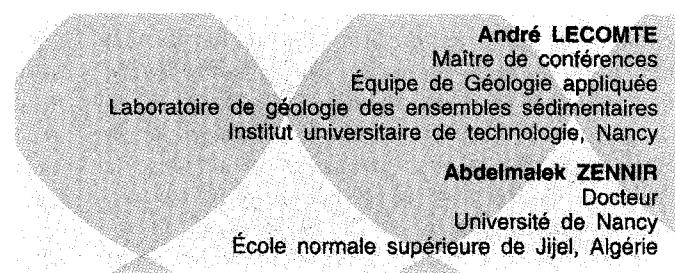


# Modèle de suspension solide et formulation de bétons calcaires en Lorraine



## Présentation

François de LARRARD

Chef de la section Formulation et mise en œuvre des bétons  
Division Bétons et ciments pour ouvrages d'art  
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

*Alors que les praticiens utilisent encore largement des méthodes empiriques pour la formulation des matériaux de génie civil, méthodes dont les plus récentes datent de la fin des années soixante, il est intéressant de voir un nombre croissant de travaux de recherche tendant à proposer des approches plus scientifiques et rationnelles. L'enjeu est non seulement d'obtenir des matériaux plus adaptés et plus économiques, mais aussi de permettre une meilleure utilisation des ressources naturelles, en faisant tomber des barrières normatives qui parfois n'ont pas lieu d'être.*

*L'article d'André Lecomte et d'Abdelmalek Zennir présente ainsi une application d'un modèle proposé il y a quelques années, dans un domaine que nous n'avons que peu exploré, à savoir celui de la formulation des bétons courants. Les essais relatés permettent d'abord d'enrichir les données existantes sur les interactions binaires entre classes granulaires, dont la modélisation est à la base de toute la démarche. Il est confirmé ensuite que le modèle appliqué au béton frais permet de retrouver avec une bonne approximation les proportions granulaires optimales, conduisant au béton le plus économique, homogène et durable pour une consistance et une résistance données.*

## RÉSUMÉ

Des mesures de compacité sur granulats calcaires ont permis de confirmer les fonctions qui décrivent les interactions granulaires associées au modèle de suspension solide. Après une légère adaptation, le modèle a servi à formuler des bétons à base de granulats calcaires « non conventionnels ».

La comparaison avec les résultats expérimentaux s'est avérée très bonne, ce qui démontre la pertinence de l'outil pour la formulation des bétons hydrauliques et son aide précieuse dans la mise au point de bétons nouveaux.

**MOTS CLÉS :** 32 - Béton hydraulique - France - Calcaire - Composition du mélange - Essai - Granulat - Compacité - Méthode d'essai.

*Enfin, il apparaît possible, moyennant quelques adaptations, de prévoir la demande en eau du béton pour une maniabilité fixée, ce qui ouvre la voie à un traitement numérique objectif et automatique de la problématique globale de formulation des bétons. L'étape ultérieure, pour laquelle il reste encore du chemin à parcourir, sera de construire des systèmes capables de piloter en temps réel une installation de fabrication de béton, de façon à répercuter sur la composition du matériau tout changement qualitatif de la fourniture. On réduira ainsi grandement la variabilité des bétons produits, en termes de rhéologie et de propriétés mécaniques, tout en augmentant la qualité et l'économie des structures réalisées. L'industrie du béton aura alors atteint le degré de développement qu'on connaît déjà dans la fabrication du ciment ou dans le génie chimique.*

## Introduction

La plupart des bétons courants sont actuellement fabriqués en Lorraine avec les granulats siliceux alluvionnaires des vallées de la Meurthe et de la Moselle. Face à l'épuisement de cette ressource, les instances administratives et scientifiques et les entreprises cherchent à valoriser d'autres matériaux de substitution aptes à fournir, si possible, des bétons de même qualité.

Parmi les gisements potentiels se trouvent les calcaires du Bajocien (côtes de Moselle) qui forment, par leur puissance et leur extension, la principale réserve régionale. Il s'agit le plus souvent de calcaires « tendres » qui produisent des granulats souvent riches en fines, parfois argileuses au demeurant. Ces matériaux économiques sont déjà largement utilisés en techniques routières. Il convient donc d'envisager aussi leur emploi comme granulats de substitution dans les bétons, même si certaines de leurs propriétés les classent *a priori* « hors spécifications » pour cet usage.\*

Ces calcaires présentent par ailleurs une forte variabilité spatiale de leur qualité, ce qui limite la transposition de résultats d'une carrière à

\* Notons toutefois, à leur avantage, que ces calcaires possèdent certaines affinités (activités) avec les pâtes liantes, et que la présence des fines peut améliorer, dans certaines proportions, la compacité-résistance. Un traitement des argiles est aussi possible (lavage, chaux), et les granularités (fines) peuvent être corrigées.

\*\* Dans son principe, le modèle assimile un mélange granulaire à une « suspension solide » obtenue par malaxage. Celle-ci présente une viscosité relative (par rapport à l'eau) grande, mais finie, même après serrage intense.

l'autre et conduit à travailler au cas par cas. Au niveau des formulations, compte tenu des spécificités énoncées, les méthodes graphiques utilisées pour les bétons traditionnels ne peuvent convenir d'emblée. Seule la réalisation d'une série d'expériences en laboratoire (et en centrale), selon par exemple la démarche de Baron-Lesage [1], pourra apporter pour chaque cas une réponse concrète en terme de maniabilité-résistance. Ces essais en vraie grandeur sont toutefois fastidieux et onéreux à réaliser. Ils peuvent maintenant être allégés, voire remplacés par simulation grâce au modèle de suspension solide proposé par F. de Larrard et Th. Sedran [2]. Cet outil permet en effet d'atteindre la composition du squelette granulaire optimum en se basant sur les propriétés effectives de chaque matériau et sur la « viscosité relative »\*\* du mélange.

Les aspects théoriques, l'étalonnage et la validation de ce modèle sont publiés en [3] et [4]. On retiendra simplement à ce stade que le calcul de la concentration solide d'un mélange, qui permet d'accéder aux proportions, est déduit de :

- la granularité des différents constituants,
- la compacité propre virtuelle de chacune de leurs classes élémentaires (déduite de la compacité propre mesurée et de la viscosité relative atteinte au moment de la mesure, viscosité dite de référence),
- la valeur de deux coefficients d'interaction qui quantifient les réactions granulaires entre classes (effet de paroi et effet de desserrement),
- la viscosité relative souhaitée pour la « suspension solide ».

Il importe évidemment de bien mesurer à chaque fois, selon des protocoles conventionnels ou normalisés, les granularités et compacités propres de chacun des constituants utilisés. En revanche, pour ce qui concerne les deux coefficients d'interaction, des mesures assez fastidieuses, pratiquées sur mélanges binaires d'un granulat concassé et d'un granulat roulé [3], ont montré que leur évolution pouvait être simplement décrite par deux fonctions uniques *a priori*. Il est donc heureusement inutile d'étalonner à chaque fois les deux fonctions d'interaction associées au modèle.

On notera cependant que les expériences ont été réalisées sur des granulats de forme et de rugosité différentes de celles des granulats calcaires lorrains. Il était donc intéressant de reconduire les mesures [5], ne serait-ce que pour vérifier la pertinence des ajustements proposés et pour conforter, le cas échéant, leur universalité.

Précisons toutefois que les données présentées ont été obtenues avant parution du modèle de suspension solide, dans le cadre d'un étalonnage

du modèle linéaire de compacité qui lui était antérieur [6]. Les mesures ont pu néanmoins être utilisées car elles ont été acquises selon un protocole similaire à celui qui est associé au nouveau modèle.

Par suite, le modèle de suspension solide a servi à étudier divers bétons calcaires. Les proportions trouvées ont été comparées à celles obtenues selon la démarche expérimentale de Baron-Lesage.

## Compacités propres et coefficients d'interaction mesurés sur granulats calcaires

### Matériaux et protocole opératoire

C'est un granulat calcaire concassé 0/31,5 provenant d'une carrière implantée dans les *polypiers* supérieurs du Bajocien lorrain, à une quinzaine de kilomètres au sud de Nancy, qui a été choisi pour réaliser les mesures. Vingt-cinq classes élémentaires  $d/D$  ( $D = d \sqrt[10]{10}$  en général) ont été extraites par tamisage de l'échantillon prélevé. Ces classes ont servi tout d'abord à la détermination des compacités propres, puis, par mélange deux à deux, au calcul des coefficients d'interaction.

Les manipulations ont simplement consisté à relever la compacité de ces classes unimodales ou des mélanges après qu'ils aient été soumis à une phase de vibration sous contrainte dans un conteneur d'expérimentation.

Deux types de conteneur ont été utilisés selon la taille du granulat testé :

➤ une éprouvette cylindrique graduée de 2 litres en verre pour les granulats ne dépassant pas 4 mm de grosseur,

➤ un moule métallique cylindrique  $16 \times 32$  cm pour les grossesures supérieures à 4 mm.

Pour les mesures, les échantillons ont tout d'abord été introduits par couches minces dans le conteneur approprié. Les mélanges ont été soigneusement homogénéisés au préalable par brassage manuel. Le conteneur a ensuite été fixé sur une machine à tamiser de laboratoire et équipé d'un piston de même diamètre que le diamètre intérieur du conteneur. Une phase de vibration avec application d'une pression manuelle exercée par le biais du piston guidé verticalement a alors permis le serrage du granulat jusqu'à stabilisation de sa hauteur dans l'éprouvette ou le moule. Les opérations ont été répétées plusieurs fois pour chaque préparation, en faisant varier la fréquence (de 10 à 60 Hz) et la durée de vibration (de une à trois minutes), et seule la

valeur la plus faible a été considérée. Pour les classes unimodales, le serrage maximum était généralement atteint pour les grains fins après un temps de vibration assez long à des fréquences élevées et, pour les gros grains, après un temps plutôt court à des fréquences plus basses. Pour les mélanges binaires, il n'a pas été possible d'établir une corrélation franche entre grosseur, titre des mélanges, temps et fréquence de vibration, et la stabilisation était souvent inconstante. Compte tenu de la relative friabilité de ces grains calcaires « tendres » (tableau I), il se produisait souvent durant les manipulations une attrition non négligeable, marquée par l'apparition de fines qui ont été systématiquement éliminées aux cours des tamisages de récupération. Ce phénomène a pu altérer quelque peu les mesures, en raison aussi d'une possible évolution de l'état de surface de certains matériaux plusieurs fois réutilisés.

TABLEAU I  
Principales propriétés des granulats calcaires utilisés pour les expériences (valeurs moyennes mesurées selon les normes en vigueur)

Densité réelle	2,520	Los Angeles	31
Absorption	2,5	Micro Deval en présence d'eau	32
Porosité	6	Aplatissement/Coefficient volumétrique	5/27

### Aspects théoriques

Durant ces opérations, la compacité de chaque suspension solide a été mesurée lorsque sa viscosité relative, qui résulte du mode de serrage, atteignait une valeur de référence  $\eta_r^*$ . D'après les auteurs [3], qui ont repris le modèle de viscosité de Mooney [7], cette viscosité relative est liée à la compacité virtuelle maximale que ces granulats peuvent en théorie atteindre par empilement géométrique (viscosité infinie) par les relations :

– pour une classe unimodale de grosseur  $d_i$  ;

$$\eta_{r,i}^* = \exp \left( \frac{2,5}{\frac{1}{\alpha_i} - \frac{1}{\beta_i}} \right), \quad (1)$$

avec  $\alpha_i$  et  $\beta_i$  les compacités propres réelle et virtuelle,

– pour un mélange multimodal ;

$$\eta_{r,m}^* = \exp \left( \sum_{i=1}^n \frac{2,5 y_i}{\frac{1}{c} - \frac{1}{\gamma_i}} \right), \quad (2)$$

avec  $c$  la compacité réelle atteinte,  $\gamma_i$  la compacité virtuelle du mélange lorsque la classe de grosseur  $d_i$  ( $d_1 > d_i > d_n$ ), de compacité propre virtuelle  $\beta_i$ , est dominante, et  $y_i$  la proportion volumique de la classe  $i$  dans le mélange.

La compacité virtuelle  $\gamma$  du mélange est, quant à elle, donnée par :

$$\gamma = \inf_{\gamma_i \neq 0} (\gamma_i) \quad (3)$$

$$y_i = \frac{1}{\sum_{k=1}^m \left[ \sum_{j=1}^{i-1} \left\{ y_{k,j} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1}{\beta_{k,j}} \right) b_{ji} \right] \right\} + \sum_{j=i}^n \left( \frac{y_{k,j}}{\beta_{k,j}} a_{ij} \right) \right]} \quad (1)$$

avec :

- $m$ , nombre de constituants du mélange,
- $y_{k,j}$ , proportion volumique de la classe de taille  $d_j$  du constituant  $k$ ,
- $\beta_{kj}$ , compacité propre virtuelle de la classe de taille  $d_j$  du constituant  $k$ ,
- $y_i$ , somme des  $y_{k,i}$ .

Dans cette relation, lorsque la classe  $i$  est dominante, le coefficient  $a_{ij}$  désigne l'effet de desserrage exercé par le granulat  $j$  sur la classe  $i$ , et le coefficient  $b_{ij}$  désigne l'effet de paroi subi par le granulat  $j$  de la part de la classe  $i$ . Comme on peut le constater, ces coefficients sont considérés indépendants du constituant  $k$ , car les expériences d'étalonnage du modèle n'ont pu différencier leur évolution entre grains concassés et roulés, pour plusieurs contrastes de taille. Les équations très simples retenues pour décrire ces coefficients généralisés s'écrivent :

$$a_{ij} = (d_j / d_i)^{0.5}, \quad (4)$$

$$b_{ji} = d_j / d_i. \quad (5)$$

Le protocole appliqué aux granulats calcaires, décrit précédemment, est comparable en de nombreux points à celui développé pour l'étalonnage du modèle. Les deux coefficients  $a$  et  $b$  peuvent donc être recalculés avec les mesures réalisées sur les mélanges binaires, ce qui permettra après lissage une comparaison avec les équations (4) et (5). Les coefficients  $a$  et  $b$  sont calculés pour chaque contraste de taille à partir des compacités propres  $\alpha$  et des pentes « à l'origine » mesurées dans un repère figurant l'évolution de l'indice des vides  $e$  en fonction du titre volumique  $y$  des mélanges. En effet, comme a pu le montrer Caquot [8] par exemple, l'indice des vides d'un mélange binaire évolue avec le titre volumique selon deux droites reliées par une partie courbe (fig. 1). Les pentes de ces droites expriment directement les interactions granulaires entre classes, et elles permettent le calcul des coefficients  $a$  et  $b$  selon les relations suivantes déduites des équations du modèle (avec  $d_1 > d_2$ ) :

$$a_{12} = \alpha_2 \left( \left| \frac{\partial e}{\partial y_2} \right|_{y_2=0} + 1/\alpha_1 \right), \quad (6)$$

$$b_{21} = \frac{1/\alpha_2 - 1 - \left| \frac{\partial e}{\partial y_2} \right|_{y_2=1}}{1/\alpha_1 - 1} \quad (7)$$

On notera, pour terminer ce point, que ces deux équations sont licites lorsque la compacité réelle rejoint la compacité virtuelle, c'est-à-dire lorsque la viscosité de référence devient infinie. Or, au moment des mesures, la viscosité relative n'atteint jamais ce stade, quel que soit le mode de serrage adopté. Heureusement, pour des mélanges binaires, dans le domaine des titres volumiques très contrastés, l'expérience numérique montre que lorsque la viscosité est suffisamment grande (empilements serrés), les courbes de compacité deviennent colinéaires à celles du modèle de viscosité infinie [3]. Il en est de même pour l'indice des vides. Le calcul des coefficients d'interaction  $a$  et  $b$  peut donc être entrepris avec les tangentes « à l'origine » déduites des présentes expériences, et les valeurs trouvées pourront alors être comparées à celles du modèle, même si son étalonnage initial a été réalisé avec une viscosité relative de référence vraisemblablement différente, induite par un serrage à une pression de 10 kPa.

Indice des vides mesuré  $e$

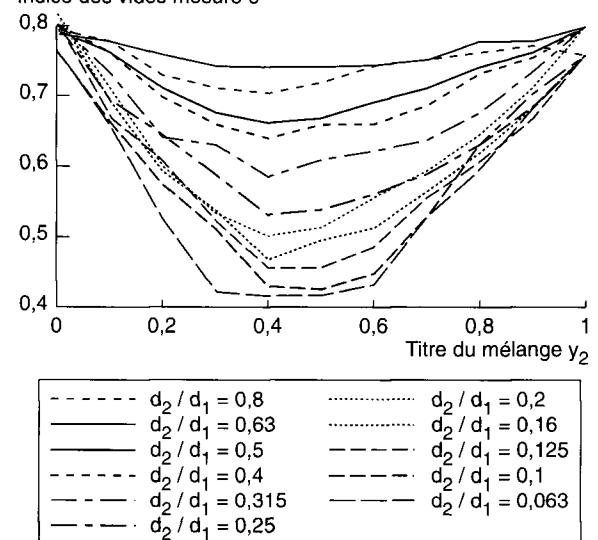


Fig. 1 - Mélanges binaires. Relation entre indice des vides et titre volumique pour différents contrastes de tailles.

## Résultats

À l'issue de chaque expérience, le volume en vrac  $V_{\text{vrac}}$  de l'échantillon, de masse sèche  $M_s$ , a été déterminé soit par lecture directe dans l'éprouvette graduée, soit par calcul à partir de la hauteur  $h_{\min}$  atteinte dans le moule ( $V_{\text{vrac}} = S * h_{\min}$  ;  $S = 200 \text{ cm}^2$ ). La compacité propre  $\alpha$  et l'indice des vides  $e$  sont alors calculés grâce aux relations suivantes, où  $\rho_r$  désigne la masse volumique réelle moyenne des granulats ( $\rho_r = 2520 \text{ kg/m}^3$ ) :

$$\alpha = \frac{M_s / \rho_r}{V_{\text{vrac}}}, \quad e = \frac{1}{\alpha} - 1 \quad \left( \text{et } \alpha = \frac{1}{1+e} \right) \quad (8)$$

**TABLEAU II**  
**Compacité et indice des vides mesurés sur les classes élémentaires**

Classes granulaires		Refus à d	Volume mesuré	Compacité propre	Indice des vides
d/D	d (mm)	M <sub>s</sub> (g)	V <sub>vrac</sub> (cm <sup>3</sup> )	α	ε
25/31,5	25	3 898	2 500	0,619	0,616
20/25	20	5 381	3 800	0,562	0,780
16/20	16	9 101	6 400	0,564	0,772
12,5/16	12,5	9 308	6 400	0,577	0,733
10/12,5	10	9 400	6 400	0,583	0,716
8/10	8	8 647	6 040	0,568	0,760
6,3/8	6,3	5 267	3 700	0,565	0,770
5/6,3	5	6 122	4 300	0,565	0,770
4/5	4	4 673	3 280	0,565	0,769
3,15/4	3,15	2 407	1 730	0,552	0,811
2,5/3,15	2,5	2 370	1 715	0,548	0,824
2/2,5	2	2 394	1 710	0,556	0,800
1,6/2	1,6	2 302	1 650	0,554	0,806
1,25/1,6	1,25	2 583	1 850	0,554	0,805
1/1,25	1	1 609	1 150	0,555	0,801
0,8/1	0,8	2 042	1 445	0,561	0,783
0,63/0,8	0,63	2 180	1 560	0,555	0,803
0,5/0,63	0,5	1 585	1 135	0,554	0,805
0,4/0,5	0,4	1 408	985	0,567	0,763
0,315/0,4	0,315	1 491	1 045	0,566	0,766
0,2/0,315	0,2	1 095	760	0,572	0,749
0,16/0,2	0,16	668	460	0,576	0,735
0,1/0,16	0,1	2 895	1 990	0,577	0,732
0,08/0,1	0,08	1 210	880	0,546	0,833
0,04/0,08	0,04	767	545	0,558	0,791
Sommes et moyennes		90 803	63 430	0,562	0,772

Le tableau II présente les valeurs obtenues pour les 25 classes élémentaires de taille d<sub>i</sub> tirées de l'échantillon 0/31,5. Les compacités mesurées ici dépassent d'environ 6 % en moyenne celles des grains concassés qui ont servi à l'étalonnage du modèle, en raison probablement de la forme trapue des grains calcaires (tableau I). Un ajustement linéaire, du type

$$\alpha_i = g + f \lg (d_i) \quad (9)$$

appliqué sur ces mesures (excepté la première jugée trop divergente), ou sur les tranches 0/6 et 6/20 également produites à la carrière, a permis d'obtenir un lissage satisfaisant avec, comme paramètres :

Tranche	f	g
0/25	+ 0,00185	0,5623
0/6,3	- 0,00320	0,5598
6,3/20	- 0,00970	0,5800

Onze contrastes de taille d<sub>2</sub>/d<sub>1</sub> (avec d<sub>1</sub> > d<sub>2</sub>) ont ensuite été choisis pour tester les interactions granulaires sur mélange binaire. Pour chaque contreaste, onze séries de mesures ont été réalisées avec des titres volumiques allant de 0 à 1, par pas de 0,1. Le tableau III et la figure 1 présentent l'évolution des indices des vides mesurés. Le titre volumique y<sub>2</sub> désigne sur ces documents la proportion de petits grains dans le mélange (y<sub>2</sub> = Vd<sub>2</sub>/(Vd<sub>1</sub> + Vd<sub>2</sub>)).

TABLEAU III  
Indices des vides mesurés sur les différents mélanges binaires (122 mesures)

$d_2/d_1$	Titre volumique $y_2$											
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
0,4/6,3	0,063	0,770	0,658	0,524	0,418	0,412	0,412	0,428	0,529	0,597	0,680	0,763
0,4/4	0,1	0,769	0,663	0,579	0,512	0,428	0,420	0,445	0,529	0,631	0,680	0,763
0,4/3,15	0,125	0,811	0,667	0,612	0,522	0,453	0,453	0,483	0,554	0,605	0,669	0,763
0,4/2,5	0,16	0,824	0,696	0,597	0,538	0,466	0,496	0,512	0,560	0,618	0,689	0,763
0,5/2,5	0,2	0,824	0,715	0,606	0,531	0,500	0,512	0,556	0,594	0,644	0,714	0,805
0,4/1,6	0,25	0,806	0,697	0,647	0,589	0,529	0,538	0,562	0,589	0,631	0,706	0,763
0,5/1,6	0,315	0,806	0,738	0,644	0,633	0,588	0,612	0,625	0,638	0,676	0,738	0,805
0,5/1,25	0,4	0,805	0,766	0,703	0,663	0,644	0,663	0,663	0,689	0,739	0,760	0,805
0,5/1	0,5	0,801	0,766	0,715	0,680	0,663	0,672	0,697	0,715	0,748	0,766	0,805
0,63/1	0,63	0,801	0,781	0,765	0,747	0,747	0,747	0,747	0,757	0,781	0,781	0,803
0,4/0,5	0,8	0,805	0,782	0,733	0,715	0,706	0,722	0,748	0,757	0,766	0,773	0,763

TABLEAU IV  
Valeurs des coefficients  $a_{12}$  (effet de desserrement) et  $b_{21}$  (effet de paroi)  
obtenus sur granulat calcaire pour 11 contrastes de taille

$d_2/d_1$	0,4/6,3 0,063	0,4/4 0,1	0,4/3,15 0,125	0,4/2,5 0,16	0,5/2,5 0,2	0,4/1,6 0,25	0,5/1,6 0,315	0,5/1,25 0,4	0,5/1 0,5	0,63/1 0,63	0,4/0,5 0,8
$a_{12}$	0,330	0,464	0,497	0,527	0,548	0,641	0,698	0,732	0,772	0,901	0,914
$b_{21}$	-0,032	0,049	0,095	0,155	0,213	0,299	0,416	0,551	0,673	0,831	0,914

Pentes et indices des vides « à l'origine » ont alors été calculés par régression linéaire, sur les trois ou quatre premiers points de la partie gauche du diagramme dans le cas des *gros dominants*, et sur les quatre ou cinq derniers points de la partie droite du diagramme dans le cas des *petits dominants*. Les valeurs, introduites dans les équations (6) et (7), ont permis de trouver les coefficients  $a_{12}$  et  $b_{21}$  pour les onze contrastes de taille. Les résultats sont portés dans le tableau IV et sur les figures 2 et 3, qui reprennent également les quatorze valeurs obtenues sur les granulats qui ont servi dans le cadre de l'étaillonage initial du modèle (sept points pour le granulat roulé et sept points pour le granulat concassé).

On constate sur ces deux figures qu'il existe une bonne concordance générale entre granulats calcaires et granulats roulés et concassés. En d'autres termes, la nature et la morphologie des grains ne semblent pas jouer un rôle prépondérant dans l'intensité des interactions granulaires. Ce résultat est important, car il confirme qu'un lissage unique pour chaque type d'effet peut

convenir pour tous les granulats du génie civil, comme le suggéraient déjà d'ailleurs les simulations réalisées dans le cadre de la validation du modèle [4]. Les calcaires développent toutefois des réactions légèrement plus fortes, du moins vers les faibles contrastes de taille pour l'effet de paroi, et vers les forts contrastes pour l'effet de desserrement, en raison probablement de leur rugosité. Le lissage initial sur les figures (courbes en pointillés) peut alors être légèrement modifié si l'on veut que le modèle prenne mieux en compte ce phénomène. Les nouveaux ajustements proposés, intégrant l'ensemble des points et figurés par les courbes en trait continu, ont pour équations :

$$a_{ij} = d_j / d_i^{0,414}, \quad (10)$$

$$b_{ji} = d_j / d_i^{1,33} + d_j / d_i (1 - d_j / d_i). \quad (11)$$

Certes, ces fonctions sont de forme plus complexe que précédemment, notamment pour  $b$ . Mais elles améliorent la précision générale de l'outil car l'écart-type entre points expérimentaux et lissages est sensiblement réduit, y compris d'ailleurs pour les grains siliceux (tableau V).

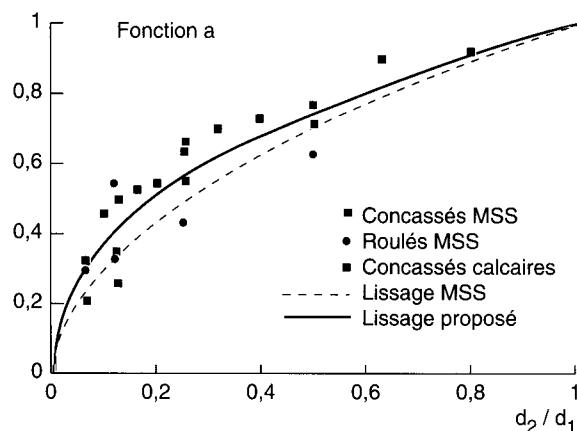


Fig. 2 - Ajustement de la fonction a  
« effet de desserrement ».

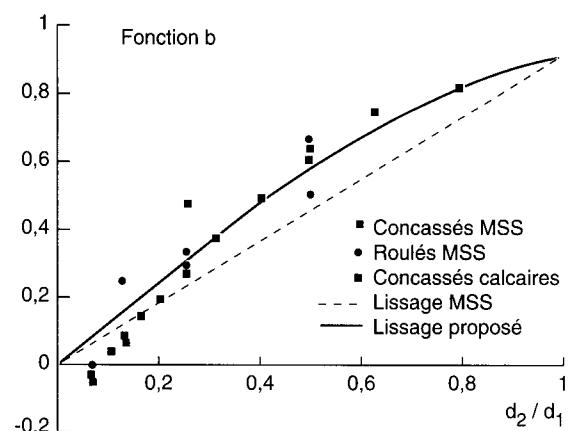


Fig. 3 - Ajustement de la fonction b  
« effet de paroi ».

TABLEAU V  
Écart-type des écarts entre points expérimentaux et lissages selon les fonctions a et b adoptées

Granulats	Fonctions initiales			Fonctions modifiées		
	a (4)	b (5)	a et b	a (10)	b (11)	a et b
Roulés	0,084	0,095	0,092	0,073	0,080	0,076
Silicieux concassés	0,110	0,147	0,135	0,115	0,126	0,123
Ensemble	0,098	0,124	0,115	0,097	0,106	0,102
Calcaires concassés	0,038	0,093	0,075	0,028	0,052	0,058
Ensemble	0,092	0,111	0,102	0,090	0,086	0,089

On peut s'attendre d'autre part à ce que les compacités obtenues soient légèrement plus faibles qu'initialement, en raison de l'amplification locale des interactions. Nous avons alors calculé la compacité de plusieurs mélanges binaires de grains « étalons » et calcaires, et du mélange de deux granulats calcaires bruts puis lavés avec, successivement, les fonctions initiales (4) et (5) puis les fonctions modifiées (10) et (11). Le tableau VI consigne certains résultats seulement, ceux pour lesquels existait une valeur expérimentale de référence et apparaissait parallèlement la différence la plus significative. Concrètement, ces conditions sont réunies pour les mélanges binaires à proximité de l'optimum de compacité, pour un titre volumique  $y_2$  de 40 %. Pour les mélanges granulaires calcaires, six titres volumiques échelonnés de 20 %, entre 0 à 100 %, ont été choisis. On constate alors que les compacités obtenues avec les fonctions modifiées sont bien, comme on s'y attendait, un peu inférieures à celles du modèle initial. La différence moyenne en valeur absolue pour l'ensemble des calculs est de -0,0187 soit, en termes relatifs, de -2,7 % environ. Par contre, ces compacités sont plus proches des valeurs expérimentales, car elles n'en diffèrent en

moyenne que de -0,05 % seulement. Les écarts-types confirment aussi l'intérêt des lissages proposés.

On observe par ailleurs que les nouvelles fonctions d'interaction modifient parfois les proportions optimales (valeurs non communiquées), mais seulement pour certains granulats et certains contrastes de taille, et de un à deux points tout au plus.

Ces calculs enfin ont été réalisés avec une viscosité relative de référence de  $1,36 \cdot 10^5$ , c'est-à-dire celle des expériences de l'étalonnage initial. Compte tenu de la bonne concordance entre valeurs expérimentales et calculées, quels que soient les granulats (et les titres volumiques), on en déduit que le serrage manuel appliqué sur les mélanges calcaires était finalement équivalent à celui du protocole opératoire recommandé (pression constante de 10 kPa). Par contre, si l'on utilise le modèle proposé pour des mélanges non vibrés (mélanges binaires de Cintré par exemple [4]), ou pour des mélanges vibrés sans pression de confinement (mesures de Joisel par exemple [4]), il faut alors une viscosité de référence plus forte que celle préconisée pour obtenir un rapport expérience/simulation satisfaisant. Dans le premier cas, une viscosité de 1 000 environ (à la place de 460) donne une réponse correcte. Dans le second, une valeur de 12 000 (à la place de 2 600) a permis à la fois de caler les hypothèses de compacités propres à partir des tranches élémentaires (les classes utilisées par Joisel ne sont pas unimodales) et d'obtenir une coïncidence au moins aussi satisfaisante qu'avec le modèle initial. Il faut donc encore associer aux lissages proposés une échelle adéquate de viscosité de référence.

En résumé, ces mesures complémentaires sur granulats calcaires ont engendré une légère adaptation du modèle de suspension solide. C'est avec ces modifications qu'il a servi à formuler des bétons avec les calcaires lorrains.

TABLEAU VI  
Étude statistique des écarts entre compacités mesurées  
et calculées avec les fonctions a et b initiales ou modifiées

Mélanges		Compacités			Écarts entre			Statistiques sur écarts Moyenne				
		Mesurées	Calculées avec fonctions		calculs avec les fonctions		les deux calculs (3)					
			initiales	modifiées	initiales	modifiées	cas (1)	cas (2)	cas (3)			
d <sub>2</sub> /d <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>											
Granulats siliceux roulés. Classes unimodales												
0,5/8	0,063	40	0,7530	0,7503	0,7442	- 0,0027	- 0,0088	- 0,0072	en termes absolus			
1/8	0,125	40	0,7285	0,7476	0,7377	+ 0,0191	+ 0,0092	- 0,0113	+ 0,0082	- 0,0027	- 0,0108	
0,5/4	0,125	40	0,7360	0,7370	0,7273	+ 0,0010	- 0,0087	- 0,0111	0,0127	0,0118	0,0026	
2/8	0,250	40	0,7230	0,7274	0,7139	+ 0,0044	- 0,0091	- 0,0153				
0,5/2	0,250	40	0,7080	0,7060	0,6966	- 0,0020	- 0,0114	- 0,0111	en termes relatifs			
4/8	0,500	40	0,6565	0,6911	0,6777	+ 0,0346	+ 0,0212	- 0,0147	+ 0,0120	- 0,0034	- 0,0154	
0,5/1	0,500	40	0,6635	0,6663	0,6525	+ 0,0028	- 0,0110	- 0,0151	0,0190	0,0173	0,0043	
Granulats siliceux concassés. Classes unimodales												
0,5/8	0,063	40	0,7230	0,6996	0,6930	- 0,0234	- 0,0300	- 0,0078	+ 0,0134	+ 0,0007	- 0,0136	
1/8	0,125	40	0,7025	0,6888	0,6780	- 0,0137	- 0,0245	- 0,0121				
0,5/4	0,125	40	0,6910	0,6774	0,6654	- 0,0136	- 0,0256	- 0,0138	0,0277	0,0252	0,0030	
2/8	0,250	40	0,6430	0,6622	0,6478	+ 0,0192	+ 0,0048	- 0,0161				
0,5/2	0,250	40	0,5880	0,6330	0,6168	+ 0,0450	+ 0,0288	- 0,0183				
4/8	0,500	40	0,5875	0,6352	0,6211	+ 0,0477	+ 0,0336	- 0,0155	+ 0,0249	+ 0,0046	- 0,0202	
0,5/1	0,500	40	0,5560	0,5883	0,5739	+ 0,0323	+ 0,0179	- 0,0158	0,0450	0,0395	0,0061	
Granulats calcaires concassés. Classes unimodales												
0,4/6,3	0,063	40	0,7082	0,7197	0,7107	+ 0,0115	+ 0,0025	- 0,0106	+ 0,0118	- 0,0014	- 0,0132	
0,4/4	0,100	40	0,7003	0,7093	0,6979	+ 0,0090	- 0,0024	- 0,0132				
0,4/3,1	0,127	40	0,6882	0,6948	0,6811	+ 0,0066	- 0,0071	- 0,0158				
0,4/2,5	0,160	40	0,6821	0,6859	0,6712	+ 0,0038	- 0,0109	- 0,0168	0,0091	0,0083	0,0029	
0,5/2,5	0,200	40	0,6667	0,6704	0,6550	+ 0,0037	- 0,0117	- 0,0175				
0,4/1,6	0,250	40	0,6540	0,6677	0,6518	+ 0,0137	- 0,0022	- 0,0179				
0,5/1,6	0,313	40	0,6297	0,6494	0,6332	+ 0,0197	+ 0,0035	- 0,0180				
0,5/1,2	0,400	40	0,6083	0,6331	0,6174	+ 0,0248	+ 0,0091	- 0,0173	+ 0,0188	- 0,0018	- 0,0206	
0,5/1	0,500	40	0,6013	0,6172	0,6027	+ 0,0159	+ 0,0014	- 0,0159	0,0155	0,0134	0,0046	
0,63/1	0,630	40	0,5724	0,5986	0,5867	+ 0,0262	+ 0,0143	- 0,0129				
0,4/0,5	0,800	40	0,5862	0,5812	0,5740	- 0,0050	- 0,0122	- 0,0078				
Granulats calcaires concassés. Classes multimodales												
0/6 - 6/20	brut	0	0,6170	0,6602	0,6399	+ 0,0432	+ 0,0229	- 0,0221	+ 0,0316	+ 0,0001	- 0,0315	
		20	0,7100	0,7393	0,7102	+ 0,0293	- 0,0002	- 0,0323				
		40	0,7830	0,8110	0,7757	+ 0,0280	- 0,0073	- 0,0398	0,0099	0,0132	0,0055	
		60	0,8220	0,8403	0,8058	+ 0,0183	- 0,0162	- 0,0390	+ 0,0416	- 0,0026	- 0,0442	
		80	0,8150	0,8397	0,8054	+ 0,0247	- 0,0096	- 0,0388				
		100	0,7830	0,8293	0,7937	+ 0,0463	+ 0,00107	- 0,0402	0,0175	0,0168	0,0087	
Granulats calcaires concassés. Classes multimodales												
0/6 - 6/20	lavé	0	0,6160	0,6480	0,6286	+ 0,0320	+ 0,0126	- 0,0212	+ 0,0293	- 0,0027	- 0,0320	
		20	0,6870	0,7194	0,6910	+ 0,0324	+ 0,0040	- 0,0316				
		40	0,7600	0,7776	0,7433	+ 0,0280	- 0,0167	- 0,0384	0,0118	0,0122	0,0073	
		60	0,7790	0,7907	0,7576	+ 0,0117	- 0,0214	- 0,0371	+ 0,0431	+ 0,0017	- 0,0414	
		80	0,7440	0,7778	0,7451	+ 0,0338	- 0,0011	- 0,0362				
		100	0,7200	0,7681	0,7243	+ 0,0481	+ 0,0043	- 0,0476	0,0165	0,0190	0,0041	
Moyenne sur l'ensemble des mesures (en termes absolus)									+ 0,0175	- 0,0012	- 0,0187	
Écart-type sur l'ensemble des mesures (en termes absolus)									0,0180	0,0149	0,0101	
Moyenne sur l'ensemble des mesures (en %)									+ 0,0263	- 0,0005	- 0,0268	
Écart-type sur l'ensemble des mesures (en %)									0,0275	0,0228	0,0126	

## Application à des bétons calcaires lorrains

Deux carrières ont été sélectionnées pour étudier la faisabilité de bétons avec les calcaires du Bajocien lorrain. La première (carrière 1) est celle d'où sont issus les granulats qui ont servi à mesurer les interactions [5]. La seconde (carrière 2), située dans le sud des Vosges, a été étudiée dans le cadre du programme « Materloc Calcaires » [9]. Deux coupures « routières » habituellement produites par ces carrières, un sable 0/6 et un gravillon 6/20, ont été utilisées telles quelles pour formuler les bétons.

### Mesures

La compacité propre des granulats a été mesurée selon le protocole décrit précédemment. La granularité du ciment utilisé, un CEMII/B CPJ 32,5 de Vicat-Xeuilley (54), a été communiquée par le fabricant et celle des fines a été déterminée par sédimétonométrie\*. La compacité du ciment et des fines a été mesurée selon le procédé proposé par de Larrard et Sedran [2], et les compacités propres correspondantes ont été trouvées grâce au modèle, par essais successifs, jusqu'à retrouver la compacité mesurée. Ces essais ont été conduits avec ou sans défloculant.

Pour chaque carrière, plusieurs gâchées expérimentales, fluidifiées ou non, ont tout d'abord été réalisées selon la démarche de Baron-Lesage [5], [9]. Elles ont permis, d'une part, de trouver le rapport s/g optimum, qui est voisin de 1 pour les deux types de béton\*\* (fig. 5), et de mesurer d'autre part, les affaissements, rendements volumétriques et résistances mécaniques en fonction du dosage des constituants. Seule est donnée ici, sur la figure 4, l'évolution de l'affaissement en fonction du dosage en « eau efficace ( $E_{eff}$ ) » pour quatre formules réalisées avec 350 (carrière 1) ou 325 (carrière 2) kilogrammes de ciment par  $m^3$  effectif [10], avec ou sans défloculant.

Parallèlement, ces quatre bétons ont été recalculés avec le modèle de suspension solide. Pour sa mise en œuvre, les dosages volumétriques en ciment (c) et en granulats (s + g) ont été déduits des relations suivantes :

$$c = 100 \frac{C/\rho_c}{1000 \Gamma}, \quad (12)$$

$$s + g = 100 - c, \quad (13)$$

\* Le taux de fines dans les sables est de 14 % environ pour la carrière 1 et de 8 % environ pour la carrière 2.

\*\* Ce rapport est aussi celui couramment adopté pour les graves traitées fabriquées avec ces matériaux.

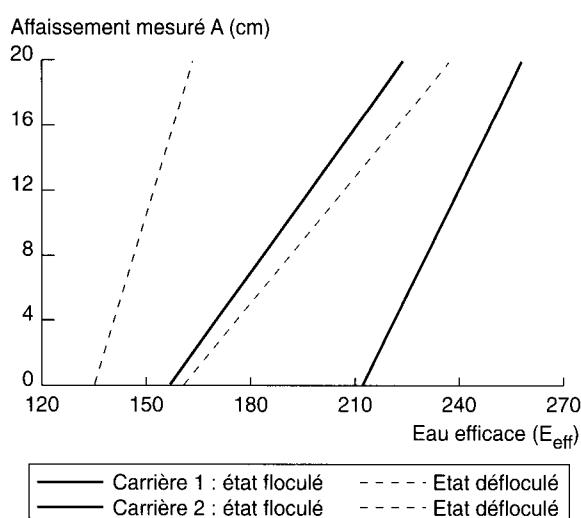


Fig. 4 - Relation expérimentale entre eau efficace  $E_{eff}$  et affaissement A pour quatre bétons calcaires.

où  $C$  et  $\rho_c$  sont le dosage massique et la masse volumique réelle du ciment.  $\Gamma$  désigne la compacité effective calculée d'après le rendement volumétrique de chaque formule parfaitement vibrée [5], [9]. Il varie avec l'affaissement et il peut être correctement évalué (en négligeant l'air occlus résiduel) d'après le dosage en eau efficace  $E_{eff}$  mesuré, selon la relation :

$$\Gamma = \frac{1000 - E_{eff}}{1000} \quad (14)$$

Pour les quatre bétons, en extrapolant par exemple sa valeur jusqu'à l'affaissement nul ( $A = 0$ , béton très ferme), on trouve les proportions volumétriques du tableau VII.

TABLEAU VII  
Compacités mesurées  
et proportions volumétriques en ciment  
et granulats pour quatre bétons calcaires  
d'affaissement nul ( $A = 0$ )

Carrière	Ciment $C$ ( $kg/m^3$ )	État floqué		État défloqué	
		$\Gamma$	c (%)	$s + g$ (%)	$\Gamma$
1	350	0,788	14,3	85,7	0,839
2	325	0,840	12,5	87,5	0,865

Durant les simulations, les sables s ont été introduits dans le modèle en deux tranches : les fines f et les éléments définis (ou lavés) s'. Bien évidemment,  $s = f + s'$ . De même, les rapports  $f/(f + s')$  et  $c/(s + g)$  ont toujours été gardés constants comme dans les sables utilisés et les bétons réalisés. Les fines et le ciment ont été considérés successivement floclés et défloclés. Seules les proportions s et g ont varié jusqu'à trouver l'optimum de compacité. Les calculs ont été conduits avec la viscosité de référence des mesures de compacité propre, c'est-à-dire  $1,36 \cdot 10^5$ .

TABLEAU VIII  
Compacités maximales calculées avec le modèle pour quatre bétons calcaires

Carrière	Ciment C (kg/m <sup>3</sup> )	État floqué						État défloqué					
		c	f	s'	g	s/g	c <sub>max</sub>	c	f	s'	g	s/g	c <sub>max</sub>
1	350	14,4	6,1	37,7	41,8	1,00	0,824	13,6	6,3	38,9	41,1	1,10	0,843
2	325	12,4	3,7	42,2	41,7	1,00	0,837	12,0	4,0	45,8	38,2	1,20	0,857

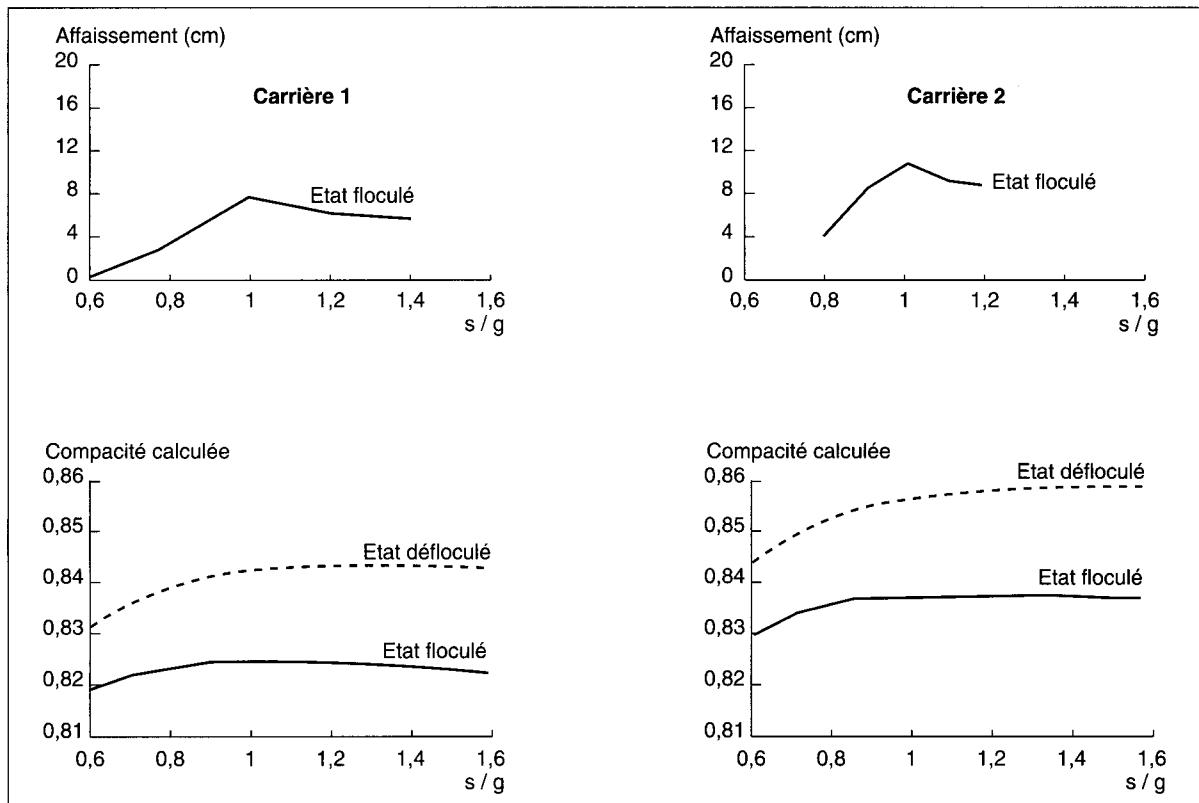


Fig. 5 - Comparaison des affaissements mesurés et des compacités calculées à viscosité relative constante pour différents rapports s/g.

## Résultats

Ils sont consignés dans le tableau VIII et sur la figure 5.

On constate tout d'abord que les rapports s/g optimums des bétons non fluidifiés sont conformes à ceux fournis par la méthode Baron-Lesage, au droit de l'affaissement maximum (expériences réalisées sans fluidifiant). Cette similitude confirme donc déjà la qualité et l'intérêt du modèle de suspension solide pour l'établissement de la formulation du squelette minéral des bétons. On

observe cependant qu'il faut plus de sable pour atteindre la compacité maximale des mélanges fluidifiés (rapport s/g supérieur), et que la compacité calculée diminue lentement lorsqu'on augmente encore la part de sable. Ces réactions sont à rapprocher de la présence des fines qui, lorsqu'elles sont bien défloqué, entrent en compétition avec le ciment de granularité comparable. Ces simulations à viscosité constante montrent alors le rôle prépondérant joué par les fines (et le sable) dans ces bétons calcaires. Elles indiquent aussi que leur rapport granulaire est peu « pointu », du moins au-delà des optimums retenus.

D'autre part, la concordance des compacités entre mesures ( $\Gamma$ ) et simulations ( $c_{max}$ ) est très satisfaisante, puisque l'écart ne dépasse pas 1 % (il dépasserait 3 % avec les fonctions d'interaction initiales), excepté pour le mélange floqué de la carrière 1\*. Il apparaît en conséquence que

\* Pour ce béton, la faible compacité expérimentale provient d'une forte demande en eau, qui peut être liée à la présence de fines argileuses : ces fines auraient, au sein du béton non défloqué, un comportement différent de celui enregistré au moment des mesures de compacité propre.

la viscosité relative de référence des empilements aléatoires serrés (136 000) peut être considérée comme un marqueur probant de l'état très ferme ( $A = 0$ ) de ces bétons calcaires. Rappelons que leur compacité expérimentale résulte d'une interpolation de mesures faites sur des bétons plus fluides parfaitement vibrés, où il régnait vraisemblablement une viscosité relative optimale.

En utilisant ce paramètre, la compacité donnée par le modèle permet alors d'accéder à la porosité intergranulaire de ces bétons et d'avoir, si l'on néglige l'air piégé, une bonne appréciation de la quantité minimale d'eau efficace  $E_{\text{eff}}$  à introduire dans l'empilement avant que le squelette ne commence à être suspendu. Une quantité d'eau plus faible laissera l'édifice partiellement « dénoyé ». Une quantité plus forte diminuera la viscosité, mais aussi la compacité et la résistance. La relation est :

$$E_{\text{eff}} \geq 1\ 000 (1 - c_{\text{max}}) \quad (15)$$

À noter, pour les formules défloculées, qu'au-delà de ce seuil l'apport d'un réducteur d'eau ne sera d'aucune efficacité, car la compacité-viscosité du squelette granulaire ne pourra plus augmenter par simple serrage.

En élargissant ce concept, cette valeur permet aussi de prévoir indirectement l'ordre de grandeur de la résistance maximale que le mélange pourra atteindre. Il suffit pour cela d'introduire le rapport  $C/E_{\text{eff}}$  maximum dans une loi de type Féret-Bolomey par exemple. Les calculs pour ces bétons calcaires donnent, avec une bonne précision, les résistances maximales atteintes expérimentalement pour les formules les plus fermes [5], [9]. On voit ici donc l'intérêt de connaître avec une précision suffisante, grâce au modèle, la compacité maximale que le mélange des constituants d'un béton pourra atteindre, afin de présager en amont de ces performances.

Si l'on cherche par ailleurs à augmenter cette résistance, et si les propriétés mécaniques des granulats le permettent, on ne peut alors qu'intervenir sur la granularité des matériaux et/ou incorporer de nouvelles coupures favorables à la compacité. Le modèle s'avère être l'outil le plus approprié pour ce genre de recherches prospectives.

Enfin, en utilisant les mesures de compacité réalisées durant les expériences où, comme il est dit précédemment, l'on suppose que chaque béton calcaire atteint une viscosité relative optimale dans le moule, il devient possible d'établir, par le biais du modèle, une échelle de viscosité calée sur l'affaissement  $A$ . Le calcul de la viscosité relative se fait en introduisant dans le modèle la compacité mesurée pour chaque état, déduite de (14) et de la relation qui lie  $A$  à  $E_{\text{eff}}$  (fig. 4).

La figure 6 montre les résultats obtenus pour les quatre bétons. Outre le décalage à l'origine lié aux légères différences entre mesures et calculs de compacité signalées précédemment, les courbes montrent, comme on peut s'en douter, qu'il n'existe pas *a priori* de loi unique reliant la viscosité relative d'un béton à son affaissement. Il se dégage toutefois des tendances qui mériteraient d'être confortées par de nouvelles mesures sur gâchées expérimentales. Mais, déjà, ces courbes peuvent être utilisées ici pour évaluer la viscosité relative à prendre en compte pour chacun des bétons, selon la plasticité désirée.

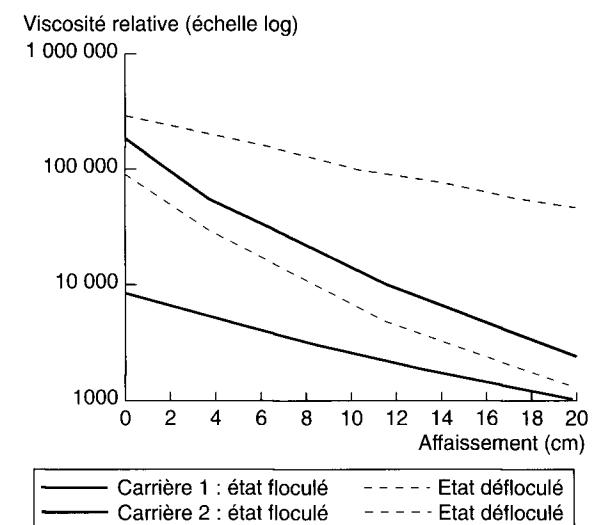


Fig. 6 - Relation entre viscosité relative et affaissement pour les quatre bétons calcaires.

## Conclusion

Les données expérimentales recueillies sur ces granulats calcaires lorrains ont permis de confirmer le caractère universel des interactions granulaires prises en compte dans le modèle de suspension solide. Cependant, une adaptation légèrement moins avantageuse des lissages initiaux provoque des variations sensibles de compacité ou de viscosité, ce qui montre l'importance d'une bonne définition de ces paramètres. Des mesures sur d'autres types de grains encore garantiraient les lissages proposés.

La pertinence du modèle est d'autre part largement avérée lorsqu'il s'agit d'optimiser un squelette granulaire. Il constitue même l'outil privilégié pouvant traiter les granulats non conventionnels écartés par les méthodes de formulation traditionnelles ou par les spécifications, comme le sont certains matériaux locaux pouvant entrer dans la composition des bétons.

Ces travaux ont montré enfin que le modèle de suspension solide pouvait servir à approcher les propriétés prévisionnelles d'un béton (quantité minimale d'eau efficace, résistance maximale),

sous réserve toutefois de déterminer très précisément les granularités et compacités propres des matériaux, dont celles des fines, qui jouent un rôle prépondérant.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BARON J., LESAGE R. (1976), *La composition du béton hydraulique du laboratoire au chantier*, Rapport de recherche LCPC, **64**, décembre.
- [2] SEDRAN T., de LARRARD F. (1994), RENE-LCPC : un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux de génie civil, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **194**, novembre-décembre, pp. 87-93.
- [3] 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**, novembre-décembre, pp. 59-70.
- [4] 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**, novembre-décembre, pp. 71-86.
- [5] 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.
- [6] de LARRARD F. (1988), Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances, *Rapport de recherche LCP*, **149**.
- [7] MOONEY M. (1951), The viscosity of concentrated suspensions of spherical particles, *Journal of colloids and interface science*, Vol. 6, p. 162.
- [8] CAQUOT A. (1937), *Le rôle des matériaux inertes dans le béton*, Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils de France, pp. 562-582.
- [9] LECOMTE A., MASSON L., RÉMILLON A. (1995), Formulation de bétons courants avec des granulats calcaires lorrains 0/6 et 6/20, *Annales de l'ITBTP*, **539**, pp. 1-24, décembre.
- [10] LECOMTE A. (1997), *Proposition d'une méthode pour rétablir les dosages et les performances des bétons au m<sup>3</sup> réel* (À paraître).

### ABSTRACT

### A solid suspension model and the mix design of calcareous concrete in Lorraine

A. LECOMTE - A. ZENNIR

Compaction measurements of calcareous aggregates have confirmed the granular interaction properties described by the solid suspension model. After minor modification, the model has been used to design concrete which uses "non-conventional" calcareous aggregates. Comparison with experimental results was very good, which indicates the usefulness of the tool for hydraulic concrete design and the value of its contribution for the development of new types of concrete.