

Impact des caractéristiques du sable concassé sur la consistance de MBE

Arnaud Perrot¹, Abdelkerim S. Ahmat¹, Damien Rangeard²

¹ Univ. Bretagne-Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, F-56100 Lorient

² Laboratoire CBTP, Groupe Pigeon, F-35 532 Noyal sur Vilaine

RESUME Cet article traite de l'effet de la variabilité des sables concassés sur la consistance de mortiers de béton équivalent. Deux formulations de bases sont testées : la première correspond au mortier contenu dans un béton de référence, la seconde correspond au mortier de béton équivalent de ce même béton. Pour ces formulations, le seuil de cisaillement est mesuré pour deux teneurs en sables concassés (33% et 66%) et 8 sables de différentes provenances. Le seuil de cisaillement est relié aux caractéristiques de formes des sables ainsi qu'à leur distribution granulométrique. Une méthode permettant de prédire la grande variabilité de consistance observée à partir de ces données géométriques est proposée.

Mots-clefs sable concassé, seuil de cisaillement, classe de consistance, mortier équivalent béton

I. INTRODUCTION

Cette étude part du constat de la raréfaction de la ressource en sables alluvionnaires traditionnellement utilisés dans les bétons ordinaires et hautes performances. Une des solutions est la substitution partielle ou totale de ces sables par des sables concassés issues des carrières exploitant des roches massives. Ces sables concassés présentent un caractère plus variable que les sables roulés avec notamment des teneurs en fines plus importantes. Ainsi, en fonction de la nature géologique de la roche et du matériel de concassage et de tri, la granulométrie, la forme des grains et la minéralogie de ces fines varient fortement d'une carrière à l'autre, voire même au sein d'un même site de production. Dans cette étude, deux formulations de mortier issues d'un béton prêt à l'emploi sont utilisées et une comparaison des propriétés de cette formulation en variant la nature et la proportion des sables concassés a été effectuée. Le but est de comprendre les interactions entre les caractéristiques du sable concassés et les performances du béton à l'état frais afin d'optimiser les niveaux de substitution du sable roulé.

II. Matériaux et méthodes

A. Matériaux de référence et sables concassés testés

L'étude s'articule autour d'une formation de béton ordinaire de référence présentant une substitution d'un tiers du sable roulé par un sable concassé issue d'une carrière. Afin de

faciliter l'étude, magnifier l'effet du sable et limiter les quantités de matériaux testées, il a été décidé de travailler à l'échelle du mortier, à la fois sur le mortier constitutif du béton (en retirant les graviers de la composition – volume de sable 53,5%) et sur le mortier équivalent du béton testé (en remplaçant les graviers par une quantité de sable présentant la même surface spécifique et en préservant le ratio roulé/concassé – volume de sable 57,5%). Le béton contient du ciment CEM IIA 42,5 (dosage 255 kg/m³), des fines calcaires (dosage 55 kg/m³). Le rapport massique eau/ciment est de 0,63 et le rapport gravier/sable est de 1,17. Un superplastifiant sous forme liquide est utilisé à un dosage de 1% par rapport à la masse de ciment.

Des sables concassés référencés de A à D, provenant de quatre carrières ont été testés :. Pour les sables B, C et D, les sables ont été utilisés tels quels et après un procédé de défillarisation. (notés « défi »). Pour le sable D, en plus du sable brut, deux niveaux de défillarisation ont été testés, notés 50% et défi. Au total, 8 sables concassés différents ont donc été testés. Ces sables ont permis de confectionner des mortiers (fraction volumique de sable de 53,5%) et MBE (fraction volumique de sable de 57,5%) avec des taux de substitution du sable roulé par du concassé d'un tiers et de deux tiers. Au total, 32 formulations ont donc été préparées. Pour chaque sable, la distribution granulométrique a été mesurée et a permis l'estimation de la surface spécifique et du coefficient d'uniformité C_u décrivant l'étalement de la courbe granulométrique. Pour chaque sable, une mesure de l'élanement des grains a été réalisée par analyse des dimensions de 100 particules de chaque tranche granulométrique. Connaissant la masse des 100 particules, il a été possible de calculer l'épaisseur moyenne de chacun des grains et donc de calculer un coefficient d'aplatissement moyen. Enfin, la fraction volumique dense (compacité aléatoire) de chaque sable été évaluée par remplissage d'un volume de 2l (remplissage par pluviation).

TABLEAU 1. Récapitulatif des caractéristiques des différents sables

Sable	Données granulométrique					Surface spécifique (m ² /kg)	Forme		Compacité	Cu/ aplatissement
	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	C _u	C _c		L/l Elancement	L/e Aplatissement		
A	0,16	0,35	1,2	7,5	0,64	7,31	1,55	4,01	0,556	1,87
B	0,08	0,7	1,65	20,6	3,71	7,69	1,64	6,66	0,575	3,10
B défi	0,2	0,75	1,65	8,3	1,70	4,38	1,64	6,66	0,543	1,24
C	0,145	0,6	1,4	9,7	1,77	5,28	1,57	6,98	0,541	1,38
C défi	0,38	1	1,65	4,3	1,59	3,26	1,57	6,98	0,530	0,62
D	0,04	0,35	1,3	32,5	2,36	10,85	1,51	4,98	0,638	6,53
D 50%	0,07	0,4	1,5	21,4	1,52	7,66	1,51	4,98	0,619	4,30
D défi	0,1	0,63	1,6	16,0	2,48	4,46	1,51	4,98	0,593	3,21
Roulé	0,25	0,42	0,9	3,6	0,78	4,42	1,1	1,4	0,565	2,57

B. Mélanges de sable

En plus des 9 sables testés (le sable roulé et les 8 sables concassées), 16 mélanges de sable ont été réalisés entre le sable roulé et les 8 sables concassés en les mélangeant dans des proportions 2/3-1/3 et 1/3-2/3. Pour chaque mélange, la compacité et la distribution granulaire ont été mesurées. Une revue de la littérature montre que la compacité d'un mélange granulaire augmente avec l'étalement de la courbe granulométrique et la sphéricité des grains. Un facteur adimensionné mêlant ses deux paramètres permettant de rendre compte de la compacité du

mélange a donc été recherché. Ainsi, la figure 1 montre la bonne corrélation entre le rapport $C_u/A_{\text{aplatissement}}$ et la compacité aléatoire mesurée expérimentalement. Ce paramètre de compacité aléatoire du sable est primordial dans la consistance des mortiers car il impacte directement le seuil de cisaillement de ces matériaux (Mahaut, 2006).

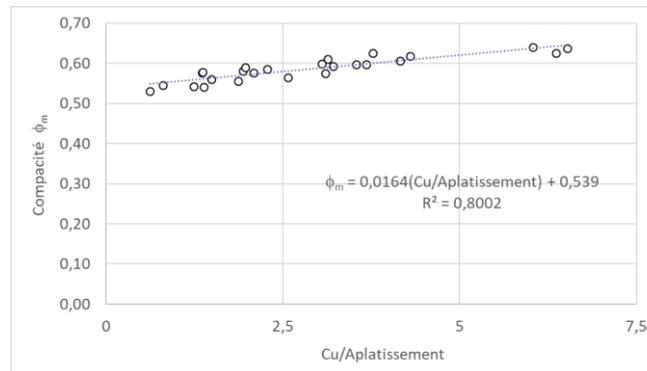


FIGURE 1. Relation entre la compacité aléatoire mesurée des mélanges de sable et le paramètre adimensionné $C_u/A_{\text{aplatissement}}$

III. Consistance des mortiers – évaluation et prédiction

Conventionnellement, l'évaluation de la classe de consistance (de S1 à S5) comme définie dans la norme NF EN 206-1 se fait par mesure de l'affaissement au cône d'Abrams sur les matériaux confectionnés en suivant le protocole de la norme NF-EN 12350-2. Cependant, cet essai de réception de chantier, même s'il est très robuste et très pratique, nécessite des volumes de matériau important et n'est pas suffisamment précis pour décrire le comportement rhéologique des matériaux cimentaires. Un rhéomètre Anton Paar Rheolab QC est donc utilisé pour mesurer le seuil de cisaillement des mortiers et MBE en utilisant une géométrie scissométrique à vitesse constante faible (0,05 tr/min) afin de ne pas avoir d'effets visqueux (Mahaut, 2008). Cette valeur de seuil de cisaillement peut être convertie en valeur d'affaissement en utilisant une des nombreuses formules de passage disponibles dans la littérature. La relation proposée par Roussel sera utilisée dans cette étude (Roussel, 2005). Enfin, une tentative de prédiction de la consistance du mortier à partir des caractéristiques des mélanges de sable a été développée à partir d'une modélisation à double échelle : pâte de ciment et mortier. Dans un premier temps, le modèle YODEL (Flatt, 2004) est utilisé pour prédire le seuil de cisaillement de la pâte de ciment $\tau_{0,pc}$ du mélange à partir de la fraction volumique de ciment contenue dans celle-ci. Cette équation s'écrit :

$$\tau_{0,pc} \cong m \frac{\phi_c^2 (\phi_c - \phi_{perc})}{\phi_{m,c} (\phi_{m,c} - \phi_c)} \quad (1)$$

Avec ϕ la fraction volumique de ciment dans la pâte, $\phi_{m,c}$ la compacité maximale du ciment, ϕ_{perc} la fraction volumique de ciment nécessaire à l'obtention d'un seuil et m un coefficient décrivant les forces d'interactions entre les grains à l'échelle microscopique. Ce modèle est calé expérimentalement sur la pâte de ciment utilisé en mesurant le seuil de cisaillement à différentes fractions volumiques de ciment (ou différentes teneurs en eau). Cette étape permet de connaître le seuil de cisaillement de la pâte de ciment d'un mélange donné en déduisant de la teneur en eau

du mélange (ou la fraction volumique de ciment) la quantité d'eau de mouillage demandée par le sable. Cette valeur est reliée dans notre cas à la surface spécifique de chaque distribution granulométrique. Ensuite, le seuil de cisaillement du mortier testé est calculé en utilisant le modèle de Mahaut (Mahaut, 2008) qui lie cette valeur au seuil de cisaillement de la pâte de ciment et au rapport entre la fraction volumique de sable ϕ et la compacité du mélange granulaire ϕ_m .

$$\tau_0 = \tau_{0,pc} \cdot \sqrt{\frac{1-\phi}{(1-\phi/\phi_m)^{2.5\phi_m}}} \quad (2)$$

La figure 2 présente une très bonne concordance entre les seuils de cisaillement prédits et les seuils mesurés. On peut noter la grande variabilité apportée par le changement du sable sur la consistance des mortiers. Dans tous les cas, la prédiction proposée permet de retrouver la classe de consistance observée du mortier testé.

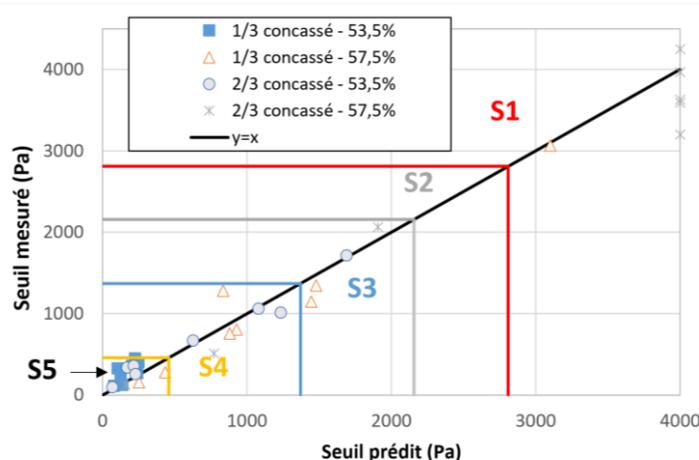


FIGURE 2. Comparaison entre les valeurs prédites et mesurées des seuils de cisaillement des mélanges

IV Conclusions

Cette étude a permis d'observer et d'expliquer les fortes variations de consistances de mortier contenant des sables concassés. Notamment, un outil permettant de prédire l'influence de la proportion et de la nature du sable concassé dans des formulations de mortier à partir des caractéristiques de forme et de la distribution granulométrique des sables a été validé. Il conviendra dans une prochaine étude de valider ce protocole aux bétons en travaillant sur des mélanges granulaires sable / gravier pour se rapprocher des réelles problématiques industrielles.

REFERENCES

- Flatt, R. J., & Bowen, P. (2006). *Journal of the American Ceramic Society*, 89(4), 1244-1256.
- Mahaut, F., Chateau, X., Coussot, P., & Ovarlez, G. (2008) *Journal of Rheology*, 52(1), 287-313.
- Roussel, N., & Coussot, P. (2005). *Journal of rheology*, 49(3), 705-718.