

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

### Résumé

Une bonne composition de béton est déterminée par plusieurs facteurs et particulièrement par un choix satisfaisant de la phase inerte c.-à-d. entre sable et gravillon. Cette dernière occupe environ plus de 70% du volume totale du béton et contribue fortement les caractéristiques de ce matériau. On sait qu'un squelette granulaire plus compacte diminue le volume des vides dans le béton et laisse moins d'espace à occuper par la pâte du ciment ce qui conduit à une bonne résistance et une diminution du retrait et du fluage, ainsi qu'à une économie.

Cette étude se focalise sur la comparaison de la compacité des mélanges granulaires sur des granulats concassés et de sable, optimisé par voie expérimentale et par voie théorique, en se basant sur le concept du modèle d'empilement compressible (MEC). Nous avons effectué plusieurs essais et le modèle nous a donné un taux de corrélation très acceptable par rapport aux résultats expérimentaux.

### 1. Introduction

Pour aboutir une formulation du béton technico-économique, l'optimisation granulaire est une étape importante à maîtriser. Plusieurs méthodes de formulation sont concentrées de s'approcher d'une courbe granulaire idéale supposé donné la compacité maximale, mais aucune de ses méthodes ne repose sur un corpus scientifique à la fois solide et explicite [1].

Plusieurs modèles permettent aujourd'hui la prévision de la compacité d'un mélange granulaire (Golterman et al., 1997, Dewar, 1999, de Larrard, 2000). Le Modèle d'Empilement Compressible (MEC), proposé par de Larrard, se réfère à un indice de serrage K pour caractériser le mode de mise en place et permet aussi de résoudre ce problème avec une précision suffisante et pour des applications pratiques.

Ce modèle a été validé au niveau du LCPC par un programme expérimental colossal sur des granulats de différentes nature et provenance.

Toutefois nous n'avons pas la certitude que ces résultats peuvent être extrapolés sur les granulats les plus utilisés de notre pays, donc l'objectif de notre recherche est de faire une étude comparative de la compacité des mélanges granulaires secs sur des granulats concassés provenant Ambohimahitsy (optimisé par voie expérimentale et par voie théorique).

### 2. Méthodologie

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

La connaissance de l'énergie de mise en place et la distribution granulométrique du système ainsi que la compacité de chaque classe élémentaire prise isolément, ce modèle permet de calculer la compacité réelle (C) d'un mélange de plusieurs classes granulaires.

La compacité virtuelle ( $\gamma_i$ ) et l'énergie de serrage (K) [2] sont les deux éléments de base de ce module.

Cette 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 :

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

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,

$y_j$  : 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.

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 déterminer la compacité réelle est présentée par la formule (7) [1] :

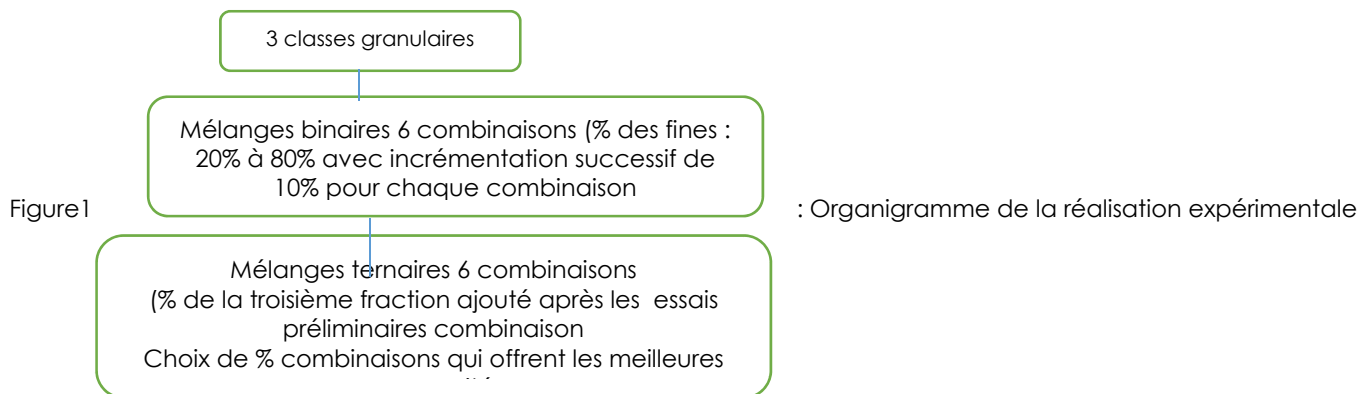
$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_i/\beta_i}{\frac{1}{C} - \frac{1}{\gamma_i}}$$

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

Trois classes élémentaires ont été préparées, elles sont délimitées par des tamis de la « série de renard » (0.08 -5 / 5-15 / 15-25 ). 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 consigné sur la (Figure 1)



## 2-3. Matériaux et matériels utilisés

Nous avons choisi le sable 0/5, gravillon 5/15 et 15/25 provenant de la carrière d'Ambohimahitsy pour l'approvisionnement des granulats. Le tableau ci-dessous présente leurs caractéristiques.

Tableau 1 : Caractéristiques des granulats

Caractéristiques des granulats	Classes granulaires		
	0/5	5/15	15/25
Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	1450	1380	1355
Masse volumique absolue (kg/m <sup>3</sup> )	2650	2721	2710
Equivalent de sable (%)	79		
Essai de propreté (impuretés) (%)	-	1.6	0.75
Coefficient d'aplatissement (%)	-	9	9
Module de finesse	2.85		
Teneur en fines (%)	18		
Essai Los Angeles (%)	-	29	33
Essai Micro Deval (%)	-	18	16

La carrière Ambohimahitsy produit des sables avec un module de finesse respectifs grossiers avec de légères discontinuités et des granulats (Figure 2). L'analyse granulométrique a donnée, une teneur en fines de 17% et un module de finesse de 2.95 pour le sable.

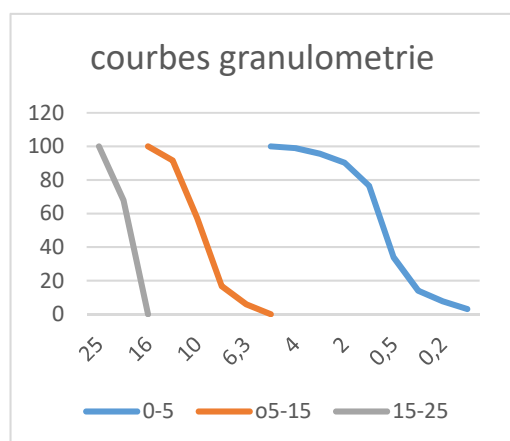


Figure 2 : Courbes granulométriques des granulats

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 l'institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo conformément aux recommandations de la méthode N°61 du (LCPC) France. L'essai consiste à mesurer la compacité des fractions granulaires l'ors qu'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 [4].



Photo 1 : Table à vibrante de l'institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo

Plusieurs d'essais de répétabilité et de reproductibilité ont été réalisés pour chaque constituant (granulat) au lieu de trois essais recommandés. Ces résultats montrent bien que le banc d'essais présente une bonne reproductibilité.

### 3. Résultats et discussion

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

La compacité de chaque classe élémentaire est déterminée 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 (0.08-5), Nous remarquons que la variation de la compacité pour le gravier est modeste par rapport au sable.

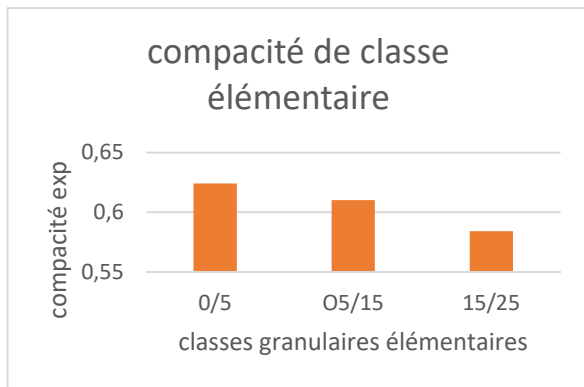


Figure 3 : compacité des classes élémentaires

#### 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

Ces mélanges ont été réalisés avec l'introduction de l'élément fin à 10, 25, 40, 55, 70 et 85 %. Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 4.

C'est le mélange de sable (40%) et de gravier 15/25 (60%) qui a atteint la compacité maximale (72%). Aussi, la compacité maximale des 3 mélanges binaires se situe au droit du taux d'introduction de 40% de l'agrégat de classe faible

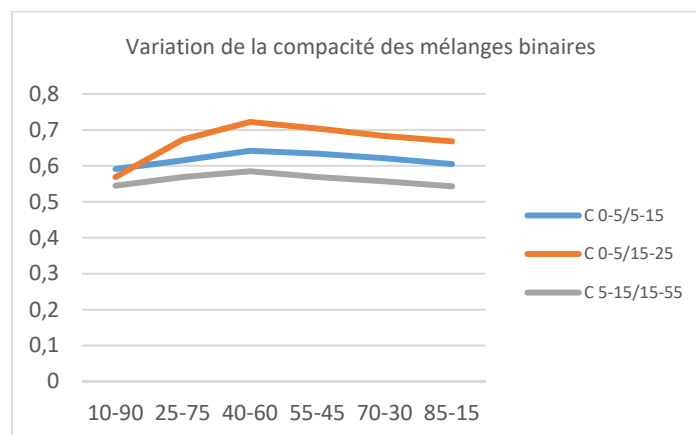


Figure 4 : Variation de la compacité en fonction des proportions des grains fins pour des mélanges binaires

#### 3-3. Compacité des mélanges ternaires

Nous avons effectué une étude systématique sur des mélanges ternaires obtenus par une combinaison de deux classes élémentaires, préalablement préparées. Pour la réalisation des mélanges, nous avons procédé à une homogénéisation manuelle.

Ces mélanges ont été réalisés avec l'introduction de l'élément fin à 10, 25, 40, 55, 70 et 85 %. Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 6.

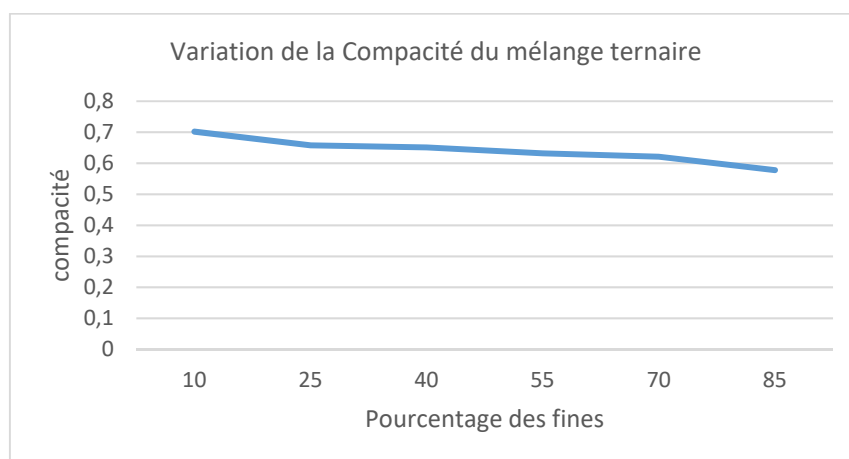


Figure 5 : Variation de la compacité en fonction des proportions des grains fins pour des mélanges ternaires. D'après cette figure ci-dessus, on a constaté que la compacité de ce mélange diminue en fonction de l'augmentation des proportions des fines. Pour trouver la compacité maximale, nous avons réalisés des mélanges avec l'introduction de l'élément fin à 5%, 10% et 25 %. La figure suivante présente ce résultat.

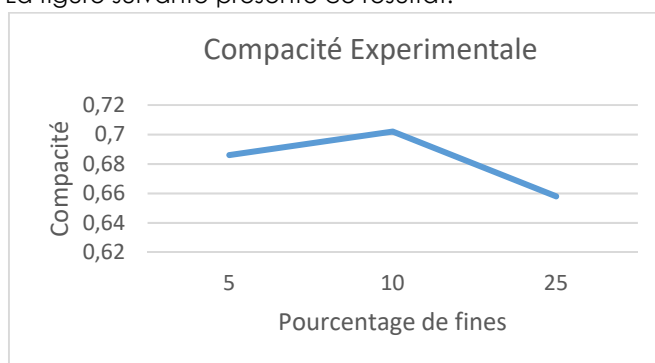


Figure 6 : Variation de la compacité en fonction des proportions des grains fins pour des mélanges ternaires. On a fait une étude approfondie sur la compacité de mélange ternaire entre 32 et 38% de sable, 48 et 57,2% de granulat 5/15 et de 9 à 20% de granulat 15/25. Et on a constaté que la compacité optimale obtenu par le 36,4% de sable, 54,5% de granulat 5/15 et de 9,1% de de granulat 15/25, on a également un rapport de G/S=1.75

### 3-4. 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 [6] (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

Tableau 2 : Les données d'entrée du logiciel (René LCPC)

Diamètre des tamis (mm)	Granulométrie en Tamisât cumulé (%)		
	0-5	05-15	15-25
25			100
20			67,9
16		100	0
12,5		91,6	
10		57,3	
8		16,8	
6,3		5,9	
5	100	0	
4	99		
3,15	95,6		
2	90,3		
1	76,6		
0,5	33,9		
0,315	14		
0,2	7,7		
0,125	3,1		
0,08	1		
Masse volumique réelle (kg/m3)	2650	2721	2710
Compacité expérimentale	0.624	0.610	0.584
Indice de serrage	9		

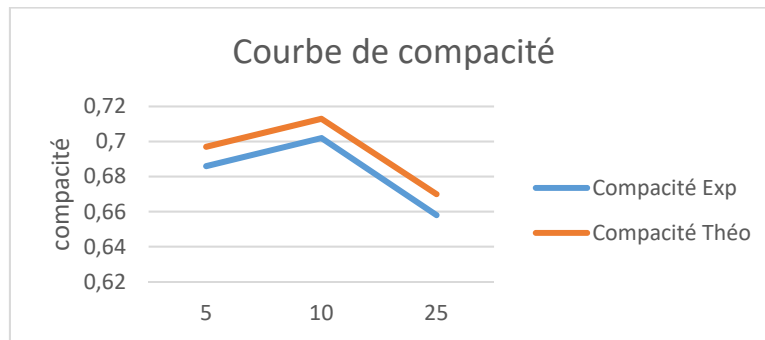


Figure 7 : Variation des compacités expérimentales et théoriques pour des mélanges ternaires

La Figure ci-dessus montre 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 obtenus, d'après la littérature [2], 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 36%, cette différence est due à l'origine et la nature des granulats utilisés.

Le modèle théorique (modèle d'empilement compressible) utilisé, nous a fourni 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)
- [2], 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)
- [3], M. BOUTERFAS. « Optimisation de la compacité du squelette granulaires », Mémoire de magister, Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen, Algérie, (2012)
- [4], 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),
- [5], . KECHKAR et Y CHERAIT, « Contribution a l'étude des empilements granulaires », laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH), Université 08 mai 45, Guelma, Algérie(2008).
- [6], . SEDRAN. et de F LARRARD. « Manuel d'utilisation de René-LCPC version 6.1 du Logiciel d'optimisation granulaire », Septembre (2000)