

Amélioration de l'essai d'écoulement des sables

Yannick DESCANTES

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Alain DEVILLERS

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Rouen

Note

technique

RÉSUMÉ

Cette étude a pour objectifs de comprendre les causes des défauts de fidélité de l'essai d'écoulement des sables de fraction granulaire 0,08/2 mm, défini par les normes française NF P 18-564 et européenne NF EN 933-6, et de proposer une solution économique et efficace pour l'améliorer.

Elle montre que 90 % de la variance interlaboratoire, responsable de la mauvaise fidélité de l'essai, peut s'expliquer par l'incertitude liée à l'introduction de l'échantillon de sable dans l'angulomètre par l'opérateur. Pour tenter de diminuer cette incertitude, un alimentateur prototype a été conçu et évalué. Les résultats des essais réalisés ont montré que la présence de l'alimentateur réduisait à quantité négligeable cette incertitude. Ainsi, en utilisant l'alimentateur prototype réalisé par le CECP de Rouen, il semble que la reproductibilité de l'essai d'écoulement des sables puisse être divisée par trois. Ce résultat, qui répond bien aux exigences des catégories spécifiées dans les normes produits française (XP P 18-540) et européenne (NF EN 13043), devra faire l'objet d'une validation dans le cadre d'une campagne d'essais interlaboratoires.

DOMAINE : Route.

ABSTRACT

IMPROVEMENT IN THE SAND FLOW TEST

This study's objective is twofold: to gain an understanding of the causes of poor reliability in the sand flow test with a 0.08/2-mm particle size fraction, as set forth in French standards NF P 18-564 and European standards NF EN 933-6; and to propose an economical and efficient solution for improving this reliability.

The study indicates that 90% of inter-laboratory variance, which is responsible for poor testing reliability, can be explained by uncertainty as the operator introduces a sand sample into the flow unit. In seeking to reduce this level of uncertainty, a prototype feeder was designed and then evaluated. Test results showed that the presence of a feeder served to decrease this uncertainty to a negligible amount. By using the prototype feeder developed at the CECP prototype center in Rouen (Normandy), it would seem that reproducibility of the sand flow test may be divided by a factor of three. This finding, which solidly meets category requirements stipulated in both French and European product standards (XP P 18-540 and NF EN 13043, respectively), will be the focus of an upcoming validation effort within the scope of a cross-testing experiments.

FIELD: Roads.

Introduction

L'essai d'écoulement des sables a pour objet la détermination du temps d'écoulement d'un échantillon de sable de classe granulaire 0,08/2 mm ou 0,08/4 mm, à travers un entonnoir d'orifice calibré. Mis au point par Reznak [1974] puis étudié par Garnier et Robert [1979], cet essai simple, rapide et économique fait l'objet de la norme française NF P 18-564 [1990]. Il est essentiellement utilisé pour caractériser le niveau d'élaboration des sables d'origine alluvionnaire employés en technique routière, le temps d'écoulement augmentant avec le niveau d'élaboration. En pratique, l'expérience montre que le temps d'écoulement de la fraction sable est en étroite relation avec la maniabilité et le risque d'orniérage d'un mélange pour matériau hydrocarboné [Conan et Rellier, 2000], ceux-ci étant d'autant plus élevés que le sable s'écoule rapidement.

Récemment, l'essai d'écoulement des sables a été repris par le référentiel normatif européen, puisqu'il fait l'objet de la norme NF EN 933-6 [2002] et est cité comme essai de référence dans la norme produit NF EN 13043 [2003], définissant les caractéristiques des granulats pour mélanges hydrocarbonés.

Pour autant, l'essai d'écoulement des sables pose encore quelques difficultés en terme de fidélité. En effet, si sa répétabilité est excellente, inférieure à la seconde, il n'en est pas de même de sa reproductibilité, les écarts de résultats observés entre laboratoires sur un même sable pouvant atteindre

3 secondes. Or, les intervalles correspondant aux catégories d'écoulement, définies dans la norme produit XP P 18-540 [1997] et intégralement reprises par la norme produit NF EN 13043 qui va lui succéder en juin 2004, ont pour limites les valeurs spécifiées 38 s, 35 s et 30 s. Il en résulte que la reproductibilité de l'essai est difficilement compatible avec la largeur des catégories d'écoulement qui vaut 5 secondes au maximum et peut descendre à 3 secondes.

La présente étude a pour objectifs de comprendre les causes de la mauvaise reproductibilité de l'essai, puis de proposer et d'évaluer une solution visant à l'améliorer. La démarche utilisée comporte trois étapes : tout d'abord, une première campagne d'essais menée en 1998 par des Laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées (LRPC), quelques Laboratoires départementaux et le LCPC a permis d'évaluer la fidélité de l'essai d'écoulement avec un sable connu [Delalande, 1999] ; une seconde campagne d'essais a ensuite été définie et réalisée en 2000, afin d'étudier spécifiquement la composante interlaboratoire de la reproductibilité ; enfin, une dernière campagne d'essais, menée en 2001, a permis d'évaluer l'apport d'un alimentateur prototype disposé sur l'angulomètre.

Évaluation de la fidélité de l'essai

L'évaluation des valeurs de fidélité r et R de l'essai d'écoulement des sables à l'angulomètre a été effectuée conformément à la méthode définie dans la norme NF ISO 5725 [1994]. Il s'agit seulement d'une évaluation et pas d'une campagne d'essais croisés, notamment dans la mesure où un seul niveau de temps d'écoulement a été considéré et où la détermination de l'incertitude de préparation des échantillons n'a pas été effectuée.

Procédure expérimentale

Dix-sept laboratoires équipés d'angulomètres à sable ont été impliqués. Les essais ont exclusivement porté sur le sable de référence (sable B), un 0/2 siliceux de baie de Somme, élaboré en sole tournante dans une exploitation de l'entreprise Chatelet SA, située sur la commune de « Le Hourdel » (80). Le LRPC de Rouen, qui a constitué un stock conservatoire de ce sable, en a expédié un échantillon de 1 kg à chaque laboratoire. Les laboratoires ont chacun réalisé 3 essais d'écoulement avec l'orifice de diamètre 12 mm de leur angulomètre, un résultat d'essai étant la moyenne de 5 déterminations. Au préalable, le LRPC de Rouen a contrôlé l'homogénéité de son stock conservatoire, en prélevant 20 échantillons de 1 kg et en procédant également à 3 essais par échantillon.

Résultats obtenus

Les résultats des essais sont rassemblés dans les tableaux I et II. Le tableau I présente les résultats des dix-sept laboratoires (moyennes et écarts-types). Le tableau II donne les résultats des essais d'homogénéité (moyennes et écarts-types).

Calcul des valeurs de fidélité et interprétation

Les calculs, opérés à l'aide des formules mathématiques de la norme NF ISO 5725 [1994] appliquées aux résultats des tableaux I et II, conduisent aux valeurs indiquées dans la seconde colonne du tableau III. La variance de reproductibilité s^2 (reproductibilité) est la somme des variances intra-laboratoires s^2 (répétabilité), d'échantillon s^2 (échantillon) et interlaboratoires s^2 (interlaboratoires). La variance d'échantillon, déterminée à l'aide des seuls résultats du tableau II, est estimée par la différence entre la variance globale des résultats des essais d'homogénéité et la variance intra-laboratoire du LRPC de Rouen. Les hypothèses relatives à la normalité des variables du modèle statistique utilisé pour les calculs, à l'homogénéité des variances intra-laboratoires et des moyennes des laboratoires, ont respectivement été validées à l'aide des tests de Shapiro-Wilk, de Cochran et de Grubbs. La normalité de la population de résultats des essais d'homogénéité a été validée à l'aide du test du Khi-deux, car l'effectif dépassait la limite fixée pour appliquer le test de Shapiro-Wilk. À titre de comparaison, la troisième colonne du tableau III donne les valeurs de fidélité citées dans la norme P 18-564, pour un niveau correspondant à un temps d'écoulement de 40 secondes.

TABLEAU I**Résultats d'essais des 17 laboratoires lors de la campagne de 1998 sur le sable B**

Laboratoire	Temps d'écoulement	
	Moyenne (s)	Écart-type(s)
Paris	31,53	0,13
Nantes	31,75	0,07
Aix (C2)	30,63	0,20
Angers	30,25	0,16
Annecy	32,42	0,16
Autun	30,09	0,09
Blois	29,94	0,03
Clermont-Ferrand	29,91	0,05
Lille	30,13	0,01
Lyon	30,69	0,13
Nancy	31,05	0,11
Nice	32,67	0,11
Rouen	30,93	0,02
St Brieuc	32,21	0,23
St Quentin	32,01	0,25
Strasbourg	29,87	0,05
Trappes	31,41	0,10

TABLEAU II**Résultats des essais d'homogénéité du sable B (1998)**

N° Échantillon	Temps d'écoulement	
	Moyenne (s)	Écart-type(s)
1	30,99	0,00
2	30,93	0,00
3	30,99	0,00
4	30,97	0,00
5	30,87	0,00
6	30,95	0,00
7	30,95	0,00
8	30,95	0,00
9	30,96	0,00
10	30,80	0,00
11	30,89	0,00
12	30,81	0,00
13	30,83	0,01
14	30,81	0,00
15	30,97	0,00
16	30,87	0,01
17	30,75	0,00
18	30,95	0,00
19	30,85	0,00
20	31,00	0,00

TABLEAU III
Valeurs de fidélité estimées et valeurs de référence

	Temps (s)	Valeurs de référence (P 18-564) (s)
Écoulement moyen	31,0	40,0
s ² (échantillons)	0,00	-
s ² (répétabilité)	0,02	-
s ² (interlaboratoires)	0,89	-
s ² (reproductibilité)	0,91	-
Répétabilité r	0,4	1,2
Reproductibilité R	2,7	2,9

Les résultats du tableau III montrent clairement que la variance d'échantillon est négligeable, ce qui établit l'excellente homogénéité des échantillons remis aux différents laboratoires, et que la variance intra-laboratoires représente 2,25 % de la variance interlaboratoires. En comparant la deuxième colonne du tableau III avec la troisième, il convient de remarquer que la répétabilité de l'essai (1,2 s) est bien supérieure à l'évaluation résultant des essais de 1998 (0,4 s), cela étant dû aux conditions expérimentales de la campagne de 1998 où un seul sable préparé par un seul laboratoire a été caractérisé. Pour autant, la reproductibilité de l'essai (2,9 s) et l'évaluation résultant des essais de 1998 (2,7 s) sont voisines, ce qui prouve la pertinence de la campagne de 1998 pour mettre en évidence la mauvaise variance interlaboratoires.

Étude de la variance interlaboratoires

En première approximation, la variance interlaboratoires peut être décomposée en deux composantes, la variance d'échantillons étant négligée à la lumière des calculs qui précèdent :

- une composante « matériel », les angulomètres des différents laboratoires pouvant, notamment, présenter des différences géométriques et/ou de constituants,
- une composante « opérateur », puisque ce dernier intervient aux stades de l'introduction de l'échantillon dans l'angulomètre, de l'ouverture de la trappe d'écoulement et de déclenchement/arrêt du chronomètre.

Cette seconde étude a eu pour objet d'estimer ces deux composantes.

Procédure expérimentale

Seize laboratoires ont expédié leur angulomètre à sable au LRPC de Rouen, où un même opérateur a réalisé un essai unique sur chacun des 17 angulomètres mis à sa disposition. En effet, il n'a pas été jugé nécessaire de répéter l'essai, compte tenu du caractère négligeable des variances d'échantillons et intra-laboratoires par rapport à la variance interlaboratoires. Les 17 échantillons qui ont servi à ces essais, un pour chaque angulomètre, étaient réputés identiques à ceux de la précédente campagne. De surcroît, ils ont été préparés par recombinaison selon les indications données dans le tableau IV, afin qu'ils aient tous la même granularité.

Résultats obtenus

Le tableau V rassemble les résultats des essais. Pour chacun des appareils testés, dont le laboratoire d'appartenance est cité dans la première colonne, la seconde colonne donne le résultat de l'essai réalisé. Les deux dernières lignes de ce tableau déterminent la moyenne et la variance de tous ces résultats.

TABLEAU IV
Granularité de recombinaison des échantillons de la campagne de 2000

Tamis	2 mm	1 mm	0,5 mm	0,315 mm	0,250 mm	0,200 mm	0,100 mm
Sable B (%)	100	73	46	33		22	4

TABLEAU V
Résultats d'essais de la campagne 2000 sur le sable B

Anglomètre	Essai 1 (s)
Nantes	30,16
Aix (C2)	30,76
Aix (F1)	29,60
Angers	30,28
Autun	29,96
Blois	30,40
Clermont-Ferrand	29,94
Lille	30,26
Lyon	30,74
Nancy	30,00
Nice	30,46
Rouen	30,46
St Brieuc	30,56
St Quentin	29,98
Strasbourg	29,98
Trappes	30,10
Toulouse	30,32
Moyenne	30,23
Variance	0,09

Calcul de la composante « matériel »

Les calculs, opérés à partir des résultats du tableau V, conduisent aux valeurs indiquées dans la troisième colonne du tableau VI, intitulé de l'année de la campagne d'essais [2000]. Pour les besoins des calculs, la deuxième colonne du tableau rappelle les résultats des calculs relatifs à la campagne d'essais 1998. La variance globale s^2 (globale) est la variance des résultats des essais figurant dans le tableau V. En admettant l'absence d'interaction entre facteurs, cette variance se réduit à la somme de la variance de répétabilité propre au LRPC de Rouen, estimée lors des essais d'homogénéité de 1998, et de la composante « matériel », ce qui donne une estimation de la composante « matériel » par différence. De même, la composante « opérateur » est estimée en soustrayant à la variance inter-laboratoires estimée en 1998 la composante « matériel » qui vient d'être estimée. Comme précédemment, les hypothèses relatives à la normalité des variables du modèle statistique utilisé pour les calculs ainsi qu'à l'absence de résultat aberrant ont respectivement été validées à l'aide des tests de Shapiro-Wilk et de Grubbs.

Les résultats du tableau VI montrent tout d'abord que le temps d'écoulement moyen obtenu par l'opérateur du LRPC de Rouen s'écarte légèrement du temps d'écoulement moyen de la campagne d'essais inter-laboratoires de 1998. Ce léger écart est vraisemblablement imputable à la préparation

TABLEAU VI
Résultats des calculs (campagne 2000)

	Temps (s)	
	1998	2000
Écoulement moyen	31,0	30,2
s ² (échantillons)	0,00	0,00
s ² (répétabilité)	0,02	0,00
s ² (interlaboratoires)	0,89	-
s ² (matériel)	0,08	0,08
s ² (opérateur)	0,80	-
s ² (reproductibilité/globale)	0,91	0,09
Répétabilité r	0,4	-
Reproductibilité R	2,7	-
R hors composante opérateur	-	0,8

des échantillons de la campagne 2000, ceux-ci ayant été recomposés par tamisage selon une courbe granulométrique différente de celle des échantillons de 1998 (non recomposés). Ensuite, il apparaît clairement que la composante « matériel » représente environ 10 % de la variance inter-laboratoires déterminée en 1998, tandis que les 90 % restants sont représentés par la composante « opérateur ». Cette conclusion montre que les angulomètres des différents laboratoires se ressemblent beaucoup, ce qui est rassurant pour le Centre d'études et de construction de prototypes (CECP) de Rouen qui les fabrique. Il en résulte qu'en éliminant la composante « opérateur », la valeur de reproductibilité serait théoriquement abaissée autour de 0,8 s, ce qui reviendrait à la diviser environ par trois.

Définition et évaluation d'un alimentateur

Pour tenter de réduire la composante « opérateur », les stades d'intervention de l'opérateur au cours de l'essai ont été étudiés. Outre la préparation de l'échantillon, ce dernier doit l'introduire dans l'angulomètre, ouvrir la trappe d'écoulement en même temps qu'il déclenche le chronomètre et, enfin, arrêter le chronomètre à la fin de l'écoulement. Certes, le déclenchement et l'arrêt du chronomètre pourraient être automatisés, mais un accroissement sensible du coût de l'appareil en découlerait pour un bénéfice incertain. En revanche, il est généralement admis que le mode d'introduction de l'échantillon dans l'angulomètre, qui induit un compactage plus ou moins important, influence la mesure du temps d'écoulement. Cette problématique proche de celle des écoulements en trémie et silos a fait l'objet de quantité d'études par les spécialistes des granulaires [Azanza et Chevoir, 1995]. Par conséquent, un alimentateur prototype a été conçu par le LRPC de Rouen et sa réalisation confiée au CECP de Rouen. Cet alimentateur est représenté sur la figure 1, monté sur un angulomètre à sable. Il est constitué d'un cylindre ouvert à l'extrémité supérieure et perforé à l'extrémité inférieure, ce trou étant obstrué par un piston. Une fois l'échantillon introduit dans le cylindre, le piston est tiré vers le haut, de sorte que le sable s'écoule dans l'angulomètre par l'espace situé entre le cylindre et le piston. Une ultime campagne d'essais a alors été lancée.

Procédure expérimentale

Trois sables de classe granulaire 0/2 connus pour avoir des temps d'écoulement différents ont été testés, le premier (sable A) correspondant à un alluvionnaire de Seine provenant du site de « la Sif » à Ambourville (76), le second étant le sable B, enfin, le troisième, (sable C) correspondant à un éruptif provenant de la carrière de Roupperoux (61). Pour chaque sable, 10 échantillons réputés identiques ont été préparés par le LRPC de Rouen, par recombinaison suivant une granularité définie dans le tableau VII. Dix agents du LRPC de Rouen, dont certains n'avaient jamais pratiqué d'essais

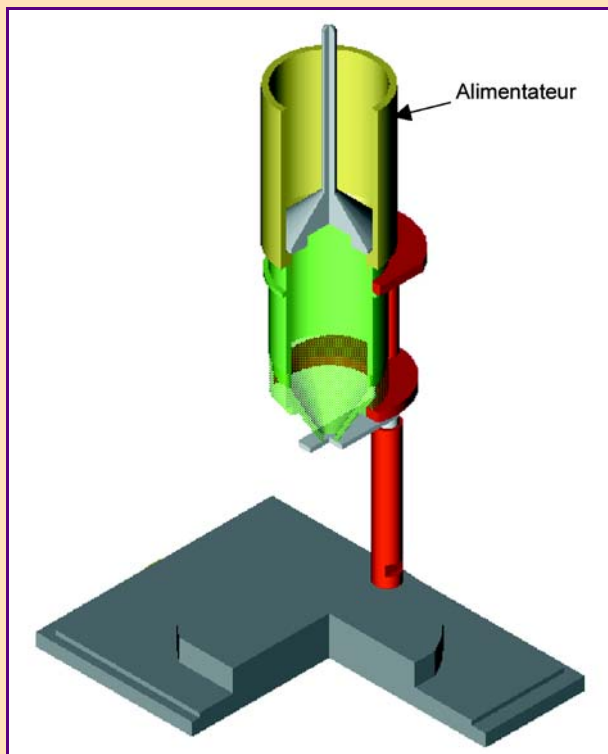


Fig. 1 - Schéma de l'angulomètre à sable muni de l'alimentateur prototype.

d'écoulement, ont chacun reçu un échantillon des trois sables et ont réalisé à tour de rôle un essai d'écoulement par échantillon avec l'angulomètre du LRPC. Ensuite, 3 des 10 échantillons de chaque sable ont été lavés, séchés, puis expédiés avec l'alimentateur prototype au LCPC, qui a chargé trois agents, dont un ne connaissait pas l'essai, de procéder comme le LRPC de Rouen sur l'angulomètre du LCPC muni de l'alimentateur.

Résultats des essais

Le tableau VIII rend compte des résultats des essais réalisés au LRPC de Rouen. Pour chaque opérateur référencé dans la première colonne du tableau, les trois colonnes suivantes indiquent le temps d'écoulement obtenu avec chaque sable. Les trois dernières lignes de ce tableau estiment les valeurs des moyenne, variance et écart-type caractérisant chaque sable, tous opérateurs confondus.

Le tableau IX contient les écarts absolus observés entre les résultats du LRPC de Rouen et ceux du LCPC sur les mêmes échantillons. Ces écarts sont fournis pour les trois sables considérés, chaque sable correspondant à une colonne. À titre de comparaison, les écarts absolus observés entre les résultats de ces mêmes laboratoires en 1998, certes sur des échantillons différents cette fois, sont rappelés dans les dernières lignes de ce tableau.

Interprétation des résultats

Pour chaque sable, les estimations de la moyenne et de la variance globale des résultats du tableau VIII sont rassemblées dans les trois dernières colonnes intitulées « 2001 » du tableau X, où les résultats des calculs opérés à l'issue des campagnes de 1998 et de 2000 sont également rappelés. Trois remarques s'imposent : tout d'abord, le temps d'écoulement moyen du sable B est supérieur d'une seconde et demi en moyenne aux valeurs qu'il avait lors des deux campagnes précédentes ; ensuite, les variances globales relatives à chaque sable sont pratiquement égales à la variance globale observée sur le sable B lors de la campagne 2000, avec toutefois un léger phénomène de décroissance à mesure que le temps d'écoulement augmente ; enfin, le caractère discriminant de l'essai n'est pas perturbé par la présence de l'alimentateur, ces variances étant très inférieures à l'écart entre les temps d'écoulement moyens de deux sables quelconques. Il résulte de ces observa-

TABLEAU VII
Granularité de recomposition des échantillons de la campagne de 2001

Tamis	2 mm	1 mm	0,5 mm	0,315 mm	0,250 mm	0,200 mm	0,100 mm	0,08 mm
Sable A (%)	100	79	55,7		27,1			0
Sable B (%)	100	73	46	33		22	4	0
Sable C (%)	100	45,5	23,6		12,7			0

TABLEAU VIII
Résultats de la campagne 2001 sur 3 sables (A, B et C)

Opérateur	Sable A (s)	Sable B (s)	Sable C (s)
1	27,54	31,80	45,18
2	28,02	32,54	44,86
3	27,44	31,88	44,90
4	27,58	32,42	44,82
5	28,38	32,24	44,74
6	28,48	31,92	45,06
7	27,82	31,90	45,10
8	27,80	32,24	45,08
9	27,78	32,04	44,90
10	28,26	31,88	45,16
Moyenne	27,91	32,09	44,98
Variance	0,13	0,07	0,02
Écart-type	0,36	0,26	0,15

TABLEAU IX
Différences absolues des résultats des laboratoires de Rouen et Nantes lors de la campagne de 2001

	Temps d'écoulement Rouen - Nantes (s)		
	Sable A (s)	Sable B (s)	Sable C (s)
Campagne 2001	0,12	0,27	0,77
	0,63	0,23	0,43
	0,67	0,76	0,83
Campagne 1998	-	0,79	-
	-	0,75	-
	-	0,92	-

tions que le mode d'introduction de l'échantillon dans l'angulomètre influence fortement le temps d'écoulement, au point que la mise en place de l'alimentateur semble avoir éliminé l'effet « opérateur ».

L'examen des résultats du tableau IX permet de vérifier que l'introduction de l'alimentateur prototype réduit considérablement les écarts entre les résultats délivrés par deux appareils différents sur les mêmes échantillons. Ces écarts sont inférieurs ou égaux à l'estimation de la reproductibilité hors composante « opérateur ».

TABLEAU X
Synthèse des résultats des calculs

	1998	2000	2001		
	Lot B (s)	Lot B (s)	Lot A (s)	Lot B (s)	Lot C (s)
Temps moyen	31,0	30,2	27,9	32,1	45,0
s ² (échantillons)	0,00	0,00	-	-	-
s ² (répétabilité)	0,02	0,00	-	-	-
s ² (interlaboratoires)	0,89	-	-	-	-
s ² (matériel)	-	0,08	-	-	-
s ² (opérateur)	0,80	-	-	-	-
s ² (reproductibilité/globale)	0,91	0,09	0,13	0,07	0,02
Répétabilité r	0,4	-	-	-	-
Reproductibilité R	2,7	-	-	-	-
R hors composante opérateur	-	0,8	-	-	-

Conclusion et perspectives

La présente étude visait à comprendre les causes de la mauvaise reproductibilité de l'essai d'écoulement des sables de classe granulaire 0,08/2 mm, puis à proposer et à évaluer une solution économique visant à l'améliorer. La démarche utilisée a montré que 90 % de la variance interlaboratoire pouvait s'expliquer par l'incertitude liée à l'introduction par l'opérateur de l'échantillon de sable dans l'angulomètre. Pour tenter de diminuer cette incertitude, un alimentateur prototype a été conçu et évalué. Les résultats des essais réalisés ont montré que la présence de l'alimentateur réduisait à une quantité négligeable cette incertitude.

Ainsi, en utilisant l'alimentateur prototype réalisé par le CECP de Rouen, il semble que la reproductibilité de l'essai d'écoulement des sables puisse être divisée par 3 pour atteindre 0,8 s. Ce résultat, qui répond bien aux exigences des catégories spécifiées dans les normes produits française (XP P 18-540) et européenne (NF EN 13043), est cependant à prendre avec réserve. En effet, seule la réalisation d'une véritable campagne d'essais croisés, impliquant au moins huit laboratoires dotés d'angulomètres munis d'un alimentateur et portant sur plusieurs sables de propriétés d'écoulement différentes, pourra quantifier avec précision l'amélioration réellement apportée par l'alimentateur sur la reproductibilité de l'essai.

***Remerciements.** Les auteurs remercient l'ensemble des participants aux différentes campagnes d'essais menées dans le cadre de cette étude, le CECP de Rouen pour la réalisation de l'alimentateur et, tout particulièrement, les agents des équipes granulats du LRPC de Rouen et du LCPC.*

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AFNOR NF EN 13043, *Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, aérodromes et d'autres zones de circulation*, **2003**.

AFNOR NF EN 933-6, *Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats*, Partie 6 : Évaluation des caractéristiques de surface – Coefficient d'écoulement des granulats, **2002**.

AFNOR XP P 18-540, *Granulats : Définitions, conformité, spécifications*, **1997**.

AFNOR NF ISO 5725, *Application de la statistique. Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et des méthodes de mesure*, Partie 2 : Méthodes de base pour la détermination de la répétabilité et la reproductibilité d'une méthode de mesure normalisée, **1994**.

AFNOR P 18-564, *Granulats : Détermination du coefficient d'écoulement des sables*, **1990**.

AZANZA E., CHEVOIR F., *Étude expérimentale d'écoulements granulaires*, XII^e congrès français de mécanique. Strasbourg, **1995**.

CONAN J., RELIER V., Essai d'écoulement des sables : expérience du Laboratoire Central Eurovia, *Revue Générale des Routes et Aéroports*, **781**, **2000**, pp. 57-60.

DELALANDE G., XP P 18-564, *Détermination du coefficient d'écoulement des sables : Essais inter-laboratoires pour qualification d'un sable de référence*, rapport interne, **1999**.

GARNIER J., ROBERT J., Détermination de l'angularité des gravillons et des sables, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **104**, **1979**, pp. 67-76.

REZNAK L., Détermination du frottement interne des sables par une méthode viscométrique, *Bulletin de liaison des Laboratoires de Ponts et Chaussées*, **70**, **1974**, pp. 26-28.