

Nouvel essai de mesure de compacité des fractions granulaires à la table à chocs

François de LARRARD
Vincent LÉDÉE
Thierry SEDRAN
Frédéric BROCHU †
Jean-Bernard DUCASSOU †
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

La mise au point d'une méthode de mesure de compacité des tranches granulaires, destinée notamment à alimenter les logiciels d'aide à la formulation des bétons et autres matériaux granulaires du génie civil, est présentée. On commence par montrer qu'il est inutile de séparer les sables en plusieurs sous-classes à des fins de caractérisation de la compacité, comme on en avait pris l'habitude depuis une dizaine d'années. Ensuite, on relate les résultats d'une importante campagne expérimentale, dans laquelle six modes opératoires de mesure de compacité ont été mis en œuvre sur différentes fractions tirées de trois origines, chaque essai étant répété quinze fois afin d'estimer valeur moyenne et écart-type. Le mode opératoire sélectionné consiste à placer un échantillon de 7 kg de granulats dans un cylindre, à le soumettre à une série de secousses (par l'intermédiaire d'une table à chocs), et à répéter ces sollicitations après avoir placé sur la surface supérieure de l'échantillon un piston en acier appliquant une contrainte verticale de 10 kPa. L'appareillage de ce nouvel essai est plus simple que celui de l'essai précédent (qui nécessitait l'utilisation d'une table vibrante), et sa reproductibilité (qui reste à évaluer) doit être meilleure. Cette recherche a par ailleurs confirmé la capacité prédictive du modèle d'empilement compressible du LCPC, en limitant cependant son domaine d'autocohérence à celui des empilements denses.

DOMAINE : Ouvrages d'art.

ABSTRACT

NEW TEST FOR MEASURING THE COMPACTNESS OF GRANULAR FRACTIONS ON THE SHOCK TABLE

*The development of a method for measuring the packing density of aggregate fractions is presented and discussed herein. This method has been especially intended to provide input for the software application aimed at assisting with the mix design of concrete and other granular materials used in civil engineering. The article begins by demonstrating the lack of utility in separating sands into several subcategories for characterizing packing density, as has been customary over the past decade. The results from a major experimental campaign, in which six packing density measurement operating modes were implemented on different fractions drawn from three sources, are then described, with each test being repeated a total of fifteen times to estimate the average value and standard deviation. The selected operating mode consists of placing a 7-kg sample of aggregate within a cylinder, submitting it to a series of strokes (by means of a shock table), and then repeating these same loads once a steel piston applying a 10-kPa vertical stress on the upper surface of the sample has been positioned. The instrumentation of this new test is more straightforward than that of the previous one (which necessitated use of a vibration table) and its level of reproducibility (which still needs to be evaluated) is probably better. This research effort has confirmed the predictive capacity of the LCPC compressible packing model, **by virtue however** of limiting its range of self-coherence to dense packing.*

FIELD: Structural engineering.

Introduction

Les matériaux granulaires du génie civil sont fabriqués à partir de fractions granulaires disponibles en coupures de type 0/D ou d/D (où d est la taille minimale, et D la taille maximale au sens des tamis). De tous temps, la combinaison de ces fractions, permettant d'aboutir à des mélanges formulés, a été effectuée sur la base de considérations de dimension (telle que décrite par la granulométrie). Plus récemment, des modèles sont apparus, visant à prendre en compte non seulement cette dimension, mais aussi la forme des grains [1, 2]. Celle-ci conditionne la propension des grains à se rassembler de façon plus ou moins compacte. Les modèles de compacité développés au LCPC [3-5] s'appuient sur une connaissance de la compacité « naturelle » des fractions granulaires, à partir de laquelle ils fournissent une prévision de la compacité de tout mélange, ce qui en fait des outils d'optimisation. De tels modèles sont à la base de méthodes de formulation de béton utilisées aujourd'hui par les praticiens [6, 7] ;

leur applicabilité pourraient s'étendre dans un avenir proche aux matériaux routiers, qu'ils soient non traités, hydrauliques ou bitumineux, voire à d'autres matériaux divisés.

Cependant, il n'existe pas aujourd'hui d'essai normalisé, français ou européen, adapté à la mesure de compacité des fractions d/D. La recherche du LCPC s'est fondée jusqu'alors sur un mode opératoire consistant à placer les granulats dans un cylindre surmonté d'un piston et à soumettre l'ensemble à une vibration pendant un certain temps. Il est nécessaire, pour mettre en œuvre cet essai, de disposer d'une table vibrante, appareil certes commun, mais dont il est difficile de contrôler finement les paramètres (fréquence, amplitude, accélération). L'objectif de la recherche relatée ici est donc de proposer un mode opératoire plus simple, reposant sur un matériel le plus léger et le moins coûteux possible, susceptible d'assurer une répétabilité et une reproductibilité satisfaisantes. Cette étape est nécessaire pour assurer une diffusion « définitive » de ces méthodes dans la communauté technique du génie civil et de la route.

Après avoir réexaminé l'opportunité d'une disposition qui, à l'usage, s'est avérée contraignante (la caractérisation de la compacité des sables par coupures relativement étroites), on présentera les différents modes opératoires envisagés. Puis on relatera une importante campagne expérimentale, dont les résultats permettront de sélectionner un nouvel essai. Il restera à vérifier la valeur de l'indice de serrage associée (au sens du Modèle d'Empilement Compressible, ou MEC [5]).

Question préliminaire : faut-il continuer à caractériser les sables par coupures séparées ?

Pratique actuelle et question posée

Depuis une dizaine d'années que les modèles de compacité du LCPC sont utilisés, l'habitude a été prise de caractériser les gravillons par coupure commerciale. Pour les sables, par contre, du fait de leur large étendue granulaire, on avait pris, par précaution, le parti de les séparer en éléments fins ($< 80 \mu\text{m}$), dont la compacité est donnée par une mesure de demande en eau et en éléments grossiers ($> 80 \mu\text{m}$), séparés en fractions d'étendue maximale D/d égale à 4. Les mesures de compacité étaient effectuées sur ces fractions séparées. Cela permettait de remonter à une valeur, supposée uniforme, de β , compacité virtuelle* « monotaille », pour les grains appartenant à chaque fraction. Ainsi, pour un sable commercial 0/4 ou 0/5, on devait préparer trois ou quatre coupures, chacune donnant *in fine* une valeur de β . On aboutissait ainsi à une fonction en escalier pour la compacité virtuelle en fonction de la taille des grains.

Cependant, cette pratique s'avère fastidieuse, en particulier pour les sables pauvres en éléments fins. La nécessité d'obtenir une quantité suffisante de fraction fine impose alors de tamiser des quantités très importantes de matériaux. Il serait plus pratique de se limiter à une mesure de compacité globale sur le sable complet, débarrassé de ses fines.

Simulations à l'aide du logiciel BétonlabPro 2 [7]

Afin de valider la pertinence d'une telle démarche, des simulations ont été réalisées avec le logiciel d'optimisation des bétons BétonlabPro 2, fondé sur la dernière version du MEC**. À partir d'un sable dont les valeurs de β ont été déterminées par mesure de fractions séparées, on génère un sable dit « uniformisé », dont la compacité réelle est la même, mais dont les sous-classes ne sont pas distinguées, ce qui signifie que la valeur de β est la même pour toute l'étendue granulaire du sable

* On rappelle que la compacité est la proportion de volume solide, dans un volume total unité. La compacité « virtuelle » est par convention la valeur maximale que l'on peut atteindre en plaçant les grains un à un. En pratique, on réalise des empilements aléatoires dont la compacité réelle est toujours plus faible, et dépend de l'énergie fournie au système pendant la mise en place. Dans le cadre du MEC, cette énergie est exprimée par l'indice de serrage K, qui prend une valeur finie pour les modes opératoires courants ($K = 9$ pour la vibration/compression utilisée jusqu'alors), et tend vers l'infini pour l'empilement virtuel [5].

** BétonlabPro 2 étant initialement prévu pour le calcul de propriétés de bétons, les calculs d'optimisation de compacité ont été réalisés en incorporant 1 kg/m^3 de ciment dans les mélanges (pour éviter des divisions par zéro). En imposant un indice de serrage de 9, la teneur en eau efficace du « béton » divisée par le volume de « béton » désaéré (soit 1000-10 a où a est le pourcentage d'air) correspond alors à la porosité de l'empilement sec. La compacité est égale au complémentaire à un de cette porosité.

considéré. On réalise alors un certain nombre de calculs d'optimisation, d'une part avec le sable originel, et d'autre part avec le sable uniformisé. Si les résultats du calcul ne diffèrent pas significativement, cela signifie que l'opération de séparation est inutile.

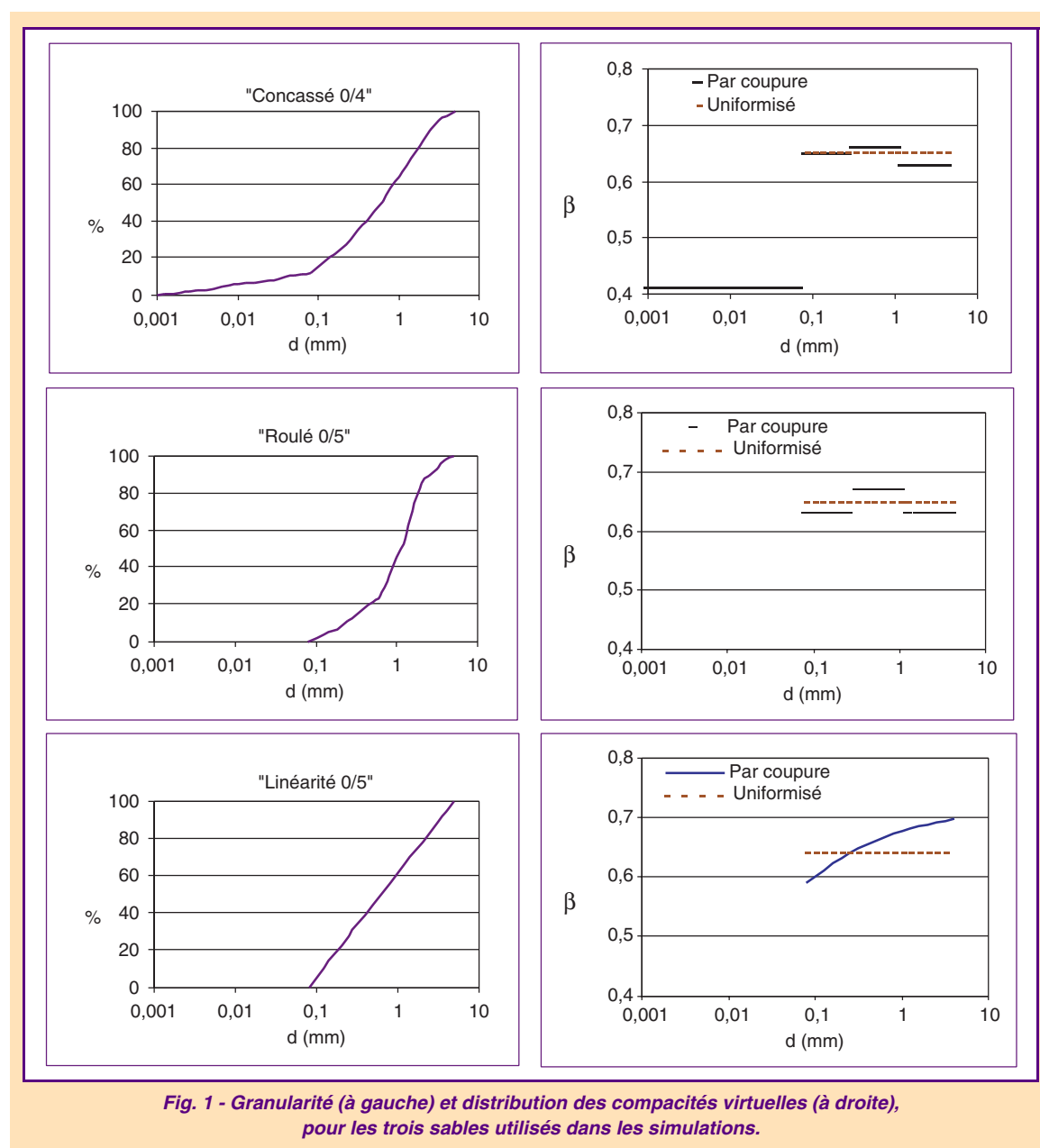
Pour apprécier dans quelle mesure les résultats de simulation diffèrent, on se souviendra que :

- les optima granulaires sont toujours assez plats, c'est-à-dire que des mélanges dont les pourcentages varient de plusieurs points donnent des valeurs de compacité très proches, dans la zone de l'optimum ;
- le MEC dans sa dernière version [5] comme dans l'avant-dernière [4] donne une erreur moyenne par rapport à l'expérience comprise entre 0,5 et 1 % en valeur absolue de compacité.

On utilise les matériaux du dossier « Matériaux génériques » livré avec BétonlabPro 2 : concassés 12,5/20 et 5/12,5, ciment CPA CEM I. La démarche sera déroulée avec trois sables :

- le sable « concassé 0/4 », avec une teneur en fine de 12 %, et une compacité virtuelle fortement différenciée dans les différents étages de la granularité ;
- le sable « roulé 0/5 », sable alluvionnaire classique sans fines ;
- un sable dit « linéaire 0/5 », dont la granularité est parfaitement linéaire dans un diagramme semi-logarithmique (entre 80 μm et 5 mm) et la compacité virtuelle croît avec la dimension des grains, selon des mesures réalisées sur tranches étroites [4].

Les granularités et les compacités virtuelles sont représentées sur la figure 1.



Résultats

Avec chaque sable, on a recherché successivement les mélanges binaires (sable/petit gravillon), ternaires (sable/petit et gros gravillon) et quaternaires (filler/sable/petit et gros gravillon) donnant la compacité maximale. On a calculé ensuite la compacité des mélanges optimums contenant les sables « uniformisés », en remplaçant le sable par le matériau originel. Cela permettait de voir quelle aurait été l'erreur d'appréciation de l'optimum due à l'absence de séparation dans la caractérisation du sable. Les résultats de ces calculs sont présentés dans les tableaux I à III.

On constate que les déplacements d'optimum sont très faibles, et les différences de compacité entre les « vrais »* optima (calculés avec les sables originaux) et les « faux » optima (résultant de

TABLEAU I

Optima granulaires calculés avec le logiciel BétonlabPro 2, pour les mélanges à base de sable roulé 0/4, avec un indice de serrage K = 9. G1 : gravillon 1, G2 : gravillon 2, S : sable. Les pourcentages sont calculés par rapport à la masse totale de granulats

	Binaire			Ternaire			Quaternaire		
G1 (12,5/20) (%)	0	0	0	51,23	50,98	50,98	48,67	48,69	48,69
G2 (5/12,5) (%)	51,04	51,3	51,3	5,78	6,29	6,29	9,11	9,12	9,12
S (0/4 originel) (%)	48,96	0	48,7	42,99	0	42,73	42,23	0	42,19
S (0/4 uniformisé) (%)	0	48,7	0	0	42,73	0	0	42,19	0
Filler calcaire (kg/m ³)	0	0	0	0	0	0	282,7	281,6	281,6
Compacité	0,7829	0,7840	0,7829	0,8101	0,8109	0,8101	0,8571	0,8577	0,8571

TABLEAU II

Mêmes calculs, pour les mélanges à base de sable concassé 0/4

	Binaire			Ternaire			Quaternaire		
G1 (12,5/20) (%)	0	0	0	43,92	43,71	43,71	42,84	42,65	42,65
G2 (5/12,5) (%)	44,4	44,83	44,83	7,74	8,26	8,26	12,74	13,11	13,11
S (0/4 originel) (%)	55,6	0	55,17	48,34	0	48,03	44,43	0	44,24
S (0/4 uniformisé) (%)	0	55,17	0	0	48,03	0	0	44,24	0
Filler calcaire (kg/m ³)	0	0	0	0	0	0	125,6	124,4	124,4
Compacité	0,8348	0,8359	0,8350	0,8519	0,8525	0,8520	0,8610	0,8615	0,8611

TABLEAU III

Mêmes calculs, pour les mélanges à base de sable linéaire 0/5

	Binaire			Ternaire			Quaternaire		
G1 (12,5/20) (%)	0	0	0	44,47	45,4	45,4	43,78	44,51	44,51
G2 (5/12,5) (%)	49,47	48,04	48,04	11,82	9,82	9,82	15,08	13,45	13,45
S (0/5 originel) (%)	50,53	0	51,96	43,71	0	44,78	41,14	0	42,04
S (0/5 uniformisé) (%)	0	51,96	0	0	44,78	0	0	42,04	0
Filler calcaire (kg/m ³)	0	0	0	0	0	0	223,2	230,5	230,5
Compacité	0,8209	0,8159	0,8205	0,8397	0,8358	0,8394	0,8652	0,8635	0,8651

* Les guillemets sont employés car il s'agit d'un optimum au sens du modèle, qui ne coïncide pas tout à fait avec l'optimum réel.

l'optimisation avec les sables « uniformisés ») sont nulles pour les deux premiers sables, et marginales pour le troisième, ce qui signifie qu'étant donné la précision du modèle :

- les optima calculés avec le sable original ou uniformisé ne diffèrent pas de façon significative ;
- l'erreur sur la compacité maximale des mélanges est inférieure ou du même ordre que l'erreur moyenne intrinsèque au modèle.

On en conclut donc qu'il n'est pas nécessaire de continuer à couper les sables pour la partie supérieure à 80 µm (ou 63 µm d'après la norme européenne), sauf si l'on souhaite mettre en évidence des particularités de texture des grains liées à la structure pétrographique de la roche [8].

Modes opératoires envisagés pour l'essai de compacité

Ceux-ci allaient de l'essai le plus simple (versement gravitaire) jusqu'à un mode opératoire plus complexe (combinant vibration et compression), proche de celui utilisé auparavant [4, 5], en passant par une méthode utilisant une table à chocs, dont on espérait qu'elle produirait des niveaux de serrage proches du précédent essai tout en faisant appel à un appareillage plus simple.

Simple versement

Cette méthode, décrite dans la norme NF EN 1097-3, consiste à remplir un récipient de volume V connu en laissant s'écouler le matériau sous l'effet de la gravité, sans autre sollicitation, et en mesurant la masse M du récipient après arasement. M_0 étant la masse du récipient à vide, et ρ la masse volumique réelle, la compacité s'écrit :

$$c = \frac{M - M_0}{\rho V} \quad (1)$$

Dans la présente recherche, on a utilisé un cylindre de hauteur 200 mm et de volume égal à 3,98 l pour les gravillons, et un cylindre de hauteur 80 mm et de volume égal à 0,56 l pour le sable.

Piquage

Pour améliorer le compactage du matériau dans le cylindre, on peut utiliser une tige, que l'on enfonce plusieurs fois dans l'échantillon (méthode inspirée de la méthode ASTM C 29-78). Dans le cas présent, la tige en acier utilisée pour les gravillons, à tête hémisphérique, mesurait 600 mm de long, pour un diamètre de 16 mm. Pour les sables, la longueur utile était de 130 mm (diamètre 6 mm). Les cylindres (identiques à ceux utilisés dans le précédent mode opératoire) étaient remplis en trois couches successives, chacune piquée vingt-cinq fois. Un échantillon faisait en fait l'objet d'une première mesure après simple versement, puis le matériau était vidé, séparé en trois parties, et le présent mode opératoire était appliqué.

Chocs sous compression 1 ou 10 kPa

Pour ce mode opératoire, un échantillon de 7 kg de gravillons était placé dans un cylindre de hauteur et de diamètre égaux à 400 et 159 mm, respectivement. Pour le sable, la masse de l'échantillon était de 1 kg, et les dimensions du récipient de 300 et 95 mm. Le matériau était versé en trois couches successives, chaque ajout étant suivi d'une série de vingt secousses appliquées au moule. Ensuite, des pistons en aluminium (pour la compression de 1 kPa) ou en acier (pour la compression de 10 kPa), de hauteur appropriée, étaient placés sur l'échantillon, et une série de quarante secousses était encore appliquée. Ces séries de chocs étaient créées par une table carrée, solidaire du fonds de moule, articulée sur un de ses côtés, et qui pivotait et retombait sous l'effet d'une came (fig. 2). Dans ce mode opératoire, la masse de matériau est imposée et le volume est mesuré à l'aide d'un pied à coulisse, à partir de la mesure de la distance entre le bord du moule et le haut du piston.

Un échantillon de matériau était d'abord caractérisé sous une compression de 1 kPa, puis, le cylindre ayant été vidé, l'essai était répété avec la compression de 10 kPa.

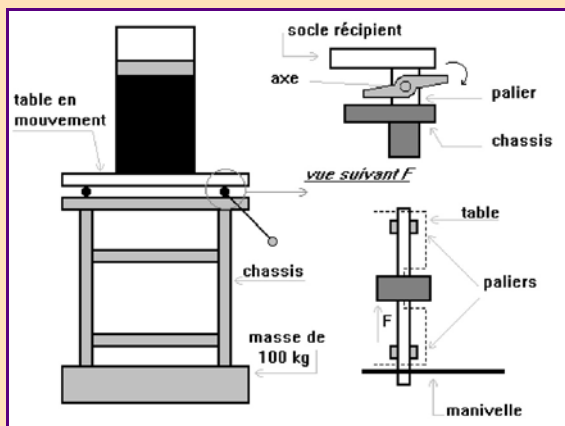


Fig. 2 - Table à chocs utilisée dans les essais.
Hauteur de chute : 1 cm au niveau de la came.

Vibration sous compression 1 et 10 kPa

Les tailles d'échantillon, les moules et les pistons étaient les mêmes que pour la méthode précédente. La vibration, d'une amplitude de 0,2 mm et d'une fréquence de 50 Hz, était appliquée à l'aide de la table vibrante fournie avec l'angulomètre à gravillons (modèle AG 20, norme NF P 18-563). Le remplissage de chacune des trois couches était suivi d'une vibration pendant 20 secondes. Ensuite, le piston était placé dans le moule rempli de matériau, et une vibration était appliquée pendant 90 secondes. La mesure du volume final de l'échantillon était effectuée par la même méthode que précédemment. Là aussi, un échantillon de matériau était successivement caractérisé sous une compression de 1, puis de 10 kPa.

Sélection du mode opératoire

Les matériaux utilisés

Trois natures de granulats ont été utilisées : un roulé dur et un concassé dur, considérés comme de « bons granulats à béton », et un concassé tendre, susceptible de présenter un certain niveau d'attrition pendant les essais de compacité. À partir de ces sources, des coupures 0,08/0,5 (ou 0/0,5), 1/6,3, 4/6,3, 6,3/20 et 20/31,5 ont été élaborées par criblage et/ou recombinaison manuelle. Les tableaux IV et V récapitulent quelques-unes de leurs caractéristiques.

Première campagne d'essais de compacité

La compacité de chaque coupure des trois matériaux a été mesurée selon les six modes opératoires précédemment présentés. Afin d'aboutir à une estimation correcte de la moyenne et de l'écart-type, quinze échantillons différents ont été caractérisés pour chacun des cas. Les résultats sont présentés dans les tableaux VI et VII.

À l'examen du tableau VI, on peut faire les constatations suivantes :

- les niveaux de compacité, comme on s'y attendait, dépendent du mode opératoire. Le versement simple donne le niveau le plus faible, suivi du piquage, des deux modes sous faible compression (1 kPa) puis des modes à forte compression (10 kPa) ;
- d'après la théorie du MEC, on s'attendait à ce que les différences d'un mode opératoire à l'autre soient du même ordre de grandeur pour les différentes coupures granulaires, chaque mode opératoire étant en principe caractérisé par une valeur moyenne d'indice de serrage [5]. Force est de constater que cette prévision est mise en défaut. Au contraire, le type d'essai a un effet plus important sur la compacité des sables, en particulier lorsqu'ils contiennent des fines, que sur celle des gravillons, matériaux qui semblent se compacter assez facilement à leur valeur maximale pour un mélange aléatoire (fig. 3) ;

TABLEAU IV

Masse volumique et granularité des fractions utilisées dans les essais

d (mm)	Roulés					Concassés durs					Concassés tendres			
	R0,08/0,5	R1/6,3	R4/6,3	R6,3/20	R20/31,5	CD0/0,5	CD1/6,3	CD4/6,3	CD6,3/20	CD20/31,5	CT0/0,5	CT1/6,3	CT4/6,3	CT6,3/20
Masse volumique réelle (kg/m ³)	2584	2584	2584	2584	2584	2647	2647	2647	2647	2647	2554	2433	2378	2378
0,05														
0,063	0					17					4			
0,08	2					27					9			
0,1	4					35					17			
0,125	6					43					24			
0,16	8					52					32			
0,2	10					60					40			
0,25	32					70					55			
0,315	54					80					70			
0,4	76					90					84			
0,5	98	0				98	0				97	3		
0,63	99	1				99	1				98	4		
0,8	100	1				100	1				99	5		
1		1					1				100	6		
1,25		3					3					15		
1,6		5					5					23		
2		8					8	0				32	4	
2,5		16					16	1				46	5	
3,15		24	0				25	2	0			61	5	3
4		52	9				50	29	1			80	16	4
5		81	48	0			83	72	1			96	61	4
6,3		100	100	2			100	99	5			100	100	9
8				17				100	22					20
10				22					43					39
12,5				33	0				63					62
16				75	1				80	0				85
20				99	14				98	1				100
25				100	70				100	44				
31,5					100					100				

TABLEAU V

Caractéristiques des granulats utilisés dans les essais de compacité

Types de matériaux	Roulés	Concassés durs	Concassés tendres
Origine	Alluvionnaires de Garonne (Villenave-d'Ornon, Gironde)	Gneiss de la carrière des Maraichères (Bouguenais, Loire-Atlantique)	Calcaire de la carrière de Saint-Porchaire, (Charente-Maritime)
Los Angeles (%)	18	18	33

TABLEAU VI

Mesures de compacité effectuées sur les fractions élémentaires, avec les différents modes opératoires.
Valeurs moyennes en %

Matériaux	Essais					
	Versement	Piquage	Secousses (1 kPa)	Secousses (10 kPa)	Vibration (1 kPa)	Vibration (10 kPa)
Roulés						
20 / 31,5	57,11	61,38	61,28	61,67	61,29	62,19
6,3 / 20	59,96	64,50	65,42	66,07	65,06	65,61
4 / 6,3	58,23	62,73	66,05	66,30	64,99	65,25
1 / 6,3	61,02	65,43	66,04	67,90	65,64	66,88
0,08 / 0,5	55,32	58,76	61,51	63,19	60,84	63,74
Concassés durs						
20 / 31,5	45,91	52,47	51,04	50,56	50,86	51,35
6,3 / 20	48,96	55,10	55,11	55,12	54,87	55,92
4 / 6,3	48,12	53,60	54,58	54,62	54,36	54,83
1 / 6,3	50,25	55,07	55,76	57,29	56,23	58,06
0 / 0,5	49,25	56,29	63,43	63,99	65,39	67,32
Concassés tendres						
20 / 31,5	49,06	57,14	54,27	54,39	52,53	54,75
8 / 31,5	53,41	59,94	59,02	58,33	58,05	59,20
6,3 / 20	53,16	59,03	59,04	58,86	58,10	59,80
4 / 6,3	51,44	57,96	58,64	58,88	57,46	58,37
1 / 6,3	48,24	52,91	55,88	56,98	56,82	59,36
0 / 0,5	46,17	51,27	54,62	56,89	56,59	64,17



Fig. 3 - Valeurs moyennes de compacité pour tous les matériaux selon les différents modes opératoires, en distinguant les fractions fines (inférieures à 6,3 mm) et les fractions plus grossières (supérieures à 6,3 mm).

TABLEAU VII

Mesures de compacité effectuées sur les fractions élémentaires, avec les différents modes opératoires. Écarts-types (%), calculés sur des ensembles de quinze valeurs individuelles

Matériaux	Essais					
	Versement	Piquage	Secousses (1 kPa)	Secousses (10 kPa)	Vibration (1 kPa)	Vibration (10 kPa)
Roulés						
20 / 31,5	0,984	0,698	0,595	0,731	0,840	0,967
6,3 / 20	0,406	0,787	0,487	0,313	0,354	0,289
4 / 6,3	0,892	0,191	0,248	0,152	0,202	0,217
1 / 6,3	0,925	0,949	0,343	0,589	0,407	0,870
0,08 / 0,5	0,166	1,166	0,254	0,262	1,143	0,314
Concassés durs						
20 / 31,5	1,333	0,828	1,411	1,352	0,729	0,517
6,3 / 20	1,037	0,529	0,623	0,873	0,693	1,103
4 / 6,3	0,370	0,737	0,302	0,406	0,148	0,430
1 / 6,3	1,180	0,793	0,587	0,532	0,549	1,155
0,08 / 0,5	0,686	0,471	0,752	0,281	0,589	0,532
Concassés tendres						
20 / 31,5	1,188	1,291	1,302	1,771	1,796	1,258
8 / 31,5	0,870	1,503	0,877	1,163	0,895	1,276
6,3 / 20	0,986	0,723	0,392	0,946	0,957	0,845
4 / 6,3	0,958	1,263	0,891	0,772	0,561	0,604
1 / 6,3	0,662	0,670	0,434	0,539	0,427	0,755
0,08 / 0,5	0,347	1,421	1,260	0,396	2,748	0,687
Moyennes	0,812	0,876	0,672	0,692	0,815	0,739

➤ comparé aux deux autres matériaux, le concassé tendre se caractérise par de très faibles valeurs de compacité après versement, et par un supplément de compacité marqué lorsqu'on passe de la vibration sous 1 kPa à la vibration sous 10 kPa (fig. 4). Ce dernier phénomène peut s'expliquer par une attrition relativement importante, qui rendrait le mode opératoire « vibration sous 10 kPa » impropre à ce type de matériaux ;

➤ si l'on compare les valeurs obtenues par les deux modes opératoires sous 10 kPa, en excluant les concassés tendres – pour lesquels, d'après la remarque précédente, l'essai de référence ne s'applique pas – et le sable concassé dur, dont la richesse en fines (27 %) le place en dehors de l'épuration, on obtient un écart moyen de 0,69 % (en valeur absolue), de 0,12 % (en valeur algébrique), et un coefficient de corrélation de 0,9964 (fig. 5) : en d'autres termes, les résultats de ces deux essais ne sont pas significativement différents.

Examinons à présent le tableau des écarts-types (cf. tableau VII). On y voit que les différents essais donnent, somme toute, des écarts-types peu différents, les plus faibles étant cependant ceux reposant sur l'usage de la table à secousses (la différence étant cependant peu significative d'un point de vue statistique). Comme on pouvait s'y attendre, l'écart-type augmente quand le nombre de particules testées diminue, ou quand la dimension moyenne des grains augmente. Dans la figure 6, on a fait figurer la moyenne des valeurs obtenues pour une coupure donnée des différentes natures de granulats, en fonction du rapport entre le diamètre moyen des coupures et la racine cubique de la masse

de l'échantillon. En effet, rappelons que des récipients de taille différente ont été utilisés pour les sables et les gravillons. La racine cubique de la masse est donc à peu près proportionnelle à une dimension moyenne de l'échantillon (aux écarts près de densité absolue). Le rapport calculé varie donc de façon inverse avec le nombre de particules. On voit qu'il existe une relation grossièrement affine entre ces grandeurs.

À ce stade, il semble qu'on puisse substituer l'essai utilisé jusqu'alors (vibration sous 10 kPa) par l'essai à la table à secousses, sous la même contrainte verticale, sans différence significative en valeur moyenne (par rapport à la précision des modèles dans lesquels on injectera ces données), et avec un écart-type de répétabilité du même ordre de grandeur.

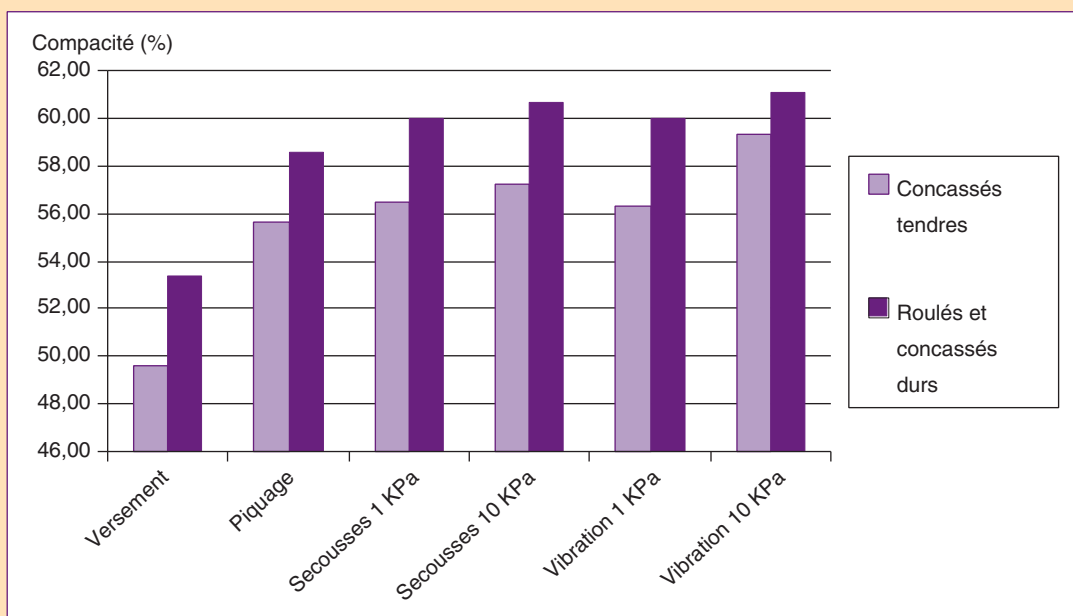


Fig. 4 - Valeurs moyennes de compacité pour tous les matériaux selon les différents modes opératoires, en distinguant les matériaux tendres des autres matériaux.

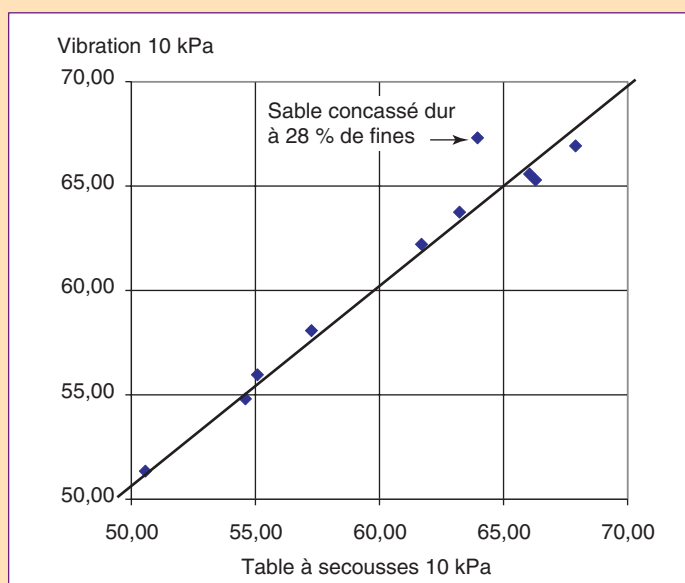


Fig. 5 - Comparaison entre compacité mesurée sous vibration et compression à 10 kPa et compacité mesurée à la table à chocs (sous 10 kPa), pour les matériaux durs (roulés et concassés durs).

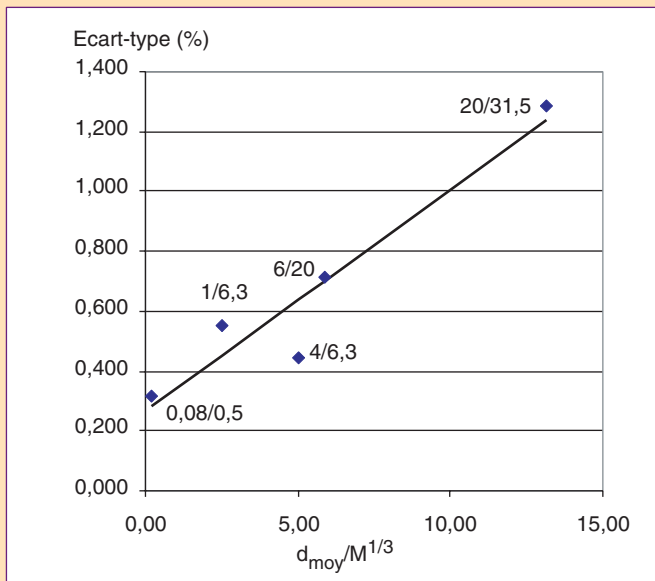


Fig. 6 - Relation entre l'écart-type sur la compacité et le rapport dimension moyenne des grains/racine cubique de la masse de l'échantillon, pour le mode opératoire table à chocs sous 10 kPa.

Essais complémentaires visant à mettre en évidence un effet de taille d'échantillon

Au début de la campagne précédente, le choix avait été fait de travailler sur des échantillons de taille différente, selon qu'il s'agissait de matériaux de dimension inférieure ou supérieure à 6,3 mm. Ce choix était dicté par des considérations d'économie en matériau, et tenait compte du fait que le volume représentatif d'un matériau granulaire dépend de la taille maximale des grains. Encore fallait-il vérifier que les valeurs obtenues avec les deux types d'éprouvettes, pour un même matériau, étaient sensiblement égales. Un programme d'essai complémentaire, décrit dans le tableau VIII, a donc été lancé, avec les mêmes matériaux que précédemment mais en prenant la précaution de définir les sables par lavage à l'eau sur un tamis de 80 μm . Le tableau IX précise les granulométries des sables ainsi lavés. Les mélanges n^{os} 1, 2, 5, 8, 9 et 12 ont fait l'objet d'essais de compacité à la table à chocs sous 10 kPa, successivement dans le petit (échantillon d'1 kg) et dans le grand cylindre (échantillon de 7 kg), chaque essai étant répété. La figure 7 montre qu'il existe un effet systématique de la taille de l'échantillon, bien que la contrainte verticale et les sollicitations soient identiques. Les points expérimentaux s'alignent sur la droite correspondant à la relation :

$$c_{PC} = 1,040 c_{GC} - 0,0148 \quad (2)$$

où c_{PC} et c_{GC} sont les compacités obtenues avec le petit et le grand cylindre, respectivement. Cette relation empirique n'est peut-être pas universelle (de telles mesures n'ont notamment pas été faites avec le sable roulé), mais permet de mettre en évidence un effet de taille d'échantillon sur la compacité. Cet effet est peut-être lié à l'élancement des échantillons, la petite éprouvette étant moins élancée, et donc moins susceptible d'être le siège de voûtes de sable s'opposant à la descente du piston.

Il est à noter que cet effet ne peut être assimilé à un effet de paroi au sens de la théorie de Caquot [9] ou de Ben-Aïm [10] (c'est-à-dire à une diminution de compacité due aux parois de l'échantillon, au voisinage desquelles le volume des cavités interstitielles est plus important qu'en pleine masse du matériau). En effet, dans ce cas, la compacité sur grand cylindre serait supérieure...

On déduit de ces quelques essais la nécessité de travailler avec une taille unique d'échantillons, c'est-à-dire avec la grande taille (correspondant à un échantillon de 7 kg), même pour les sables.

TABLEAU VIII
Mélanges utilisés dans les essais complémentaires.
Les sables avaient été préalablement débarrassés de leurs fines

Type de granulat	Numéro du mélange	Essai petit cylindre	Essai grand cylindre	0,08/0,5	1/6,3	4/6,3	6,3/20	20/31,5
Concassé dur (gneiss)	1	X	X	100				
	2	X	X		100			
	3		X				100	
	4		X					100
	5	X	X	43	57			
	6		X	38	22		40	
	7		X	33	25		8	34
Concassé tendre (calcaire)	8	X	X	100				
	9	X	X		100			
	10		X			100		
	11		X				100	
	12	X	X	45	9	46		
	13		X	36	20		44	

TABLEAU IX
Granulométrie des sables après lavage à l'eau sur tamis de 80 µm

d (mm)	Concassé dur lavé 0,080/0,5	Concassé tendre lavé 0,080/0,5
0,063	0	0
0,08	4	1,7
0,2	45	42,4
0,315	71,2	74,5
0,5	99	99,7
1	100	100

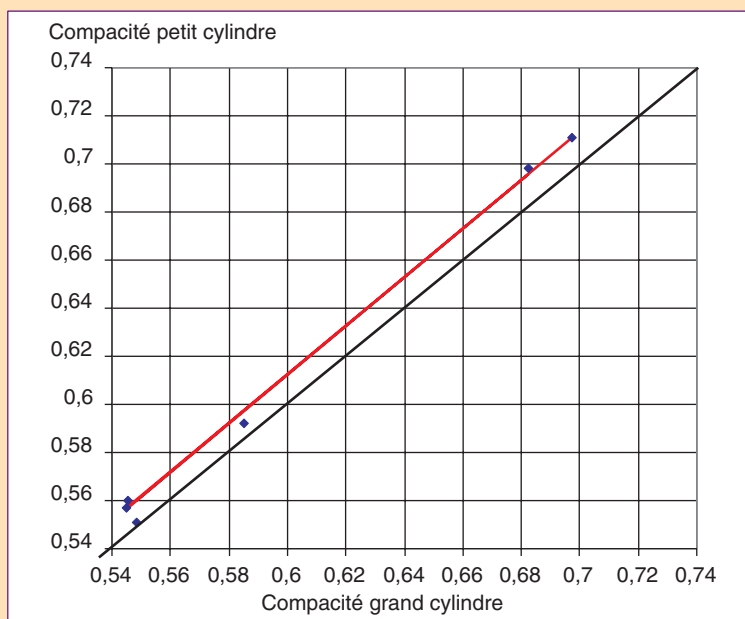


Fig. 7 - Comparaison entre essais sur petit et sur grand cylindres, pour les mélanges décrits dans le tableau VIII dont la taille maximale des grains est inférieure ou égale à 6,3 mm. Les abscisses et les ordonnées sont les valeurs moyennes de deux essais de compacité. Mode opératoire : table à chocs sous 10 kPa.

Choix du nombre de répétitions de l'essai

Compte-tenu de la précision du MEC, on se fixera comme objectif de l'essai la détermination de la valeur moyenne de la compacité avec un intervalle de confiance à 90 % i_c égal à 1 %. D'après les lois de la statistique, on a :

$$i_c \geq \frac{1,65 s}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

où s est l'estimation de l'écart-type, et n le nombre de répétitions de l'essai. On a vu précédemment qu'il existait une relation entre l'écart-type s sur la compacité et le rapport dimension moyenne des grains/racine-cubique de la masse (*cf.* figure 6), que l'on peut décrire par la relation empirique suivante :

$$s = 0,0738 \frac{\sqrt{d D}}{\sqrt[3]{m}} + 0,267$$

où s est l'écart-type (en pour-cent), d et D les tailles minimales et maximales de l'échantillon (en mm) et m la masse de l'échantillon (en kg). Le nombre de répétitions doit donc satisfaire la relation suivante :

$$n \geq \left(\frac{1,65 \left(0,0738 \frac{\sqrt{d D}}{\sqrt[3]{m}} + 0,267 \right)}{i_c} \right)^2 \quad (4)$$

soit finalement :

$$n \geq \left(\frac{0,122 \frac{\sqrt{d D}}{\sqrt[3]{m}} + 0,441}{i_c} \right)^2 \quad (5)$$

avec $i_c = 1$.

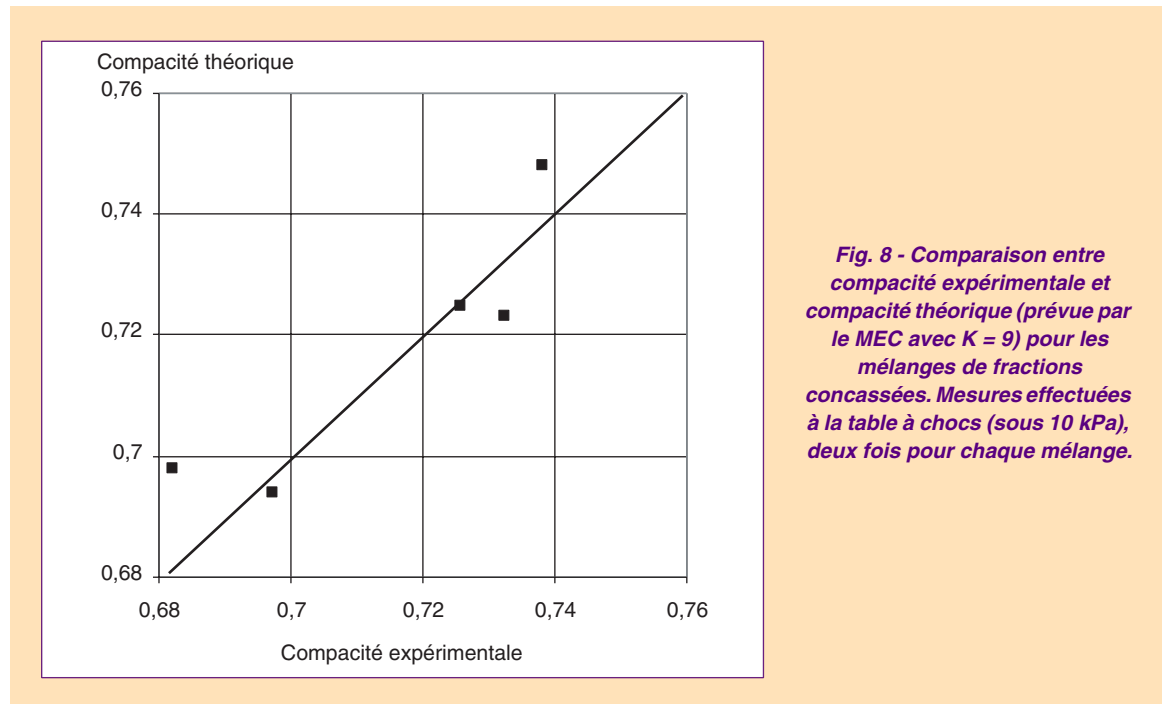
Le tableau X montre l'application de cette formule à quelques cas courants. On voit que pour les sables, un seul essai serait théoriquement suffisant. Cependant, il paraît sage de prescrire un minimum de deux essais, afin de limiter le risque de valeur aberrante (la comparaison des deux valeurs permet en effet de détecter facilement une erreur de manipulation). Selon ces calculs, deux réalisations seraient suffisantes dans la plupart des cas de granulats à béton courants ($D \leq 25$ mm). L'utilisation de granularités plus grossières entraînerait par contre une multiplication du nombre d'essais de compacité, en plus de la nécessaire correction d'effet de paroi [9, 10].

TABLEAU X
Nombre d'essais à réaliser selon les coupures granulaires n

Coupures	d (mm)	D (mm)	d moyen (mm)	$n \geq$	n
0/5	0,08	5	0,63	0,2	
5/10	5	10	7,07	0,8	
10/20	10	20	14,14	1,8	2
5/25	5	25	11,18	1,3	
10/25	10	25	15,81	2,1	
20/31,5	20	31,5	25,10	4,2	5

Vérification de la valeur de l'indice de serrage relative à l'essai choisi

Le nouvel essai différant peu en termes de résultats de l'ancien essai (sous vibration), l'indice de serrage précédemment déterminé doit rester valable. Pour vérifier ce pronostic, on a appliqué le MEC aux combinaisons de fractions élémentaires testées dans la deuxième campagne (n° 5-6-7-12-13 dans le tableau VIII). La comparaison entre valeurs théoriques et expérimentales est présentée sur la figure 8. L'erreur moyenne en valeur absolue (0,77 %) est comparable à l'erreur habituelle du modèle [5]. Par ailleurs, l'erreur moyenne en valeur algébrique n'est que de 0,25 %, ce qui montre que le modèle est bien calibré, et la valeur $K = 9$ acceptable.



Conclusion

La recherche relatée dans cet article avait pour but de développer un mode opératoire de mesure de la compacité des fractions granulaires. Le matériel devait être simple, peu coûteux, si possible sans alimentation électrique, et ayant des chances de présenter une reproductibilité acceptable. Il devait également fournir un résultat utilisable dans les nouvelles approches d'optimisation de la granularité des matériaux de génie civil.

Des simulations préliminaires ont d'abord montré qu'il était inutile de séparer les coupures commerciales de sable 0/D en sous-classe d'étendue granulaire limitée. Il suffit en fait de laver les sables pour les débarrasser de leurs fines, puis de caractériser le matériau lavé d'une part, et les fines d'autre part (si leur pourcentage dans le mélange à formuler est significatif).

Concernant le choix du mode opératoire de compacité, un important programme expérimental a été entrepris, afin de comparer six modes opératoires appliqués à un total de 16 coupures granulaires (sables et gravillons) issus de trois sources. L'essai sélectionné consiste finalement à mesurer le volume d'une masse de 7 kg de granulats, mise en place dans un cylindre en trois couches, chaque couche étant soumise à une série de chocs, la dernière étant en plus comprimée par un piston exerçant une pression de 10 kPa. Cet essai serait exécuté deux fois pour les coupures granulaires courantes, la valeur moyenne étant retenue comme compacité de la fraction granulaire. Par rapport au mode opératoire initialement utilisé au LCPC (compression + vibration sous 10 kPa), la répétabilité obtenue est du même ordre de grandeur, mais la reproductibilité sera probablement meilleure, compte tenu de l'absence de dispositif vibrant nécessitant une vérification fréquente. Un mode opératoire LCPC est en cours de finalisation. Des essais croisés inter-laboratoires pourraient être organisés afin d'évaluer la reproductibilité de ce nouvel essai.

Le niveau de compactage obtenu dans cet essai est comparable à celui rencontré dans l'essai précédent (dans lequel les échantillons étaient vibrés). Du point de vue de la physique des milieux granulaires, les expériences relatées dans cet article ont confirmé la capacité du modèle d'empilement compressible (MEC) à prévoir la compacité de mélanges *secs* à partir de la connaissance de celle des fractions granulaires élémentaires. Cependant, une limitation du modèle dans sa forme actuelle est apparue : le niveau de serrage de l'essai choisi doit être important, sans quoi l'autocohérence du modèle n'est plus assurée, au sens où les valeurs de compacité virtuelle dépendront de l'essai. On doit donc proscrire la caractérisation de la compacité des granulats par des méthodes telles que le simple versement ou le piquage manuel, en particulier si les mesures sont destinées à alimenter des modèles de prévision des caractéristiques du béton à l'état frais (grandeurs rhéologiques) ou durci (propriétés mécaniques), du type de ceux proposés dans la référence [5].

Remerciements. Les auteurs remercient Yannick Descantes (ingénieur à la section des Granulats du LCPC) et André Lecomte (maître de conférences à l'université de Nancy) pour leurs précieux conseils, ainsi que l'équipe des techniciens de la même section pour le très important travail expérimental entrepris à l'occasion de cette recherche.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] JONES M.R., ZHENG L., NEWLANDS M.D., Comparison of particle packing models for proportioning concrete constituents for minimum voids ratio, *Materials and structures*, Vol. **35**, June **2002**, pp. 301-309.
- [2] JOHANSEN V., ANDERSEN P.J., Particle Packing and Concrete Properties, *Materials Science of Concrete II*, édité par J. Skalny et S. Mindess, The American Ceramic Society, Westerville, OH, **1991**, pp. 111-148.
- [3] de LARRARD F., *Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances*, Thèse de Doctorat de l'École nationale des ponts et chaussées, Rapport de Recherche des LPC **149**, mars **1988**.
- [4] de LARRARD F., SEDRAN Th., ANGOT D., Prévision de la compacité des mélanges granulaires par le modèle de suspension solide. I : Fondements théoriques et calibration du modèle, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **194**, novembre-décembre **1994**.
- [5] de LARRARD F., *Structures granulaires et formulation des bétons*, traduit de l'anglais par A. Lecomte, Études et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, **OA 34**, avril 2000, 414 pages.
- [6] SEDRAN Th., de LARRARD F., *RENé-LCPC - Logiciel d'optimisation granulaire*, LCPC Division BCOA, juin **1994**.
- [7] SEDRAN Th., de LARRARD F., *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 **2000**.
- [8] LECOMTE A., MECHLING J.-M., Compacité des mélanges et propriétés des grains, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **220**, mars-avril **1998**, pp. 21-34.
- [9] CAQUOT A., *Le rôle des matériaux inertes dans le béton*, Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils de France, pp. 562-582, juillet-août **1937**.
- [10] BEN AIM R., *Étude de la texture des empilements de grains. Application à la détermination de la perméabilité des mélanges binaires en régime moléculaire, intermédiaire, laminaire* Thèse d'État de l'université de Nancy, **1970**.
- [11] SEDRAN Th., *Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants*, Thèse de doctorat de l'ENPC, mars **1999**, 220 pages.