

Évaluation et utilisation du banc d'analyse granulométrique

Un appareil de mesure de l'homogénéité des mélanges

Pierre-Olivier VANDANJON

Chargé de recherche
Section Robotique de chantier
Division Méthodes et matériels de construction
et d'entretien des routes
Laboratoire central des Ponts et Chaussées
Centre de Nantes

RÉSUMÉ

L'introduction de nouveaux matériaux dans le génie civil, comme les bétons à hautes performances (BHP), a paradoxalement augmenté l'importance du matériel de fabrication de ces matériaux, notamment pour le malaxage. Pour évaluer l'action d'un malaxeur, le Laboratoire central des Ponts et Chaussées (LCPC) a développé un appareil de mesure de l'homogénéité des mélanges : le banc d'analyse granulométrique (BAG). La méthode de mesure construite autour de cet appareil permet d'obtenir un fuseau granulaire représentant l'hétérogénéité du mélange à partir de prélèvements dans le matériau produit.

Dans cet article, nous présentons l'évaluation de cette méthode de mesure. Les performances de cette méthode ainsi que la facilité d'utilisation de l'appareil surclassent les méthodes classiques par tamisage manuel et permettent d'envisager de quantifier l'homogénéité du mélange.

Nous proposons un critère d'homogénéité synthétisant les mesures issues du BAG. Ce critère tient compte de la répétabilité de l'appareil, de l'erreur fondamentale d'échantillonnage et du nombre de prélèvements. La difficulté du problème est que nous nous intéressons plus à la mesure de l'écart type qu'à la mesure plus classique de la moyenne.

MOTS CLÉS : *Domaine 32 - 31 - Mélange - Granulométrie (granularité) - Hétérogénéité - Prélèvement - Mesure - Évaluation - Homogénéité - Malaxeur - Béton hautes performances - Eprouvette - Appareil de mesure - Méthode - Répétabilité - Écart type - Intervalle de confiance // banc d'analyse granulométrique.*

Introduction

Le malaxage est, actuellement, un enjeu important dans le domaine du génie civil :

- la durée de malaxage des bétons hautes performances (BHP) est un frein au développement de ces matériaux ;
- des malaxeurs spéciaux (malaxeurs Eirich, Skako, etc.) sont proposés sur le marché ;
- la dispersion des éléments fins dans le béton ou l'enrobé reste un problème important.

Sur chantier, la principale appréciation de l'action du malaxeur est fournie par le wattmètre (Teillet et *al.*, 1991). Récemment, certaines recommandations portant sur la dispersion de grandeurs caractéristiques, par exemple sur E/C (teneur en eau/teneur en ciment), ont été proposées (Charonnat, 1996).

Au Laboratoire central des Ponts et Chaussées (LCPC), nous disposons d'un moyen d'essai industriel : la station d'étude du malaxage. Nous avons ainsi pu développer des études sur le malaxage à l'aide d'un équipement industriel dans un environnement maîtrisé.

Nous avons considéré que le but du malaxeur est que tout point du mélange respecte sa composition moyenne. Pour rester au plus près de la mesure de cet objectif, nous avons choisi d'apprécier l'action d'un malaxeur en quantifiant l'hétérogénéité d'un mélange fabriqué. Cette hétérogénéité est appréhendée par des analyses granulométriques effectuées en de nombreux points du mélange.

Un appareil de mesure a été construit à cet effet : le banc d'analyse granulométrique (BAG).

La méthode de mesure élaborée autour de ce prototype a été conçue pour posséder les avantages suivants : bonne répétabilité et rapidité d'analyse.

Nous présentons dans cet article l'évaluation de cette méthode puis, dans une seconde partie, nous décrivons l'utilisation de cet appareil pour élaborer un critère d'homogénéité.

Évaluation de la méthode de mesure

Nous commençons tout d'abord par présenter les différentes fonctions de cet appareil de mesure, puis nous détaillons l'évaluation des performances de chaque fonction.

Présentation

Sur la station d'étude du malaxage du Centre de Nantes, nous caractérisons la production d'un malaxeur en échantillonnant celle-ci. Sur chaque échantillon, nous mesurons une teneur en eau puis nous effectuons une analyse granulométrique. Cette dernière mesure est réalisée grâce au BAG.

La mesure de la teneur en eau s'effectue par séchage. À l'issue de cette mesure, l'échantillon est donc sec. À partir de cet échantillon, le BAG fournit une analyse granulométrique. Il a été conçu pour analyser quarante-huit échantillons d'une masse de 1,5 kg en une journée de travail pour un opérateur. Une présentation complète de l'appareil a été faite par Gallenne et *al.*, (1994). Nous ne rappelons, ici, que les principes fondamentaux de cet appareil pour une meilleure compréhension de l'article.

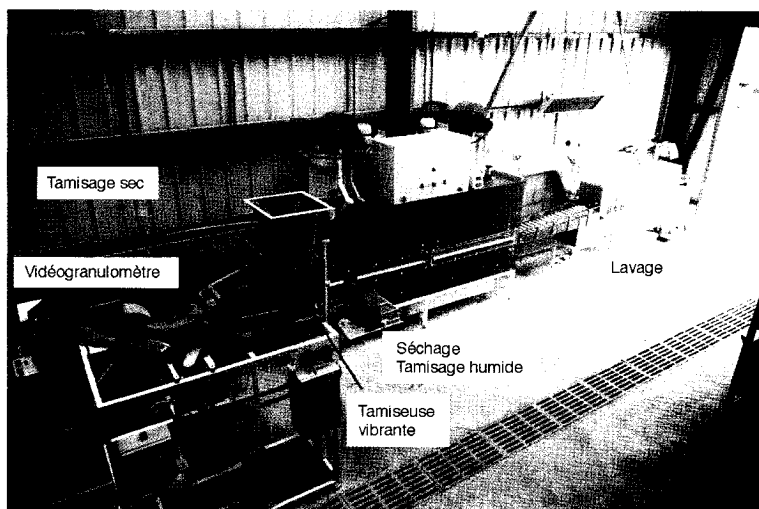


Fig. 1 - Le banc d'analyse granulométrique (BAG).

La figure 1 illustre les deux parties composant le BAG :

❶ **le tamisage humide**, constitué d'un laveur et d'un sécheur qui éliminent les éléments fins. Pour cet article, les éléments fins sont les passants au tamis de 80 micromètres ;

❷ **le tamisage sec**, un **tri granulométrique** est effectué par une tamiseuse vibrante et un vidéo-granulomètre. Le principe en est décrit par Blot et *al.* (1987).

Tamisage humide

La teneur en éléments fins est obtenue par passage d'un échantillon à travers la partie lavage/séchage du BAG. L'échantillon sec est transvasé dans un bac dont le fond est un tamis de 80 μm . Ce bac, appelé par la suite bac-tamis, est passé dans un laveur qui permet d'évacuer les éléments fins. L'échantillon est ensuite séché. Par différence de masse, nous obtenons la teneur en éléments fins.

Tri granulométrique

Pour obtenir la teneur de chaque classe granulaire supérieure à 80 μm , nous vidons le bac-tamis dans l'ensemble tamiseuse vibrante/vidéogranulomètre. Une tamiseuse vibrante permet d'analyser les granulats qui passent au tamis de 2 mm. Le refus au premier tamis (2 mm) est analysé par le vidéo-granulomètre.

Analyse granulométrique

Après traitement des résultats des deux étapes précédentes, nous obtenons une courbe granulaire du mélange. Cette courbe ne peut pas être analysée dans son ensemble de manière absolue car elle est constituée de trois mesures de nature différente (tamisage humide, tamisage sec, vidéo-granulomètre). Cependant, elle peut être analysée en relatif, c'est-à-dire par rapport à une autre courbe issue du même traitement appliqué à un autre échantillon.

Conditions d'utilisation

Cet appareil a été conçu pour analyser les mélanges sans liant actif : nous avons donc évalué le BAG par rapport à un tel matériau.

Répétabilité du tri granulométrique

Ici, nous nous intéressons à la partie tamisage sec du BAG, c'est-à-dire à l'ensemble tamiseuse vibrante/vidéogranulomètre. Nous utilisons le BAG comme un appareil de mesure relatif. Il est donc crucial de connaître la répétabilité de l'appareil. C'est l'objet de cette section.

Pour les besoins de ce document, nous introduisons les définitions suivantes :

- la répétabilité se rapporte à la mesure de N échantillons réputés identiques par le BAG ;
- la répétitivité est, ici, le passage d'un même échantillon N fois dans la partie tamiseuse vibrante/vidéogranulomètre ;
- une teneur est la proportion d'une fraction granulaire dans un échantillon rapportée à la quantité de matériaux secs.

Les facteurs influents de l'analyse granulométrique sont :

- le temps de tamisage qui est commandé par une trappe sur le tamis de 2 mm. Cette trappe régule le passage des granulats vers le vidéogranulomètre ;
- le type de matériaux : roulé ou concassé ;
- la formulation : nous avons utilisé les deux types extrêmes de formules définies pour les graves ciments 0/20 par la norme **NF P 98-116**.

La charge des tamis, traditionnellement très influente, n'est pas prise en compte ici car, grâce au système de prélèvement, les quantités de matériau sur chacun des tamis sont toujours très voisines.

Temps de tamisage

Nous avons commencé notre analyse par déterminer un temps de tamisage minimal et maximal de la tamiseuse vibrante. En effet, en situation d'essai, l'opérateur doit vérifier le fonctionnement de l'appareil avant de commander l'ouverture de la trappe. C'est donc lui qui détermine le temps de tamisage. Nous avons passé un échantillon riche en sable dans la tamiseuse vibrante

selon différents temps de tamisage. Par observation de l'évolution de la coupure à 2 mm, nous en avons déduit un temps minimal de tamisage de 40 s un temps maximal de tamisage de 2 minutes.

Type de matériaux et formulation

Après avoir déterminé le temps de tamisage, nous avons effectué des essais de répétitivité selon le type de matériaux et sa formule.

Expérience menée

Nous avons préparé quatre échantillons de nature différente. Chaque échantillon correspond à un type de matériau spécifique : roulé ou concassé, selon deux formules notées F1 et F2 correspondant aux fuseaux extrêmes des graves ciments 0/20 définies dans la norme **NF P 98-116**, le ciment étant remplacé par des fines.

Chacun des quatre échantillons est passé seize fois dans l'ensemble tamiseuse vibrante/vidéogranulomètre. Nous nous sommes donc placés dans le cadre de la répétitivité car il était plus facile de contrôler le passage du même échantillon dans l'appareil de mesure que de préparer seize échantillons identiques.

Résultats

La figure 2 fournit les résultats obtenus pour chaque échantillon. L'ordonnée correspond au coefficient de variation (écart type /moyenne). Nous remarquons des résultats médiocres aux extrémités du graphique. Ceci provient :

- d'un défaut sur la toile de 160 µm : par la suite, nous n'utilisons plus cette coupure ;

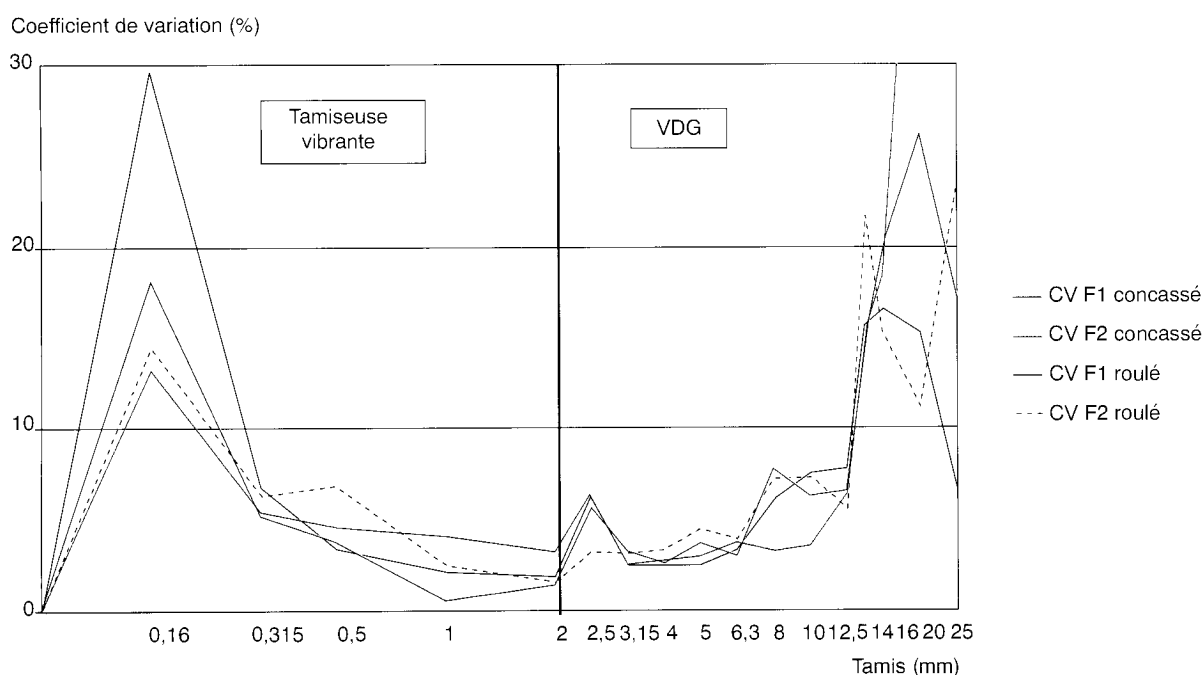


Fig. 2 - Évaluation du tamisage sec

➤ du nombre trop réduit de grains pour les grosses fractions granulaires : nous avons choisi, par la suite, de regrouper les fractions de façon à avoir suffisamment de grains par fraction.

Le tableau I fournit une utilisation de l'évaluation du tamisage sec : nous n'employons pas la toile de 160 µm, et nous avons regroupé les classes granulaires. De plus, nous retenons le maximum des quatre courbes, ceci afin de se placer dans le cas le plus défavorable. Les résultats obtenus sont moins dispersés que ceux définis dans la norme P 18-560 pour un tamisage manuel. Nous remarquons aussi que, par rapport au graphique, les résultats indiqués par le tableau sont largement meilleurs. Ceci provient du regroupement des classes granulaires. Nous voyons donc ici que, nous devons gérer un compromis entre la finesse de la description du mélange et la répétabilité de la mesure : lorsque les classes sont regroupées, la mesure est moins dispersée.

TABLEAU I
Évaluation du tamisage sec

Fractions granulaires (mm)	Coefficient de variation pour N = 16 passages
0 - 2	1,2 %
2 - 10	2,5 %
10 - 20	2,3 %

Ce tableau permet de construire un écart type de répétabilité s_{rep} avec $N = 16$ passages pour n'importe quelle mesure de teneur t conforme avec les conditions de l'évaluation en appliquant la formule :

$$s_{rep} = CV_{rep} \times t$$

où

- s_{rep} est l'écart type de répétabilité pour $N = 16$ passages ;
- CV_{rep} est donné par le tableau ;
- t est la teneur de la fraction granulaire considérée.

Précision de la mesure de teneur en éléments fins et perte de matériaux

Contrairement à la partie tamisage sec, la mesure de la teneur en éléments fins est un contrôle destructif. Nous nous plaçons donc dans le cadre de la répétabilité et non plus de la répétitivité. Pratiquement, nous devons préparer autant d'échantillons qu'il y a de répétitions à faire.

Le facteur influent est le taux d'éléments fins dans le mélange. Nous nous sommes placés dans le cas le plus défavorable en constituant des échantillons contenant un taux d'éléments fins de 15 %, ce qui correspond au taux maximal autorisé par les conditions d'utilisation de l'appareil.

Comme les échantillons sont ensuite passés dans le tamisage sec, nous devons donc aussi quantifier l'altération de l'échantillon pour le prendre en compte dans le calcul du critère d'homogénéité. Nous avons passé des échantillons sans fines pour mesurer les éventuels changements de granularité dus au passage de ces échantillons dans la partie tamisage humide du BAG.

Répétabilité du tamisage humide

Nous avons passé seize échantillons avec une teneur en éléments fins de 15 %. Le tableau II fournit les résultats obtenus. Ces résultats sont considérés comme bons, compte tenu de :

- la précision des balances ;
- la difficulté de fabriquer des échantillons identiques ;
- la courbe granulaire des fines ajoutées.

TABLEAU II
Évaluation du tamisage humide

Moyenne pour 15 %	Écart type pour N = 16 passages
14,93 %	0,09 %

Pertes de matériaux

Pour déterminer l'influence du tamisage humide sur les mesures du tamisage sec, nous devons quantifier les pertes de matériaux (autres que les éléments fins) pendant le tamisage humide.

Seize échantillons sans fines sont passés dans le tamisage humide. Par différence de masse, nous pouvons quantifier l'altération de l'échantillon.

Le tableau III fournit le résultat de cette expérimentation. Les résultats sont bons, compte tenu de la précision de nos balances. Cependant, pour se placer dans le cas le plus défavorable, nous supposons que des pertes de matériaux affectent les fractions granulaires inférieures à 2 mm (nous ne perdons pas de gravillons). Cette prise en compte se situe à trois niveaux :

❶ nous n'analysons pas les fractions granulaires dont la masse est du même ordre que la perte moyenne ;

❷ nous corrigeons l'écart type de répétabilité du tamisage sec pour les classes inférieures à 2 mm, à l'aide de la formule :

$$s_{rept} = \sqrt{s_{rep}^2 + \left(\frac{1,8}{M}\right)^2} \quad (1)$$

M étant la masse de l'échantillon en grammes. Le choix du numérateur (1,8 g) provient de la prise en compte de la perte moyenne 0,9 g, qui est considérée comme un biais, et de l'écart type de 0,9 g de cette perte moyenne.

❸ Nous ne comparons que les écarts types qui diffèrent de plus de (1,8 g/M).

TABLEAU III
Pertes pendant le tamisage humide

Altération de l'échantillon	Perte (g)
Perte moyenne	0,9
Écart type pour N = 16 passages	0,9

Utilisation du banc d'analyse granulométrique

Grâce à l'évaluation précédente, le BAG fournit une représentation granulaire du mélange avec un écart type de répétabilité connu. Par ailleurs, cet appareil permet d'analyser de nombreux échantillons rapidement. Ces deux points importants permettent d'utiliser cette méthode pour quantifier l'hétérogénéité d'un mélange.

Cependant, lors de l'exploitation d'un nombre important d'échantillons, le BAG fournit une masse d'informations importante : teneur et écart type pour chaque fraction granulaire. Pour le praticien, ces informations doivent être synthétisées dans un critère. C'est ce que nous proposons ici. Il faut souligner qu'il existe de nombreuses autres possibilités pour présenter ces informations : notre proposition n'est qu'un exemple d'une exploitation possible de notre méthode de mesure.

Nous décrivons, ici, le critère d'homogénéité construit à partir de la mesure du BAG et nous appliquons cette méthode pour la caractérisation de la production d'un malaxeur.

Principe

À partir de l'analyse de N échantillons, le BAG fournit N teneurs pour chacune des P fractions granulaires, ce qui permet de calculer une variance de dispersion par fraction. Cette variance de dispersion contient trois composantes :

- la variance de répétabilité du BAG : $(\sigma_{\text{rep}})^2$,
- la variance provenant de l'échantillonnage du mélange : nous l'appellerons la variance fondamentale : $(\sigma_{\text{fond}})^2$,
- l'hétérogénéité du mélange noté v_d .

La mesure de l'hétérogénéité du mélange consiste à comparer la variance de dispersion fournie par le BAG avec la variance fondamentale en tenant compte de la variance de répétabilité. Il s'agit donc de comparer v_d à $(\sigma_{\text{fond}})^2$ en tenant compte de $(\sigma_{\text{rep}})^2$.

Nous effectuons une comparaison statistique à partir d'une évaluation de la variance sur la variance de dispersion.

Dans un premier temps, nous décrivons l'utilisation du BAG pour mesurer l'hétérogénéité du mélange avec un intervalle de confiance. Puis, nous évoquons le calcul de la variance fondamentale. Enfin, nous proposons une représentation graphique et numérique de l'hétérogénéité du mélange.

Mesure de l'hétérogénéité d'un mélange

Nous débutons en définissant la variance de dispersion calculée par le BAG : V_d et la variance de dispersion réelle : v_d , calculée à partir des teneurs réelles des bacs. Cette variance de dispersion concerne la teneur d'une fraction granulaire. Les calculs suivants précisent cette notion :

- N \Rightarrow nombre d'échantillons (dans le cas du BAG, N = 48),
- $m_i \Rightarrow$ teneur réelle (de la fraction étudiée) du $i^{\text{ème}}$ bac,
- x_i teneur mesurée (de la fraction étudiée) par le BAG du $i^{\text{ème}}$ bac.

Hypothèse 1 : x_i suit une loi normale N (m_i , σ^2) et les x_i sont indépendants.

Remarque : σ représente l'incertitude de mesure de l'appareil.

La variance de dispersion calculée par le BAG est alors définie par la formule suivante :

$$V_d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \text{ avec } \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i.$$

Ce calcul doit permettre d'approcher la variance de dispersion réelle définie par :

$$v_d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - \bar{m})^2 \text{ avec } \bar{m} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i.$$

Le calcul des probabilités nous conduit aux résultats suivants concernant l'espérance et la variance de la variance de dispersion calculée par le BAG :

$$E(V_d) = \frac{(N-1) \times \sigma^2}{N} + v_d \quad (2)$$

$$\text{Var}(V_d) = \frac{2 \times (N-1) \times \sigma^4}{N^2} + \frac{4 \times \sigma^2 \times v_d}{N} \quad (3)$$

On remarque que le BAG effectue une estimation par excès de la variance de dispersion réelle. En effet, la variance de dispersion calculée par le BAG est la somme de la variance de dispersion réelle v_d et de la variance de dispersion due à l'erreur de mesure. Du point de vue statistique, notre estimateur est biaisé.

De plus, les formules (2) et (3) nécessitent de connaître l'incertitude de mesure de l'appareil, σ , et la variance de dispersion réelle v_d .

Or, la variance de dispersion réelle n'est pas connue, nous cherchons à la mesurer. Dans la suite, nous majorons celle-ci par la variance de dispersion mesurée V_d .

En ce qui concerne l'incertitude de mesure de l'appareil, σ , le calcul de son majorant utilise les résultats de l'évaluation de la manière suivante :

$$0 < \sigma < \sigma_{\text{rep}}$$

où σ_{rep} est l'écart type de répétabilité calculé par la formule suivante :

$$\sigma_{\text{rep}} = s_{\text{repl}} \times k$$

dans laquelle s_{repl} est un résultat de l'évaluation du BAG (équation (1)) et k est un coefficient qui correspond à l'approximation de l'écart type de répétabilité par rapport à l'écart type expérimental obtenu en effectuant n répétitions.

Pour $n = 16$ répétitions, $k = 2,13/1,96 = 1,09$.

2,13 est une borne à 97,5 % pour une loi de Student à 15 (= 16-1) degrés de liberté et 1,96 est la même borne pour la loi normale.

Calcul d'une hétérogénéité de référence

Principe

L'erreur totale d'échantillonnage comprend plusieurs composantes : erreur de préparation, erreur de prise, erreur de découpe, erreur fondamentale, etc. Cet article n'a pas pour objet d'explicitier cette analyse. Celle-ci est décrite dans Gy (1988). Lorsque l'échantillonnage est correct du point de vue des erreurs de découpe, de prise, de préparation, etc., l'erreur totale d'échantillonnage se réduit à l'erreur fondamentale.

Pour illustrer cette notion, nous considérons un tas de billes noires et blanches en égale proportion parfaitement mélangées (fig. 3), nous choisissons deux billes dans le tas : dans le premier cas, nous obtenons deux billes blanches, puis deux billes noires et, enfin, lors du troisième prélèvement, une bille noire et une bille blanche. Si nous calculons la teneur en billes blanches de chaque prélèvement, nous obtenons trois teneurs différentes et donc une variance de dispersion. La conclusion de cet exercice est que, même si nous mélangeons les billes parfaitement, il existe une variance fondamentale, appelée aussi erreur fondamentale.

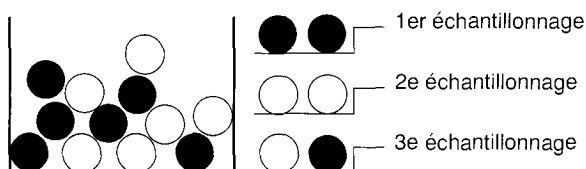


Fig. 3 - Échantillonnage dans un tas de billes.

Formule

Dans le cadre de notre activité, une extension du calcul de cette erreur a été menée dans la thèse de Robin (1988) et exposée dans l'article de Gourdon et *al.* (1987). Nous retraçons ici les étapes de calcul de cette erreur fondamentale pour une fraction granulaire donnée, par exemple, pour la fraction [1, 2[.

Le calcul nécessite les données suivantes :

- masse moyenne de l'échantillon : 1,5 kg,
- teneur en [1, 2[: 30 %.

À partir de ces données, nous calculons :

- la probabilité de tirer au sort un granulat de la fraction [1, 2[dans le lot de matière. Cette probabilité est égale à la fréquence numérique de granulats de cette classe dans l'échantillon, noté $f_{[1, 2[}$. Pour connaître cette fréquence, nous divisons la masse de la classe [1, 2[, soit $M_{[1, 2[}$, par la masse d'un gravillon moyen de cette fraction, notée $M_{\text{moyenne } [1, 2[}$.

$N_{[1, 2[} = \frac{M_{[1, 2[}}{M_{\text{moyenne } [1, 2[}}$ où $N_{[1, 2[}$ est le nombre de grains appartenant à [1, 2[,

$f_{[1, 2[} = \frac{N_{[1, 2[}}{N}$ où N est le nombre total de grains dans l'échantillon ;

- la variance en effectif de la fraction est alors $N \times f_{[1, 2[} \times (1 - f_{[1, 2[})$ et la covariance avec l'effectif d'une autre classe, par exemple [4, 5[, s'écrit $-N \times f_{[1, 2[} \times f_{[4, 5[}$. Ceci correspond à une modélisation probabiliste du mélange par une distribution multinomiale ;
- à partir de cette étude en effectif, nous calculons une variance sur la masse de la fraction [1, 2[au sein de l'échantillon, en multipliant les effectifs par la masse d'un gravillon moyen de cette classe soit : $\text{Var}(M_{[1, 2[}) = M_{\text{moyenne } [1, 2[}^2 \times N \times f_{[1, 2[} \times (1 - f_{[1, 2[})$;
- enfin, pour obtenir la variance sur la teneur, nous calculons la variance du rapport entre la masse de la fraction et la masse de l'échantillon.

Remarques

Pour calculer une hétérogénéité de référence, nous supposons l'échantillonnage correct, c'est-à-dire que le processus de malaxage distribue les grains au hasard dans la cuve du malaxeur et que l'échantillonnage ne perturbe en rien le résultat de cette action.

Les hypothèses sous-jacentes au calcul précédent sont les suivantes :

- les particules d'une classe granulaires d/D ont les caractéristiques d'une particule moyenne, c'est-à-dire qu'elles sont assimilées à $N_{[d, D]}$ particules moyennes ;
- les prélèvements sont effectués à nombre de particules constant ;
- l'échantillon est constitué de grains tirés au sort aléatoirement ;
- la probabilité de prélever un grain de la classe d/D est égale à la fréquence numérique de cette classe.

Pour le tri granulométrique des granulats refusés au tamis de 2 mm, le vidéogranulomètre permet de nous affranchir de la première hypothèse. En effet, celui-ci donne directement la fréquence numérique de chaque classe. Cette information supplémentaire (par rapport au tamisage) permet une bien meilleure évaluation de l'erreur d'échantillonnage.

Une des principales critiques de cette approche est de modéliser le mélange comme un solide morcelé sans liant. Or, ce liant structure le mélange et réduit ainsi la dispersion. La variance fondamentale d'échantillonnage ainsi obtenu, est donc, à notre avis, un majorant.

Critère d'homogénéité

Présentation

À partir de la mesure de l'hétérogénéité du mélange et de la connaissance de l'erreur fondamentale, nous pouvons fonder un critère d'homogénéité sur une base statistique. Le critère que

nous présentons possède trois composantes :

- un fuseau granulaire ;
- une courbe des coefficients de variation ;
- un test statistique.

Nous présentons ci-après une application de ce critère sur un mélange produit par la station d'étude du malaxage du LCPC.

Fuseau granulaire

La figure 4 présente la première partie du critère. L'abscisse comporte les différentes tailles des tamis tandis que l'ordonnée fournit les passants à ces différents tamis (appelés aussi tamisats). Le fuseau granulaire mesuré par le BAG est bleu. Il est comparé au fuseau en rouge représentant la variance fondamentale. Celle-ci est issue du calcul présenté dans la section précédente concernant l'hétérogénéité de référence. Ces fuseaux sont construits en faisant correspondre à chaque tamis l'intervalle [teneur - 2 écarts types, teneur + 2 écarts types]. Cette représentation graphique classique, issue de la norme sur le tamisage P 58-560, permet de visualiser globalement la qualité du mélange.

Courbe des coefficients de variation

Le second élément du critère est un graphique qui permet de localiser les hétérogénéités selon les constituants : éléments fins (inférieurs à 80 μ m), sables (0/2 mm), gravillons (2/10 mm), graviers (10/20 mm), en raisonnant en terme de coefficient de variation. La figure 5 illustre cette partie du critère. La figure 4 permettait de visualiser globalement la qualité du mélange. Celle-ci permet de mieux localiser l'hétérogénéité du mélange selon les constituants.

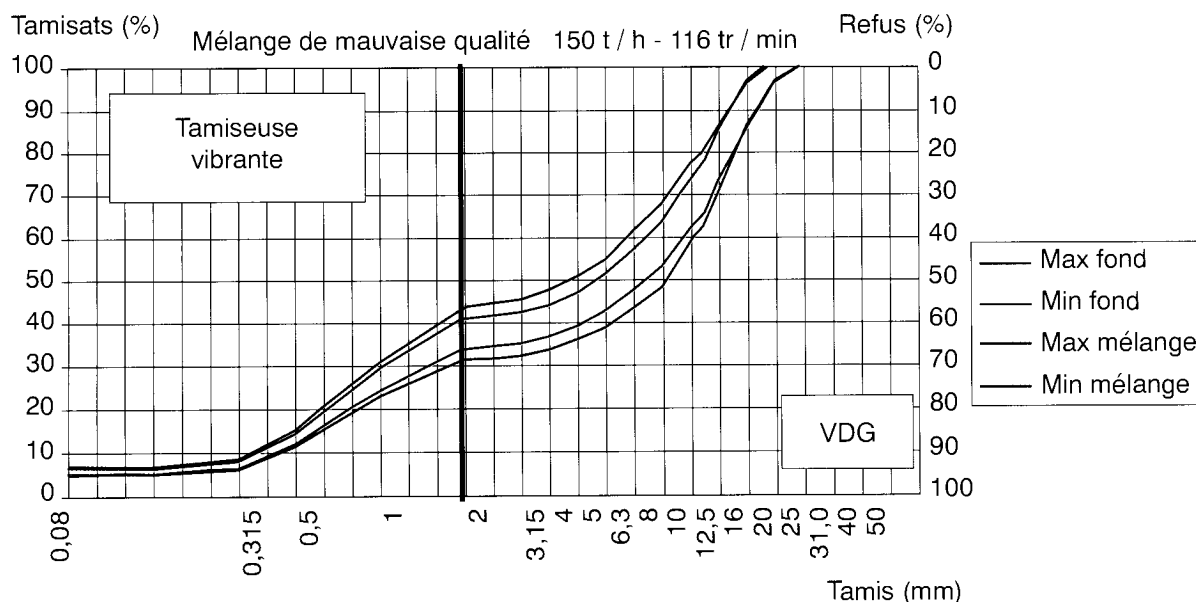


Fig. 4 - Comparaison des fuseaux granulaires.

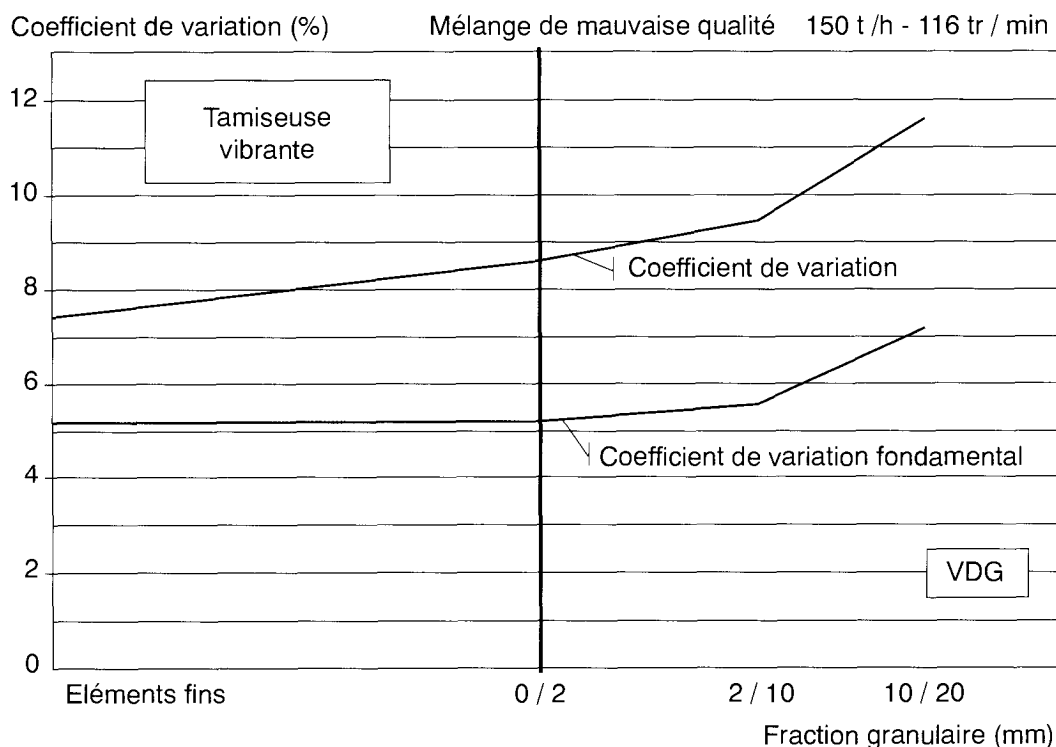


Fig. 5 - Coefficient de variation.

TABLEAU IV
Test statistique

Constituants	Moyenne	$\sqrt{v_d}$	σ_{fond}	σ_{rep}	$\sqrt{v_{\text{dmin}}}$	$\sqrt{v_{\text{dmax}}}$
Fines	5,77 %	0,43 %	0,30 %	0,09 %	0,39 %	0,45 %
0/2	31,52 %	2,70 %	1,64 %	0,43 %	2,54 %	2,82 %
2/10	20,86 %	1,97 %	1,17 %	0,57 %	1,71 %	2,13 %
10/20	41,85 %	4,85 %	3,02 %	1,05 %	4,42 %	5,14 %

Test statistique

Enfin, un test statistique permet de valider les interprétations des deux graphiques précédents en déterminant si l'écart entre la variance de dispersion et l'erreur fondamentale est significatif. Dans le souci de simplifier l'exposé, nous présentons ici ce test sous l'hypothèse que nous effectuons plus de trente échantillons. Cette hypothèse permet d'assimiler v_d à une loi normale. À partir des équations (2) et (3), nous construisons alors l'intervalle de confiance à 95 % :

$$V_d - [(N - 1) \cdot (\sigma_{\text{rep}})^2] / N - a \cdot \sqrt{(\text{Var}(V_d))} \\ < v_d < V_d + a \cdot \sqrt{(\text{Var}(V_d))} \text{ avec } a = 1,96$$

En utilisant la notation $v_{\text{dmin}} < v_d < v_{\text{dmax}}$, les courbes sont significativement différentes si $\sigma_{\text{fond}} \notin] \sqrt{v_{\text{dmin}}} ; \sqrt{v_{\text{dmax}}} [$ où σ_{fond} est l'écart type fondamental calculé à partir de la variance

fondamentale. Le tableau IV présente un exemple de ce test. La colonne moyenne correspond à la teneur fournie par le BAG. La colonne $\sqrt{v_d}$ correspond à l'écart type de dispersion mesuré par le BAG. La colonne σ_{fond} est l'écart type fondamental et σ_{rep} est l'écart type de répétabilité. Dans ce cas particulier, l'écart type mesuré par le BAG est significativement différent de l'écart type fondamental provenant de l'erreur d'échantillonnage. Cependant, nous remarquons que ces deux écarts types, ainsi que l'écart type de répétabilité, sont du même ordre de grandeur. Nous remarquons aussi que l'intervalle de confiance est important, bien que la méthode de mesure ait une bonne répétabilité et que le nombre de prélèvements, ici quarante-huit, soit grand. Ceci confirme que la mesure de l'écart type est plus délicate que la mesure, plus classique, de la moyenne.

Conclusion

Le banc d'analyse granulométrique fournit, pour chaque classe granulaire, sa teneur et son écart type. Pour être exploitable, cette masse d'informations doit être :

- fiable : nous avons évalué complètement le BAG,
- synthétisée : nous avons proposé un critère d'homogénéité des mélanges.

Ce critère est fondé sur une base statistique qui tient compte de la répétabilité de l'appareil, de l'erreur fondamentale d'échantillonnage et du nombre de prélèvements. Cette étude souligne la difficulté de mesurer l'homogénéité des mélan-

ges. En effet, cette homogénéité est appréhendée, ici, à travers le calcul d'un écart type. Or, ce type de calcul implique l'utilisation de moyens de mesures répétables et maîtrisés.

Ce critère est une première proposition qui doit être améliorée, notamment du point de vue :

- théorique : le calcul de l'erreur fondamentale d'échantillonnage est simplifié par rapport à la réalité et demande à être affiné ;
- opératoire : la liaison entre homogénéité du mélange et les performances mécaniques du matériau doit être étudiée.

Nous menons actuellement des expérimentations sur la station d'étude du malaxage du Centre de Nantes qui permettront d'étudier cette liaison.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BLOT G., DUCASSOU J.-B. (1987), *Condition d'utilisation du vidéogranulomètre*, Actes des journées physiques : les milieux granulaires, décembre, pp. 51-56.

CHARONNAT Y. (1996), *Efficiency of concrete mixers : the mixer test station*, Production Methods and Workability of Concrete, Proceedings of the international RILEM conference, E&FN SPON, juin, pp. 3-10.

GALLENNE M.-L., MONÉRON P., DEHOUSSE B. (1994), *Le banc d'analyse granulométrique*, LCPC, Actes des journées des sciences de l'ingénieur, tome 2, octobre, pp. 415-422.

GOURDON J.-L., CHARONNAT Y., ROBIN P. (1987), *Contribution à la caractérisation de l'échantillonnage de mélanges granulaires en vue d'étudier les phénomènes de malaxage*, Material Science to Construction Materials Engineering, 1st International RILEM Congress, J.-C. Maso Ed., Septembre, pp. 476-483.

GY P. (1988), *Hétérogénéité, Échantillonnage, Homogénéisation*, Collection Mesures, Masson.

ROBIN P. (1988), *Contribution à la caractérisation de l'échantillonnage des mélanges granulaires en vue d'étudier les phénomènes de malaxage*, Thèse de l'université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand 2, 24 octobre.

TEILLET R., BRUNEAUD S., CHARONNAT Y. (1991), Suivi et contrôle de la fabrication des mélanges, une nouvelle jeunesse pour le wattmètre différentiel, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 174, juillet-août, pp. 5-16.

ABSTRACT

Appraisal and use of the particle size measurement test bench An apparatus for measuring mix homogeneity

P.-O. VANDANJON

Paradoxically, the introduction of new civil engineering materials such as High Performance Concrete (HPC) has increased the importance of the equipment used to manufacture these materials, in particular as regards mixing. In order to assess the action of a mixer, the Laboratoire des Ponts et Chaussées has developed an apparatus to measure mix homogeneity, the Particle Size Measurement Bench. The measurement method that has been developed for this device provides a particle size envelope that represents the heterogeneity of the mix on the basis of samples taken from the manufactured material.

This paper presents an evaluation of the measurement method. The performance and ease of use of this method exceed conventional hand sieving methods and it may provide a means of quantifying mix homogeneity.

The authors propose a homogeneity criterion that synthesizes measurements from the Particle Size Measurement Bench. The criterion takes account of the repeatability of the results from the apparatus, the fundamental sampling error and the number of samples taken. The difficulty of the problem resides in the fact that we are more interested in measuring the standard deviation than the conventionally favoured average value.