

Nouveau dispositif d'essai de stabilité d'un réseau granulaire

Sandrine BETHMONT

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

Un nouveau dispositif d'essai, développé dans le cadre de l'étude de la stabilité des matériaux cimentaires à l'état frais appliquée à la ségrégation des bétons autoplacants (BAP), est présenté. Il permet d'étudier la réponse d'un ensemble organisé de particules sphériques de même diamètre, immergé dans un fluide à seuil, soumis à un effort de traction provoqué par le déplacement du fluide. La mesure de l'effort devrait conduire à la définition d'un critère de stabilité pour les matériaux cimentaires, dépendant de la rhéologie du fluide suspendant et des caractéristiques du réseau de grosses particules.

DOMAINE : Ouvrages d'art.

ABSTRACT

NEW DEVICE FOR TESTING THE STABILITY OF A GRANULAR LATTICE

A new testing device was developed within the scope of the stability study of fresh cement based materials and especially the segregation of self-compacting concretes (SCC). This device makes it possible to evaluate the response of an organized group of spherical particles, all featuring the same diameter. The lattice is immersed in a yield stress fluid and submitted to a tensile force created by the displacement of the fluid. Measuring the force would lead to establishing a stability criterion specific to cementitious materials, which would depend on both the rheology of the suspending fluid and characteristics of the granular lattice.

FIELD: Structural engineering

CONTEXTE

Les bétons autoplacants permettent, par leur fluidité, une mise en œuvre sans vibration et assurent un remplissage correct des zones de géométrie complexe ou fortement ferraiées. Ils présentent en revanche un risque accru de ségrégation des plus gros granulats [1].

Les études théoriques ou expérimentales issues de la littérature, portant sur la stabilité d'une particule sphérique isolée immergée dans un fluide à seuil, mènent toutes à un critère conforme à l'analyse dimensionnelle, de la forme :

$$D < K_0 \frac{\tau_0}{\gamma}$$

où

- D est le diamètre de la particule,
- γ son poids spécifique déjaugé pour le fluide considéré,
- τ_0 le seuil de cisaillement du fluide et K_0 une constante.

Malgré la diversité des méthodes et des matériaux employés, la majorité des valeurs obtenues pour K_0 se situent entre 15 et 21 [2].

Ces considérations sont toutefois insuffisantes pour apprécier la stabilité d'un béton autoplacant car la thixotropie de la phase suspendante, qui se manifeste par une élévation progressive du seuil après mise en place, et l'effet de groupe de la fraction granulométrique supérieure y contribuent également.

Un dispositif d'essai original répondant à ce besoin a été conçu et réalisé.

DESCRIPTION DU DISPOSITIF

Le dispositif, de plan carré, comporte quatre tiges verticales de guidage, encastrées dans une embase et réunies par un plateau supérieur. Un équipement mobile coulisse sur ces tiges entre deux butées et

au moyen de douilles à billes. Il est constitué d'une plaque principale surmontée d'une contre-plaque de hauteur réglable et repose sur la membrane d'un vérin souple pneumatique placé sur l'embase. Un capteur permet de mesurer le déplacement de l'équipage mobile en cours d'essai. La figure 1 présente une vue d'ensemble du dispositif et la figure 2 montre l'équipage mobile sans la contre-plaque.

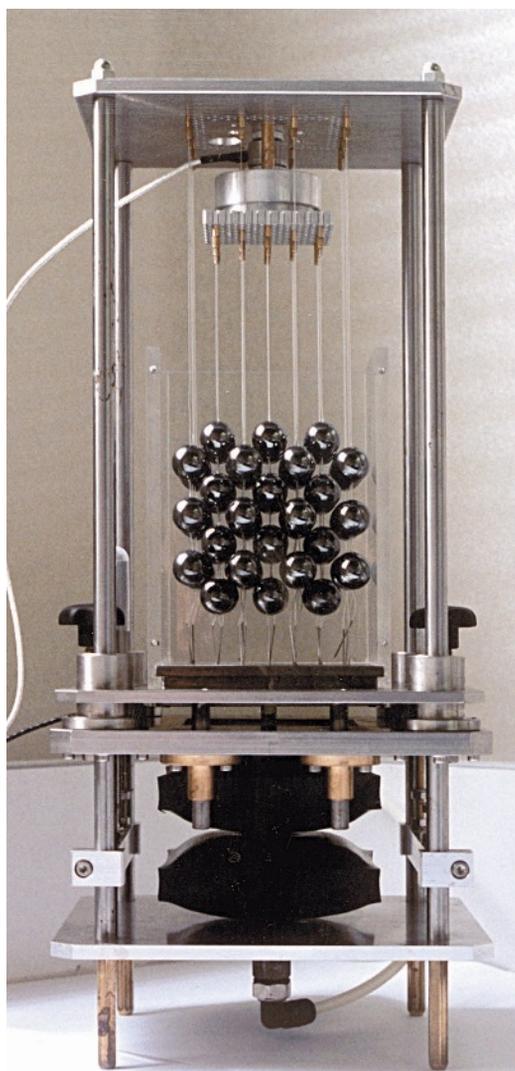
La partie centrale, en saillie, de la contre-plaque constitue le fond d'une cuve dont la paroi en Plexiglas est mise en place par coulissement étanche, l'un de ses quatre panneaux étant amovible (Fig. 3). Cette cuve contient la phase fluide qui peut être de différentes natures : fluide modèle, pâte de ciment, mortier fin, etc.

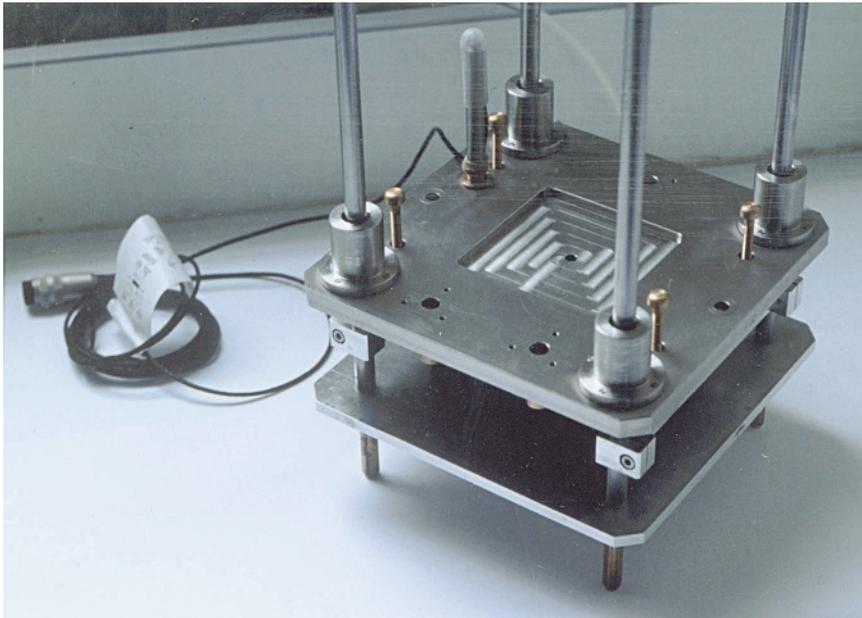
Un ensemble de billes en hématite situé à l'intérieur de la cuve est organisé en réseau cubique centré. Pour ce faire, les billes sont enfilées en chapelets et collées à l'Araldite sur des fils de Nylon qui matérialisent les axes réticulaires verticaux du réseau. Les chapelets sont suspendus au plateau supérieur par un embout fileté.

Le mouvement relatif du réseau par rapport à la cuve étant vertical, aucune liaison horizontale n'est établie. En revanche, le remplissage de la cuve perturberait l'arrangement du réseau si les fils n'étaient pas momentanément tendus. C'est pourquoi leur extrémité inférieure, raidie par une aiguille creuse, traverse la contre-plaque, perforée à cet effet, puis une couche de caoutchouc sous-jacente qui la retient par frottement et participe à l'étanchéité. La figure 4 montre les vues de dessus et de dessous de cette contre-plaque. L'abaissement de la contre-plaque sur la plaque principale de l'équipage mobile provoque une tension des fils avant de les libérer par désengagement des aiguilles.

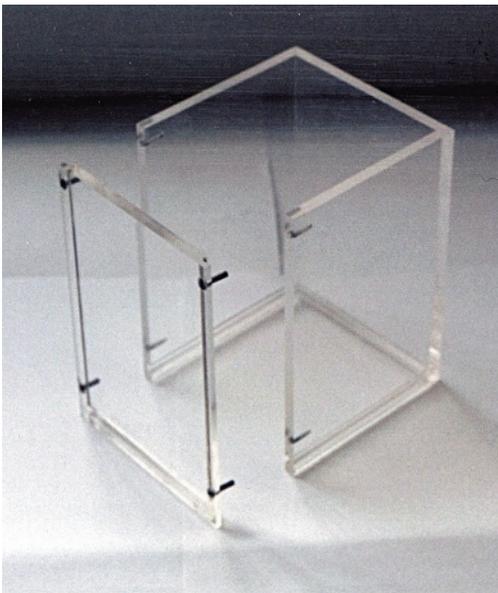
Le collage des chapelets de billes, avec embouts filetés et aiguilles, est réalisé en une seule opération sur gabarits.

■ **Fig. 1**
Vue d'ensemble du dispositif d'essai sur réseau de billes. La configuration présentée est un réseau cubique centré composé de billes de 16 mm, d'une maille de 24 millimètres.

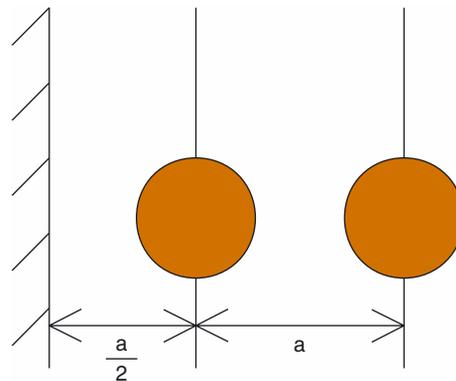




■ **Fig. 2**
Équipage mobile sans la contre-plaque. Il permet de guider la cuve lors de la descente du vérin. Le capteur (en haut à gauche) mesure son déplacement lors de l'essai. Les quatre têtes de vis servent de butée mécanique haute.



■ **a** Cuve en Plexiglas en deux parties. La partie en U est mise en place autour du réseau puis la face avant est vissée.



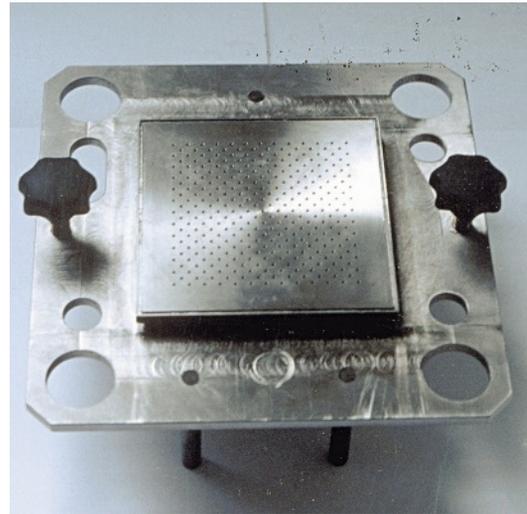
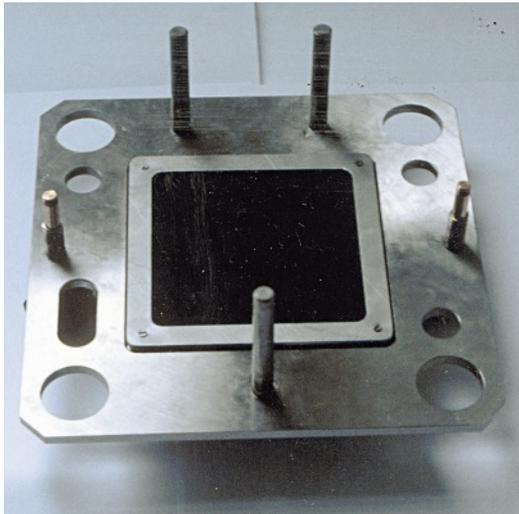
■ **b** Principe du dimensionnement des différentes cuves.

■ **Fig. 3**

Les chapelets extérieurs sont vissés directement sous le plateau supérieur pour former un anneau de garde. Les autres sont mis en place sous une plaquette liée à ce plateau par l'intermédiaire d'un capteur de force (Fig. 5). Une manœuvre simple permet de substituer une liaison rigide à cet instrument durant les phases de préparation ou de démontage afin de lui éviter toute surcharge.

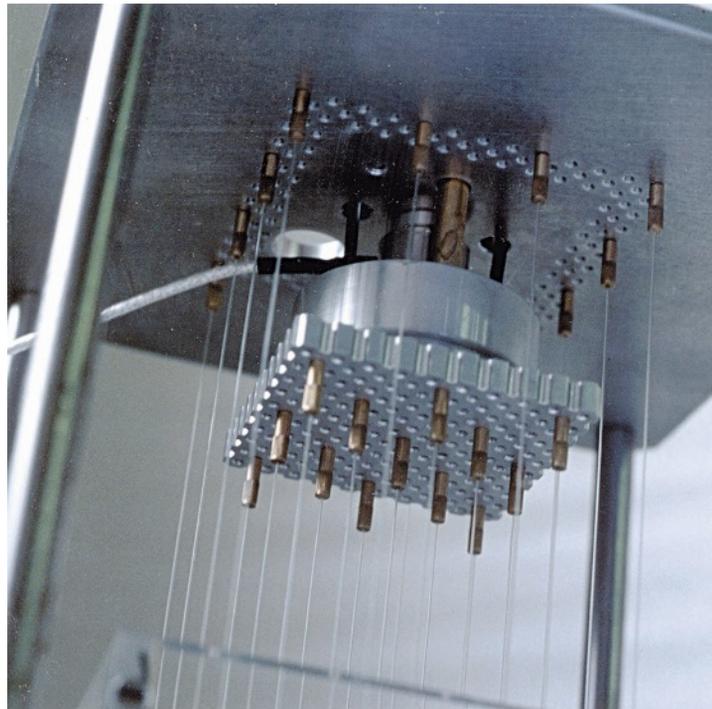
Trois types de chapelets, qui se distinguent par leur longueur ou leur nombre de billes, sont nécessaires à la constitution du réseau (Fig. 6).

La combinaison de divers diamètres de bille et de diverses distances réticulaires permettra de couvrir une large gamme de fractions volumiques solides. Plusieurs jeux de chapelets ont ainsi été préparés. Par ailleurs, les points d'attache supérieurs et les passages dans la contre-plaque, en vis-à-vis, sont suffisamment nombreux pour convenir à ces différents cas. Enfin, le choix entre plusieurs cuves garantit le respect de l'échelle.



■ Fig. 4

Contre-plaque. On voit, en vue de dessous, la membrane élastique permettant de maintenir les aiguilles et, en vue de dessus, les perforations permettant le passage des aiguilles.

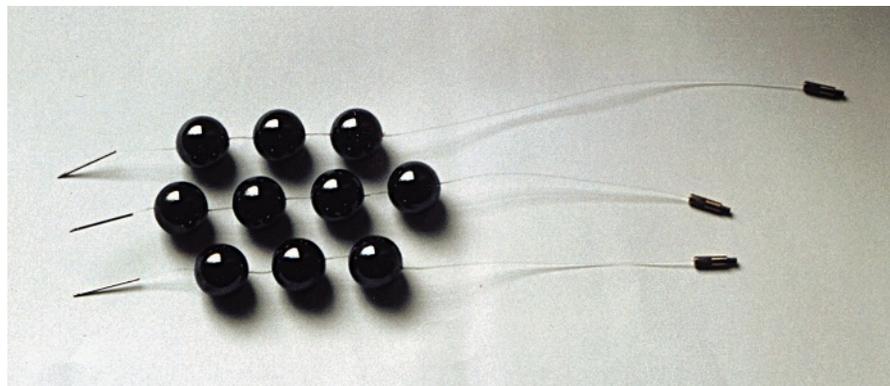


■ Fig. 5

Principe de fixation des chapelets de billes. On distingue le plateau supérieur, le capteur de force et la plaquette située sous le capteur.

■ Fig. 6

Chapelets de billes servant à constituer un réseau complet.



L'essai consiste à mesurer la force maximale pouvant être exercée sur le réseau sans mouvement relatif irréversible par rapport au fluide. Le fort poids spécifique de l'hématite, qui n'intervient en aucune façon dans les mesures, joint à la souplesse des fils, assure la qualité de la géométrie du réseau. Son indéformabilité résulte de celle des fils, pour les sections retenues et sous les variations d'effort estimées en cours d'essai.

Des essais seront également réalisés sur un élément isolé (bille ou chapelet) avec ce dispositif. Un capteur de force adéquat sera alors interposé entre l'embout fileté du fil unique et la plaquette du plateau supérieur.

MODE OPÉRATOIRE SUCCINCT

Le vérin (dont la réserve d'air est augmentée par un accumulateur) est mis sous pression d'air, ce qui place l'équipage mobile en butée haute. Les chapelets sont suspendus au plateau supérieur ou à sa plaquette et les aiguilles sont engagées dans la contre-plaque. La cuve est ensuite disposée autour du réseau, fermée par son panneau avant et remplie de fluide dont un échantillon est conservé pour des mesures rhéologiques simultanées. La contre-plaque est alors manœuvrée pour libérer les chapelets. Le capteur de force est mis en fonction ainsi que le capteur de déplacement de l'équipage mobile. Le fluide est laissé au repos pendant un temps défini.

La procédure consiste ensuite à relâcher progressivement, mais rapidement, la pression dans le vérin en provoquant une fuite par un ajustage calibré.

La diminution de l'effort ascendant exercé par le vérin sur l'équipage mobile est d'abord compensée par la diminution des efforts dans les butées, jusqu'à leur annulation, puis par une augmentation de la tension des fils, constatée par le capteur de force. La liaison que le fluide réalise entre le réseau et la cuve bloque tout déplacement autre qu'élastique, jusqu'à ce qu'elle cède.

Après un pic d'effort, le réseau laisse s'échapper l'équipage mobile et son chargement en s'extrayant du fluide.

On conçoit l'intérêt de disposer d'un vérin souple pour pratiquer un tel essai, qui est bien un essai de rupture.

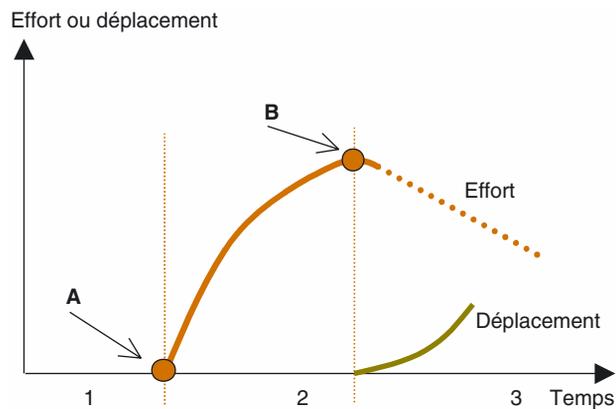
PREMIERS RÉSULTATS

Les premiers essais, conduits selon le mode opératoire présenté ci-dessus, ont montré un fonctionnement du dispositif conforme aux prévisions (Fig. 7 et 8). En particulier, on obtient bien un pic d'effort sans déplacement notable. Sa valeur est sensible aux paramètres d'essai (seuil de la pâte de ciment et fraction volumique) et la répétabilité est satisfaisante (Tableau I). Par ailleurs, l'importance de l'effet de groupe semble confirmée. Une étude avec diverses combinaisons de paramètres et sur différentes phases suspendantes est en cours.

TABLEAU I
Pics d'efforts obtenus pour deux pâtes de ciment de seuils de cisaillement différents et pour deux réseaux de billes de différentes fractions volumique

Seuil initial de la pâte de ciment (Pa)		≅ 1	11	11
Fraction volumique		0,21	0,21	0,31
Diamètre (mm)		14	14	16
F _{max} (N)	1 ^{er} essai	0,35	3,33	3,63
	2 ^e essai	0,35	3,43	3,55
	3 ^e essai	0,35	3,29	3,65
Moyenne		0,35	3,35	3,61
Ecart type		0	0,07	0,05

■ **Fig. 7**
Évolution de la force appliquée au réseau et
du déplacement de la cuve durant l'essai.



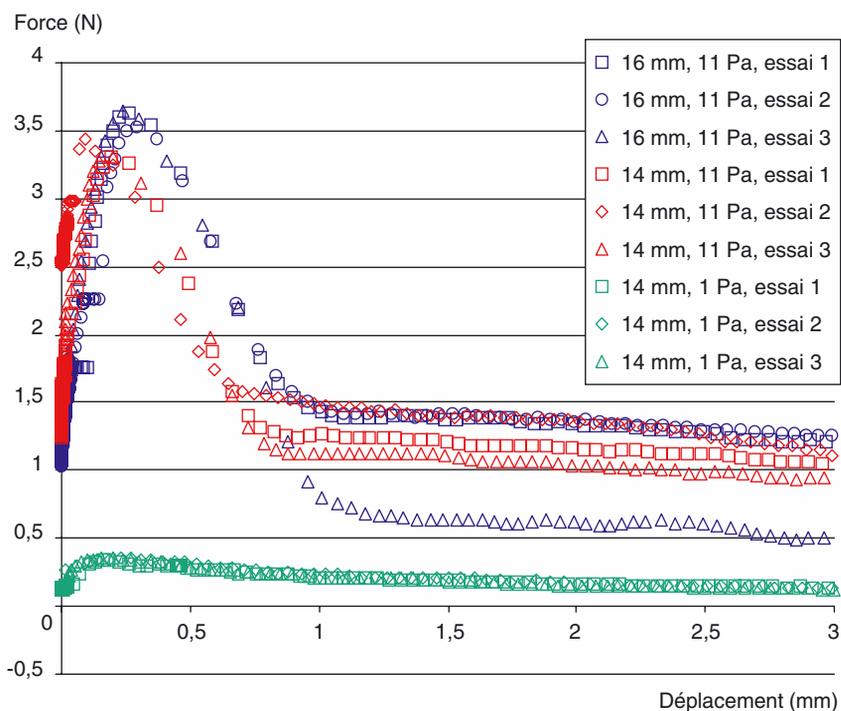
Zone 1 : temps de repos

Point A : débit de fuite

Zone 2 : augmentation de l'effort dans le réseau,
maintien de l'équilibre. Il n'y a pas de déplacement

Point B : le capteur de force enregistre un maximum

Zone 3 : le réseau ne reprend plus les efforts,
l'équipage mobile peut alors se déplacer



■ **Fig. 8**

Comparaison de l'évolution de la force en fonction du déplacement pour des réseaux de diamètres de billes différents immergés dans une même pâte (courbes rouges et bleues) et pour des réseaux de mêmes diamètres immergés dans différentes pâtes (courbes rouges et vertes).

Remerciements. Ce dispositif d'essai a été conçu et réalisé au sein de la division Bétons et composites cimentaires du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées avec l'aide du service « Métrologie et instrumentation » et celle de Christian Stéfani de la Direction scientifique du LCPC.

Par ailleurs, cette étude a été réalisée dans le cadre d'une thèse du LCPC bénéficiant d'un financement complémentaire spécifique du ministère de la Recherche par le biais de l'action concertée incitative (ACI) « Ville ».

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] *Bétons Auto-Plaçants*, Recommandations provisoires de l'Association française de génie civil (AFGC), juillet 2000, 63 pages.
- [2] BETHMONT S., D'ALOIA SCHWARTZENTRUBER L., STÉFANI C., LE ROY R., Defining the Stability criterion of a sphere suspended in a cement paste: a way to study the segregation risk in Self-Compacting Concrete (SCC), Reykjavik, 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Islande, 17-20 août 2003, pp. 94-105.

