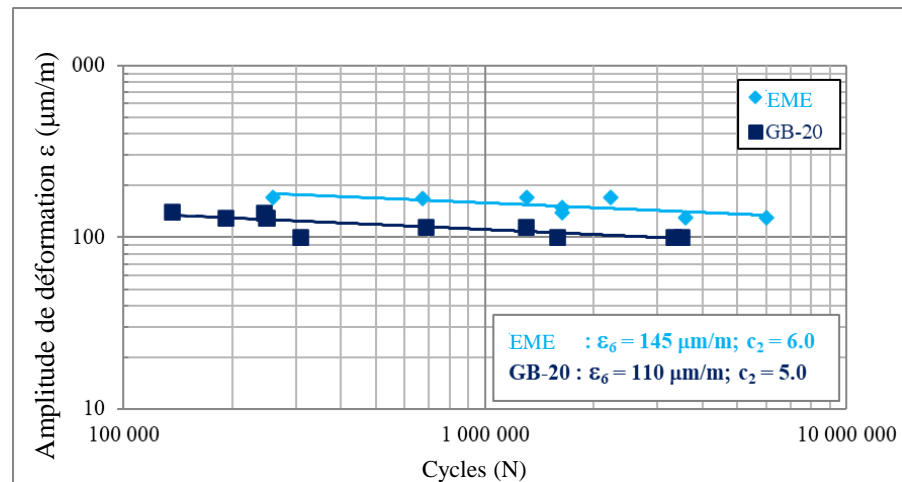
1. DÉVELOPPEMENT ENROBÉS BITUMINEUX HAUTES PERFORMANCES

COMPARAISON ENTRE GB-20 ET EME AVEC MÊME SOURCE GRANULAIRE



Module Complexe (Essai TC) dans la domaine Cole-Cole

- Comportement partie visqueuse E2 plus grande pour la GB-20 en comparaison à l'EME.



Courbe de Wöhler sous sollicitation Sinusoidale à 10°C et 10 Hz

- Résistance en fatigue nettement plus élevée
- $\epsilon_{6 \text{ EME}} > \epsilon_{6 \text{ GB-20}}$

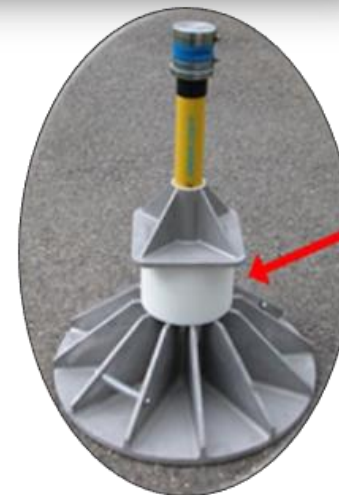
2. SPÉCIFICATIONS DE PORTANCE DE LA PLATEFORME

CLASSIFICATION ET CAPACITÉ

Principe : Mesure du « Module Élastique Ev2 » sous charge statique (Essai de plaque).







- LA MÉTHODE DIMENSIONNEMENT DE CHAUSSÉE “FRANÇAISE” CLASSIFIE LES PLATEFORMES SELON LES CAPACITÉS SUIVANTES:
 - PF1 : $Ev2 \geq 20$ MPa – faible trafic
 - **PF2 : $Ev2 \geq 50$ MPa – Fort trafic et aires industrielles**
 - PF3 : $Ev2 \geq 120$ MPa – **Aires Industrielles** et trafic exceptionnel
- EXEMPLE: PLATEFORME POUR AIRES INDUSTRIELLES PF2 DE 50 MPa
 - Sol d’infrastructure $Ev2$ de 20 MPa recouvert d’une couche granulaire 0-56 mm de **30-35 cm**



3. UTILISATION DE L'APPROCHE DE CONCEPTION MÉCANIQUE DES CHAUSSÉES

COMPARAISON ENTRE LES PARAMÈTRES DE TRAFIC

PARAMÈTRES	ROUTES ET BLV. INDUSTRIELS	AIRES INDUSTRIELLES, PORT ET AIRES DE CONTENEURS
Nature du trafic	Camions lourds 	Chargeurs, Camions lourds, Reach Stackers 
Charge à l'essieu	3 à 10 tonnes	Jusqu'à 90 tonnes (Reach Stackers) 
Niveau de pression	0.2 à 0.7 Mpa	0.2 a 1.0 MPa
Vitesse de déplacement	30 km/h en urbain 110 km/h sur routes et autoroutes	< 30 km/h en charge Stockage Statique 
Fréquence/intensité	Jusqu'à plusieurs millions Écas	Jusqu'à plusieurs millions de mouvements
Balayage transversal	Trafics canalisés avec faible balayage – (2 x Écarts-types) de 0.25 a 0.45 m	Balayage transversal - trafic dispersé (2 x Écarts-types) entre 0 m et 1.5 m

3. UTILISATION DE L'APPROCHE DE CONCEPTION MÉCANIQUE DES CHAUSSÉES

PRINCIPALES DIFFÉRENCES DES MÉTHODOLOGIES DE CONCEPTION ENTRE LES CHAUSSÉES ROUTIÈRES ET LES AIRES INDUSTRIELLES

Étapes	Routes et blv. industriels	Aire Industrielle / Port / Aire de conteneurs
Capacité portante à long terme de la plateforme support	<ul style="list-style-type: none"> • Modules Statique Ev2 	<ul style="list-style-type: none"> • Module Statique Ev2; • Ev2 Minimum de 50 Mpa
Détermination du trafic	<ul style="list-style-type: none"> • Durée de vie de 15 à 30 ans • Usage de configuration en demi-essieu • Volume de Trafic • Croissance du Trafic • Coefficient d'agressivité moyen 	<ul style="list-style-type: none"> • Durée de vie de 10 à 20 ans • Modélisation des charges dynamiques pour les équipements spéciaux • Nombre de mouvements (trafic) • Croissance du trafic • Considération du Balayage transversal des engins
Choix de la couche de roulement	<ul style="list-style-type: none"> • Fonction de la vitesse, et de la résistance à l'orniérage 	<ul style="list-style-type: none"> • En fonction de l'orniérage, cisaillement superficiel et résistance au poinçonnement • Résistance aux agents chimiques • Étanchéité aux lixiviations
Modélisation de la structure en fonction de la vitesse du trafic et de la température	<ul style="list-style-type: none"> • Types de matériaux et caractéristiques rhéologiques (module de rigidité, coefficient de Poisson) • Épaisseurs des couches • Conditions des interfaces (Collées, décollées) • Modèle multi-couches 	<ul style="list-style-type: none"> • Types de matériaux et caractéristiques rhéologiques (module de rigidité, coefficient de Poisson) • Épaisseurs des couches • Conditions des interfaces (collées, semi-collées ou décollées) • Modèle multi-couches
Calculs déterminants des structures	<ul style="list-style-type: none"> • Détermination des limites admissibles en fatigue et verticales en fonction du trafic Écas • Optimisation des épaisseurs de couches (déformations calculées inférieures aux valeurs admissibles) 	<ul style="list-style-type: none"> • Détermination des limites admissibles en fatigue et verticales, en fonction du nombre de mouvements (Trafic) • Optimisation des épaisseurs des couches basées sur les Dommages cumulés (Loi de Miner)

4. EXEMPLE DE CONCEPTION DE CHAUSSÉE

BLV. INDUSTRIEL – PARAMÈTRES TRAFIC

Paramètres	500 Camions / voie / jour	2,000 Camions / voie / jour
Période de design, années	20	20
Nombre de Camions / voie / jour	500	2,000
Coefficient Agressivité (Écas/camions)	3.0	3.0
Croissance (%)	2.0	2.0
Risque (%)	5.0	5.0
ECAS	13,301,000	52,122,000

4. EXEMPLE DE CONCEPTION DE CHAUSSÉE

BLV. INDUSTRIEL - CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES ENROBÉS BITUMINEUX (COUCHE DE BASE)

	Conventionnel (GB-20 PG58-28)	Haute performance (Module Élevé)
Module de Rigidité (MPa)		
• 10 °C – 10 Hz (≈ 100 km/h)	6,500	15,000
• 10 °C – 3 Hz (≈ 30 km/h)	5,500	12,850
• 10 °C - 1.5 Hz (≈ 15 km/h)	5,000	12,000
Paramètres de Fatigue, Courbe de Wöhler		
• ϵ_6 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	110	145
• Pente -1/b	5.0	6.0

Conception
boulevard
industriel

4. EXEMPLE DE CONCEPTION DE CHAUSSÉE

BLV. INDUSTRIEL - LIMITES ADMISSIBLES ϵ_T ET ϵ_Z – MODULOVIA 4X

Alize-Lcpc - Computation of allowable values

Cumulated heavy lorries traffic: data

- Annual daily mean (MJA): 2000
- Geometric growth rate (%): 1,79
- Arithmetic growth rate (%): 2
- Service duration (years): 20
- Cumulated traffic (heavy lorries): 1,7374E+7

Tick 3 boxes at most

Help

- Agressiveness coefficients CAM
- Values of computation risk R

Lcpc-Setra Guide 1994
Catalogue 1998
Standard NF P98-086

Allowable values: data

material type: **Modulovia4X**

coefficient CAM: 3

risk (%): 5,0

cumul. traffic NE=: 5,2122E+7

Epsilon6 (µstrain): 145,0

-1/b: 6

Fréquence (Hz): 3 Hz

Teta Equiv. (°C): 10 °C

E(10°,10Hz) (MPa): 15000

E(Teq,Freq) (MPa): 12850

AC structural H (m): 0,1

PF réglage fin +/- 0.015 m

standard dev. Sh (m): 0,010

standard dev. SN: 0,350

Kr (risk): 0,792

Kc (adjustment): 1,0

Ks : E(MPa) sousjacent égal ou sup. à 120 MPa: 1

Allowable EpsilonT=

Free note Modulovia4X

1 - EpsiT= 64,2 (Modulovia4X)

2 - EpsiZ= 232,3 (uga-soils)

Compute EpsiT allowable

Inverse comput. NE=f(EpsiT)

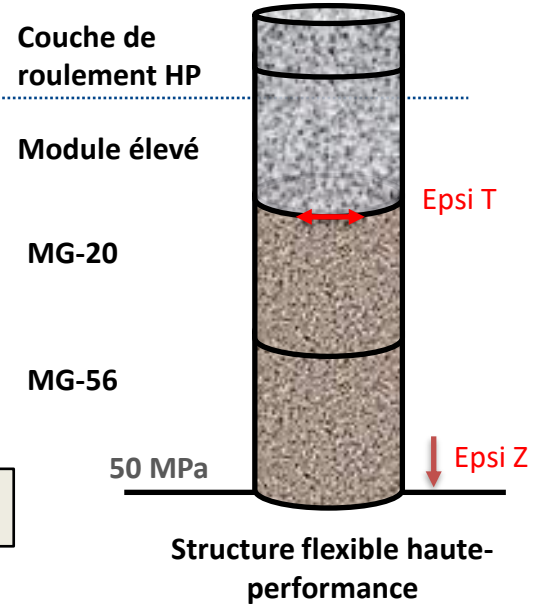
Inverse comput. Risk=f(EpsiT)

$$|E|(10^\circ\text{C}, 3\text{ Hz})$$

1 - EpsiT= 64,2 (Modulovia4X)
2 - EpsiZ= 232,3 (uga-soils)

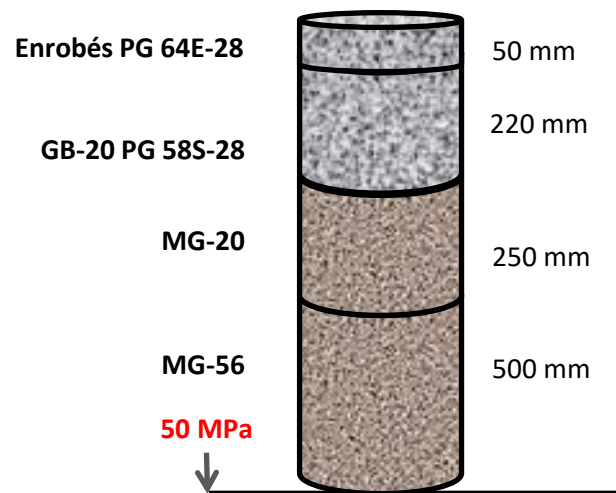
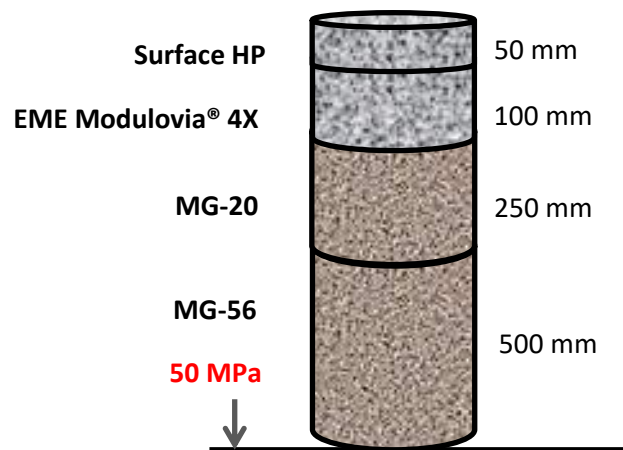
$$\epsilon_{adm} = \epsilon_6(\text{Teq } ^\circ\text{C}, \text{Freq Hz}) \times \left(\frac{\text{NE}}{10^6}\right)^b \times \sqrt{\frac{E(10^\circ\text{C}, 10\text{Hz})}{E(\text{Teq } ^\circ\text{C}, \text{Freq Hz})}} \times kc \times kr \times ks$$

$$\epsilon_{adm} = A \times \text{NE}^{-0.222}$$



4. EXEMPLE DE CONCEPTION DE CHAUSSÉE

BLV INDUSTRIEL - COMPARAISON CHAUSSÉES – 2,000 CAMIONS/JOUR



Chaussée flexible haute performance		
	Limites déformations admissibles	Déformations Calculées
Traction (µm/m)	64,2	63,9
Verticale (µm/m)	232	140

Chaussée flexible conventionnelle		
	Limites déformations admissibles	Déformations calculées
Traction (µm/m)	50,2	50,2
Verticale (µm/m)	232	100

5. EXEMPLE DE CONCEPTION DE CHAUSSÉE INDUSTRIELLE

CHAUSSÉE INDUSTRIELLE – PARAMÈTRES TRAFIC

Trafic		
Chargeur Reach Stacker RS 46-36	En charge avec Conteneurs de 32 tonnes (Mouvements/jour)	200
	À vide (Mouvements/jour)	200
	Vitesse de déplacement (km/h)	30
	Croissance (%)	1.0
	Balayage transversal (m)	1.5
	Journées d'opération (jours actifs /année)	300
Camions	En charge 45,000 kg (Mouvements/jour)	400
	À vide 20,000 kg (Mouvements/jour)	400
Empilement de Conteneurs	Conteneurs de 40' de 32 tonnes (unités)	5

5. EXEMPLE DE CONCEPTION DE CHAUSSÉE INDUSTRIELLE

CHAUSSÉE INDUSTRIELLE – CARACTÉRISTIQUES DES ENROBES BITUMINEUX

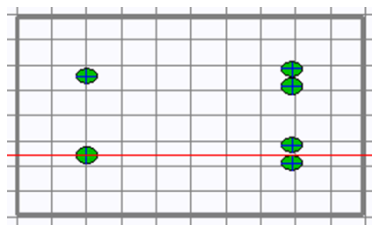
Description des couches	Charges Dynamiques Modules (10 °C - 3 Hz) (MPa)	Charges Statiques Modules (10 °C - 0 Hz) (MPa)
Surface HP	12,850	1,000
EME couche de base	12,850	1,000
Base granulaire	360	360
Sous-base granulaire	300	300
Plateforme, Ev2	120	120

5. EXEMPLE DE CONCEPTION DE CHAUSSÉE INDUSTRIELLE

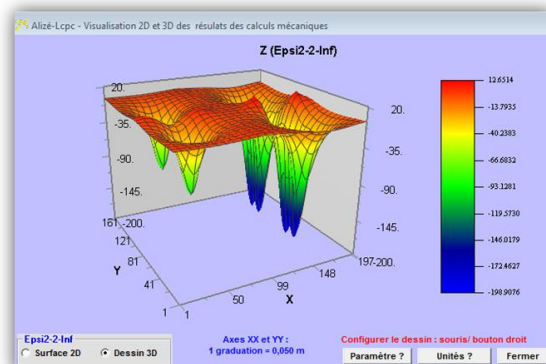
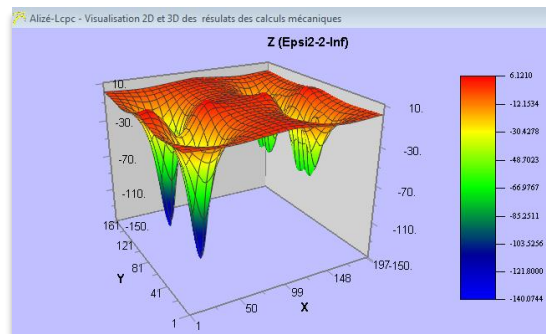
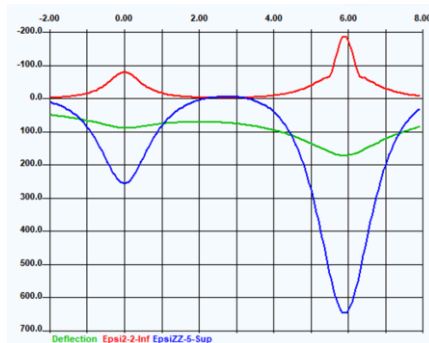
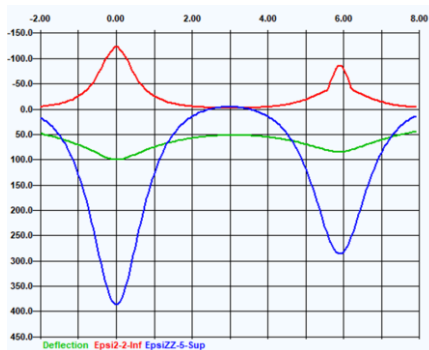
CHAUSSÉE INDUSTRIELLE - REACHSTACKER RS 46-36 CH CONFIGURATION CHARGÉE



Vide, 81 tonnes



Chargé
Conteneur de 32 tonnes,
114 tonnes total



5. EXEMPLE DE CONCEPTION DE CHAUSSÉE INDUSTRIELLE

LIMITES ADMISSIBLES ϵ_T ET ϵ_Z – MODULOVIA 4X

Alize-Lcpc - Computation of allowable values

Cumulated heavy lorries traffic: data

<input checked="" type="checkbox"/> Annual daily mean (MJA):	200
<input type="checkbox"/> Geometric growth rate (%):	0.95
<input checked="" type="checkbox"/> Arithmetic growth rate (%):	1
<input checked="" type="checkbox"/> Service duration (years):	16.4
<input type="checkbox"/> Cumulated traffic (heavy lorries):	1.2894E+6

Tick 3 boxes at most

Help

Agressiveness coefficients CAM

Values of computation risk R

Lcpc-Setra Guide 1994

Catalogue 1998

Standard NF P98-086

Allowable values: data

material type	bituminous
coefficient CAM	1
risk (%):	15.0
cumul. traffic NE=	1.2894E+6
Epsilon6 (µstrain):	145.0
-1/b	6

Compute EpsiT allowable

Inverse comput. NE=f(EpsiT)

Inverse comput. Risk=f(EpsiT)

E(10°,10Hz) (MPa):	15000
E(Teq,Freq) (MPa):	12850
AC structural H (m):	0.015
<input checked="" type="checkbox"/> PF réglage fin +/- 0.015 m	
standard dev. Sh (m):	0.010
standard dev. SN:	0.350
Kr (risk):	0.863
Kc (adjustment):	1.3
Ks : E(MPa) underlying equal or more than 120	1

Allowable EpsilonT=

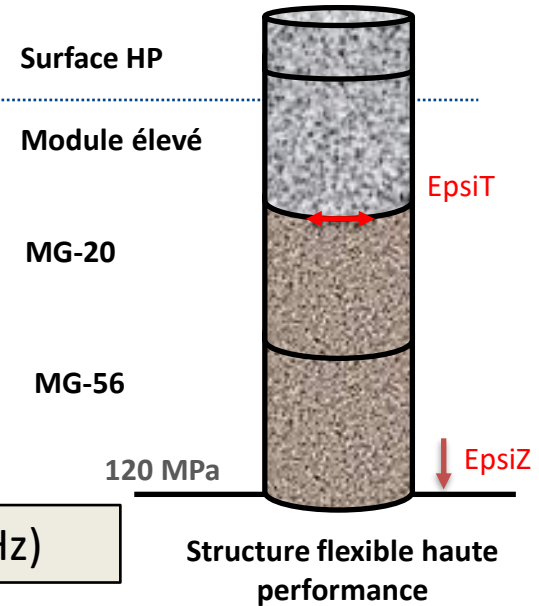
Free note

uga-soils

Memo

1 - EpsiT= 168.5 (bituminous)

2 - EpsiZ= 704.1 (uga-soils)



E (10°C, 3 Hz)

$$\epsilon_{adm} = \epsilon_6 (Teq \text{ } ^\circ\text{C}, Freq \text{ Hz}) \times \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b \times \sqrt{\frac{E(10^\circ\text{C}, 10\text{Hz})}{E(Teq^\circ\text{C}, Freq\text{Hz})}} \times kc \times kr \times ks$$

$$\epsilon_{adm} = A \times NE^{-0.222}$$

5. EXEMPLE DE CONCEPTION DE CHAUSSÉE INDUSTRIELLE

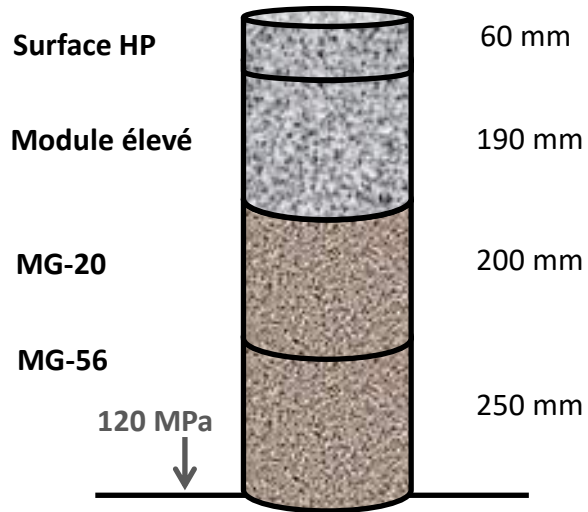
CHAUSSÉE INDUSTRIELLE - PARAMÈTRES DE CONCEPTION ET RÉSULTATS

Données de Conception			
Durée de vie (années)		20	
Capacité portante EV2 de la plateforme support (MPa)		120 (CBR : 30)	
Risque de calcul (%)		15	
Résultats de calculs		Calculés	Admissibles
Dommages de déformation en traction	200 mouvements Reach Stacker chargés	0.856	
	200 mouvements Reach Stacker vides	0.047	
	400 passages Camions chargés	0.000	
	Fatigue cumulée, D	0.903	< 1.0
Dommages de déformation verticale	200 mouvements Reach Stacker chargés	0.332	
	200 mouvements Reach Stacker vides	0.031	
	400 passages Camions chargés	0.007	
	Déformation verticale cumulée, D	0.370	< 1.0
Charge statique permanente, Sigma z (MPa)		0.480	< 1.0

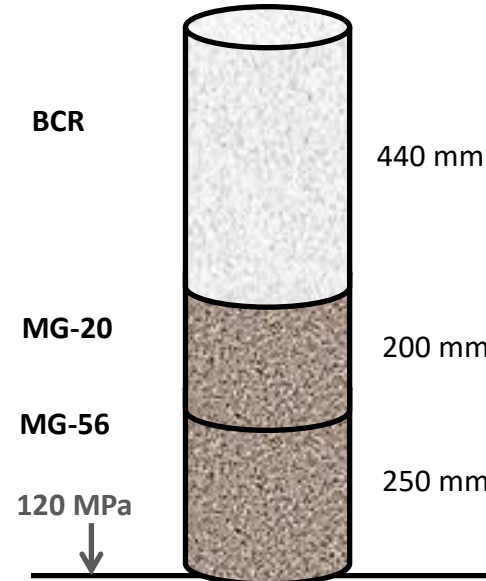
5. EXEMPLE DE CONCEPTION DE CHAUSSÉE INDUSTRIELLE

CHAUSSÉE INDUSTRIELLE - COMPARAISON DES STRUCTURES

**Structure Flexible
Haute Performance**



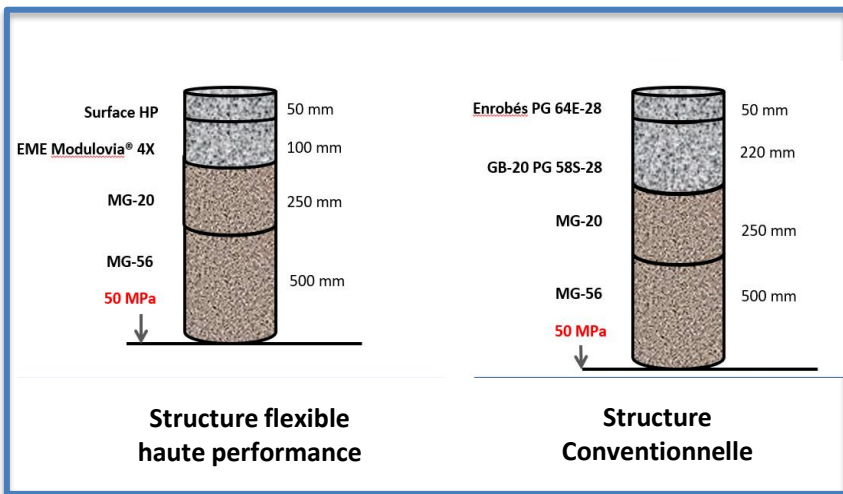
**STRUCTURE Rigide
Bétons compactés au rouleau BCR**



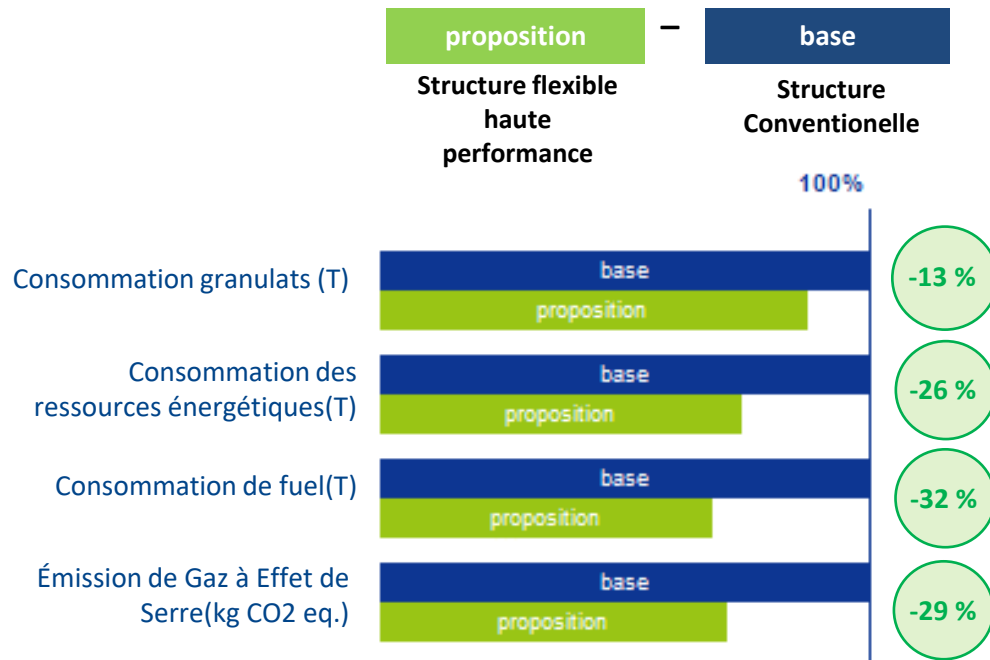
6. AVANTAGES ENVIRONNEMENTAUX

COMPARAISON ENVIRONNEMENTALE – BLV. INDUSTRIEL – 2000 CAMIONS/JOUR

– Calculs à l'aide du logiciel interne Eurovia - GAIA



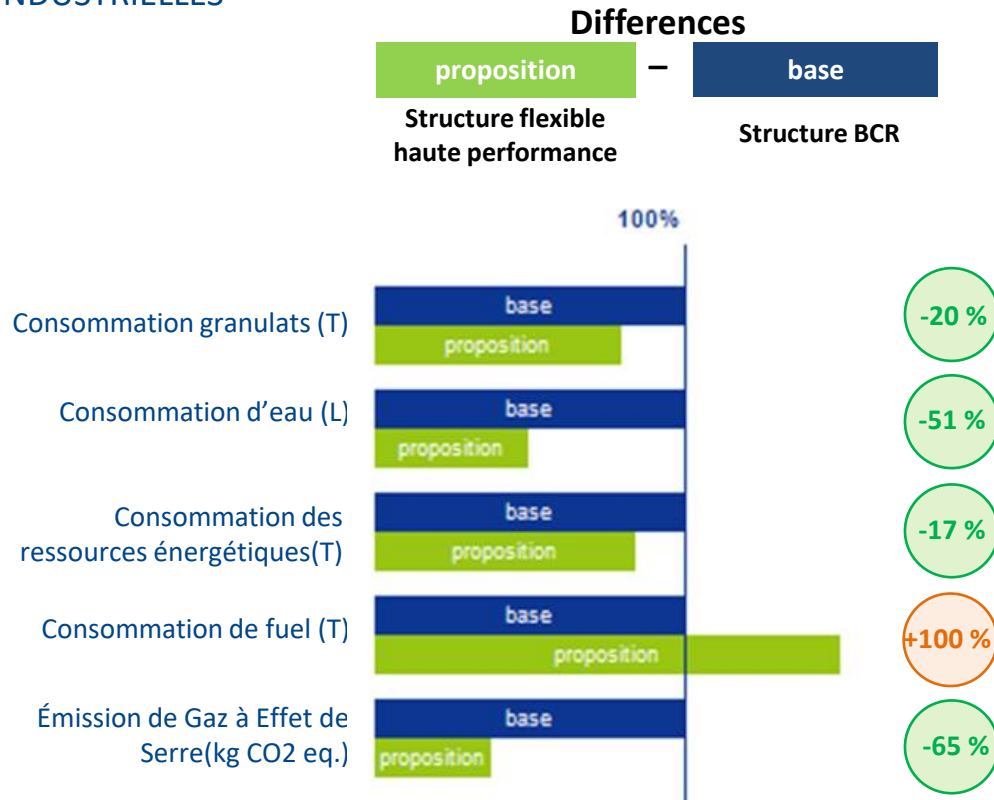
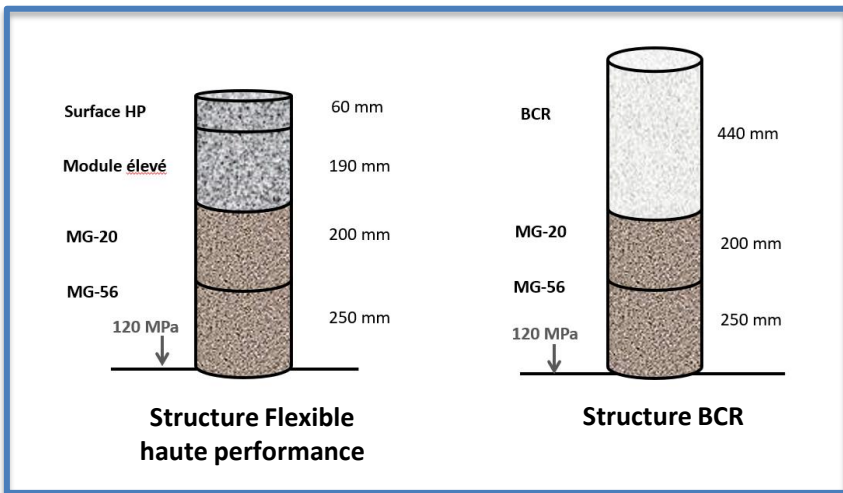
Différences



6. AVANTAGES ENVIRONNEMENTAUX

COMPARAISON ENVIRONNEMENTALE- STRUCTURES INDUSTRIELLES

– Calculs à l'aide du logiciel interne Eurovia - GAIA



USAGES ET APPLICATIONS DES ENROBÉS À MODULES ÉLEVÉS POUR CHAUSSÉES FORTEMENT SOLLICITÉES ET INDUSTRIELLES

CONCLUSION

- Les Enrobés à Modules Élevés sont une solution très efficace pour les autoroutes, les boulevards et les cours industrielles à fort trafic
- Nécessite le recours à une méthodologie de dimensionnement mécanistique
- Pour une performance structurelle à long terme
- Leurs avantages environnementaux sont importants
- Réduire l'épaisseur de la couche ou prolonger la durée de vie de la chaussée
- Plus facile à entretenir/renforcer si nécessaire





EUROVIA
VINCI 