

Caractérisation et performance des matériaux granulaires recyclés

**Maîtrise de Carl MONIZ
en ingénierie des matériaux routiers**

**Comité d'encadrement : Richard Pleau, Pascale Pierre,
Jean-Loup Robert et Jean Ruel**

Responsables au MTQ : Félix Doucet et Claude Robert

Présentation : Sylvain Juneau



Contexte

- La démolition des routes génère une quantité importante de matériaux.
- Il est important de revaloriser ces matériaux dans une optique de développement durable.
- Les connaissances actuelles sur les matériaux recyclés (MR) permettent difficilement de les utiliser conformément aux normes québécoises.

Objectifs

- Caractérisation géotechnique complète des matériaux granulaires recyclés (MR).
- Évaluation du module réversible, de la conductivité hydraulique et de la susceptibilité au gel des MR.
- Ces résultats permettront d'utiliser les valeurs réelles et précises afin d'établir les paramètres de conception.

Matériaux recyclés (MR)

- Les matériaux granulaires recyclés comprennent 3 types de matériaux granulaires (MG-20).

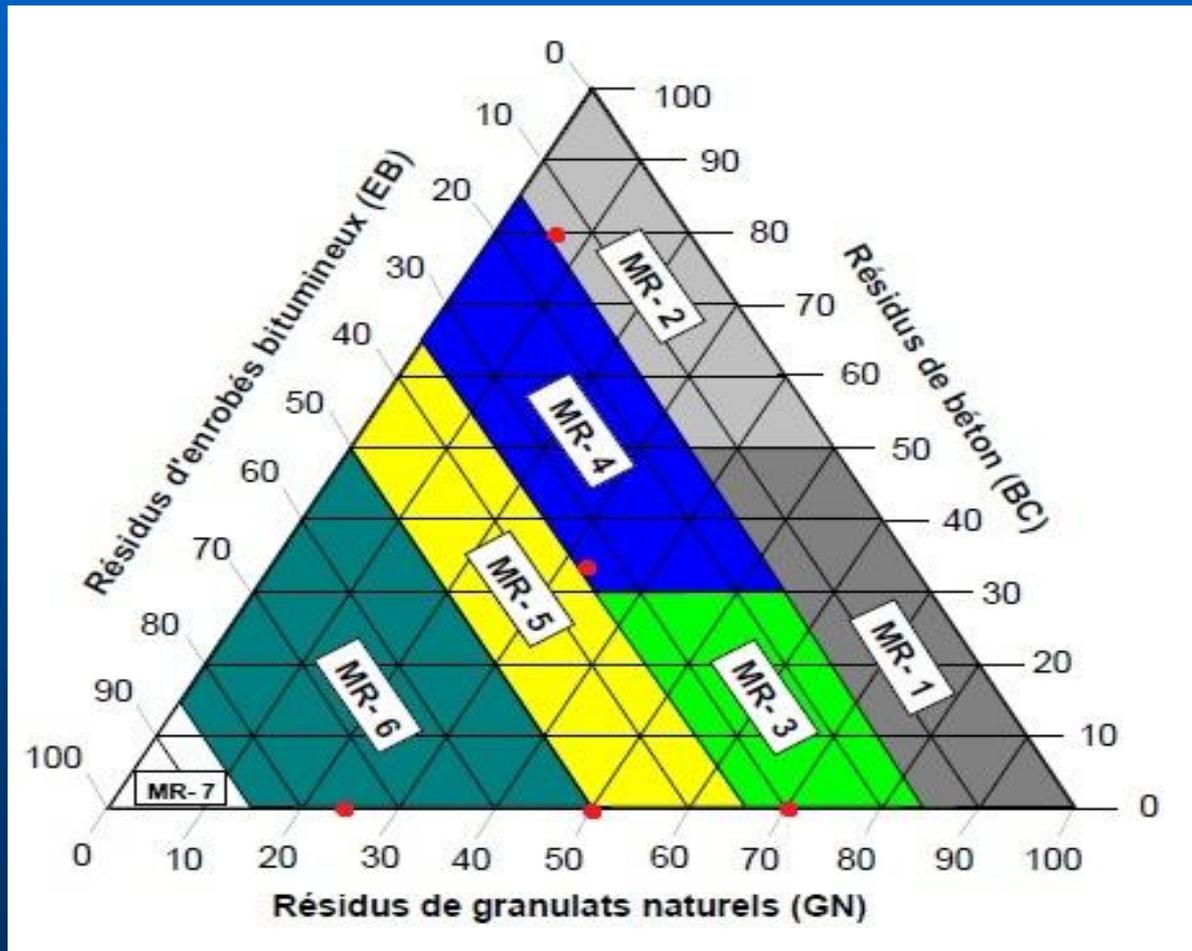
Granulat naturel, gneiss granitique (GN)

Béton de ciment concassé (BC)

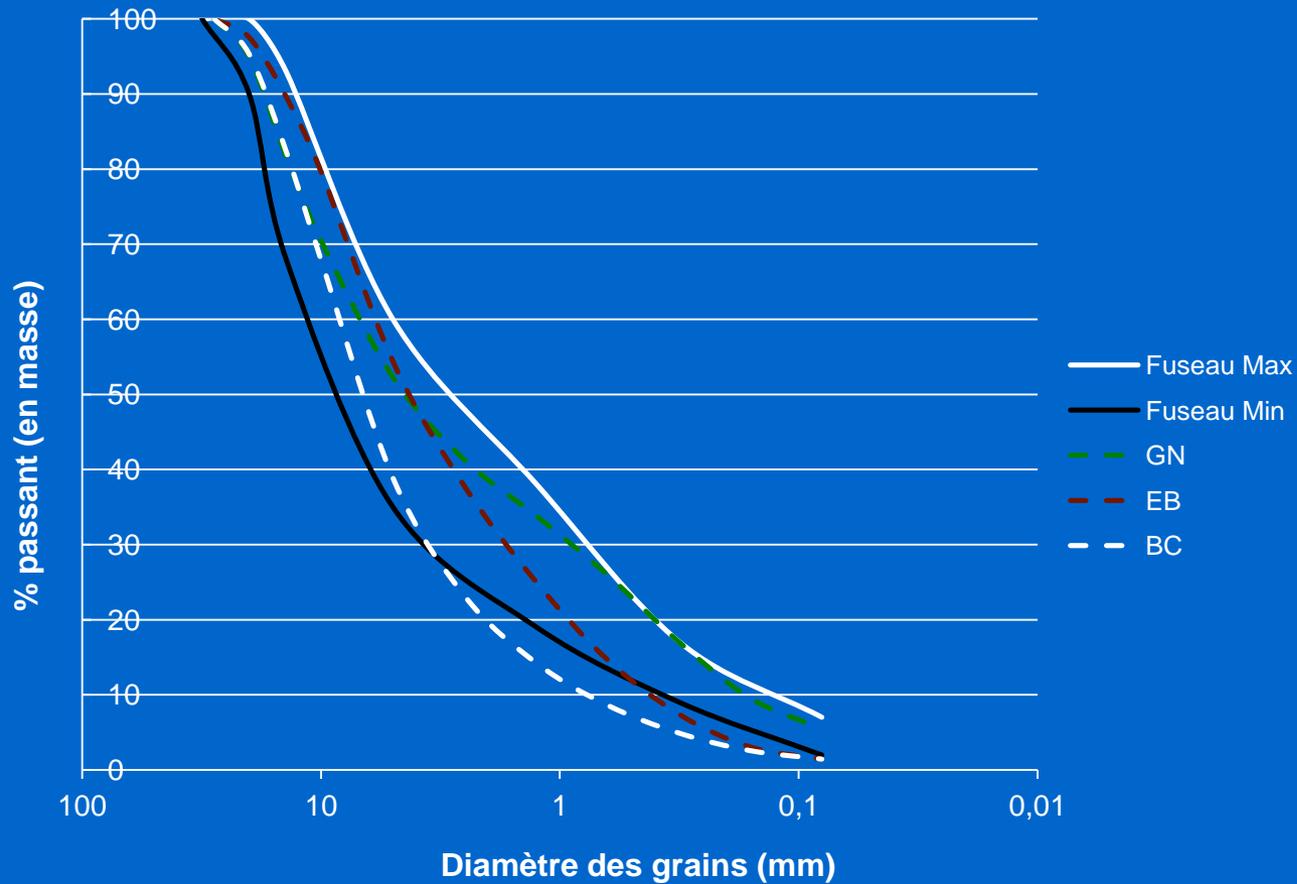
Enrobés bitumineux, résidus de planage, (EB)

%	MR2	MR3	MR4	MR5	MR6
GN	7,5	70	33	50	25
BC	80	-	33	-	-
EB	12,5	30	33	50	75

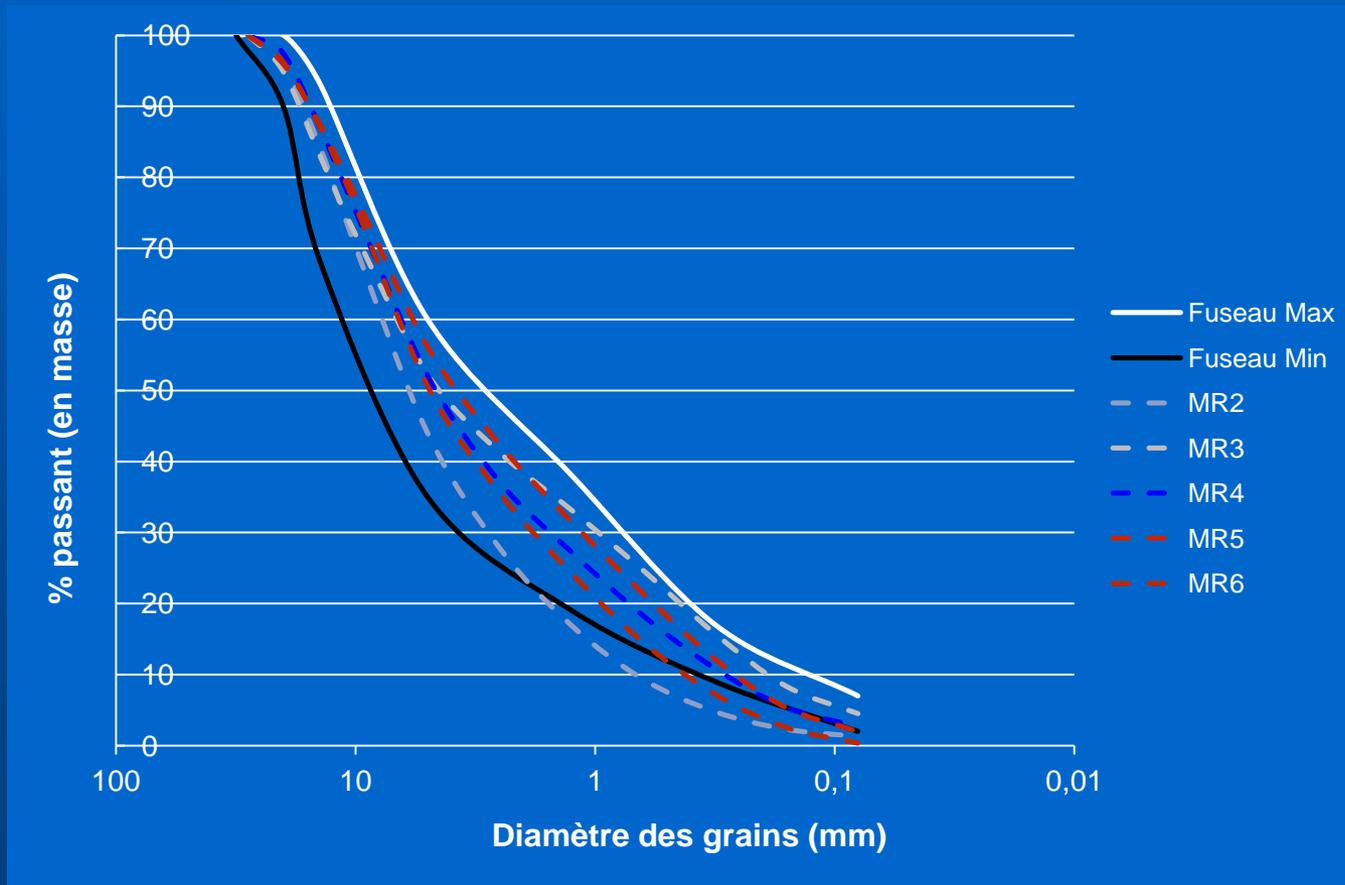
Matériaux recyclés (MR)



Analyse granulométrique



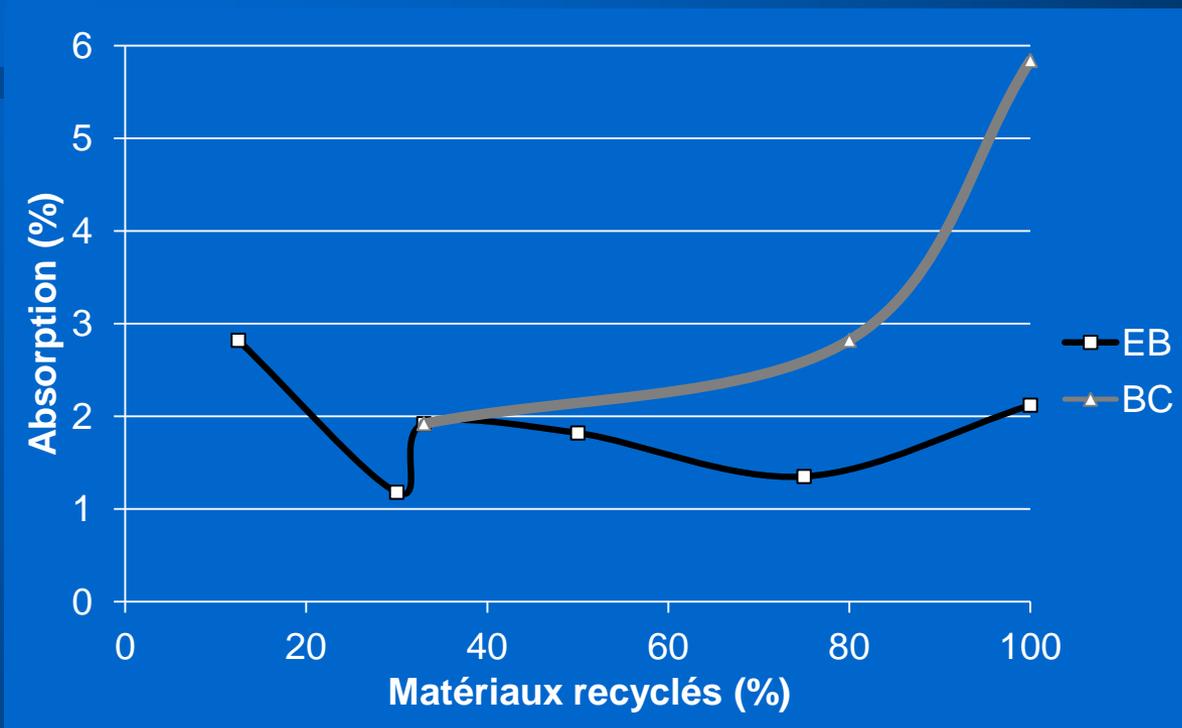
Analyse granulométrique



Densité et Absorption

Matériau granulaire	Densité combiné	Absorption combiné (%)
GN	2,64	0,86
EB	2,29	2,12
BC	2,26	5,84
MR2	2,32	2,82
MR3	2.50	1.18
MR4	2,44	1,92
MR5	2,42	1,82
MR6	2.39	1,35

Densité et Absorption



Les valeurs des densités sont relativement près les unes des autres.

La variation de l'absorption est causée par la nature différente de chaque matériau granulaire (gneiss granitique, béton/pâte de ciment, résidus de planage bitumineux).

Résistance à l'abrasion (Los Angeles)

Matériau granulaire	Abrasion (%)
GN	41,2
EB	32,5
BC	44,3
MR2	34,3
MR3	37,1
MR4	34,3
MR5	35,1
MR6	33,2

Les exigences du ministère des Transports du Québec, MTQ (NQ 2560-600) pour un MG-20 est un pourcentage d'abrasion ≤ 50 %.

L'ensemble des MR respectent la norme et ils sont tous dans le même intervalle de valeurs.

Coefficient d'usure par attrition

Matériau granulaire	Coefficient micro-Deval (%)
GN	7,55
EB	23,60
BC	21,16
MR2	16,44
MR3	12,70
MR4	14,95
MR5	14,35
MR6	22,86

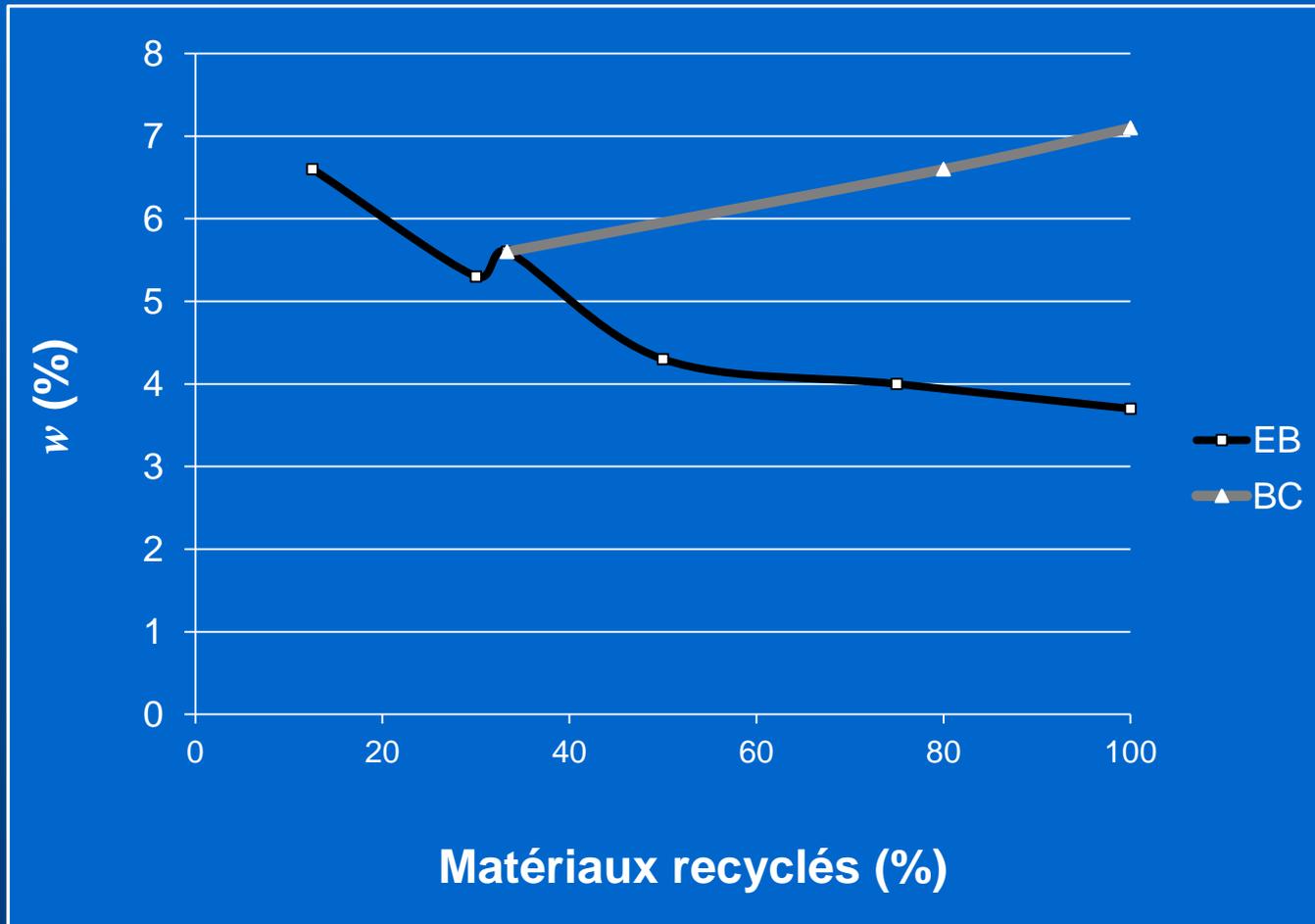
L'exigence du ministère des Transports du Québec, MTQ (MQ 2560-600) pour un MG-20 est un pourcentage d'usure par attrition ≤ 25 %.

Le granulat naturel (gneiss granitique) est de loin le plus résistant à l'abrasion de tous les matériaux à l'étude.

Proctor modifié

Matériau granulaire	w_{opt}	ρ_d	e
	%	kg/m ³	-
GN	5,1	2 200	0,20
EB	3,7	1 856	0,20
BC	7,1	1 922	0,22
MR2	6,6	1 884	0,23
MR3	5,3	2 149	0,16
MR4	5,6	1 971	0,24
MR5	4,3	2 104	0,15
MR6	4,0	2 009	0,19

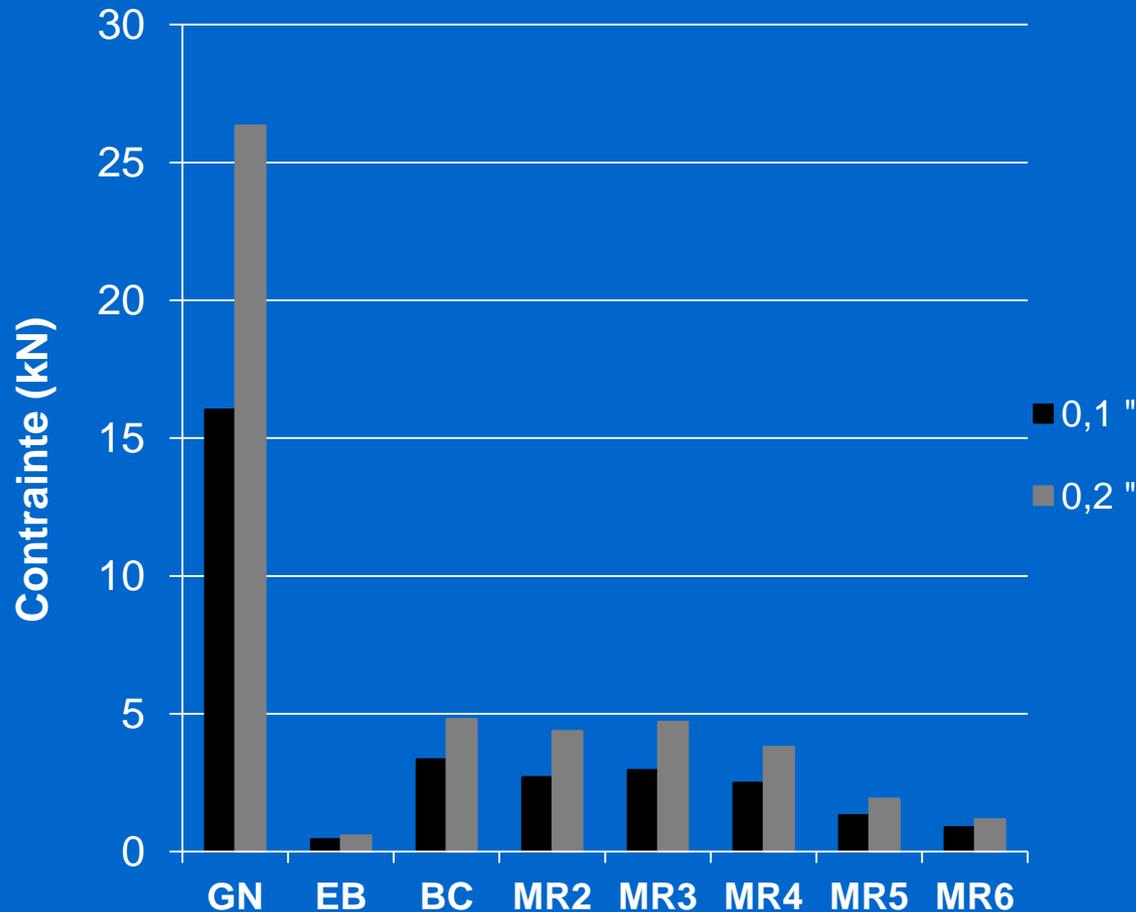
Proctor modifié



Indice de portance californien (CBR)

	0,1" (kN)	CBR (0,1")	0,2" (kN)	CBR (0,2")
GN	16,04	120,2	26,34	132,2
EB	0,45	3,4	0,60	3,0
BC	3,35	23,9	4,81	23,4
MR2	2,71	28,2	4,38	29,1
MR3	2,96	22,2	4,72	23,7
MR4	2,51	18,8	3,81	19,1
MR5	1,32	8,4	1,92	8,3
MR6	0,89	6,7	1,18	5,9

Indice de portance californien (CBR)



Susceptibilité au gel

Évaluer le potentiel de ségrégation (SP) d'un matériau granulaire afin de caractériser sa susceptibilité au gel.



Susceptibilité au gel

	ρ_d (kg/m ³)	VB (mL/g)	SP (mm ² /°C · jour)	Fines (< 80 μ m) %
GN	2 200	0,03	5,12	5,44
EB	1 856	0,10	2,20	1,46
BC	1 922	0,08	4,77	1,44
MR2	1 884	0,02	5,56	1,31
MR3	2 149	0,1	2,97	4,51
MR4	1 971	0,03	2,97	2,68
MR5	2 104	0,04	5,57	2,02
MR6	2 009	0,05	2,09	0,36

SP < 12 mm²/°C · jour correspond à une susceptibilité au gel négligeable (*Info DLC, Vol.7 n°2, février 2002*).

L'exigence du ministère des Transports du Québec, MTQ (MQ 2560-600) pour un MG-20 est une valeur au Bleu de Méthylène (VB) $\leq 0,20$.

Conductivité hydraulique

Matériau granulaire	k (cm/s)
GN	$2,41 \times 10^{-4}$
EB	$1,10 \times 10^{-2}$
BC	$2,04 \times 10^{-2}$
MR2	$1,57 \times 10^{-2}$
MR3	$2,13 \times 10^{-4}$
MR4	$2,27 \times 10^{-2}$
MR5	$9,67 \times 10^{-4}$
MR6	$2,37 \times 10^{-3}$

La perméabilité augmente avec la proportion d'enrobés bitumineux.

$$k_i > 1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$$



Essai triaxial (Module Réversible)

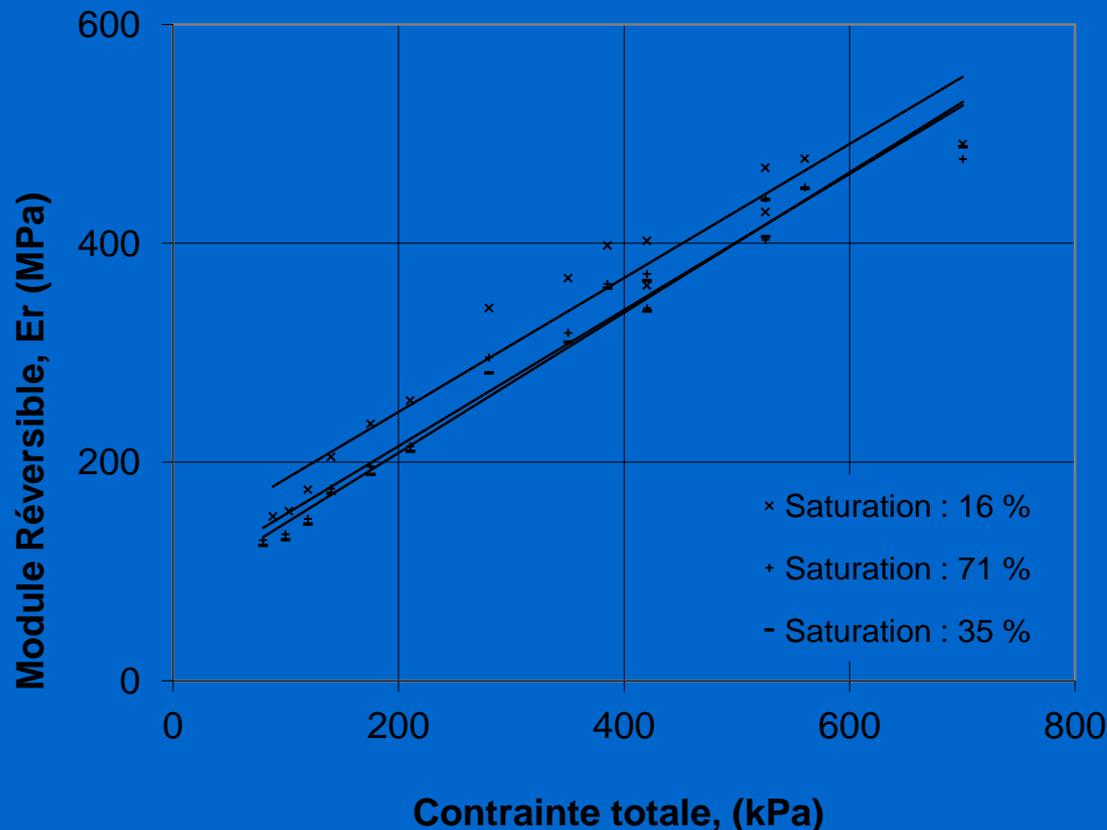
- Comportement contrainte-déformation des MR.
- Ce paramètre est nécessaire lors du dimensionnement des chaussées.
- Montage : Cellule triaxiale, presse, LVDT, capteur de pression.

Échantillon \rightarrow $h = 300\text{mm}$
 $d = 150\text{mm}$



Module Réversible

Exemple pour un MR4



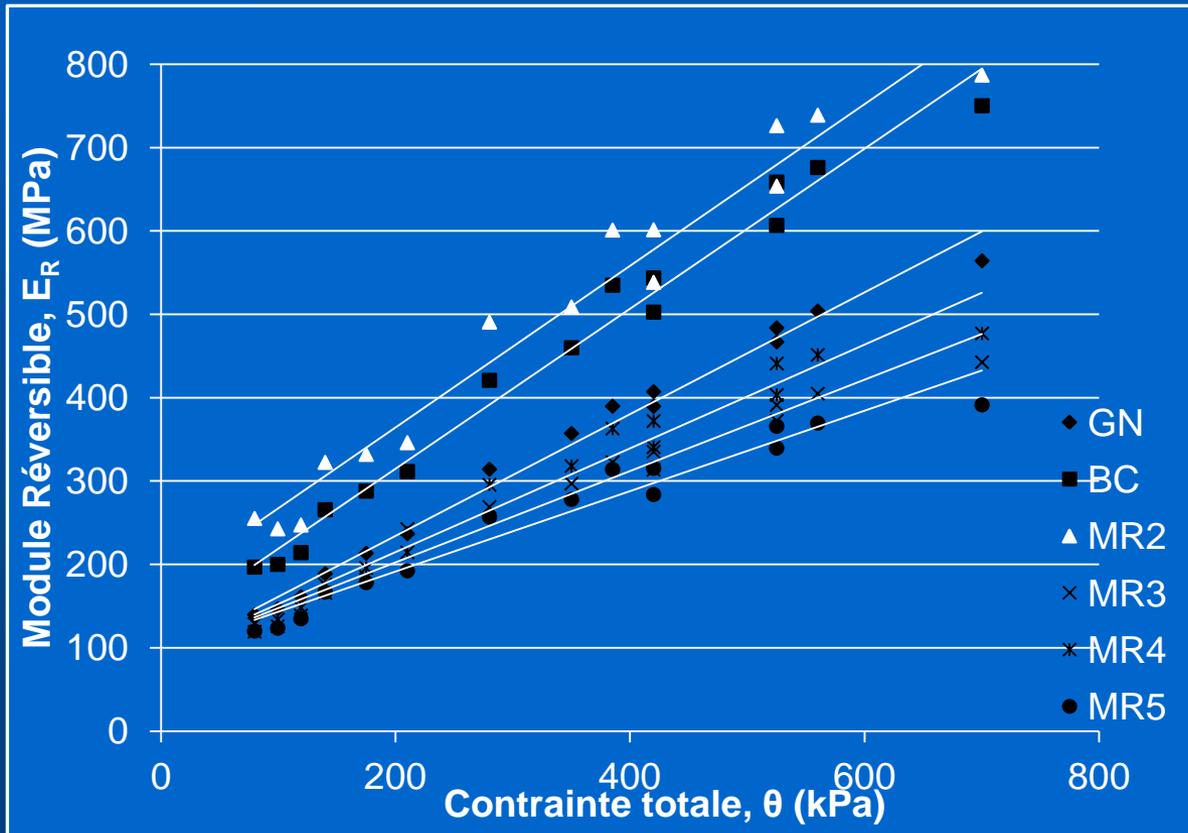
Les résultats suivants sont obtenus à un état de contrainte intermédiaire, un confinement de 70 kPa et une contrainte déviatorique de 140 kPa.

Module Réversible

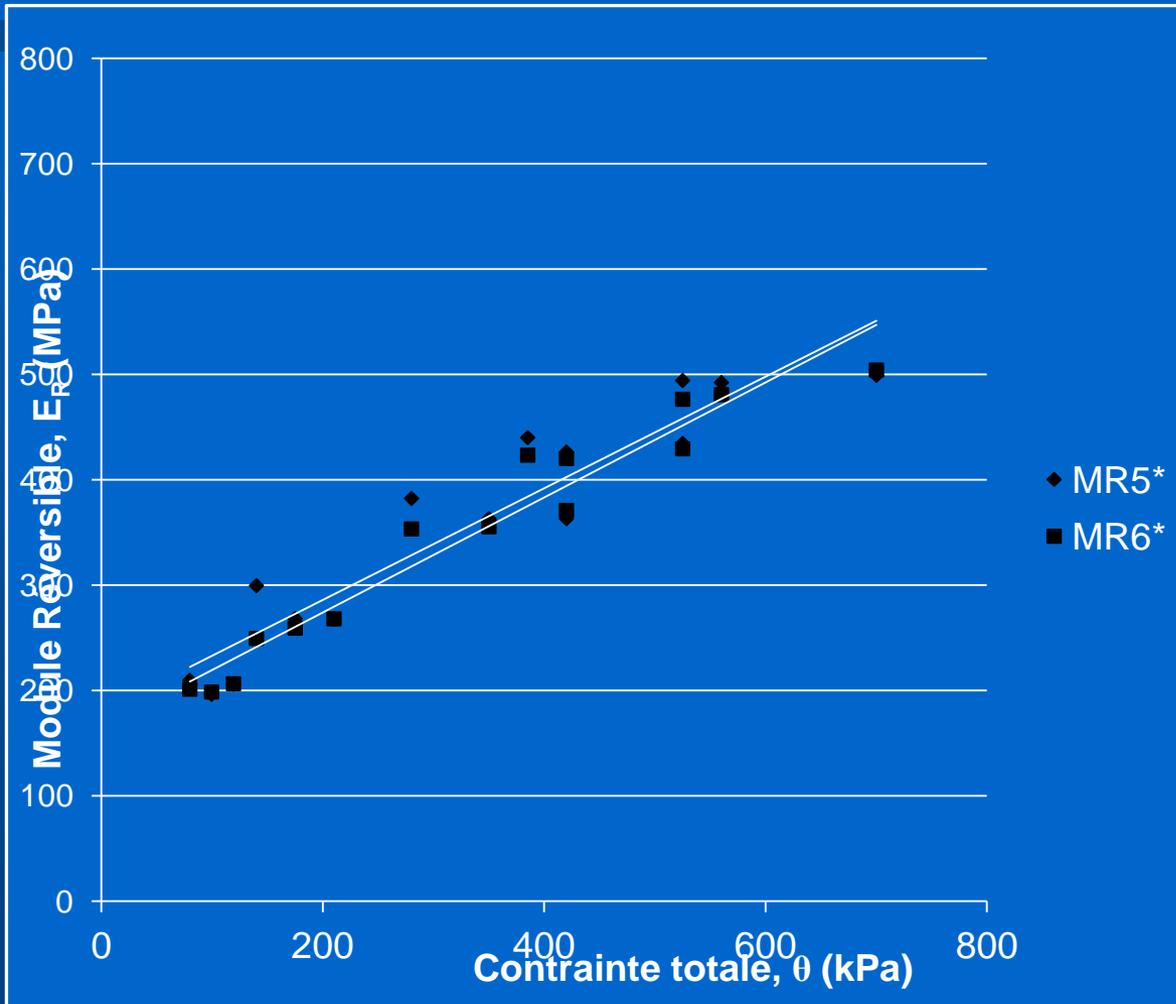
	Initial (MPa)		Saturé (MPa)		Drainé (MPa)	
	E_R (MPa)	ν_R	E_R (MPa)	ν_R	E_R (MPa)	ν_R
GN	415	0,16	357	0,18	378	0,17
BC	432	0,26	460	0,27	451	0,26
MR2	449	0,24	509	0,23	487	0,23
MR3	354	0,21	297	0,24	299	0,24
MR4	368	0,21	318	0,23	310	0,22
MR5	295	0,20	278	0,23	293	0,20
MR5*	355	0,22	363	0,24	346	0,18
MR6*	393	0,24	355	0,27	350	0,25

Module Réversible

Afin de comparer les MR entre eux, il est recommandé d'utiliser l'état saturé comme état de référence.

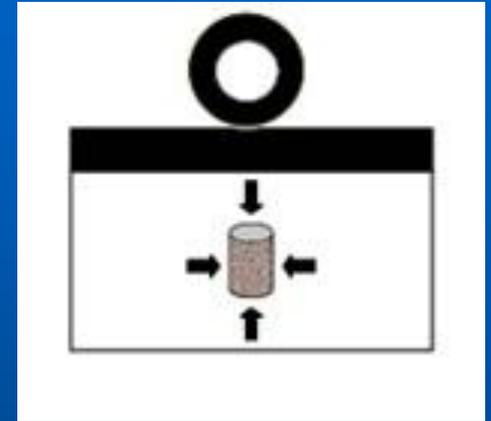


Module Réversible



Module Réversible (E_R)

- Les E_R obtenus permettront de faire les recommandations nécessaires quant aux utilisations possibles.
- Même si les valeurs des E_R pour les MR sont plus faibles que celui d'un MG-20 *standard*, ces valeurs n'excluent pas une utilisation des MR en fondation de chaussée.



©info-DLC, juin 2005



©radio-canada.ca

Comparaison économique

La comparaison économique a été faite à l'aide du logiciel Chaussée2 (MTQ).

www.mtq.gouv.qc.ca

GN

MR5

Segment homogène
NE PAS OUBLIER:
- Objectifs et Climat
- Durée de vie recommandée = valeur par défaut
- Sol de support
- Valider la stratigraphie
- Paramètres des matériaux
- Épaisseurs requises (STRUCTURAL et GEL)

Objectifs
Type de route: Autoroute
Classe de trafic (DJMA projeté): supérieur à 20000
Années: 30
ÉCAS (millions): 0,0
Outil ÉCAS:

Climat
Station météorologique: Québec a
Zone: Sud
T_{eb}: 20,5
T_{ma}: 4,0
IG_n: 1236
σ_{IG}: 161
Simulation: PR
IG: 1477
Climat: 15
IG_s: 1477
n: 1,0

Couches de matériaux

Matériau	H (mm)	P d (t/m²)	Eau (%)	SPo (mm²/KH)	a (MPa ⁻¹)	Ku (W/mK)	Kf	Sr (%)	Lf (Wh/m²)	Coût (\$/m²)
1 BB HR0	300	2,35	0,0	0,0		1,48	1,48	0	1250	42,30
2 MG 20	400	2,2	4,0	0,0		1,77	1,89	52	7897	7,60
3 MG 112 (fuseau entier)	1600	1,92	8,0	0,0		2,10	2,49	56	14018	14,40
4										
5										
6										
7										
8 CL, ML, CH, MH (IL>=0,9)		1,15	50,0	20,0	7,0	1,15	2,29	99	48058	
Total = 2300										64,30

Z (m): 2,345 h (m): 0,049

Segment homogène
NE PAS OUBLIER:
- Objectifs et Climat
- Durée de vie recommandée = valeur par défaut
- Sol de support
- Valider la stratigraphie
- Paramètres des matériaux
- Épaisseurs requises (STRUCTURAL et GEL)

Objectifs
Type de route: Autoroute
Classe de trafic (DJMA projeté): supérieur à 20000
Années: 30
ÉCAS (millions): 0,0
Outil ÉCAS:

Climat
Station météorologique: Québec a
Zone: Sud
T_{eb}: 20,5
T_{ma}: 4,0
IG_n: 1236
σ_{IG}: 161
Simulation: PR
IG: 1477
Climat: 15
IG_s: 1477
n: 1,0

Couches de matériaux

Matériau	H (mm)	P d (t/m²)	Eau (%)	SPo (mm²/KH)	a (MPa ⁻¹)	Ku (W/mK)	Kf	Sr (%)	Lf (Wh/m²)	Coût (\$/m²)
1 BB HR0	300	2,35	0,0	0,0		1,48	1,48	0	1250	42,30
2 MR5 (50 % BB)	400	2,05	4,0	0,0		1,02	1,22	41	7359	1,50
3 MG 112 (fuseau entier)	1600	1,92	8,0	0,0		2,10	2,49	56	14018	14,40
4										
5										
6										
7										
8 CL, ML, CH, MH (IL>=0,9)		1,15	50,0	20,0	7,0	1,15	2,29	99	48058	
Total = 2300										58,20

Z (m): 2,301 h (m): 0,005

Une économie d'environ 10% (6 \$/m²).

Conclusions

- L'usage des MR peut mener à des économies significatives.
- Il serait intéressant de prendre en compte les propriétés réelles et précises des MR dans la conception des chaussées afin de valider le véritable impact économique de leur utilisation.

Questions

