



## **Etude comparative de la compacité expérimentale et prévisionnelle des milieux granulaires**

**Walid HANINI\*, Fouad GHOMARI et Sidi Mohammed El Amine BOUKLI HACENE**

*Laboratoire Eau et Ouvrages dans leur environnement BP 230,  
Université de Tlemcen, 13000, Algérie*

\*Correspondance, courriel : [haniniwalid@gmail.com](mailto:haniniwalid@gmail.com)

### **Résumé**

La confection d'une bonne composition de béton est conditionnée par plusieurs paramètres et notamment par un choix judicieux de la phase inerte c à d sable + gravier. Puisque cette dernière constitue plus de 70% du volume totale du béton et affecte fortement les caractéristiques de ce matériau. Un squelette granulaire plus compacte diminue le volume des vides dans le béton et laisse moins d'espace à occupé par la pate du ciment ce qui conduit à une bonne résistance et une diminution du retrait et du fluage, ainsi qu'à une économie. Ce travail présente une étude comparative de la compacité des mélanges granulaires sur des granulats calcaires concassés provenant de l'ENG(sidi elabdli,Tlemcen), optimisé par voie expérimentale à l'aide d'un banc d'essai réalisé localement au niveau de notre laboratoire conformément aux recommandations de la méthode (N°61 LCPC) et par voie théorique, en se basant sur le concept du modèle d'empilement compressible. Plusieurs essais on été effectués et le modèle nous a donné un taux de corrélation très acceptable par rapport aux résultats expérimentaux.

**Mots-clés :** *granulats, compacité, mélange, béton, table à secousses, modèle d'empilement.*

### **Abstract**

#### **Comparative study of experimental and predictive compact granular media**

The making of a good concrete composition depends on several parameters including through a judicious choice of the inert phase (sand + gravel). Since the latter is more than 70% of total concrete volume and strongly affects the characteristics of this material. A more compact granular skeleton decreases the volume of voids in the concrete, leaving less space occupied by the cement paste leading to good strength and decreased shrinkage and creep, as well as a saving. This work presents a comparative study of the compactness of granular mixtures on limestone crushed aggregates from the ENG (Sidi elabdli, Tlemcen), optimized experimentally using a test done locally at our bench laboratory in accordance with the recommendations of the method (N° 61 LCPC) and theoretical way, based on the concept of stacking compressible model. Several tests were carried out and the model gave us a very acceptable level of correlation with experimental results.

**Keywords :** *aggregates, compactness, mixture, concrete, shaking table, stacking model.*

## 1. Introduction

L'optimisation granulaire est une étape primordiale dans la formulation du béton. Plusieurs méthodes de formulation sont focalisées de s'approcher d'une courbe granulaire idéale supposée donner la compacité maximale, mais aucune de ses méthodes ne repose sur un corpus scientifique à la fois solide et explicite [1]. Les travaux récents de Larrard et ses collègues ont permis de résoudre ce problème avec une précision suffisante et pour des applications pratiques grâce à un modèle théorique appelé modèle d'empilement compressible [2]. Ce modèle a été validé au niveau du LCPC par un programme expérimental colossal sur des granulats de différentes natures et provenances. Toutefois, nous n'avons pas la certitude que ces résultats peuvent être extrapolés sur les granulats les plus utilisés de notre région, donc l'objectif de notre recherche est de faire une étude comparative de la compacité des mélanges granulaires secs sur des granulats calcaires concassés provenant de l'ENG (Sidi Elabdi) optimisés par voie expérimentale et par voie théorique.

## 2. Méthodologie

### 2-1. Présentation du Modèle d'empilement compressible

Ce modèle permet de prédire la compacité réelle ( $C$ ) d'un mélange de plusieurs classes granulaires à partir de la connaissance de la compacité de chaque classe élémentaire prise isolément et la distribution granulométrique du système ainsi que l'énergie de mise en place. Il s'appuie sur la notion de la compacité virtuelle ( $\gamma$ ) et l'énergie de serrage ( $K$ ) [3]. La compacité virtuelle est la compacité maximale qu'il est possible d'atteindre pour un mélange donné, chaque particule étant placée une à une et gardant sa forme originelle. Pour calculer la compacité virtuelle d'un mélange de  $n$  classes, on doit tenir compte de deux coefficients d'interactions, l'effet de paroi et l'effet de desserrement [4].

- Effet de paroi : traduit le fait qu'à la proximité d'un grain de taille supérieure, l'empilement de grains de taille inférieure est relâché [5].
- Effet de desserrement : traduit le fait que lorsqu'un grain de taille inférieure n'est pas suffisamment fin pour s'introduire dans la porosité de l'empilement des grains de taille supérieure, il déstructure ce dernier. En effet, en venant s'intercaler entre les gros, ils induisent un relâchement de la structure [5].

Le modèle linéaire pour la prévision de la compacité est donné par l'expression suivante [6] :

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

Avec  $\gamma_i$  : compacité virtuelle lorsque la classe  $i$  est dominante,

$n$  : nombre de classe dans le mélange,

$\beta_i$  : compacité résiduelle de classe  $i$ ,

$\gamma_j$  : proportion de classe  $j$  dans le mélange,

$a_{ij}$  : effet de desserrement exercé par un grain fin  $j$  dans un empilement de gros grains  $i$ ,

$b_{ij}$  : effet de paroi exercé par un gros grain  $i$  dans un empilement de grains fins  $j$ .

Par définition la compacité virtuelle est inaccessible à l'expérience et à partir de la formule (1) on remarque que la compacité virtuelle dépend que des caractéristiques propres des matériaux, mais en réalité elle dépend aussi de l'énergie de mise en place. Pour décrire la dépendance entre la compacité et le protocole de compaction un nouveau paramètre a été introduit appelé indice de serrage, et l'expression finale du modèle qui permet de déterminé la compacité réelle est présenté par la formule (7) [1] :

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n \frac{Y_i / \beta_i}{\frac{1}{C} - \frac{1}{\gamma_i}} \quad (2)$$

Avec :  $K$  : indice de serrage qui ne dépend que du protocole (ou l'énergie) de compactage.  $C$  : compacité réelle du mélange de  $n$  classes.

### 2-2. Programme expérimental

Sept classes élémentaires on été préparées, elles sont délimitées par des tamis de la « série de renard » (0.315-1.25 / 1.25-4 / 4-6.3 / 6.3-10 / 10-16 / 16-20 / 20-25). Ces classes ont été choisies dont le but de mesurer la compacité des différents mélanges (binaire, ternaire et quaternaire) et localisé l'optimum. Le détail du programme expérimental dont l'approche méthodologique est consignée sur la (Figure 1).

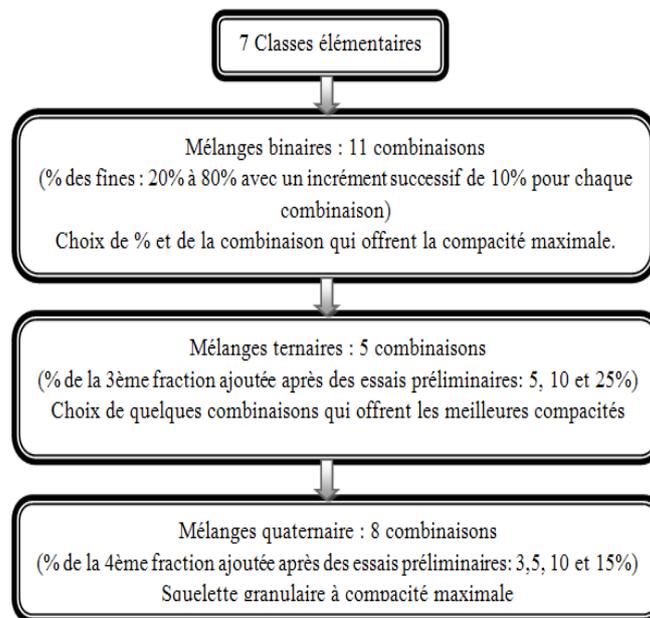
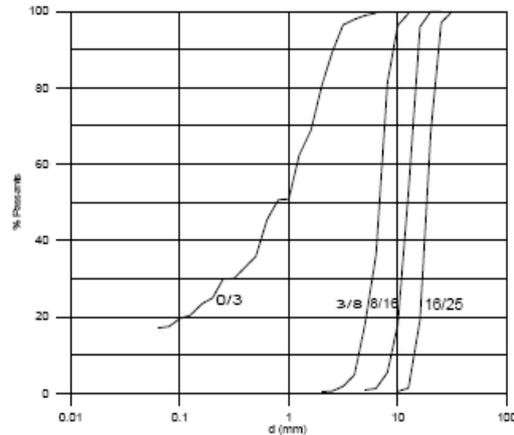


Figure1 : Organigramme de la réalisation expérimentale

### 2-3. Matériaux et matériels utilisés

La carrière choisie pour l'approvisionnement des granulats (sable0/3, gravillon3/8,8/16,16/25) est celle de Djebel Abiod de Sidi Abdelli qui appartient à l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG).Le choix retenue pour cette étude est dicté par le fait que c'est une grande carrière qui approvisionne principalement la région. La carrière de Djebel Abiod produise des sables avec un module de finesses respectifs grossiers avec de légères discontinuités (Figure 2). L'analyse granulométrique a donnée, une teneur en fines de 17% et un module de finesse de 2.95 pour le sable.



**Figure 2 :** *Courbes granulométriques des granulats Djebel Abiod*

L'essai utilisé pour mesurer la compacité est « l'essai de compacité des fractions granulaires à la table à secousse ». Le banc d'essai utilisé est réalisé localement au niveau de laboratoire de structures de la faculté de Technologie à l'université de Tlemcen conformément aux recommandations de la méthode N°61 du (LCPC) France. L'essai consiste à mesurer la compacité des fractions granulaires lorsqu'elle est soumise dans un cylindre à une sollicitation mécanique bien définie (compression+vibration), cette dernière provoque un réarrangement des grains, et donc un compactage de l'échantillon. La mesure réalisée est celle de la masse volumique apparente de l'échantillon qui permet de calculer la compacité [8].



**Figure 3 :** *Table à choc de la Faculté de Technologie de Tlemcen*

Une dizaine d'essais de répétabilité et de reproductibilité ont été réalisés pour chaque constituant (agrégat) au lieu des trois essais recommandés. Les valeurs des écart-type relatifs à la mesure de la compacité des fractions respectives 0/4, 4/8, 8/16 et 16/25 sont de 0.298%, 0.429%, 0.317% et 0.560%. Ces résultats montrent bien que le banc d'essais présente une bonne reproductibilité [9].

### 3. Résultats et discussion

#### 3-1. Compacité des classes élémentaires

Nous avons déterminé la compacité de chaque classe élémentaire par l'essai de la table à secousses et les résultats obtenus sont présentés dans la **Figure 4**. La classe granulaire qui nous a donné la compacité maximale est la classe la plus fine (0.315-1.25), Nous remarquons que la variation de la compacité pour le gravier est modeste par rapport au sable.

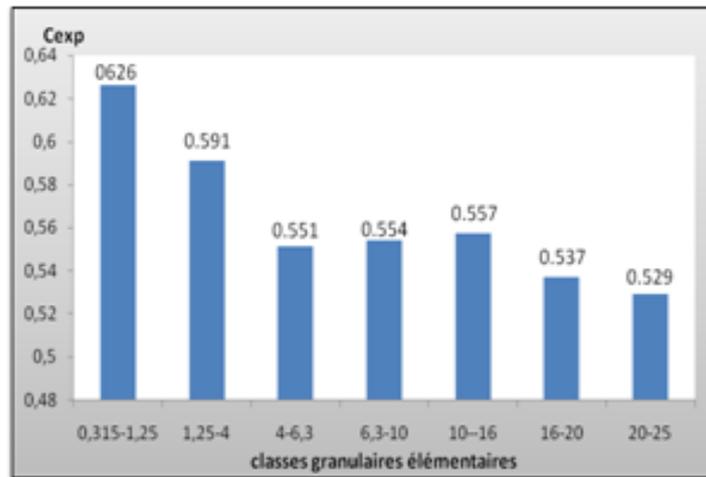


Figure 4 : compacité des classes élémentaires

#### 3-2. Compacité des mélanges binaires

Nous avons effectué une étude systématique sur des mélanges binaires obtenus par une combinaison de deux classes élémentaires, préalablement préparées. Pour la réalisation des mélanges, nous avons procédé à une homogénéisation manuelle. 11 mélanges ont été préparés et pour la réalisation de ces mélanges nous avons choisi des proportions de petits grains allant de 20% à 80% avec un incrément successif de 10%. Les résultats obtenus sont présentés dans la **(Figure 5)**.

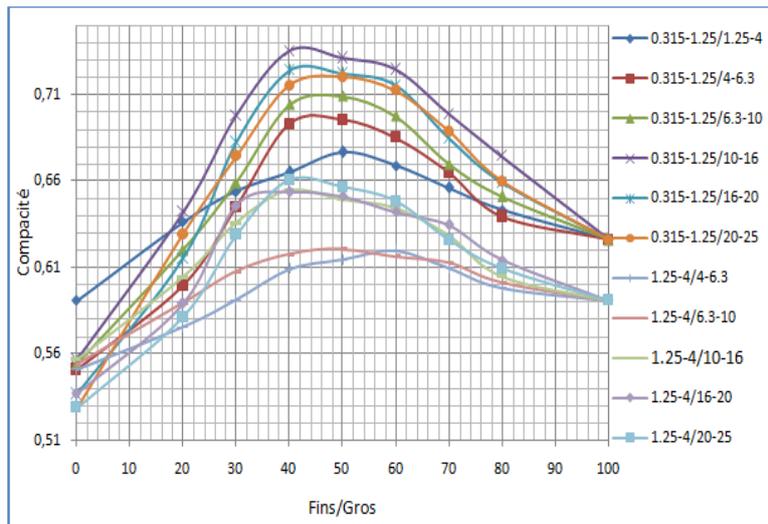


Figure 5 : Variation de la compacité en fonction des proportions des grains fins pour des mélanges binaires

Les courbes obtenues se présentent sous forme de cloche et les résultats montrent bien que l'optimum de la compacité se trouve à un taux d'introduction des grains fins  $\leq 50\%$ . Pour la majorité des mélanges, la variation de la compacité est plus rapide du côté des gros grains dominants (petits pourcentages de grains fins) que du côté des petits dominants. Cette variation s'atténue de plus en plus quand les classes granulaires sont plus proches. Le mélange qui nous a donné la compacité maximale est celui de (40% de sable 0.315/1.25 et 60% de gravillon 10-16) avec un optimum de 73%.

### 3-3. Comparaison des résultats expérimentaux avec les résultats obtenus par le modèle d'empilement compressible (logiciel René LCPC)

Dans cette partie d'étude, nous avons utilisé le logiciel René LCPC [10] (basé sur le concept du modèle d'empilement compressible) pour la prévision des compacités théoriques des différents mélanges (binaires, ternaires et quaternaires) dont le but est de comparer les résultats théoriques avec nos résultats expérimentaux. Avant d'utiliser le logiciel, nous avons besoin des données suivantes

Diamètre des tamis en (mm)	Granulométrie en passant cumulé						
	0.315-1.25	1.25-4	4-6.3	6.3-10	10-16	16-20	20-25
25							100
20						100	0
16					100	0	
12.5					74.4		
10				100	0		
8				41			
6.3			100	0			
5			57.2				
4		100	0				
3.15		89					
2.5		60.6					
2		37.2					
1.6		10					
1.25	100	0					
1	79.33						
0.8	63.33						
0.630	45.33						
0.5	28.66						
0.4	16.66						
0.315	0						
Masse volumique absolue (kg/m <sup>3</sup> )	2550	2550	2535	2540	2540	2543	2543
Compacité exp.	0.626	0.591	0.551	0.554	0.557	0.537	0.529
Indice de serrage	9						

Tableau 1 : Les données d'entrée du logiciel (René LCPC)

Les **Figures 6, 7 et 8** présentent quelques résultats théoriques et expérimentaux pour des mélanges binaires, ternaires et quaternaires.

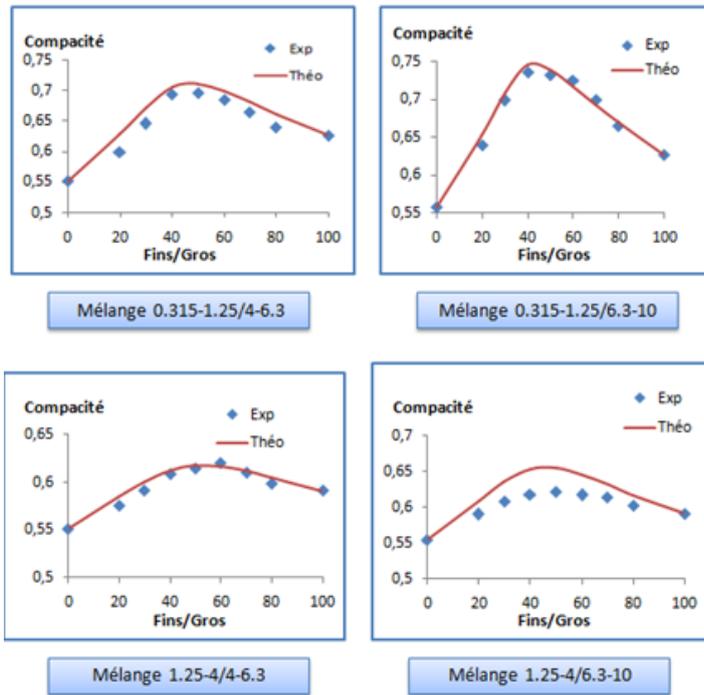


Figure 6 : Variation des compacités expérimentales et théoriques pour des mélanges binaires en fonction des diamètres des grains fins

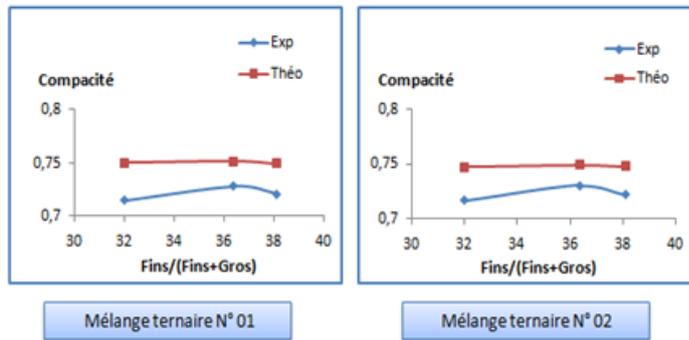


Figure 7 : Variation des compacités expérimentales et théoriques pour des mélanges ternaire

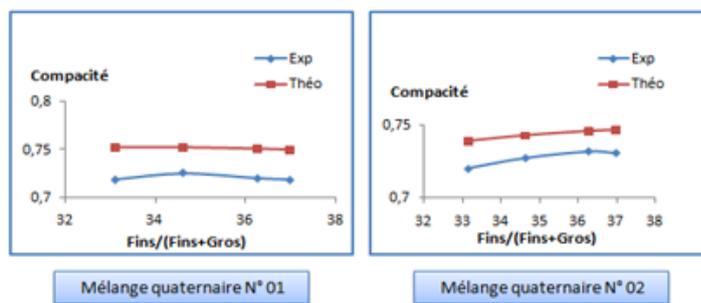


Figure 8 : Variation des compacités expérimentales et théoriques pour des mélanges quaternaires

Les **Figures 6,7 et 8** montrent bien que l'allure générale des courbes est fidèle et que le modèle donne des compacités un peu fortes par rapport à nos résultats expérimentaux. Sur l'ensemble des mesures effectuées, le modèle d'empilement compressible donne un taux de corrélation de **98%**, par rapport à nos résultats.

#### 4. Conclusion

Les résultats de la littérature [3] montrent bien que l'optimum granulaire pour un mélange binaire se situe à 30% d'introduction des grains fins, tandis que nos résultats expérimentaux donnent un optimum à 40%, cette différence est due à l'origine et la nature des granulats utilisés. L'utilisation d'un modèle théorique (modèle d'empilement compressible) nous a donné un taux de corrélation d'environ 98% par rapport à nos résultats expérimentaux. Ces résultats qui sont très acceptables et encourageants laissent à penser que l'optimisation granulaire par des modèles théoriques constitue un bon outil d'étude des empilements granulaires secs.

#### Références

- [1] - F DE LARRARD, « Structures granulaires et formulation des bétons », Etudes et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris, France, (2000) p. 414.
- [2] - S. M. A. BOUKLI HACENE, « Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen », Thèse de Doctorat, Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen, Algérie, (2010), p. 194.
- [3] - T. SEDRAN, « Rhéologie et rhéométrie des bétons : Application à la formulation des bétons autonivelants », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, Mars (1999).
- [4] - C. KECHKAR et Y CHERAIT, « Contribution à l'étude des empilements granulaires », laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH), Université 08 mai 45, Guelma, Algérie(2008).
- [5] - F. DE LARRARD « Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances », Rapports de recherche des LPC, N° 149, Paris, Mars (1988).
- [6] - M. EL BARRAK, « Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais », Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, Juillet, (2005) p. 229.
- [7] - NGOC DONG LE, « Amélioration de la régularité du béton en production », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, (2007) p. 248.
- [8] - V. LEDEE, F DE LARRARD, T SEDRAN, F BROCHU. « Essais de compacité de fractions granulaires à la table à secousses », Méthode d'essai N° 61, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France, (2004), p.13.
- [9] - M. BOUTERFAS. « Optimisation de la compacité du squelette granulaires », Mémoire de magister, Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen, Algérie, (2012), p. 66.
- [10] - T SEDRAN. et de F LARRARD. « Manuel d'utilisation de René-LCPC version 6.1d Logiciel d'optimisation granulaire », Septembre (2000) p.20.