



**HAL**  
open science

## Etude d'impact de la forme des granulats sur les paramètres du modèle d'empilement compressible

Mokrane Bala, R. Zentar, Pascal Boustingorry

### ► To cite this version:

Mokrane Bala, R. Zentar, Pascal Boustingorry. Etude d'impact de la forme des granulats sur les paramètres du modèle d'empilement compressible. 36èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil de l'AUGC, Jun 2018, Saint-Etienne, France. hal-02075087

**HAL Id: hal-02075087**

**<https://hal.science/hal-02075087v1>**

Submitted on 21 Mar 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

---

# Etude d'impact de la forme des granulats sur les paramètres du modèle d'empilement compressible

Mokrane BALA<sup>1</sup>, Rachid ZENTAR<sup>2</sup>, Pascal BOUSTINGORRY<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institut Mines Telecom Lille-Douai, LGCgE-GCE, 764 bd Lahure, BP 10838, 59508 Douai, France. mokrane.bala@imt-lille-douai.fr

<sup>2</sup>Institut Mines Telecom Lille-Douai, LGCgE-GCE, 764 bd Lahure, BP 10838, 59508 Douai, France. rachid.zentar@imt-lille-douai.fr

<sup>3</sup>CHRYSO France, 7 rue de l'Europe - Z.I. - 45300 Sermaises du Loiret, France. pascal.boustingorry@chryso.com

---

*RÉSUMÉ. Le béton hydraulique est, depuis son invention, le matériau de construction le plus utilisé au monde. Parmi ses constituants, les granulats occupent jusqu'à 75% du volume. Le volume restant étant constitué d'une pâte de ciment, cela engendre des quantités de ciment colossales et un bilan carbone lourd.*

*Les mélanges granulaires incorporés dans le béton peuvent se présenter sous une forme dense (cas d'un Béton à Haute Performance) à lâche. Des études récentes sur la compacité des granulats [1] ont conduit au développement du modèle d'empilement compressible (MEC) qui permet de calculer la compacité d'un mélange de deux ou plusieurs fractions granulaires à partir des compacités individuelles de ces fractions. L'optimisation de la compacité des mélanges granulaires permet non seulement de minimiser la quantité de ciment incorporée dans le béton, mais aussi d'améliorer sa performance et sa durabilité.*

*ABSTRACT. Since its invention, concrete has been the most widely used building material in the world. Among its constituents, the aggregates occupy up to 75% of the volume. The remaining volume is occupied by a cement paste, this generates colossal quantities of cement and a heavy carbon footprint.*

*The granular mixtures incorporated in the concrete may be dense (as for a high performance concrete) to loose. Recent studies on the packing density of aggregates [1] led to the development of the compressible packing model (CPM) that calculates the packing density of a granular mixture from the individual packing densities of its components. Optimization of the packing density of granular mixtures allows not only minimizes the quantity of cement incorporated in the concrete, but also enhances its performance and durability.*

*MOTS-CLÉS : Compacité, coefficients d'interaction, granulats roulés, granulats concassés.*

*KEY WORDS: Packing density, interaction coefficients, crushed aggregates, rolled aggregates.*

---

## 1. Introduction

Les structures granulaires sont omniprésentes dans la nature. Dans le domaine du génie civil, les granulats représentent une matière première indispensable offrant souvent le meilleur choix technico-économique. Ils peuvent être naturels, artificiels (sous-produit industriel) ou recyclés. Les granulats naturels sont d'origines alluvionnaires, ou issues des procédés de concassage (traitement mécanique). Ils sont désignés par leur plus petite et plus grande dimensions  $d$  et  $D$ . Dans ce travail, nous nous intéressons à la détermination des paramètres du MEC pour prédire la compacité maximale d'un mélange granulaire à partir des caractéristiques de ses constituants.

Plusieurs modèles ont été développés pour prédire la compacité d'un empilement granulaire. La mise en évidence des effets d'interaction entre les grains de différentes tailles, notamment par les travaux de Caquot (1937), a incité les chercheurs à étudier les classes granulaires deux-à-deux. Le modèle linéaire [2] a été raffiné pour construire le modèle d'empilement virtuel qui permettait de prédire les compacités virtuelles en faisant intervenir les proportions volumiques de chacune des classes granulaires ( $y_i$ ), leur compacité lorsqu'elles sont empilées isolément ( $\beta_i$ ) ainsi que les coefficients d'effet de paroi et d'effet de desserrement ( $a_{ij}$ ,  $b_{ji}$ ). La compacité virtuelle pour un mélange de  $n$  fractions granulaires où la classe ( $i$ ) est dominante, est donnée par la formule suivante [1] :

$$\gamma = \gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} y_j \left(1 - \beta_i + \beta_i b_{ij} \left(1 - \frac{1}{\beta_i}\right)\right) - \sum_{j=i+1}^n y_j \left(1 - a_{ij} \frac{\beta_i}{\beta_j}\right)} \quad [1]$$

Les coefficients d'interactions granulaires ont été calibrés sur des mélanges binaires [3]. Le coefficient d'effet de desserrement  $a_{12}$ , exercé par les particules fines (2) dans un empilement de gros grains dominants (1), et de l'effet de paroi  $b_{21}$  exercé par les gros grains sur les grains fins prépondérants sont donnés par ( $e$  étant l'indice des vides du mélange) [1] :

$$a_{12} = \beta_2 \left( \left. \frac{\partial e}{\partial y_2} \right|_{y_2=0} + \frac{1}{\beta_1} \right) \quad \text{et} \quad b_{21} = \frac{\frac{1}{\beta_2} - 1 - \left. \frac{\partial e}{\partial y_2} \right|_{y_2=1}}{\frac{1}{\beta_1} - 1} \quad [2]$$

Après étalonnage des coefficients  $a$  et  $b$  sur une série de données expérimentales, de Larrard [1] a proposé des formules simplifiées des coefficients d'interaction granulaire sous la forme suivante :

$$a_{i,j} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i}\right)^{1,02}} \quad \text{et} \quad b_{j,i} = 1 - \left(1 - \frac{d_i}{d_j}\right)^{1,5} \quad [3]$$

Une première tentative de prédiction des compacités réelles a été effectuée par le Modèle de Suspension Solide. Elle s'est avérée souffrir de deux défauts liés à la notion de viscosité et aux fonctions d'interactions granulaires [4]. Le Modèle d'Empilement Compressible [1] représente la dernière génération des modèles développés au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Ce modèle permet de prédire la compacité réelle d'un mélange de plusieurs classes à partir de la connaissance des compacités de chaque classe unidimensionnelle et de l'énergie de la mise en place. Cette dernière est introduite dans le MEC par l'intermédiaire du concept de l'indice de serrage  $K$ . La compacité réelle  $C$  d'un mélange de granulats est reliée à  $K$  par l'expression :

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n \frac{y_i / \beta_i}{\frac{1}{C} - \frac{1}{\gamma_i}} \quad [4]$$

L'objectif du présent article est d'étudier l'influence de la forme des granulats (concassés et roulés) sur les paramètres du MEC et sur la compacité des granulats.

## 2. Méthodes, matériel et matériaux

Le travail est engagé sur deux typologies de grains : les granulats concassés et les roulés. Les classes granulaires s'étalent d'un sable 0/4 à un gravier 10/20. La taille, la forme et la rugosité des grains sont les trois paramètres principaux qui affectent la compacité et qui ont influencé notre choix. Les granulats concassés sont en provenance des carrières du Boulonnais (Nord Pas-de-Calais). Les granulats roulés sont en provenance de Chevrières (région Hauts-de-France) et de Decize (région Bourgogne-Franche-Comté).

Par ailleurs, plusieurs méthodes existent pour déterminer la compacité réelle qui diffèrent selon le moyen de mise en place des échantillons : piquage, vibration, ...etc. Dans cette étude, nous avons choisi le mode opératoire par la table à secousses, selon la méthode LPC N° 61 [5], qui présente l'avantage que l'énergie de serrage est constante et proportionnelle au nombre de choques appliqués à l'échantillon (indice de serrage de la méthode  $K=9$ ).

En ce qui concerne le programme expérimental, les compacités ont été mesurées sur des mélanges « concassé-concassé » et « roulé-roulé » afin de déterminer les compacités optimales qu'on peut atteindre avec chaque type de granulats sur des mélanges binaires. Une combinaison entre un sable et un gros gravier a été analysée. En considérant le diamètre nominal maximal de chaque classe, on a fixé le rapport des tailles (Rapport  $D_1/D_2 = 5$ ) et on a mis en exercice l'effet de la forme des grains sur la compacité. D'autres combinaisons de mélanges binaires impliquant un gravier 4/10 ont été testées. Par ailleurs, la variation des proportions d'une classe granulaire dans le mélange binaire s'élève à 5% dans les parties extrêmes de la courbe du mélange afin de mesurer l'impact des effets d'interactions granulaires qu'on a vu précédemment.

### 3. Résultats obtenus

Les principales propriétés des granulats de l'étude sont répertoriées dans le Tableau 1. La masse volumique absolue a été mesurée selon la norme européenne NF EN 1097-6 et l'analyse granulométrique a été effectuée suivant la norme européenne NF EN 933-1.

Nature des granulats	Granulats calcaires concassés			Granulats alluvionnaires roulés		
	S 0/4	G 4/10	G 12/20	S 0/4	G 4/10	G 11/22
d/D						
Teneur en fines < 63 $\mu\text{m}$ [%]	6,2	1,0	0,8	1,3	1,7	0,1
$d_{50}$ (fractions) [mm]	0,7	7,2	15, 2	0,4	7,0	16,0
$d_{50}$ (mélanges) [mm]		9,5			13,6	
Module de finesse (sables)	3,2	-	-	3,4	-	-
M.V absolue [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	2,726	2,735	2,711	2,626	2,648	2,626
Forme et rugosité	Granulats anguleux de surface plane et rugueuse			Granulats de forme arrondie, plats ou allongés et de surface lisse		

Tableau 1. Principales caractéristiques des granulats de l'étude

Les essais de mesure de la compacité ont été réalisés par la table à secousses [5]. Cependant, vu la teneur en fines différente d'une fraction granulaire à une autre (notamment le sable concassé et le sable roulé) et afin de ne pas modifier les échantillons, on a décidé d'utiliser les matériaux dans leur état brut (c.à.d sans tamisage à 63 microns comme préconise le mode opératoire LCP N° 61). Par ailleurs, on a réalisé deux mesures de compacité différentes pour chaque mélange. Après avoir mesuré les compacités expérimentales, on est passé à leur modélisation par le MEC en calculant les compacités virtuelles et réelle à l'aide des Equations (1) et (4) respectivement. Une première modélisation de la compacité a été effectuée en utilisant les formules simplifiées des coefficients a et b (Equation (3)). Les compacités mesurées et modélisées sont illustrées dans la Figure 1.

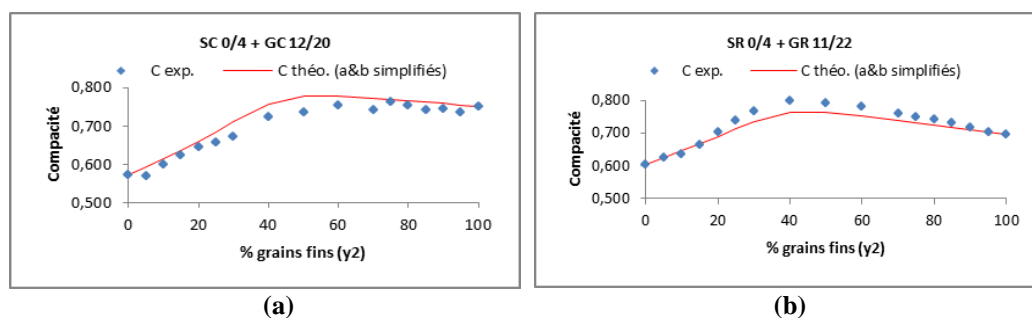
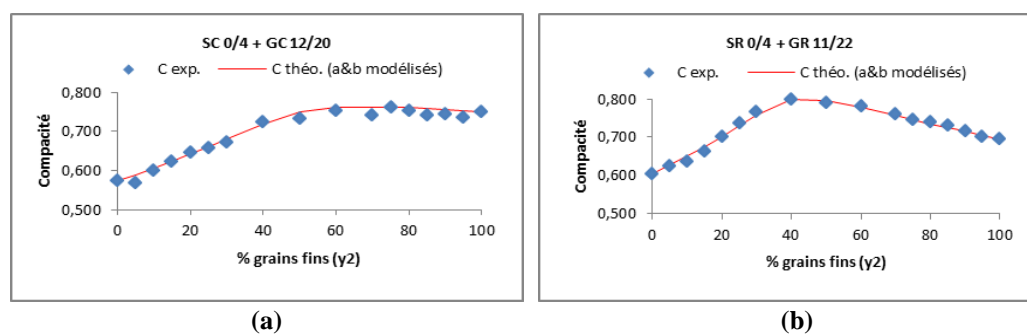


Figure 1. Compacités mesurées et modélisées des mélanges binaires concassés (a) et roulés (b) - Coefficients d'interaction via les formules simplifiées du MEC

En se basant sur les formules simplifiées des coefficients d'interactions, on arrive à prédire les compacités expérimentales avec une erreur moyenne de 2,8% pour les granulats concassés et 2,1% pour les granulats roulés. On remarque que les plus grands écarts sont constatés dans la zone des optimums où la compacité est surestimée pour les mélanges de granulats concassés et sous-estimée dans le cas des mélanges de granulats roulés. Cela nous pousse à dire que l'efficacité du mode de serrage (par la table à secousse) est influé par les paramètres de granulométrie [6] et de forme. Par ailleurs, il a été montré dans la littérature que l'erreur ne dépasse pas 0,77% pour les granulats roulés et 1,71% pour les granulats concassés [1]. Pour cela, on a procédé à une nouvelle modélisation en calibrant cette fois les coefficients a et b sur les granulats de l'étude à l'aide de l'Equation (2). Les résultats de cette modélisation sont donnés dans la Figure 2.



**Figure 2.** Compacité mesurée et modélisée des mélanges binaires concassés (a) et roulés (b) - Coefficients d'interaction calibrés sur nos mélanges

Après détermination des coefficients d'interaction, on arrive à minimiser l'écart entre le modèle et l'expérience à 1,2% pour les granulats concassés et 0,6% pour les granulats roulés. Cependant, il reste un dernier levier sur lequel on peut s'appuyer pour la prédiction des compacités qui est l'indice de serrage.

Un calcul itératif de la valeur de l'indice de serrage  $K$  nous a permis de déterminer une valeur différente  $K=5,0$  pour les granulats concassés et  $K=9,7$  pour les granulats roulés. L'indice de serrage obtenu après calibration montre que pour les granulats concassés le serrage par la table à secousse n'est pas efficace. Cela est dû à leur forte teneur en fines [7]. En ce qui concerne les granulats roulés, l'efficacité du serrage était meilleure vu qu'on a pu atteindre un indice de serrage de 9.

#### 4. Conclusion

Dans cet article, on a étudié la compacité des mélanges binaires de granulats concassés et roulés. Les résultats de la modélisation par le MEC ont montré que le calcul des coefficients d'interactions granulaires par les formules simplifiées est insuffisant pour avoir une bonne prédiction. Au bout de cette étude, on peut tirer les conclusions suivantes :

- ✓ La précision du modèle peut-être influée par la sensibilité des coefficients  $a$ ,  $b$  et  $K$  : Les formules préétablies du MEC pour les coefficients d'interactions granulaires ( $a$  et  $b$ ) ne prennent en considération que les paramètres de taille sans les paramètres de forme et ne coïncident pas dans tous les cas avec les valeurs calées sur les granulats étudiés. L'indice de serrage ( $K$ ) peut varier d'un mélange à un autre (notamment pour les granulats concassés) selon la granulométrie et la forme des grains.
- ✓ Pour les mesures de compacité à la table à secousses réalisés avec la fraction fine (<63 microns), la répétabilité des essais est assurée (écart type maximal de 0,015 entre 2 essais). Les effets de ségrégation des fines peuvent être négligés.
- ✓ Le modèle présente une bonne précision dans la détermination des optimums des mélanges binaires.

Les perspectives de la présente étude sont l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires ternaires pour les bétons ainsi que l'étude des paramètres de forme et de teneur en fines des granulats. L'utilisation des algorithmes prédictifs de l'intelligence artificielle permettra peut-être de ré-établir de nouvelles formules de calcul des paramètres du MEC, notamment les coefficients d'interaction granulaire.

#### 5. Bibliographie

- [1] DE LARRARD F., *Structures Granulaires et Formulation Des Bétons*, Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 414 p, 2000.
- [2] STOVALL T., DE LARRARD F., BUIL M., "Linear Packing Density Model of Grain Mixtures". *Powder Technology*, 48(1): 1-12, 1986.
- [3] DE LARRARD F., "Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach", CRC Press, 1999.
- [4] DE LARRARD F., SEDRAN T., "Une nouvelle approche de la formulation des bétons", *Annales du BTP*, vol. 6, p. 39-54, 1999.
- [5] LEDEE V., DE LARRARD F., SEDRAN T., BROCHU F., "Essai de compacité des fractions granulaires à la table à secousses: Mode opératoire", *Techniques et Méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 2004.
- [6] SADOK A., ZENTAR R., ABRIAK N.-E., "Genetic programming for granular compactness modelling", *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, p. 1-13, 2016.
- [7] SADOK A., "Formulation de matériaux de construction à base de sous-produits industriels avec des méthodes issues de l'intelligence artificielle", Thèse de doctorat, Université Lille 1 - Mines de Douai, 2016.