

Compacité des mélanges et propriétés des grains

André LECOMTE

Maître de Conférences

Jean-Michel MECHLING

Doctorant

JE 2167 « Structure et Matériaux »
EGA/IUT Génie civil de Nancy-Brabois

RÉSUMÉ

Cet article traite de la mesure du volume solide (compacité) des tranches élémentaires d'un granulat, paramètre utilisé par les méthodes modernes d'optimisation des mélanges granulaires. Après un rappel des procédés de mesure, il montre, à travers deux exemples, et comparativement aux normes de caractérisation des granulats, la pertinence de la méthode pour le décryptage des structures internes et des propriétés de morphologie et d'état de surface des grains.

On verra, dans le premier exemple, que cette méthode a permis d'expliquer les différences de performances mesurées sur des bétons fabriqués avec deux calcaires provenant de la même formation géologique. Elles sont liées à des nuances de texture et de rugosité des grains. Dans le second exemple, elle a révélé que la coupure conventionnelle à 63 ou 80 µm, entre fines et grains, ne coïncidait pas toujours aux différences de propriétés physiques mesurées selon les normes. Ces observations sont à relier à la nature et à l'histoire géologique des matériaux.

MOTS CLÉS : 36 - Granulat - Granulométrie (granularité) - Filler - Compacité - Degré de saturation (matér.) - Analyse chumuque - Essai - Mélange.

Introduction

F. de Larrard et son équipe ont développé au Laboratoire central des Ponts et Chaussées une démarche scientifique originale pour formuler les bétons. Elle consiste en particulier à optimiser sur ordinateur la compacité d'un mélange granulaire en tenant compte des interactions réelles entre grains. Le modèle, dans sa forme actuelle, est baptisé « Modèle d'Empilement Compressible » (1998) [1], [2] et [3]. Il permet notamment des corrélations avec la rhéologie du béton frais. Ce modèle succède au « Modèle de Suspension Solide » (1994) [4], [5] et [6], lui-même précédé du « Modèle Linéaire de Compacité » (1988) [7].

Les calculs itératifs réalisés par ces outils utilisent principalement la *granularité* des matériaux à disposition et la *compacité* de leurs **tranches élémentaires**. Cette dernière propriété, qui dépend étroitement de la morphologie et l'état de surface des grains, conditionne largement la qualité de l'empilement granulaire et, finalement, celle du béton.

Pourtant, sa mesure ne fait pas partie des essais usuels d'identification des granulats.

Notre propos est de montrer l'intérêt qu'il peut y avoir à la généraliser, car elle apporte bien souvent des informations inédites quant à la structure interne du matériau.

La mesure de la compacité peut aussi constituer un moyen de caractérisation « en grand » de l'état de surface des grains, étroitement liée à l'histoire géologique de la roche. Elle devient alors une méthode complémentaire aux (rares) essais développés dans ce domaine (frottement-rugosité, écoulement-angularité, etc.).

Après une description des protocoles opératoires proposés pour mesurer la compacité d'un granulat, cet article présente deux exemples appliqués justifiant l'intérêt de la démarche. Le premier se rapporte à deux granulats calcaires extraits du même niveau stratigraphique, qui ont donné des bétons aux performances différentes. Le second concerne des granulats gréseux, qui présentent une césure entre « fines arrondies » et « gros anguleux » différente du « conventionnel » 80 µm. Ces comportements ont pu être expliqués ou révélés grâce aux mesures de compacité réalisées sur ces granulats.

Mesure de la compacité granulaire

Dans un volume unité de matériau poreux, le *volume de matière solide* Φ est égal, par définition, à la compacité.

Pour un granulat, ce volume solide va dépendre étroitement du mode d'arrangement des grains. Les termes de « suspension solide » ou « d'empilement compressible » déjà cités sont très explicites en ce sens, car ils montrent bien que la compacité dépend directement des moyens de mise en place. Prenons l'exemple d'un conteneur de mesure dans lequel on déverse une certaine quantité de granulats. La mise en vibration du récipient favorise l'imbrication des grains et provoque une diminution sensible du volume granulaire initial (ce qui revient à une augmentation du *volume solide* Φ). Si l'on comprime ensuite le granulat avec un piston, tout en maintenant la vibration, on arrive à augmenter encore la compacité, au détriment des déplacements internes devenus quasi impossibles. Enfin, si l'on relâche la pression, le granulat se dilate légèrement et les grains se remettent en mouvement, traduisant ainsi le comportement « élastique » du corps divisé.

Cet exemple montre la nécessité qu'il y a d'associer à toute mesure un protocole garantissant une *compaction de référence* ou, pour le moins, une compaction qui se réfère à une *échelle adéquate*... Dans les articles cités, l'intensité de la compaction est caractérisée par un paramètre, appelé *viscosité relative* ou *indice de compaction*, dont la valeur est liée au mode de mise en place. Les modèles établissent la relation entre ce paramètre et la compacité du mélange granulaire.

Les conventions adoptées dans le présent article seront décrites plus loin. Toutefois, des échelles numériques de compaction en fonction du mode de mise en place sont données dans les articles cités. Le lecteur y trouvera également les fondements des modèles de compacité auxquels il est fait référence.

Rappelons, d'autre part, que le terme « granulat » ne détermine pas en soi une taille de grain ou une étendue granulaire particulière. Il peut s'agir aussi bien de fines (voire d'ultrafines) que de sables, de graviers, de cailloux ou d'un mélange de plusieurs de ces « coupures ».

Il peut s'agir également de grains de même grosseur, extraits d'un échantillon par tamisage. Ce sont d'ailleurs ces **classes monodimensionnelles d/D** (avec $D = \sqrt[10]{10}$ en général) qui nous intéressent particulièrement ici. Toutefois, en ce qui concerne les farines, les poudres, etc., on notera qu'il n'est pas simple d'extraire des « tranches élémentaires » de ces produits, ni d'obtenir des particules se comportant effectivement, à sec, comme des grains individualisés, non collés entre eux, notamment si des argiles sont présentes.

D'un point de vue pratique, il est donc nécessaire d'envisager plusieurs techniques de mesure de la compacité d'un granulat et de ses tranches monodimensionnelles, selon l'étendue et la position du spectre testé. Trois protocoles sont présentés ci-après.

Cas des grains (sans fines)

La convention retenue, comparable à celle décrite en [4], consiste à bloquer l'empilement « aléatoire » de grains en le soumettant à une vibration sous contrainte. Notons que cette opération n'amène pas le volume solide à sa valeur maximale, que l'on pourrait obtenir si l'on arrangeait un à un les grains, mais seulement à une valeur correspondant au serrage appliqué. Concrètement, la manipulation proposée consiste à placer dans un conteneur cylindrique un échantillon homogène de masse sèche M_s et à le soumettre à une vibration de 60 Hz réalisée par exemple avec une tamiseuse pour analyse granulométrique, pendant 2 minutes environ, sous une pression de 10 kPa transmise perpendiculairement par un piston plat. Le volume granulaire apparent V est calculé à partir de la section S du conteneur et de la hauteur minimale h de l'empilement, déterminée après plusieurs essais. Le volume réel des grains g est simplement déduit de M_s et de la masse volumique réelle du matériau ρ_r . La compacité c ou le volume solide mesuré Φ_m est alors :

$$V = Sh \quad g = \frac{M_s}{\rho_r} \quad c = \frac{g}{V} = \frac{M_s}{Sh\rho_r} = \Phi_m \quad (1)$$

Il se produit toutefois, aux limites du récipient, un effet de paroi qui « décompacte » l'empilement sur une certaine distance. Ce phénomène additif bien connu a été décrit et paramétré tout

d'abord par Caquot [8], puis, notamment, par Ben Aïm [9]. Il est associé au modèle de suspension solide [5] et au modèle d'empilement compressible [2] par le biais d'un coefficient k_w ajusté expérimentalement à 0,87 pour des grains roulés et 0,71 pour des grains concassés.

Ce coefficient k_w affecte un volume périphérique V_p (où agit l'effet de confinement) et il altère localement le volume solide Φ caractéristique du milieu « infini ». On écrit donc :

$$\Phi_m = (1 - V_p) \Phi + V_{pk_w} \Phi = \Phi [1 - (1 - k_w)V_p] \quad (2)$$

Selon les auteurs précités, **pour des grains de même grosseur d** , l'effet de confinement agit sur une distance estimée à $d/2$. En exprimant alors le volume perturbé V_p par rapport à d , et en le relativisant à V , on obtient un coefficient q qui permet d'atteindre Φ à partir du volume solide Φ_m mesuré dans le récipient cylindrique (de rayon R) :

$$\Phi = q\Phi_m$$

avec

$$q = \frac{1}{1 - (1 - k_w) \left[1 - \left(1 - \frac{d}{2R} \right)^2 \left(1 - \frac{d}{h} \right) \right]} \quad (3)$$

Pour un granulat formé de plusieurs classes de grains de grosseur d_i , le recours à un modèle de compacité, comme le modèle d'empilement compressible ou le modèle de suspension solide, est nécessaire pour atteindre le volume solide Φ_i de chaque tranche élémentaire.

Dans ce cas, connaissant l'intensité de compaction atteinte au moment de la mesure, on cherche à retrouver avec l'outil le volume solide mesuré, Φ_m , en ajustant par itération les volumes solides élémentaires Φ_i affectés d'un coefficient q_i égal à :

$$q_i = \frac{1}{1 - (1 - k_w) \left[1 - \left(1 - \frac{d_i}{2R} \right)^2 \left(1 - \frac{d_i}{h} \right) \right]} \quad (4)$$

Cas des fines

Le problème est comparable par certains aspects au cas précédent. En effet, comme cela a déjà été précisé, il paraît exclu de mesurer directement sur des fines le volume solide Φ_i de chaque tranche élémentaire. On passe donc par un modèle qui restitue le volume solide Φ_m de tout le produit (dont on connaît la granularité), après avoir ajusté par itération la fonction qui caractérise les volumes solides élémentaires Φ_i .

Comme pour toute mesure de volume solide, la phase expérimentale doit être réalisée avec des fines compactées à une intensité déterminée. Par convention, la compaction de référence est obtenue lorsque le mélange, formé d'une masse M_s de produit sec et d'une masse W d'eau, atteint dans un malaxeur à vitesse rapide l'état de « pâte lisse » [6]. Dans cet état standard, on admet que les interstices entre les grains sont juste emplis d'eau et que les particules commencent à être suspendues dans la phase aqueuse continue. La demande en eau W/M_s sert alors à calculer le volume solide Φ_m selon la relation :

$$\Phi_m = \frac{1}{1 + \rho_a \frac{W}{M_s}} \quad (5)$$

où ρ_a est la masse volumique absolue de la poudre.

L'état de « pâte lisse » est repéré par des essais dichotomiques où l'on introduit en une seule fois dans le malaxeur la poudre et une certaine quantité d'eau. Un dosage rapide par ajout progressif d'eau dans le mélange, jusqu'au changement d'état, permet d'apprécier en amont le volume à incorporer.

On remarque d'autre part que la « consistance normale », telle que mesurée avec la sonde de Vicat, est atteinte pour certaines poudres (ciment, fillers siliceux, diatomites, etc.) avec une quantité d'eau à peine supérieure à celle nécessaire à l'obtention de la pâte lisse.

D'autre part, dans les bétons, les fines sont très souvent défloclées grâce à l'ajout d'un plastifiant ou fluidifiant organique ou minéral. L'essai peut alors être conduit en présence du produit choisi, à sa dose A de saturation [10] exprimée par rapport à M_s . Si cet adjuvant est conditionné en phase aqueuse, il faut encore tenir compte de sa teneur en eau w_{adj} . La relation devient alors :

$$\Phi_m = \frac{1}{1 + \rho_a \left(\frac{W}{M_s} + \frac{A}{1 + 1/w_{adj}} \right)} \quad (6)$$

Par ailleurs, beaucoup de particules fines sont poreuses et absorbent une part non négligeable d'eau. C'est le cas par exemple des diatomites ou de certains calcaires. En supposant d'une part que l'absorption Ab de la poudre est connue et, d'autre part, qu'elle est satisfait durant l'essai comme cela paraît vraisemblable, compte tenu de la faible distance à parcourir par l'eau dans les petits grains, le volume solide Φ_m est alors donné par :

$$\Phi_m = \frac{1}{1 + \rho_r \left(\frac{W}{M_s} - Ab \right)}$$

ou encore, en présence d'adjuvant (7)

$$\Phi_m = \frac{1}{1 + \rho_r \left(\frac{W}{M_s} + \frac{A\%}{1 + 1/w_{adj}} - Ab \right)}$$

avec ρ_r la masse volumique réelle de la poudre.

Cas des mélanges comprenant des fines et des plus gros grains

Il est parfois nécessaire de mesurer le volume solide d'une grave naturelle ou d'un mélange de granulats comportant des éléments de toutes tailles (fines, sable, gravillon, etc.), ne serait-ce qu'à titre de comparaison avec les valeurs restituées par un modèle.

À sec, dans ce type de mélange, les « fines » restent généralement agglomérées entre elles ou collées sur les plus gros grains. Leur compacité et leur granularité effectives diffèrent donc de celles prises en compte dans les simulations (particules individualisées), ce qui entraîne des écarts fréquents entre mesures « pessimistes » et prévisions « optimistes ».

Pour résoudre ce problème, le procédé proposé consiste à travailler dans le même cylindre que précédemment, avec une quantité d'eau (et de fluidifiant le cas échéant) à peine supérieure au volume des vides (inter et intragranulaire). Le liquide permet alors de « lubrifier » les particules, notamment les plus fines, de les individualiser et de leur transmettre la poussée d'Archimède, comme dans un béton par exemple. Le volume des vides intergranulaires peut être estimé par simulation, en considérant la granularité des matériaux, la compacité des tranches élémentaires et le niveau de compaction appliquée durant l'essai. Le piston doit alors être muni d'un filtre pour laisser passer l'excédent d'eau. Le calcul du volume solide est identique à celui proposé pour les grains secs. Pour les grains poreux, il faut encore satisfaire au préalable l'absorption par une imbibition conventionnelle.

Ces manipulations sont simples, mais parfois fastidieuses à réaliser, notamment lorsqu'il s'agit d'extraire en quantité suffisante les classes monodimensionnelles d'un granulat. En revanche, les résultats permettent souvent d'expliquer certains comportements originaux, comme les exemples ci-après se proposent de le montrer.

Exemple des granulats calcaires lorrains

Nous avons récemment formulé plusieurs bétons avec des granulats calcaires provenant de deux carrières (repérées *Carrière A* et *Carrière B*)

implantées à 25 kilomètres l'une de l'autre, au sud de Nancy, dans la même **formation géologique** du Bajocien moyen lorrain [11], [12] et [13].

Les principales propriétés physico-mécaniques de la roche et des granulats, mesurées selon les normes en vigueur, sont rappelées dans le tableau I. La granularité, fines comprises, des deux coupures 0/6 et 6/20 sélectionnées dans chaque carrière sont portées sur la figure 1.

On remarque la bonne concordance des propriétés physiques normatives des deux matériaux. Toutefois, la roche de la *Carrière B* présente une résistance à la traction plus faible, probablement associée aux valeurs plus faibles des coefficients Los Angeles et Micro Deval du granulat et aux plus fortes teneurs en fines de concassage du sable, partiellement argileuses au demeurant.

Pourtant, les bétons formulés avec ces deux matériaux selon la démarche de Baron-Lesage [14], dans des proportions équivalentes, donnent des performances très différentes, à l'avantage de la *Carrière A* comme l'attestent les résultats du tableau II présentés en exemple (ces bétons demandent un fort dosage de plastifiant, de 2,5 à 3 %, à cause de la présence des fines calcaires).

En effet, quelles que soient les gâchées, on constate expérimentalement que les bétons de la *Carrière B* demandent toujours plus d'eau efficace (et de fluidifiant) que ceux de la *Carrière A* pour pouvoir être coulés. Leur porosité finale est donc plus élevée et, d'après Féret [15], leur résistance mécanique s'en trouve obligatoirement amoindrie.

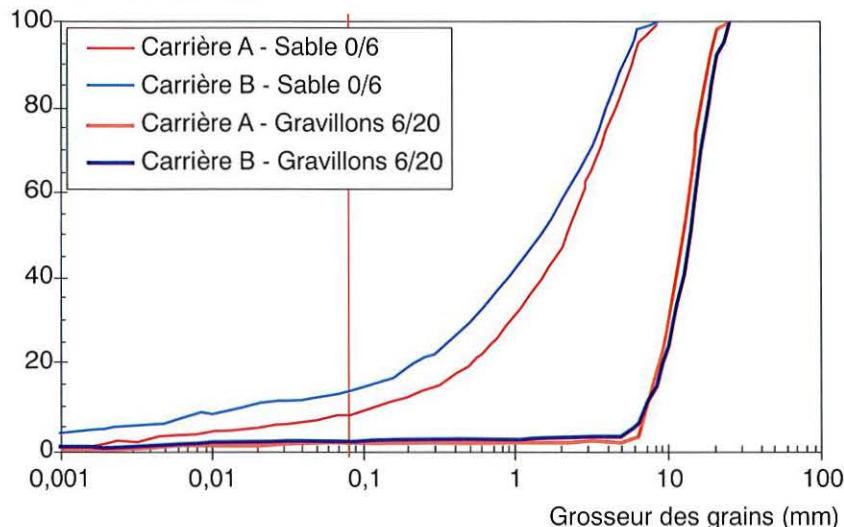
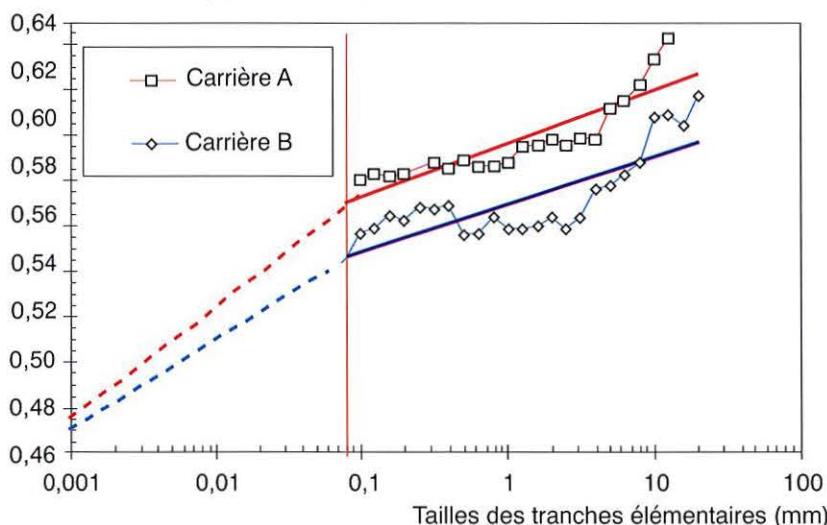
Divers essais complémentaires ont été entrepris pour tenter de limiter le besoin en eau de ces bétons [12] et [16]. Ils ont consisté pour l'essentiel :

- à laver les granulats ou à traiter le sable à la chaux dans le but d'atténuer d'éventuels effets néfastes des argiles ;
- à ajouter des cendres volantes mises à disposition de l'industriel pour améliorer la maniabilité (!) ;
- à recomposer le béton après réduction du spectre des deux coupures initiales et introduction d'une troisième coupure intermédiaire, afin d'augmenter la compacité des mélanges. Le taux maximum en fines a aussi été ajusté à celui recommandé par les spécifications.

Mais aucune expérience – industriellement coûteuse à réaliser – ne s'est révélée concluante :

- la « neutralisation » des argiles n'a pas donné de résultats probants ;
- les cendres volantes n'ont fait que raidir les mélanges ;

Tamisats cumulés (%)

Fig. 1 -
Granularité des matériaux calcaires.Volumes solides Φ_i (non confinés)Fig. 2 -
Volumes solides des tranches élémentaires des deux calcaires.

– la coupure intermédiaire s'est avérée « décompactante » et le béton discontinu présentait une porosité toujours élevée ; le taux initial en fines, un peu supérieur aux prescriptions, n'a que peu d'influence.

Des mesures de volume solide sur tranches élémentaires ont alors été réalisées sur les granulats des deux carrières selon le procédé décrit précédemment pour les grains sans fines. Les points, ajustés au milieu non confiné grâce à la relation (3), sont reportés sur la figure 2 avec les lissages correspondants en traits pleins.

Des demandes en eau ont aussi été effectuées sur les fines, en présence de 2 % de fluidifiant. Elles

ont permis de proposer, pour chaque produit, une loi linéaire décrivant les compactés élémentaires Φ_i dans le repère semi-logarithmique. Ces lois ont été choisies de façon à vérifier *simultanément*, avec une précision satisfaisante :

- les volumes solides mesurés Φ_m lorsqu'ils sont recalculés avec un modèle prédictif de compacité ;
- la continuité logique avec les valeurs obtenues sur les tranches supérieures, du moins à proximité de la coupure conventionnelle à 80 µm.

Les droites correspondantes sont présentées en pointillés sur la figure 2.

Il faut signaler que le comportement rhéologique des pâtes calcaires diffère généralement de celui des pâtes de ciment. Par exemple, les fines de la *Carrière B* donnent des pâtes « rai-dissantes » (formation brusque d'un bloc entourant l'arbre du malaxeur) qui évoluent lentement avec l'apport progressif d'eau. Celles de la *Carrière A* se comportent plus comme un « fluide binghamien » ayant un seuil assez élevé. Les pâtes de ciment présentent, elles aussi, un seuil de cisaillement, mais de valeur plus faible apparemment. *Rappelons que le but premier de l'essai est de calculer le volume solide d'une poudre placée à un état de compaction déterminé.*

Les courbes de la figure 2 montrent que les volumes solides des granulats de la *Carrière A* sont **toujours supérieurs** à ceux de la *Carrière B*, quelles que soient les tailles des grains. On observe aussi la décroissance, souvent constatée pour d'autres granulats, des volumes solides avec la dimension des grains.

Contrairement aux essais normalisés d'identification des granulats (qui n'ont pu différencier les matériaux), ce résultat démontre clairement que les faibles performances des bétons de la *Carrière B* sont dues à la faible compacité de ses granulats, ainsi probablement qu'à leur moindre performance mécanique (tableau I).

La confirmation est apportée par les simulations faites avec un modèle de compacité. Elles montrent en effet que tous les *mélanges* réalisés avec les granulats de cette carrière ont toujours une plus forte porosité que ceux de l'autre carrière. Par exemple, pour la formule présentée dans le tableau II, on obtient une porosité supérieure d'environ 5 % avec les granulats de la *Carrière B* ce qui, d'ailleurs, correspond approximativement à la quantité d'eau efficace (environ 50 litres pour 1 m³) qu'il faut ajouter à ce béton pour qu'il atteigne la consistance de celui de la *Carrière A*.

Il en résulte que les limites mécaniques de ces bétons ne pourront être dépassées que si l'on parvient à améliorer la qualité de l'arrangement granulaire. Pour cela, il faut :

- analyser les propriétés *morphologiques* et d'*états de surface* des grains, responsables manifestement des conditions d'empilement. Malheureusement, les essais normalisés sont peu développés en ce domaine ;
- quantifier par des méthodes simples (comme celle de la mesure des volumes solides) les effets de ces paramètres ;
- connaître en amont les raisons qui président à leur apparition. Comme nous le verrons plus loin, cela demande d'associer une étude pétro-

graphique et géologique (souvent oubliée) à la caractérisation des granulats sédimentaires.

Il s'agira alors de chercher un hypothétique mode de production palliatif des granulats de la *Carrière B* (exploitation sélective, concassage spécifique, etc.), afin de modifier autant que possible le « morphisme » de ses grains pour le rapprocher, par exemple, de celui des matériaux issus de la *Carrière A*.

TABLEAU I
Propriétés physico-mécaniques
des granulats calcaires utilisés
pour fabriquer les bétons

Critères	Carrière A	Carrière B
Masse volumique réelle (kg/m ³)	2510	2520
Absorption (%)	2,3 – 3,1	2,3 – 2,5
Aplatissement	9	5
Écoulement des sables [0,08/4] (s)	18	18
Coefficient volumétrique	26	27
Teneur en CaCO ₃	> 98	> 95
Teneur en fines du sable (< 80 µm)	9	14
Résistance à la compression sur roche (MPa)	72	73
Résistance à la traction sur roche (MPa)	8,5	3,8
Los Angeles (sur fraction 6,3/10)	23	31
Micro Deval en présence d'eau	19	32
Friabilité des sables	44	53

TABLEAU II
Bétons obtenus avec les matériaux des deux carrières
Exemple de formule plastifiée dosée à 350 kg
de CEMII/B pour 1 m³. Affaissement 10 cm

Critères	Carrière A	Carrière B
Eau efficace (kg/m ³)	195	242
Masse volumique (kg/m ³)	2403	2372
Résistance à la compression (MPa)	40	24
Résistance à la traction (MPa)	4,5	2,5

Exemple des grès du Luxembourg

Nous avons également étudié la compacité de granulats gréseux à matrice calcaire provenant de la formation des grès du Luxembourg (Hettangien supérieur). Il s'agit, du point de vue de la géologie, d'une lentille régionale de plus de 100 mètres de puissance qui résulte d'apports terrigènes et thalassogènes. Elle est constituée d'une imbrication de faciès gréseux de résistance mécanique très variable, allant de sables peu consolidés à des roches bien indurées localement exploitées en pierres de taille. L'abattage et le concassage de ces grès donne des sables fins en grande quantité et des gravillons de bonne qualité (utilisés par exemple en assises de chaussées).

Des mesures de volumes solides sur tranches élémentaires ont été réalisées sur deux coupures prélevées dans deux carrières distantes d'une trentaine de kilomètres. Il s'agit d'un sable 0/2 primaire et d'un tout venant 0/20 secondaire. Les courbes granulométriques (fines comprises) de ces granulats, établies par tamisage pour la fraction grossière et par sédimetométrie pour la fraction fine, sont tout d'abord présentées sur la figure 3.

On constate sur cette figure que les matériaux sont assez particuliers. En effet :

- le sable contient plus de 60 % de grains compris entre 100 et 300 µm. Son « D_{50} » est de 220 µm et son module de finesse n'est que de 1,18 ;
- le tout venant 0/20 présente, lui aussi, dans sa fraction inférieure à 1 mm une part non négligeable d'éléments compris entre 100 et 300 µm (inflexion de la courbe dans cette tranche de tailles).

La présence de cette classe granulaire est à rapprocher, de toute évidence, de la nature du grès, qui est formé essentiellement de grains de quartz compris dans cette fourchette de tailles. Ces grains, liés par la matrice calcaire, sont libérés des faciès *les plus tendres* au moment du concassage.

Comme précédemment, les compacités des tranches élémentaires des deux granulats ont été mesurées selon les procédés décrits plus haut. Leur détermination nécessite la connaissance préalable de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption des matériaux [1] et [5]. Ceux-ci ont été soigneusement mesurés, pour le sable, sur le *matériau tel quel* selon la norme NF P 18-555 et, pour le tout venant, sur la *fraction 4/20* selon la norme NF P 18-554.

Les résultats sont portés dans le tableau III. Ils sont, là encore, assez différents d'un granulat à l'autre, à cause de la texture des grains. Le 4/20, formé quasi exclusivement de fragments de grès, est assez poreux (absorption plutôt élevée). Sa masse volumique est donc plus faible que celle du sable, constitué majoritairement, comme signalé plus haut, de grains de quartz individualisés (masse volumique réelle proche de celle de la silice).

TABLEAU III
Masse volumique et absorption des granulats gréseux
Mesures réalisées selon les normes en vigueur

Critères	Sable 0/2	Gravillon 4/20
Masse volumique réelle (kg/m ³)	2627	2392
Absorption (%)	0,60	2,75

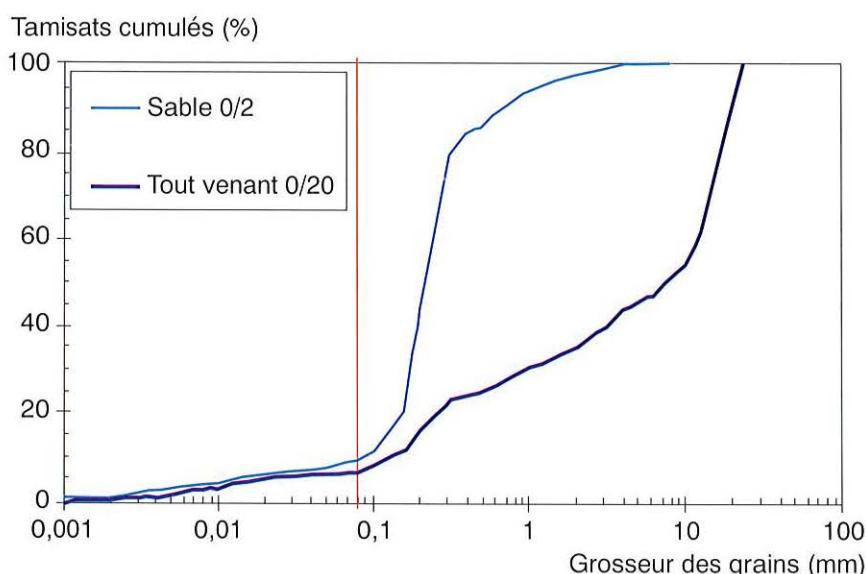


Fig. 3 -
Granularité des
matériaux gréseux
utilisés pour les
mesures de compacité.

Les volumes solides obtenus (Φ_i) sont portés sur la figure 4 avec, en trait pointillé pour les fines du sable 0/2, le lissage réalisé selon les consignes adoptées pour les calcaires (voir précédemment). On découvre que :

- les compacités du tout venant sont supérieures de 10 à 20 % à celles du sable, quelles que soient les tailles ;
- il existe pour chaque matériau deux familles de points correspondant soit aux éléments grenus de grosseurs supérieures à 800 μm , soit aux fines et aux éléments associés de tailles inférieures à 315 μm . Une césure apparaît dans la zone située vers 500 μm ;
- dans chaque famille, on observe une nette décroissance des volumes solides avec la taille des grains.

Avant de chercher une interprétation à ces phénomènes, il importe de vérifier qu'il ne s'agit pas simplement d'artefacts ayant pour seule origine les valeurs de masses volumiques réelles prises en compte dans les calculs. En effet, les propriétés physiques mesurées *selon les normes* sont des valeurs *moyennes*, caractéristiques d'un *granulat*, qui ne correspondent pas forcément aux propriétés effectives de chaque tranche élémentaire. Dans la population de grains qui constituent le matériau, la minéralogie et la texture ne sont généralement pas des constantes « transdimensionnelles ». C'est vrai en particulier pour ces matériaux sédimentaires gréseux constitués d'au moins deux familles de grains.

Fig. 4 -
Volumes solides
mesurés sur les grès.
Mesures brutes.

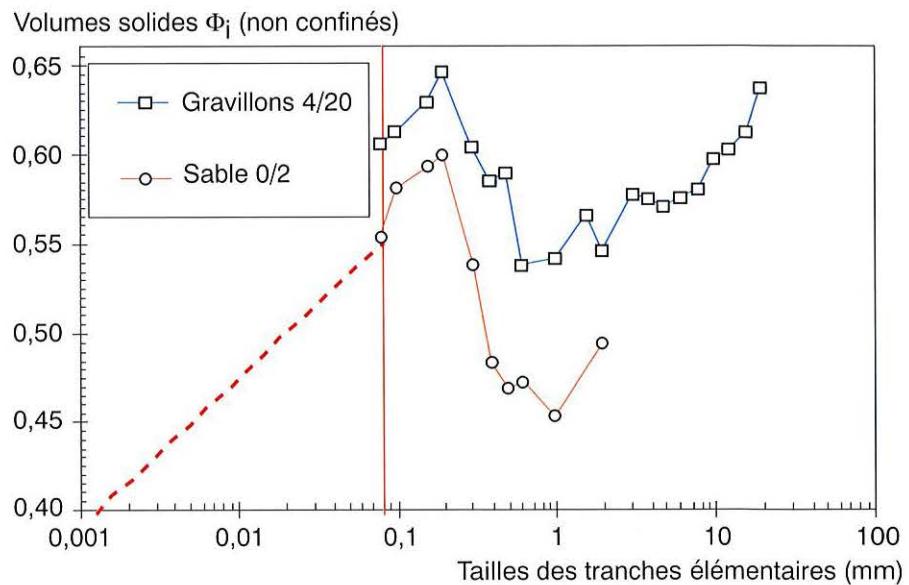
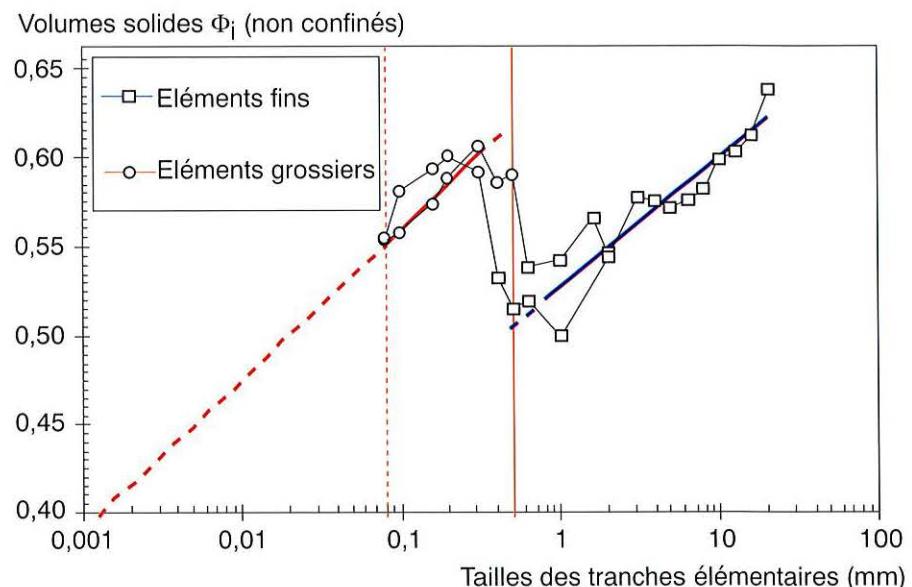


Fig. 5 -
Lissage des volumes
solides selon les frac-
tions fines et grenues.



Nous avons alors recalculé les volumes solides en considérant en première approximation, pour chaque matériau, une masse volumique réelle pour les particules fines ($< 315 \mu\text{m}$) et une masse volumique réelle pour les grains plus gros. Il aurait été fastidieux, voire irréaliste, compte tenu des techniques de mesures, de rechercher la masse volumique réelle ρ_{ri} de chaque classe de taille d_i de chaque carrière, bien que ce soit logiquement la seule approche réellement pertinente !

La masse volumique des éléments fins a été déterminée sur la tranche 0,16/0,2 du sable primaire. Celle des éléments grenus a été prise égale à la valeur mesurée précédemment sur la fraction secondaire 4/20. Les valeurs correspondantes, étendues aux deux fractions présentes, sont portées ou rappelées dans le tableau IV. On vérifie bien que la masse volumique des éléments fins est un peu supérieure à celle du sable entier, telle que mesurée selon la norme (tableau III).

TABLEAU IV
Masse volumique et absorption des granulats gréseux
Mesures réalisées selon les fractions granulométriques

Critères	Fraction 0/0,315	Fraction 0,8/20
Masse volumique réelle (kg/m^3)	2632	2392
Absorption (%)	0,26	2,75

Les nouveaux volumes solides obtenus sont portés sur la figure 5. On y découvre que le traitement a eu pour effet de superposer les deux courbes. Toutefois, la césure initialement observée vers $500 \mu\text{m}$ subsiste toujours, tout en étant atténuée en amplitude.

Les masses volumiques réelles appliquées aux deux fractions présentes dans ces granulats gréseux ne suffisent donc pas à faire disparaître le comportement binaire initialement observé. Elles ont toutefois permis de réunir les compacités des éléments grenus d'une part et celles des éléments fins d'autre part. Un lissage satisfaisant peut d'ailleurs être proposé pour chaque famille de grains (fig. 5) ; le premier concerne les éléments de tailles supérieures à $500 \mu\text{m}$; le second se rapporte aux éléments fins inférieurs à $500 \mu\text{m}$ associés aux fines. Observons que l'excellente continuité obtenue pour ce dernier démontre clairement que la coupure habituelle à $80 \mu\text{m}$, entre fines et grains, n'a pas de fondement physique dans le cas présent.

Il faut donc, comme pour les calcaires, se rapprocher des propriétés morphologiques et d'état de surface des grains, pour interpréter l'évolution des empilements élémentaires.

Volumes solides élémentaires et propriétés texturales des grains

Les deux exemples précédents ont montré des comportements très distincts selon la nature des matériaux granulaires. Reste à préciser cependant l'origine « génétique » des phénomènes observés et, si possible, à établir des corrélations entre certaines mesures physiques « classiques » et les mesures de volumes solides.

Commençons par les **granulats gréseux** qui viennent d'être étudiés. Rappelons tout d'abord qu'ils sont formés, pour les éléments fins, de grains siliceux individualisés d'environ 100 à $300 \mu\text{m}$ de diamètre et, pour les grains plus gros, de fragments de grès constitués des mêmes grains fins cimentés par une matrice calcitique.



a. Grains fins arrondis (0,2 mm) extraits du granulat gréseux.



b. Grains plus gros rugueux (0,8 mm) extraits du granulat grisé.

Fig. 6 - Aspect de deux branches granulaires extraites du grès

Longueur du champ : 7 mm - Largeur du champ : 4,7 mm

Des observations détaillées à la loupe binoculaire (fig. 6) montrent que les éléments fins ont des surfaces généralement arrondies et lisses. Par contre, les éléments grossiers ont des *formes* irrégulières et anguleuses, et leur surface présente une certaine *rugosité* formée d'aspérités et de proéminences consécutives au mode de fragmentation du grès (rupture de la matrice de calcite avec contournement des éléments fins siliceux). Ces deux critères morphologiques décelés sur *les gros grains* méritent d'être analysés :

– la rugosité, que l'on peut par exemple définir par la hauteur moyenne des protubérances, paraît constante quelle que soit la taille des grains. Dans ce cas, son influence est faible vis-à-vis de la morphologie globale et son principal effet sur l'empilement est de réduire, d'une certaine valeur, *tous* les volumes solides mesurés (par rapport à des grains arrondis à surface lisse par exemple où la compacité maximale peut avoisiner celle d'un empilement aléatoire de sphères de valeur 0,64 environ) ;

– en revanche, la *forme* des grains grenus varie largement avec la taille. En témoignent les mesures d'aplatissement (NFP 18-561) et de coefficient volumique (ancienne norme NFP 18-301) exécutées sur la fraction 4/20 et présentées sur la figure 7. Il ne s'agit pas des essais « bruts » demandés par les spécifications et destinés à fournir des valeurs moyennes pour qualifier le matériau, sans considération des dispersions, mais des coefficients partiels obtenus sur *chaque classe élémentaire*. La figure 7 montre en effet que les petits grains du gravillon sont bien plus plats et allongés que ne le sont les gros. Il existe donc, dans le cas présent, une dépendance

directe entre le volume solide, qui diminue parallèlement à la taille (fig. 5), et la forme des grains telle que caractérisée par ces mesures élémentaires adaptées des modes opératoires normatifs.

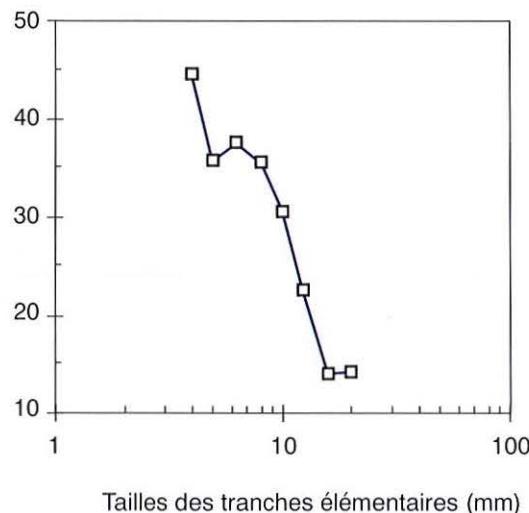
Ce sont les conditions de sédimentation et d'induration qui transparaissent dans la forme de ces gros grains et, donc, dans la compacité de leur empilement. L'observation géologique montre en effet que les grès les plus durs, bien que formés de bancs d'aspect compacts, présentent en réalité une stratification mécanique qui se marque par un délitement et des fractures en marches d'escalier de hauteur inférieure à 10 mm.

Au concassage giratoire par exemple, ce sont ces « litages » qui cèdent en premier et qui favorisent l'apparition de grains plats d'épaisseur égale ou inférieure à celle de ces strates élémentaires.

On voit bien d'ailleurs sur les courbes des figures 5 et 7 un changement de gradient vers 8-10 mm, de sorte que si l'on voulait affiner le lissage des points, on aurait plutôt tendance à proposer non pas une, mais deux, voire trois droites pour couvrir l'évolution des volumes solides dans cette zone du graphique.

Pour les petits grains de grès et les fines associées, on peut simplement constater (déplorer) qu'il n'existe pas de méthodes simples de caractérisation des formes. Les mesures des volumes solides, corrélées aux observations à la loupe, montrent toutefois que les plus gros d'entre eux, arrondis et lisses, s'arrangent plutôt bien puisque les compacités sont équivalentes à celles des grains grenus de tailles intermédiaires.

Coefficients partiels d'aplatissement



Coefficients partiels d'aplatissement

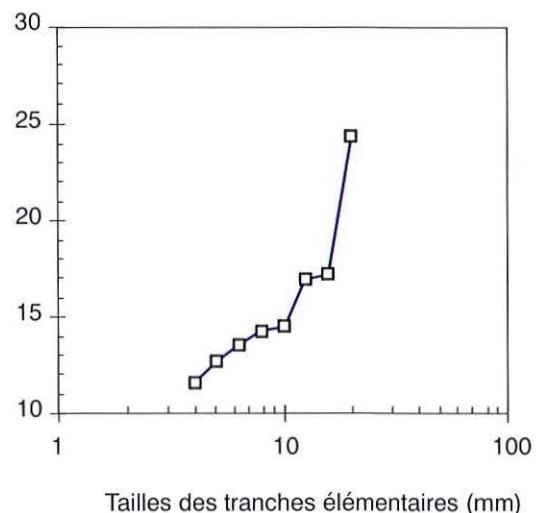


Fig. 7 - Fraction grenue des grès. Évolution des critères de forme avec la taille des grains

Plus on se déplace ensuite vers les éléments fins, plus on constate une baisse des volumes solides (mesures, puis lissage surfines). Cette décroissance ne peut être liée, elle aussi, qu'à la morphologie « décompactante » des grains naturels qui, lorsqu'ils deviennent de plus en plus fins, présentent ordinairement des formes en esquilles, en aiguilles, etc. Celles-ci sont l'expression des cristaux et de leurs clivages, notamment, pour ces grès, celle des fragments de la matrice calcitique disloquée. À ces tailles, les différences de densité entre particules jouent probablement aussi. Dans ce cas, un lissage linéaire unique pour les fines et ultra fines ne peut être qu'approximatif, mais il n'existe pas encore de méthodes communes de caractérisation physique suffisamment fines pour ces petits et très petits éléments.

Les calcaires des *Carrières A* et *B* sont, quant à eux, majoritairement de type oolithique (le diamètre moyen des oolithes est de l'ordre de 500 µm). Toutefois, et contrairement au grès, les coefficients de forme des granulats (aplatissement, coefficient volumétrique (tableau I) sont de faibles valeurs et comparables entre matériaux. Il s'agit donc d'un autre phénomène qui agit sur la qualité de l'empilement des deux types de grains, seuls ou mélangés.

Nous pensons que c'est la *rugosité* de la roche qui joue ici un rôle prépondérant. En effet, bien qu'il s'agisse globalement des mêmes calcaires, on observe que ceux de la *Carrière A* présentent une texture légèrement « saccharoïde ». La genèse de ce phénomène paraît liée à la présence d'un fossé d'effondrement à l'endroit de la carrière. Dans cette zone, les calcaires ont subi une plus forte action des contraintes tectoniques et ils ont *partiellement*

recristallisé. Cela les a rendus plus homogènes, voire plus isotropes, comme le confirme d'ailleurs leur meilleure résistance en traction (tableau I).

La *Carrière B*, par contre, est située dans une zone non faillée. Les oolithes, bioclastes et autres polypiers indurés, cimentés dans une matrice micritique plus tendre et stratifiée, confèrent au matériau une structure plus hétérogène. À la cassure, il se formerait alors une *rugosité* en « têtes d'épingles », non décelée par les essais classiques, qui empêcherait le « bon » arrangement des grains.

Des observations *microscopiques* comparatives supplémentaires, portant sur les « états de surface », apportent des éléments de réponse. Elles montrent en effet que la surface des grains de la *Carrière B* est pourvue de fines aspérités en forme d'ovoïdes provenant notamment du déchaussement, lors du concassage, des petites oolithes formant le calcaire. Certains grains de la *Carrière A* présentent aussi cette particularité, mais ils sont disséminés parmi les grains plus cristallins, eux aussi oolithiques, à la cassure plus franche.

Ces deux rugosités sont chacune relativement constantes dans la tranche 0,1/4 mm des deux matériaux, car les pentes des lissages proposés sur la figure 2 peuvent comporter, comme proposé sur la figure 8, un palier quasi horizontal dans cette zone. Au-delà, ce sont les critères de formes liés, eux aussi, à l'expression d'une stratification, qui prennent l'ascendant. La modélisation de l'évolution des volumes solides avec la taille peut alors être affinée comme proposé sur la figure 8, afin de permettre une modélisation encore plus réaliste de la compacité des mélanges.

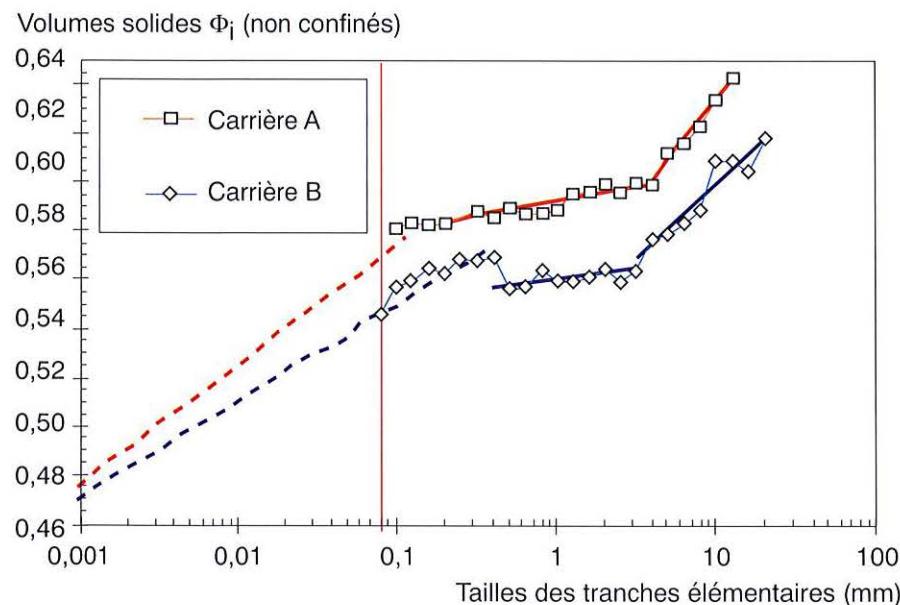


Fig. 8 -
Lissages affinés
des volumes solides
des deux calcaires.

Conclusion

Les deux exemples traités dans cet article montrent clairement l'intérêt qu'il peut y avoir à mesurer le volume solide des tranches élémentaires d'un granulat. Outre le fait qu'elle apporte les paramètres indispensables aux calculs de compacité réalisés par les modèles, cette technique fournit « à moindre frais » des renseignements généralement inédits sur les propriétés des grains.

Pour les calcaires, elle a permis d'expliquer les différences de porosité (résistance) observées entre deux bétons identiques *a priori*.

Pour les grès, les mesures ont révélé l'existence de deux familles de grains constituées, l'une des éléments supérieurs à 500 µm, l'autre des éléments plus fins associés aux fines. La coupure à

80 µm communément considérée par les praticiens n'a donc pas de sens physique dans le cas présent.

Ces mesures font partie des techniques d'optimisation moderne des mélanges granulaires, qui sont basées sur la prise en compte des effets induits par chaque grain ou, pour le moins, par chaque classe granulaire. Elles s'appliquent aussi bien aux mélanges « performants » qu'aux mélanges plus « courants », en particulier ceux qui utilisent des granulats non traditionnels.

Elles montrent enfin la nécessité qu'il y a de développer des essais plus sophistiqués que ceux définis par certaines normes actuelles, pour améliorer la caractérisation des propriétés des granulats, par référence aux observations géologiques toujours indispensables.

Remerciements

Les auteurs remercient M. Jean Voirin, du Laboratoire Screg-Est de Nancy, pour sa contribution à la caractérisation des matériaux calcaires. Ils n'oublient pas non plus le soutien matériel et logistique apporté par MM. Ferdinand et Guy Feidt, de la Société des Bétons Feidt, ainsi que par MM. Scharfe et Steichein, du Laboratoire d'Essais des Matériaux des Ponts et Chaussées du Luxembourg.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] de LARRARD F., FERRARIS C.-F. (1998), Rhéologie du béton frais remanié, I : plan expérimental et dépouillement des résultats, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **213**, janv.-févr., pp. 73-90.
- [2] de LARRARD F., FERRARIS C.-F. (1998), Rhéologie du béton frais remanié, II : relations entre composition et paramètres rhéologiques, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **214**, mars-avril, pp. 69-80.
- [3] de LARRARD F., FERRARIS C.-F. (1998), Rhéologie du béton frais remanié, III : l'essai au cône d' Abrams modifié, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **215**, mai-juin, pp. 53-60.
- [4] de LARRARD F., SEDRAN T., ANGOT D. (1994), Prévision de la compacité des mélanges granulaires par le modèle de suspension solide, I - Fondements théoriques et étalonnage du modèle, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **194**, nov.-déc., pp. 59-70.
- [5] de LARRARD F., SEDRAN T., ANGOT D. (1994), Prévision de la compacité des mélanges granulaires par le modèle de suspension solide, II - Validation. Cas des mélanges confinés, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **194**, nov.-déc., pp. 71-86.
- [6] de LARRARD F., SEDRAN T. (1994), RENÉ-LCPC : un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux de génie civil, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **194**, nov.-déc., pp. 87-93.
- [7] de LARRARD F. (1988), *Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances*, Rapport de recherche LCPC, **149**, mars.
- [8] CAQUOT A. (1937), *Rôle des matériaux inertes dans le béton*, Mémoire de la Société des ingénieurs civils de France, pp. 562-582, juillet-août.
- [9] BEN AÏM R. (1970), *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.
- [10] de LARRARD F., PUCH C. (1989), Formulation des bétons à hautes performances, Méthode des coulis, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **161**, mai-juin, pp. 75-84.

- [11] LECOMTE A., MASSON L., REMILLON A. (1995), Formulation de bétons courants avec des granulats calcaires lorrains 0/6 et 6/20, Annales de l'ITBTP, **539**, pp. 1-24, déc.
 - [12] ZENNIR A. (1996), *Bétons calcaires en Lorraine. Utilisation des granulats du Bajocien de Viterne pour la formulation de bétons courants*, Thèse de l'Université de l'UHP Nancy 1.
 - [13] LECOMTE A., ZENNIR A. (1997), Préface de F. de Larrard, Modèle de suspension solide et formulation de bétons calcaires en Lorraine, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **212**, nov.-déc., pp. 71-86.
 - [14] BARON J., LESAGE R. (1976), *La composition du béton hydraulique ; du laboratoire au chantier*, Rapport de recherche LCPC, **64**, déc.
 - [15] FERET R. (1892), *Compacité des mortiers hydrauliques*, Annales des Ponts et Chaussées, **7**, IV.
 - [16] VOIRIN J. (1998), *Contribution à l'étude des bétons de calcaires lorrains. Application au site de Viterne*, Diplôme de Recherches Doctorales, Université Henri-Poincaré Nancy 1, juin.
-

ABSTRACT

Mix compactness and the characteristics of grains

A. LECOMTE, J.-M. MECHLING

This paper deals with measurement of the solid volume (compactness) of slices of aggregate particles, a parameter used by modern granular mix optimization methods. The paper begins by reviewing the measurement procedures and then demonstrates, using two examples and with reference to standards for the characterization of aggregate particles, the validity of the method as a means of discovering the internal structure and the morphological and surface state of the grains.

From the first example we can see that this method was able to explain differences in the measured performance of concrete made with two limestones from the same geological formation. These differences are linked to differences in the texture and roughness of the grains. In the second example, the technique showed that the conventional separation between fines and grains that is imposed at 63 or 80 µm did not always coincide with the differences in the physical properties measured in accordance with the standards. These observations are to be linked with the nature and geological history of the materials.