

Prédiction de la compacité des bétons compactés au rouleau à l'aide d'un modèle d'empilement granulaire

RÉSUMÉ

Le béton compacté au rouleau (BCR) est régulièrement utilisé pour la construction de barrages, de chaussées routières et d'aires d'entreposage (en particulier, au Canada). La rapidité de mise en place, les faibles teneurs en ciment et l'utilisation d'ajouts minéraux (cendres volantes, fillers calcaires, résidus miniers, etc.) en font un matériau économiquement très intéressant pour l'industrie de la construction. Le BCR possède cependant une structure interne particulière de par sa forte proportion de granulats et sa consistance très sèche. On remarque souvent la présence de nombreux vides de compactage causés par une densification incomplète du matériau ou encore un volume insuffisant de pâte de ciment autour des granulats. Afin de faciliter l'enrobage des granulats par la faible quantité de pâte de ciment disponible, il devient donc important de maximiser la compacité du squelette granulaire en optimisant les proportions des différentes classes granulaires. La présente étude confirme le potentiel d'utilisation d'un modèle permettant la prévision de la compacité d'un mélange granulaire, le *modèle d'empilement compressible* (MEC), pour la formulation et l'optimisation des BCR. On propose une procédure de formulation des BCR par le MEC basée sur une valeur de l'indice de serrage K représentative de l'énergie nécessaire à la mise en place de ce type de matériau.

DOMAINE : Routes.

Nadia POULIOT*

Département de Génie civil
Université Laval
Québec (Canada)

Thierry SEDRAN

Ingénieur des travaux publics de l'État
Section Elaboration des Matériaux
Division Technologies du génie civil et environnement
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
Centre de Nantes

François de LARRARD

Chef de la division Technologies du génie civil et environnement
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
Centre de Nantes

Jacques MARCHAND

Département de Génie civil
Université Laval
Québec (Canada)

Le béton compacté au rouleau

Depuis quelques années, on remarque l'utilisation de plus en plus fréquente du béton compacté au rouleau (BCR) dans la construction de barrages et de chaussées au Canada (Piggott, 1987 ; Ouellet et al., 1998 ; Marchand et al., 1997) et aux États-Unis (Nanni et al., 1996). En France, une vaste étude sur la caractérisation des BCR pour barrages a été réalisée il y a quelques années dans différents laboratoires (Projet National BaCaRa, 1996).

Les BCR se distinguent des bétons ordinaires par leur affaissement nul, leur proportion importante de granulats et leur faible quantité de pâte de ciment (Marchand et al., 1997). Ce type de matériau ayant une apparence très sèche et raide, sa densification requiert quelques passages d'un rouleau compacteur de type tandem avec ou sans vibration, selon la consistance du béton.

Lorsque le BCR est utilisé pour la réalisation d'ouvrages de masse comme les barrages, la quantité de ciment utilisée est le plus souvent faible et l'utilisation d'ajouts minéraux telles que les cendres volantes est conseillé. Ceci per-

* Actuellement au ministère des Transports du Québec (Canada).

met de réduire le dégagement de chaleur lors du processus d'hydratation du ciment et de limiter les coûts de production (Marchand et al., 1997).

Le BCR peut également être utilisé comme matériau routier. Ce type d'application nécessite une plus grande quantité de ciment et un rapport E/C plus faible que pour un barrage car les sollicitations tant mécaniques (passage de véhicules) que thermiques (cycles de gel-dégel, présence de sels fondants) y sont plus importantes (Marchand et al., 1997). De plus, la teneur en particules fines de diamètre inférieur à 80 µm doit être assez élevée afin de faciliter la finition de la surface du béton. Le tableau I résume les distinctions principales qui existent entre les deux types de BCR.

TABLEAU I
Principales caractéristiques d'un BCR pour barrage et d'un BCR pour chaussée
(adapté de Ouellet, 1998)

Caractéristiques	Barrage	Chaussée
Teneur en liant (kg/m ³)	60-250	200-350
Rapport eau/liant	0,40-0,80	0,30-0,40
Diamètre maximal des granulats (mm)	75	20
Résistance à la compression 28 j (MPa)	15	45
Temps Vebe (s)	10-25	30-60

Essais sur béton frais

Deux essais sont le plus souvent réalisés sur le BCR à l'état frais :

- l'essai Proctor modifié (ASTM D 1557),
- l'essai Vebe (ASTM C 1170-91).

L'essai Proctor modifié

Cet essai permet de définir la relation entre la teneur en eau d'un mélange granulaire et sa densité sèche pour une énergie de compactage donnée. L'essai consiste à laisser tomber un marteau plusieurs fois sur un matériau granulaire dans un moule. La masse du marteau (4,5 kg), la hauteur de chute (457 mm), le nombre d'impacts (56) et le nombre de couches (5) sont fixés par la norme. Suite aux opérations de compactage, le moule est arasé puis pesé et la masse volumique humide (ρ_h) du matériau est déterminée. On peut calculer la masse volumique sèche (ρ_d) du mélange à l'aide de l'équation suivante :

$$\rho_d = \left(\frac{\rho_h}{w + 100} \right) 100 \quad (1)$$

où

- ρ_h et ρ_d sont exprimés en kg/m³,
- w représente la teneur en eau totale du béton incluant l'eau absorbée par les granulats, exprimée en pourcentage de la masse de matériaux secs.

La courbe Proctor modifiée, exprimant ρ_d en fonction de w , a l'aspect d'une cloche où chaque point sur la courbe représente un essai de compactage (Holtz et Kovacs, 1991). Cette courbe est propre à un matériau donné et l'optimum Proctor modifié est situé au sommet de la courbe. Ce point représente la teneur en eau optimale pour atteindre la densité sèche la plus élevée. En effet, lorsque l'on ajoute de l'eau à un mélange granulaire sec, celle-ci agit tout d'abord comme lubrifiant entre les particules qui ont plus de facilité à glisser les unes sur les autres et à se placer de façon optimale. Lorsque cet arrangement granulaire est atteint, l'eau prend cette fois la place du matériau solide à l'intérieur du moule et la densité sèche du squelette diminue.

L'essai Vebe

Cet essai permet de mesurer la consistance d'un mélange de béton sec. Dans ce contexte, la consistance se définit comme le temps requis pour densifier une masse de béton par vibration dans un moule cylindrique. L'essai se déroule de la façon suivante. Une masse de béton est placée dans un moule cylindrique de dimensions normalisées. Le moule est fixé sur une table vibrante. Une plaque de plastique dont le diamètre est approximativement de 10 mm inférieur au diamètre intérieur du moule est placée sur la surface du béton, une surcharge est ajoutée puis le béton est vibré. Le temps Vebe est le temps qui s'écoule entre le départ de la vibration et la formation d'un anneau de pâte autour de la plaque de plastique. De façon générale, si après deux minutes l'anneau de pâte ne s'est pas formé, la vibration est arrêtée.

Problématique de la formulation des bétons compactés au rouleau

Le BCR, qu'il soit utilisé pour la construction de barrages ou de routes, possède une structure interne particulière. En effet, il contient une forte proportion de granulats, soit plus de 75 % par rapport au volume total de matériaux et un faible volume de pâte de ciment, ce qui lui confère une consistance très sèche. Il arrive très souvent que la densification du matériau soit incomplète et qu'il y ait formation de vides de compactage de dimension variable et de forme irrégulière (Marchand et al. 1996 ; Pigeon et Marchand, 1996).

Afin de réduire la quantité de vides de compac-tage, il devient donc très important de maximiser la compacité du squelette granulaire des BCR en optimisant les proportions des différentes classes granulaires (gravillon, sable, ciment, ajouts miné-raux). L'obtention d'une faible porosité permettra un bon enrobage des granulats par la très faible quantité de pâte de ciment ainsi que des propriétés mécaniques optimisées.

Dans le passé, la formulation des bétons consistait à optimiser la compacité en utilisant des matériaux granulaires dont la formule se rapprochait le plus possible d'une courbe granulométrique détermi-née empiriquement, tout en conservant un temps Vebe adéquat (Marchand et al., 1997). Or ces courbes ne tiennent généralement pas compte de la forme, de l'angularité ou de la texture de sur-face des granulats qui peuvent faire varier considérablement la compacité d'un squelette granula-naire (de Larrard, 1999, 2000). De plus, ces méthodes de formulation empiriques nécessitent généralement de nombreuses gâchées en laboratoire pour atteindre les proportions optimales.

Récemment, un modèle granulaire analytique a été développé par de Larrard (1999, 2000) et Sedran (1999) : *le modèle d'empilement com-pressible* (MEC). Le MEC permet le calcul de la compacité d'un mélange granulaire à partir de la compacité et de la granularité des constituants, des proportions du mélange et d'un paramètre K nommé indice de serrage et qualifiant l'intensité du compactage. Le modèle d'empilement com-pressible est une version améliorée du modèle de suspension solide qui est lui-même basé sur le modèle linéaire de compacité (de Larrard et al., 1994a, 1994b).

Des études récentes (Tremblay et al., 1996 ; Ouellet, 1998 ; Ouellet et al., 1998) ont démontré l'intérêt du modèle de suspension solide pour la formulation des bétons secs comme les BCR. La présente étude a pour but de confirmer le potentiel d'utilisation du modèle amélioré d'empilement compressible dans la formulation des BCR et de proposer une méthode de formulation rationnelle adaptée au BCR.

Présentation des données expérimentales

Les données expérimentales de deux études sur les BCR réalisées à l'université Laval (Québec, Canada) ont été utilisées afin de développer une méthode de formulation des BCR avec le modèle d'empilement compressible (Tremblay et al.,

1996 ; Ouellet, 1998). Des mélanges additionnels de BCR ont également été effectués pour la pré-sente étude, dans le but de confirmer ces résultats.

La première étude, réalisée dans le cadre d'un pro-jet en collaboration avec Hydro-Québec, incluait la fabrication de plusieurs mélanges de BCR avec un rapport volumique sable/liant (S/L) et un rap-port massique sable/gravillon (S/G) variables (Tremblay et al., 1996). Pour chacun de ces mélanges granulaires, on faisait aussi varier la quantité d'eau efficace afin de déterminer la teneur en eau correspondant à la densité sèche la plus élevée, d'après l'essai Proctor modifié. Un total de quarante-sept formulations de BCR, avec et sans ajouts minéraux, ont ainsi été réalisées. Sur certains mélanges à densité optimale, des mesures de temps Vebe ont été effectuées.

Dans le cadre de la seconde étude, Ouellet (1998) a réalisé vingt-deux mélanges de BCR couvrant toute une gamme de temps Vebe. En plus de faire varier le rapport eau/liant (E/L), le type de ciment et le type d'ajouts minéraux, l'auteur a utilisé deux types de granulats, soit un granulat concassé et un granulat roulé. Des mesures de la masse volumique Proctor et du temps Vebe ont été effec-tuées sur toutes les formules. L'ensemble de la courbe Proctor n'a toutefois pas été déterminé. On supposera donc que ces mélanges étaient situés près de l'optimum Proctor modifié puisque l'auteur a utilisé la version précédente du MEC, le modèle de suspension solide, pour la formulation des BCR.

Les propriétés des matériaux granulaires utilisés dans l'étude de Tremblay et al. (1996) et dans l'étude de Ouellet (1998) sont données respective-ment dans les tableaux II et III. Les analyses gra-nulométriques de ces matériaux sont présentées dans le tableau IV. La composition des différents mélanges des études de Tremblay et al. (1996) et de Ouellet (1998) est indiquée dans les tableaux V et VI respectivement. Il est à noter qu'un réduc-teur d'eau a été utilisé pour la deuxième série des mélanges de Ouellet (1998) à un dosage de 3 ml/kg de ciment.

Six BCR additionnels ont été réalisés afin de déterminer la courbe Proctor modifiée de deux squelettes granulaires. Pour chaque formule, un essai Proctor modifié et une mesure de temps Vebe ont été effectués. Le tableau VII présente les caractéristiques des matériaux employés. La dis-tribution granulométrique du ciment type 10 est la même que celle présentée dans le tableau IV. La composition des mélanges est donnée dans le

TABLEAU II
Masse volumique réelle, coefficient d'absorption d'eau
et compacité des matériaux utilisés lors de l'étude de Tremblay et al. (1996)

Matériaux	Abréviations	Masse volumique réelle (kg/m ³)	Absorption (%)	Compacité*
Ciment type 20M	C20M	3 140	—	0,600
Cendre volante	CV1	2 460	—	0,662
Filler calcaire	FC	2 740	—	0,664
Sable	S	2 700	0,81	0,703
Gravillon concassé 12,5 mm	GC12,5	2 650	0,60	0,595
Gravillon concassé 20 mm	GC20	2 650	0,60	0,595
Gravillon concassé 25 mm	GC25	2 650	0,60	0,590

* La compacité des ciments et additions minérales est déterminée par un essai de demande en eau, alors que celle des gravillons et du sable est déterminée à sec sous vibration et compression de 10 kPa (Sedran, 1999).

TABLEAU III
Masse volumique réelle, coefficient d'absorption d'eau
et compacité des matériaux utilisés lors de l'étude de Ouellet (1998)

Matériaux	Abréviations	Masse volumique réelle (kg/m ³)	Absorption (%)	Compacité*, **
Ciment type 20M	C20M	3 140	—	0,599
Ciment type 10	C10	3 150	—	0,582
Ciment type 10sf	C10sf	3 010	—	0,616
Cendre volante	CV2	2 100	—	0,594
Filler calcaire	FC	2 740	—	0,666
Sable	S	2 700	0,64	0,703
Gravillon concassé 12,5 mm	GC12,5	2 620	0,65	0,587
Gravillon concassé 20 mm	GC20	2 660	0,51	0,590
Gravillon roulé 20 mm	GR20	2 690	0,70	0,652

* La compacité des ciments et additions minérales est déterminée par un essai de demande en eau, alors que celle des gravillons et du sable est déterminée à sec sous vibration et compression de 10 kPa (Sedran, 1999).

** Aucune variation de la compacité du ciment n'a été mise en évidence en présence de réducteur d'eau.

tableau VIII. Pour ces mélanges, un réducteur d'eau a été utilisé à raison de 3 ml/kg de ciment.

Analyse des résultats

Théorie : indice de serrage

Le modèle d'empilement compressible, tel que décrit par de Larrard (1999, 2000), repose sur la notion de compacité virtuelle (γ) d'un mélange granulaire. La compacité virtuelle se définit comme étant la compacité maximale que l'on peut atteindre pour un mélange granulaire donné, si l'on

considère que les particules sont indéformables et sont placées une par une afin d'occuper le moins d'espace possible. Par exemple, pour un mélange de billes de même grosseur, la compacité maximale γ que l'on peut atteindre en plaçant les billes une par une est de 0,74. Si l'on considère les mêmes billes mais compactées par un processus aléatoire, la compacité sera alors plus faible, variant de 0,60 à 0,64.

Le modèle peut être utilisé pour prédire la compacité virtuelle d'un mélange granulaire à partir de sa distribution granulométrique et de la compacité virtuelle β_i de chaque classe de grains le composant.

TABLEAU IV
Distributions granulométriques des matériaux des études
de Tremblay et al. (1996) et Ouellet (1998)

Dia (μm)	Pourcentage passant le tamis										
	GC25	GC20	GC12,5	GR20	S	FC	CV1	CV2	C20M	C10	C10sf
25 000	100			100							
20 000	62	100		93							
16 000	23	74	100	60							
12 500	8	34	97	40							
10 000	6	16	63	14	100						
5 000	3	6	8	2	95						
2 500	1	3	3	1	91						
2 000	0	0	0	0	87						
1 250					82						
630					46						
315					32						
160					9		100	100		100	
80					1		90	93	100	98	100
63					0		84	91	94	96	97
50						100	78	87	91	92	91
40						99	72	83	82	86	84
31,5						96	66	78	72	79	75
25						90	60	73	64	70	66
20						83	54	66	56	60	57
16						75	46	60	48	53	51
12,5						66	40	53	41	46	43
10						58	36	42	36	37	36
8						50	30	34	30	31	31
6,3						42	23	27	23	25	23
5						35	17	20	18	17	18
4						30	12	15	13	12	13
3,15						24	8	11	8	7	10
2,5						20	5	8	5	5	6
2						17	3	3	3	3	3
1,6						14	2	2	2	1	1
1,25						12	1	0	1	0	0
1						10	0		0		
0,8						7					
0,63						5					
0,5						3					
0,4						2					
0,315						1					
0,25						0					

TABLEAU V
Composition des mélanges de BCR tirés d'après Tremblay et al. (1996)

Mélange*, **, ***	C20M (kg/m ³)	CV1 (kg/m ³)	FC (kg/m ³)	S (kg/m ³)	GC12,5 (kg/m ³)	GC20 (kg/m ³)	GC25 (kg/m ³)	Eau efficace (kg/m ³)	ρ_d (kg/m ³)	w efficace (%)****	Temps Vebe (s)
Mélanges sans ajouts minéraux											
0,54-8 %	411	0	0	693	515	515	258	88	2 378	3,7	
0,54-9 %	408	0	0	689	513	513	256	99	2 365	4,2	120
0,54-10 %	411	0	0	693	516	516	258	110	2 379	4,6	29
0,54-10 %	413	0	0	697	518	518	259	111	2 390	4,6	21
0,54-11 %	409	0	0	690	513	513	257	121	2 369	5,1	
0,54-12 %	408	0	0	689	512	512	256	132	2 364	5,6	
0,54-14 %	403	0	0	680	505	505	253	152	2 333	6,5	
0,67-8 %	460	0	0	776	466	466	233	99	2 387	4,1	
0,67-10 %	458	0	0	773	464	464	232	123	2 376	5,2	
0,67-12 %	454	0	0	766	460	460	230	146	2 357	6,2	
0,67-14 %	447	0	0	755	453	453	227	168	2 322	7,3	
0,82-8 %	500	0	0	844	413	413	206	108	2 363	4,6	
0,82-10 %	499	0	0	842	412	412	206	134	2 358	5,7	
0,82-12 %	490	0	0	827	405	405	202	158	2 316	6,8	
0,82-14 %	481	0	0	812	397	397	198	181	2 273	8,0	
1,0-8 %	542	0	0	914	366	366	183	116	2 357	4,9	
1,0-10 %	540	0	0	911	365	365	182	145	2 350	6,2	
1,0-12 %	530	0	0	894	358	358	179	171	2 305	7,4	
1,0-14 %	520	0	0	877	351	351	176	196	2 262	8,6	
Mélanges avec cendres volantes											
0,54cv-8 %	127	127	0	730	543	543	271	79	2 326	3,4	
0,54cv-10 %	128	128	0	736	548	548	274	99	2 347	4,2	34
0,54cv-10 %	128	128	0	739	549	549	275	100	2 355	4,2	
0,54cv-11 %	128	128	0	738	549	549	274	109	2 352	4,6	22
0,54cv-12 %	127	127	0	735	547	547	273	119	2 342	5,1	
0,54cv-12 %	129	129	0	742	552	552	276	120	2 365	5,1	15
0,54cv-12,2 %	128	128	0	737	548	548	274	121	2 349	5,2	
0,67cv-8 %	141	141	0	810	486	486	243	87	2 292	3,8	
0,67cv-10 %	144	144	0	830	498	498	249	112	2 349	4,8	
0,67cv-10,5 %	144	144	0	829	498	498	249	117	2 347	5,0	
0,67cv-12,2 %	143	143	0	821	493	493	246	135	2 324	5,8	
0,82cv-8 %	156	156	0	898	439	439	220	97	2 293	4,2	
0,82cv-10 %	159	159	0	918	449	449	224	124	2 343	5,3	
0,82cv-10,5 %	158	158	0	910	445	445	222	128	2 324	5,5	
0,82cv-12,2 %	156	156	0	896	438	438	219	147	2 289	6,4	
1,0cv-8 %	170	170	0	982	393	393	196	106	2 290	4,6	
1,0cv-10 %	172	172	0	990	396	396	198	133	2 310	5,8	
1,0cv-10,5 %	172	172	0	989	396	396	198	139	2 307	6,0	
1,0cv-12,2 %	169	169	0	976	390	390	195	160	2 276	7,0	
Mélanges avec filler calcaire											
0,54fc-11 %	189	0	189	684	509	509	254	117	2 319	5,0	25
0,54fc-11,6 %	187	0	188	678	504	504	252	122	2 348	5,3	41

TABLEAU V (suite)

0,54fc-12 %	190	0	190	688	512	512	256	128	2 333	5,5	14
0,54fc-12,4 %	187	0	188	678	504	504	252	131	2 363	5,7	22
0,54fc-13 %	190	0	189	687	511	511	255	139	2 329	6,0	6
0,54fc-13,3 %	187	0	188	678	504	504	252	140	2 321	6,1	5
Mélanges avec filler calcaire et cendres volantes											
0,54cv-fc-11 %	94	94	65	730	543	543	271	108	2 325	4,6	36
0,54cv-fc-12 %	94	94	65	732	544	544	272	118	2 332	5,1	25
0,54cv-fc-13 %	94	94	65	730	543	543	272	128	2 328	5,5	9

* Notation : ex. mélange 0,54cv-fc-12 % : rapport massique sable/gravillon = 0,54, avec cendre volante et filler calcaire, teneur en eau totale par rapport au poids de mortier $\approx 12\%$.

** Les masses des granulats sont données à l'état saturé surface sèche.

*** Les mélanges en caractères gras représentent les optimum Proctor modifié (ρ_d la plus élevée).

**** La teneur en eau est exprimée en pourcentage de la masse volumique sèche.

TABLEAU VI
Composition des mélanges de BCR tirés d'après Ouellet (1998)

Première série											
Mélange*, **, ***	C20M (kg/m ³)	CV2 (kg/m ³)	FC (kg/m ³)	S (kg/m ³)	GC12,5 (kg/m ³)	GC20 (kg/m ³)	GR20 (kg/m ³)	Eau efficace (kg/m ³)	ρ_d (kg/m ³)	w efficace (%)****	Temps Vebe (s)
OCV-0,8-C	159	0	166	744	462	787	0	127	2 307	5,5	11
OCV-0,6-C	214	0	120	749	466	793	0	128	2 331	5,5	10
25CV-0,7-C	121	40	146	756	470	800	0	111	2 321	4,8	28
50CV-0,8-C	74	74	145	757	470	801	0	118	2 310	5,1	13
50CV-0,6-C	95	95	101	762	474	807	0	113	2 321	4,9	17
OCV-0,8-R	142	0	147	672	0	0	1 432	113	2 381	4,8	14
OCV-0,6-R	181	0	113	667	0	0	1 444	108	2 391	4,5	15
25CV-0,7-R	110	37	125	671	0	0	1 452	103	2 382	4,3	28
50CV-0,8-R	69	69	125	677	0	0	1 465	110	2 389	4,6	10
50CV-0,6-R	86	86	83	673	0	0	1 456	104	2 370	4,4	16
Seconde série											
Mélange*, **, ***	C10sf (kg/m ³)	C10 (kg/m ³)	FC (kg/m ³)	S (kg/m ³)	GC12,5 (kg/m ³)	GC20 (kg/m ³)	GR20 (kg/m ³)	Eau efficace (kg/m ³)	ρ_d (kg/m ³)	w efficace (%)****	Temps Vebe (s)
T10FS-0,35-C	297	0	0	783	490	799	0	104	2 358	4,4	49
T10FS-0,4-C	270	0	0	799	495	806	0	108	2 359	4,6	32
T10FS-0,45-C	244	0	0	809	493	803	0	110	2 338	4,7	34
T10FS-0,35-R	283	0	0	720	0	0	1 398	99	2 388	4,1	23
T10FS-0,4-R	258	0	0	739	0	0	1 436	103	2 418	4,3	26
T10FS-0,45-R	238	0	0	740	0	0	1 446	107	2 410	4,4	18
T10-0,35-C	0	312	0	766	491	799	0	109	2 357	4,6	35
T10-0,4-C	0	280	0	794	496	809	0	112	2 368	4,7	42
T10-0,45-C	0	244	0	804	498	812	0	110	2 347	4,7	51
T10-0,35-R	0	293	0	725	0	0	1 396	103	2 402	4,3	31
T10-0,4-R	0	266	0	727	0	0	1 431	107	2 410	4,4	23
T10-0,45-R	0	236	0	737	0	0	1 438	106	2 397	4,4	24

* Notation : ex. mélange T10SF-0,35-C : ciment type 10 avec fumée de silice, E/L=0,35, gravillons concassés.

** Les masses des granulats sont données à l'état saturé surface sèche.

*** Les mélanges en caractères gras représentent les optimum Proctor modifié (ρ_d la plus élevée).

**** La teneur en eau est exprimée en pourcentage de la masse volumique sèche.

L'équation générale du modèle représente la compacité virtuelle d'un mélange granulaire de n classes lorsque la classe i est dominante :

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} [1 - \beta_i + b_{ij}\beta_i(1 - 1/\beta_j)]y_j - \sum_{j=i+1}^n [1 - a_{ij}\beta_i/\beta_j]y_j} \quad (2)$$

où

- γ_i : compacité virtuelle du mélange atteinte lorsque la classe i est dominante,
- β_i : compacité virtuelle propre de la classe i empilée isolément,
- y_i : fraction volumique d'une classe par rapport au volume total du mélange solide.

On a alors :

$$\gamma = \min_i (\gamma_i) \quad (3)$$

Les coefficients a_{ij} et b_{ij} , représentent respectivement l'effet de desserrement et l'effet de paroi exercé par les grains. Ces coefficients ont été déterminés par étalonnage des mélanges granulaires binaires, tel que décrit par de Larrard et al. (1994b). Les équations obtenues sont les suivantes :

$$a_{ij} = \sqrt{1 - (1 - d_j/d_i)^{1,02}} \quad (4)$$

$$b_{ij} = 1 - (1 - d_i/d_j)^{1,50} \quad (5)$$

où d_i est le diamètre de moyen de la classe i.

Le modèle d'empilement compressible permet de passer de la compacité virtuelle, qu'on ne peut atteindre en pratique, à la compacité réelle du mélange granulaire qui est fonction de l'énergie déployée lors de sa mise en place. Un scalaire,

TABLEAU VII
Caractéristiques des matériaux utilisés pour les essais complémentaires

Propriétés	Ciment type 10*	Sable	Gravillon concassé 5-20 mm
Masse volumique réelle (kg/m ³)	3 150	2 660	2 650
Absorption (%)	-	0,81	0,84
Compacité**, ***	0,582	0,706	0,653
<i>Passant le tamis (%)</i>			
25,4 mm			100
19,1 mm			96
12,7 mm			55
9,52 mm			33
4,76 mm		100	8
2,38 mm		94	6
1,19 mm		85	0
0,59 mm		57	
0,297 mm		20	
0,149 mm		5	
0,074 mm		1	

* La granulométrie du ciment type 10 est la même que pour les deux études précédentes.

** La compacité du ciment est déterminée par un essai de demande en eau, alors que celle des gravillons est déterminée à sec sous vibration et compression de 10 kPa [Sedran, 1999].

*** Aucune variation de la compacité du ciment n'a été mise en évidence en présence de réducteur d'eau.

l'indice de serrage K, permet de relier la compacité virtuelle (γ) à la compacité réelle (Φ). Ce scalaire dépend uniquement du protocole de mise en place du mélange granulaire. Si K tend vers l'infini, la compacité tend vers la compacité virtuelle γ .

TABLEAU VIII
Composition des mélanges de BCR réalisés pour les essais complémentaires

Mélange*, **, ***	Ciment (kg/m ³)	Sable (kg/m ³)	Gravillon 5-20 (kg/m ³)	Eau efficace (kg/m ³)	E/C	ρ_d (kg/m ³)	w efficace (%)****	Temps Vebe (s)
C300-9 %	290	729	1 314	91	0,31	2 315	3,9	90
C300-10 %	297	748	1 348	103	0,35	2 376	4,3	40
C300-11 %	292	735	1 325	112	0,38	2 336	4,8	40
C250-10 %	244	750	1 341	98	0,40	2 318	4,3	120
C250-11 %	244	753	1 345	106	0,44	2 324	4,6	40
C250-12 %	234	721	1 288	114	0,49	2 226	5,1	40

* Notation : ex. mélange C300-9% : 300 kg/m³ de ciment, teneur en eau totale par rapport au poids de mortier égale à 9 %.

** Les masses des granulats sont données à l'état saturé surface sèche.

*** Les mélanges en caractères gras représentent les optimum Proctor modifié (ρ_d la plus élevée).

**** La teneur en eau est exprimée en pourcentage de la masse volumique sèche.

La forme générale de l'équation de l'indice de serrage est la suivante, pour n classes :

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n \frac{y_i / \beta_i}{1/\Phi - 1/\gamma_i} \quad (6)$$

où Φ : compacité réelle d'un mélange granulaire.

Les valeurs de l'indice K sont calées sur des mélanges binaires pour chaque procédé de compactage. Le tableau IX présente quelques valeurs courantes.

TABLEAU IX
Valeurs de l'indice K pour différents procédés de mise en place (de Larrard, 1999, 2000)

Procédé de mise en place	Indice de serrage K
À sec pour les granulats	
Simple versement	4,1
Piquage	4,5
Vibration	4,75
Vibration + compression 10 kPa	9
Avec eau pour les poudres	
Pâte lisse et épaisse	6,7

Dans la pratique, on mesure la compacité réelle Φ de chaque constituant du mélange (liant, sable, gravillons, etc.) suivant les procédures décrites dans Sedran (1999) et Sedran et de Larrard (2000). On pose l'hypothèse qu'un constituant est un mélange de classes ayant toutes la même compacité virtuelle β . On peut alors déduire, pour chaque constituant, les valeurs $\beta_i = \beta$ correspondantes à partir des équations 2 et 6. Connaissant ces valeurs, la compacité virtuelle γ de n'importe quel mélange peut être calculée à l'aide de l'équation 2. Enfin, la compacité réelle du mélange est obtenue par l'équation 6.

Afin d'appliquer le modèle d'empilement compressible à la formulation des BCR, il est nécessaire au préalable de déterminer la valeur de l'indice K représentative de l'énergie requise pour mettre en place ce type de béton. Cette valeur sera évaluée à partir des valeurs de compacité expérimentales des mélanges de BCR présentés dans le paragraphe « Présentation des données expérimentales ».

Comme le BCR est un matériau très raide et sec, il subsiste généralement des vides de compactage lors de la mise en place. On doit donc évaluer la teneur en air du béton à l'état frais à partir de la masse volumique Proctor modifiée et des proportions volumiques des divers constituants du béton.

À partir du volume d'air calculé et du volume d'eau qui est connu, on obtient la porosité (air + eau efficace) du béton, soit le complément à 1 de sa compacité.

Résultats : indice de serrage

Pour chaque mélange de BCR présenté dans le paragraphe « Présentation des données expérimentales », l'indice de serrage a été calculé à partir de la porosité réelle du mélange à l'aide du MEC. Le tableau X présente l'ensemble des résultats. On peut d'ores et déjà observer que les résultats démontrent une bonne répétabilité. En effet, certains mélanges ont été réalisés deux fois, comme c'est le cas du mélange 0,54-10 %, pour lequel on a obtenu des valeurs de K de 11,6 et 12,2 et des valeurs de porosité de 0,131 et 0,127.

La teneur en air moyenne des mélanges à l'optimum Proctor modifié est égale à 2 % avec toutefois des variations importantes (entre 0 et 3,5 %). Les valeurs négatives qui peuvent être observées sont probablement dues aux incertitudes sur les masses volumiques réelles des constituants utilisées dans les calculs.

On observe également une variation significative de l'indice de serrage en fonction de la position du mélange sur la courbe Proctor modifiée. Les figures 1a et 1b illustrent deux exemples de cette évolution. L'interprétation suivante peut être avancée. Pour les mélanges très secs, le compactage n'est pas efficace à cause d'un manque de lubrification et de la présence de forces capillaires, ce qui se traduit par une valeur de K plus faible et de nombreux vides de compactage. Au-delà de l'optimum Proctor modifié, la diminution marginale des vides de compactage ne compense pas l'ajout d'eau. Les grains sont donc de plus en plus distants et le compactage est moins efficace, ce qui conduit également à une valeur plus faible de K. À l'optimum Proctor modifié, le compactage est le plus efficace et l'indice de serrage est maximal.

En faisant la moyenne de tous les indices de serrage des mélanges à l'optimum Proctor modifié présentés dans le tableau X, on obtient une valeur de K égale à 12. Cette valeur est cohérente par rapport aux indices de serrage indiqués dans le tableau IX si l'on considère que la dame Proctor fournit une énergie de compactage importante et qu'à l'optimum Proctor modifié le squelette granulaire est lubrifié par l'eau.

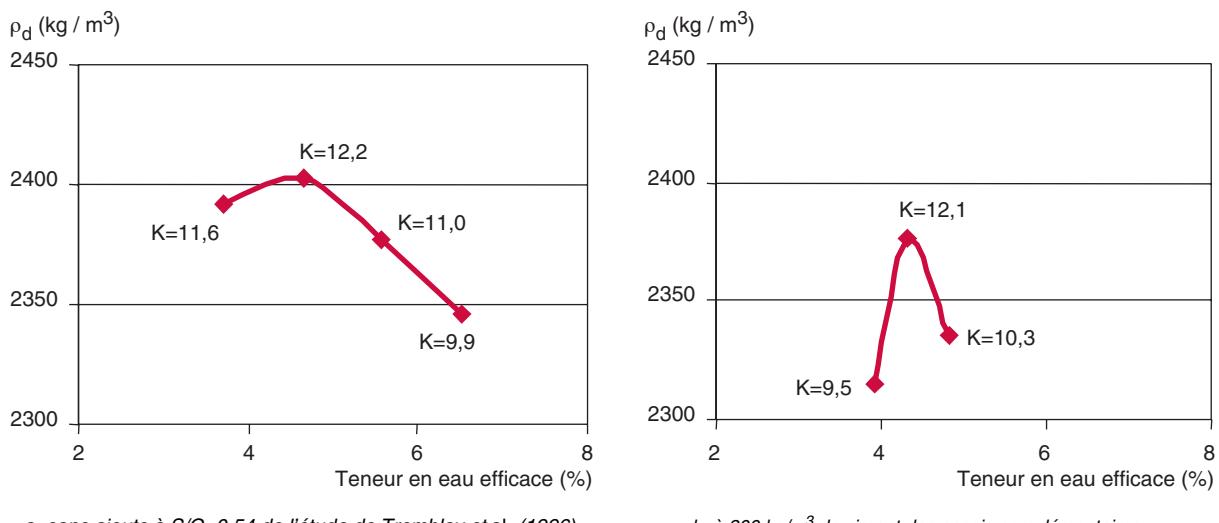
Cet indice de serrage égal à 12 semble donc être représentatif de l'énergie fournie au BCR lors de

TABLEAU X
Valeurs de teneur en air, porosité et indice de serrage K
pour les BCR des études de Tremblay et al. (1996) et Ouellet (1998)

Mélange*	Air (%)	Porosité (air + eau efficace)	Indice K	Mélange	Air (%)	Porosité (air + eau efficace)	Indice K																																																																																																																																																																																																																				
Étude de Tremblay et al. (1996)				Étude de Tremblay et al. (1996)																																																																																																																																																																																																																							
0,54-8 %	4,3	0,132	11,6	0,54fc-11 %	2,6	0,143	9,4																																																																																																																																																																																																																				
0,54-9%	3,8	0,136	11,0	0,54fc-11,6 %	0,8	0,132	10,3																																																																																																																																																																																																																				
0,54-10 %	2,1	0,131	11,6	0,54fc-12 %	1,0	0,138	9,8																																																																																																																																																																																																																				
0,54-10 %	1,6	0,127	12,2	0,54fc-12,4 %	- 0,8	0,127	10,8																																																																																																																																																																																																																				
0,54-11 %	1,4	0,135	11,2	0,54fc-13 %	0,1	0,139	9,7																																																																																																																																																																																																																				
0,54-12 %	0,5	0,137	11,0	0,54fc-13,3 %	0,1	0,142	9,5																																																																																																																																																																																																																				
0,54-14 %	- 0,4	0,148	9,9	0,54cvfc-11%	2,3	0,131	12,5																																																																																																																																																																																																																				
0,67-8 %	3,3	0,132	11,4	0,54cvfc-12 %	1,1	0,129	12,9																																																																																																																																																																																																																				
0,67-10 %	1,3	0,136	10,9	0,54cvfc-13 %	0,2	0,130	12,7																																																																																																																																																																																																																				
0,67-12 %	- 0,4	0,143	10,1	Étude de Ouellet (1998)																																																																																																																																																																																																																							
0,67-14 %	- 1,3	0,155	8,9	0,82-8 %	3,6	0,143	10,3	OCV-0,8-C	1,8	0,145	10,2	0,82-10 %	1,1	0,145	10,1	OCV-0,6-C	1,1	0,139	11,0	0,82-12 %	0,3	0,161	8,6	25CV-0,7-C	2,3	0,134	11,5	0,82-14 %	- 0,5	0,176	7,6	50CV-0,8-C	1,4	0,132	11,7	1,0-8 %	3,3	0,149	10,3	50CV-0,6-C	1,3	0,126	12,7	1,0-10 %	0,6	0,151	10,0	OCV-0,8-R	1,2	0,125	10,3	1,0-12 %	- 0,3	0,168	8,4	OCV-0,6-R	1,5	0,123	10,7	1,0-14 %	- 1,3	0,183	7,3	25CV-0,7-R	1,6	0,119	11,1	0,54cv-8 %	5,2	0,131	13,0	50CV-0,8-R	0,1	0,111	12,1	0,54cv-10 %	2,4	0,123	14,3	50CV-0,6-R	1,3	0,117	11,7	0,54cv-10 %	2,1	0,120	14,8	T10FS-0,35-C	2,4	0,128	13,6	0,54cv-11 %	1,2	0,122	14,6	T10FS-0,4-C	1,9	0,127	14,5	0,54cv-12 %	0,6	0,125	13,9	T10FS-0,45-C	2,3	0,133	14,1	0,54cv-12 %	- 0,3	0,117	15,5	T10FS-0,35-R	2,6	0,125	10,9	0,54cv-12,2 %	0,2	0,123	14,4	T10FS-0,4-R	0,9	0,112	12,9	0,67cv-8 %	5,8	0,145	10,3	T10FS-0,45-R	0,7	0,114	13,1	0,67cv-10 %	1,2	0,124	12,9	T10-0,35-C	2,4	0,133	13,3	0,67cv-10,5	0,8	0,124	12,8	T10-0,4-C	1,6	0,128	14,9	0,67cv-12,2	- 0,2	0,133	11,6	T10-0,45-C	2,3	0,133	14,9	0,82cv-8 %	4,9	0,145	10,0	T10-0,35-R	2,1	0,124	11,4	0,82cv-10 %	0,3	0,127	12,2	T10-0,4-R	1,2	0,119	12,4	0,82cv-10,5 %	0,6	0,134	11,2	T10-0,45-R	1,7	0,123	12,4	0,82cv-12,2%	0,0	0,147	9,8	Mélanges additionnels				1,0cv-8%	4,2	0,148	9,9	C300-9 %	5,3	0,143	9,5	1,0cv-10 %	0,7	0,140	10,7	C300-10%	1,8	0,121	12,1	1,0cv-10,5 %	0,2	0,141	10,6	C300-11 %	2,4	0,136	10,3	1,0cv-12,2 %	- 0,7	0,153	9,4	C250-10 %	4,2	0,140	10,4
0,82-8 %	3,6	0,143	10,3	OCV-0,8-C	1,8	0,145	10,2																																																																																																																																																																																																																				
0,82-10 %	1,1	0,145	10,1	OCV-0,6-C	1,1	0,139	11,0																																																																																																																																																																																																																				
0,82-12 %	0,3	0,161	8,6	25CV-0,7-C	2,3	0,134	11,5																																																																																																																																																																																																																				
0,82-14 %	- 0,5	0,176	7,6	50CV-0,8-C	1,4	0,132	11,7																																																																																																																																																																																																																				
1,0-8 %	3,3	0,149	10,3	50CV-0,6-C	1,3	0,126	12,7																																																																																																																																																																																																																				
1,0-10 %	0,6	0,151	10,0	OCV-0,8-R	1,2	0,125	10,3																																																																																																																																																																																																																				
1,0-12 %	- 0,3	0,168	8,4	OCV-0,6-R	1,5	0,123	10,7																																																																																																																																																																																																																				
1,0-14 %	- 1,3	0,183	7,3	25CV-0,7-R	1,6	0,119	11,1																																																																																																																																																																																																																				
0,54cv-8 %	5,2	0,131	13,0	50CV-0,8-R	0,1	0,111	12,1																																																																																																																																																																																																																				
0,54cv-10 %	2,4	0,123	14,3	50CV-0,6-R	1,3	0,117	11,7																																																																																																																																																																																																																				
0,54cv-10 %	2,1	0,120	14,8	T10FS-0,35-C	2,4	0,128	13,6																																																																																																																																																																																																																				
0,54cv-11 %	1,2	0,122	14,6	T10FS-0,4-C	1,9	0,127	14,5																																																																																																																																																																																																																				
0,54cv-12 %	0,6	0,125	13,9	T10FS-0,45-C	2,3	0,133	14,1																																																																																																																																																																																																																				
0,54cv-12 %	- 0,3	0,117	15,5	T10FS-0,35-R	2,6	0,125	10,9																																																																																																																																																																																																																				
0,54cv-12,2 %	0,2	0,123	14,4	T10FS-0,4-R	0,9	0,112	12,9																																																																																																																																																																																																																				
0,67cv-8 %	5,8	0,145	10,3	T10FS-0,45-R	0,7	0,114	13,1																																																																																																																																																																																																																				
0,67cv-10 %	1,2	0,124	12,9	T10-0,35-C	2,4	0,133	13,3																																																																																																																																																																																																																				
0,67cv-10,5	0,8	0,124	12,8	T10-0,4-C	1,6	0,128	14,9																																																																																																																																																																																																																				
0,67cv-12,2	- 0,2	0,133	11,6	T10-0,45-C	2,3	0,133	14,9																																																																																																																																																																																																																				
0,82cv-8 %	4,9	0,145	10,0	T10-0,35-R	2,1	0,124	11,4																																																																																																																																																																																																																				
0,82cv-10 %	0,3	0,127	12,2	T10-0,4-R	1,2	0,119	12,4																																																																																																																																																																																																																				
0,82cv-10,5 %	0,6	0,134	11,2	T10-0,45-R	1,7	0,123	12,4																																																																																																																																																																																																																				
0,82cv-12,2%	0,0	0,147	9,8	Mélanges additionnels																																																																																																																																																																																																																							
1,0cv-8%	4,2	0,148	9,9	C300-9 %	5,3	0,143	9,5																																																																																																																																																																																																																				
1,0cv-10 %	0,7	0,140	10,7	C300-10%	1,8	0,121	12,1																																																																																																																																																																																																																				
1,0cv-10,5 %	0,2	0,141	10,6	C300-11 %	2,4	0,136	10,3																																																																																																																																																																																																																				
1,0cv-12,2 %	- 0,7	0,153	9,4	C250-10 %	4,2	0,140	10,4																																																																																																																																																																																																																				

* Les mélanges en caractères gras correspondent à l'optimum Proctor modifié pour l'étude de Tremblay et al. (1996) et sont supposés à l'optimum Proctor modifié pour les mélanges de Ouellet (1998).

Fig. 1 - Indice de serrage en fonction de la courbe Proctor modifiée du mélange de BCR.



l'essai Proctor modifié, de façon à ce que la teneur en air soit d'environ 2 % et que la teneur en eau avoisine celle de l'optimum Proctor modifié. Il est généralement admis que l'essai Proctor modifié représente bien l'énergie que l'on doit fournir au BCR pour le mettre en place sur chantier (Saucier, 1994). C'est donc cet indice K qui servira en pratique à formuler un BCR.

Méthode de formulation proposée

La teneur en eau théorique à l'optimum Proctor modifié de tous les BCR a été calculée en respectant la démarche suivante. Pour chaque squelette granulaire, on calcule à l'aide du MEC la porosité (air + eau efficace) pour un indice K égal à 12. Par la suite, on soustrait de la porosité un volume d'air égal à 2 % (20 l) afin d'obtenir la teneur en eau efficace du BCR. La figure 2 présente les teneurs en eau efficaces expérimentales et théoriques pour tous les BCR. Les masses volumiques sèches expérimentales et théoriques sont présentées sur la figure 3.

À la lumière des résultats obtenus, il semble que la méthode de formulation proposée permet de prédirer la teneur en eau efficace des BCR à l'optimum Proctor modifié avec un écart moyen de 0,5 % en valeur absolue. On peut énumérer quelques sources d'erreur expérimentales pouvant expliquer les écarts de teneur en eau allant jusqu'à 1 % pour certains mélanges (*cf.* fig. 2) : mélange trop humide pour subir un essai Proctor modifié entraînant une perte d'eau à la base du moule ou encore courbe Proctor modifiée incomplète du

côté sec. Mais il faut plutôt incriminer les hypothèses simplificatrices qui ont été prises dans les calculs. On observe que la teneur en air expérimentale est parfois significativement différente de la valeur de 2 % adoptée forfaitairement. De même, les valeurs expérimentales de K à l'optimum proctor modifié fluctuent autour de 12 (tableau X). Ces fluctuations pourraient traduire des différences de difficulté de compactage qui n'ont pas été prises en compte ici : par exemple, dans les données de Ouellet la valeur moyenne de K pour les BCR avec des granulats roulés est de 11,7 alors qu'elle est égale à 13 pour les BCR contenant des granulats concassés.

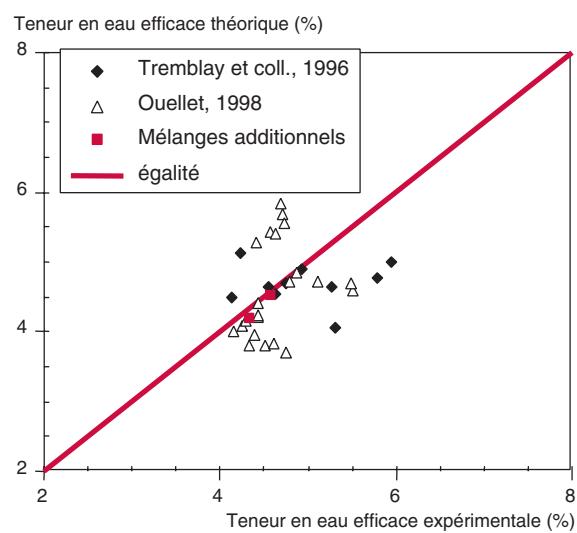


Fig. 2 - Teneurs en eau efficaces expérimentales vs teneurs en eau efficaces calculées avec $K = 12$ à l'optimum Proctor modifié (on suppose une teneur en air de 2 %).

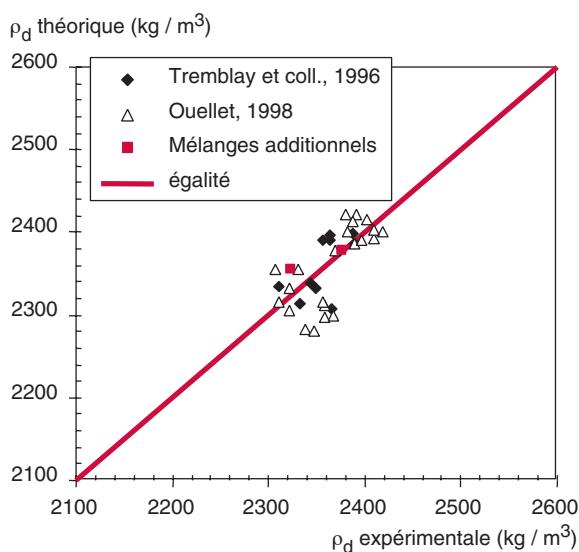


Fig. 3 - Masses volumiques sèches expérimentales vs masses volumiques sèches calculées avec $K = 12$ à l'optimum Proctor modifié.

Toutefois, dans le cas où la courbe Proctor modifiée des BCR est plutôt arrondie, un écart de $\pm 0,5\%$ sur la teneur en eau n'implique pas une variation importante de la densité sèche Proctor modifié et donc de la compacité des matériaux. L'écart moyen entre la théorie et l'expérience sur la masse volumique sèche à l'optimum Proctor modifiée est égal à 26 kg/m^3 en valeur absolue, soit une erreur moyenne de $1,1\%$. Il demeure, malgré tout, important de procéder à une ou plusieurs gâchées d'essai afin de contrôler les quantités de matériaux spécifiées par le MEC et de s'assurer que l'on obtient une consistance (temps Vebe) et des résistances mécaniques adéquates et que l'on n'a pas de désordres (risque de ségrégation, difficulté de

compactage, instabilité pouvant occasionner des défauts d'uni en cas d'excès d'eau, etc.).

Le tableau XI illustre la pertinence de la méthode de formulation proposée sur deux BCR tirés des essais complémentaires et pour lesquels la quantité de ciment a été fixée et les proportions de sable et de gravillons optimisées afin d'obtenir une porosité minimale. On présente les mélanges théoriques calculés avec le MEC et les mélanges expérimentaux obtenus en laboratoire à l'optimum Proctor modifié. Dans les deux cas, le modèle a permis de définir précisément la quantité d'eau optimale nécessaire à l'atteinte de l'optimum Proctor modifié.

Conclusion

Les résultats de cette étude démontrent que le *modèle d'empilement compressible* s'avère un outil prometteur pour la formulation des bétons compactés au rouleau. En effet, le modèle permet de prédire la masse volumique sèche d'un béton compacté au rouleau à l'optimum Proctor modifié avec un écart moyen de $\pm 26 \text{ kg/m}^3$. Il est alors possible d'optimiser par calcul les proportions des différentes classes granulaires (gravillon, sable, ciment, ajouts minéraux) afin de maximiser la compacité du BCR. Ceci réduit considérablement le nombre de gâchées de mise au point en laboratoire par rapport au résultat d'une étude classique faite sur la base d'une distribution granulaire de référence.

Ce modèle permet également de déterminer la teneur en eau à l'optimum Proctor modifié avec un

TABLEAU XI
Comparaison entre les mélanges de BCR calculés avec le MEC et obtenus expérimentalement lors des essais complémentaires

Constituants et propriétés	Mélange C250-11 % à l'optimum		Mélange C300-10 % à l'optimum	
	Théorique ($K = 12$)	Expérimental	Théorique ($K = 12$)	Expérimental
Ciment (kg/m^3)	247	244	297	297
Sable* (kg/m^3)	761	753	747	748
Gravillon* 5-20 (kg/m^3)	1 361	1 345	1 346	1 348
Eau efficace (kg/m^3)	107	106,4	102	102,9
E/C	0,43	0,44	0,34	0,35
Sable/Gravillon	0,56	0,56	0,55	0,55
Air (%)	2	3,1	2	1,8
Temps Vebe (s)	-	40	-	40

* Les masses du sable et des gravillons sont données à l'état saturé surface sèche.

écart moyen de $\pm 0,5\%$ en valeur absolue. Toutefois, l'écart peut atteindre dans certains cas 1 %, ce qui nécessite la validation de la formule par des essais afin de vérifier, notamment, la stabilité et la difficulté de compactage du mélange. Les recherches futures viseront à diminuer cet écart.

Par ailleurs, cette méthode permet d'aborder sans difficulté la formulation des BCR à très gros granulats, dont le diamètre maximal est, par exemple, de l'ordre de 50 à 80 mm. La méthode de caractérisation de la compacité des classes granulaires permet en effet de tenir compte de l'effet de paroi et calcule, à partir de la compacité expérimentale obtenue sur un petit échantillon, la valeur théorique de compacité en pleine masse. On peut alors calculer théoriquement une formulation optimale qu'il ne reste plus qu'à tester sur le chantier en conditions réelles (les dimensions réduites des éprouvettes ne permettant pas, dans ce cas, de réaliser des essais de laboratoire représentatifs).

L'applicabilité du MEC pour la formulation des BCR servira certainement de prélude à une utilisation beaucoup plus vaste du modèle pour la formulation d'autres matériaux « secs » nécessitant une énergie de compactage élevée comme les

graves-ciment, les matériaux recyclés pulvérisés et retraités aux liants hydrauliques, bitumineux ou mixtes, voire les enrobés bitumineux classiques. Dans cette perspective, une étude est actuellement en cours à l'université Laval en vue d'utiliser le MEC pour la formulation et l'optimisation des bétons obtenus par retraitement au ciment d'anciennes chaussées souples pulvérisées (Pouliot, 2001). De même, des essais sont en cours sur le réseau des laboratoires des Ponts et Chaussées pour l'application du MEC à la formulation des matériaux traités aux liants hydrauliques.

Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées a développé des logiciels pour l'application pratique du MEC à la formulation des matériaux granulaires de génie civil : BétonlabPro 2 (Sedran et de Larrard, 2000), dédié aux bétons de structure, et René-LCPC (Sedran et de Larrard, 1994]), d'application plus générale mais sans module d'optimisation automatique. Ce dernier logiciel est actuellement en diffusion libre, et peut être obtenu auprès des auteurs (voir également le site http://www.lcpc.fr/fr/presentation/organigramme/div_tgce/result/betonlabpro.php).

Remerciements. Ces travaux ont été réalisés au LCPC, Centre de Nantes, dans le cadre d'un stage de doctorat financé par le Fond pour la formation des chercheurs et l'aide à la recherche (FCAR) du Québec. Les auteurs souhaitent remercier Éric Ouellet, ingénieur au Service d'Expertise en matériau (Québec, Canada), pour sa collaboration.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- de LARRARD F. (2000), *Concrete mixture proportioning*, A scientific approach. E & FN SPON Editors, New York, NY, 421 pages.
- de LARRARD F. (2000), *Structures granulaires et formulation des bétons*. Études et recherches des LPC, **0A 34**, 414 pages.
- de LARRARD F., SEDRAN Th., ANGOT D. (1994a), Prévision de la compacité de mélanges granulaires par le modèle de suspension solide. Partie 1 : Fondements théoriques et étalonnage du modèle, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **194**, novembre-décembre, pp. 59-70.
- de LARRARD F., SEDRAN Th., ANGOT D. (1994b), Prévision de la compacité de mélanges granulaires par le modèle de suspension solide. Partie 2 : Validation – Cas des mélanges confinés, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **194**, novembre-décembre, pp. 71-86.
- HOLTZ, R.D., KOVACS, W.D. (1981), *Introduction à la géotechnique*, Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, Québec, Canada, 808 pages.
- MARCHAND J., GAGNÉ R., OUELLET E., LEPAGE S. (1997), *Mixture proportioning of roller compacted concrete – Advance in Concrete Technology*, ACI SP-171, Proceedings of the third CANMET/ACI International Conference, Auckland, New Zealand, pp. 457-486.
- MARCHAND J., HORNAIN H., DIAMOND S., PIGEON M., GUIRAUD H. (1996), The microstructure of dry concrete products, *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, **3**, pp. 427-438.
- NANNI A., LUDWIG D., SHOENBERGER J. (1996), *Roller compacted concrete for highway pavements*, Concrete International, mai, pp. 33-38.
- OUELLET E. (1998), *Formulation et étude du comportement mécanique des bétons compactés au rouleau*. Mémoire de maîtrise, Département de Génie civil, Université Laval, Canada, 200 pages.
- OUELLET E., MARCHAND J., REID E. (1998), *Comportement mécanique et durabilité au gel de mélanges de béton compacté au rouleau à faible teneur en ciment*, Congrès annuel de l'ACI, Section du Qué-

- bec et de l'est de l'Ontario, Sherbrooke, Canada, décembre, 15 pages.
- POULIOT N. (2001), *Mécanismes d'hydratation et propriétés mécaniques des BCR routiers fabriqués à partir de matériaux granulaires et de béton bitumineux recyclés*. Thèse de doctorat, Département de Génie civil, Université Laval, Canada, en préparation.
- Projet National BaCaRa 1988-1995 (1996), *Le béton compacté au rouleau – Les barrages en BCR*. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 200 pages.
- PIGEON M., MARCHAND J. (1996), *Frost resistance of roller-compacted concrete*. Concrete International, juillet, pp. 22-26.
- PIGGOTT R.W. (1987), Ten years of heavy-duty pavements in western Canada, *Concrete International*, vol. 9, 2, pp. 49-55.
- SAUCIER K.L. (1994), Roller Compacted Concrete. *Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials*. P. Klieger and J.F. Lamond Editors, ASTM, Philadelphia, USA, pp. 567-576.
- SEDRAN Th. (1999), *Rhéologie et rhéométrie des bétons : application aux bétons autonivelants*. Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, 220 pages.
- SEDRAN Th., de LARRARD F. (1994), *René-LCPC, logiciel d'optimisation granulaire*. Logiciel et notice d'utilisation, LCPC.
- SEDRAN Th., de LARRARD F. (2000), *BétonlabPro 2 – Logiciel de formulation de bétons* – Version exécutable sous Windows. Logiciel sur CD-ROM avec aide en ligne, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, juin.
- TREMBLAY S., MARCHAND J., BOISVERT L., PIGEON M., OUELLET E., MALTAIS Y. (1996), *Méthode de formulation des bétons compactés au rouleau et effet des agents entraîneur d'air sur la maniabilité*, Rapport GCS-96-11, CRIB, Département de Génie civil, Université Laval, 200 pages.

ABSTRACT

Prediction of the compactness of roller-compacted concrete using a granular stacking model

N. POULIOT, Th. SEDRAN, F. de LARRARD, J. MARCHAND

Roller-compacted concrete (RCC) is typically used in the building of dams, road pavements and storage facilities (especially in Canada). Speed of placing, a low cement content and the potential use of mineral admixtures (fly ash, limestone fillers, mining residue, etc.) combine to provide the construction industry with a highly-economical building material. Nonetheless, RCC exhibits a unique internal structure by virtue of its high proportion of aggregate and very dry consistency. The presence of considerable compaction voids, caused either by incomplete densification of the material or by an insufficient volume of cement paste around the aggregates, is quite often noted. In order to facilitate the coating of aggregates by the small quantity of available cement paste, it thus becomes critical to maximize the compactness of the granular network by means of optimizing the proportions of the different size grading categories. The study presented herein confirms the potential for making use of a model, called the *compressible packing model* (CPM), that enables forecasting the compactness of a granular mix, for the purpose of designing and optimizing RCC concretes. A procedure is proposed for designing RCC via the CPM based on a value of the compaction index K, representative of the energy required for the placing of this type of material.