



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID - TLEMCCEN**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL**

**MEMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE**  
**MAGISTER EN GENIE CIVIL**

**OPTION : MATERIAU BETON**

*Présenté et soutenu le / / 2012 par :*

Mr HANINI Walid

**ETUDE DE L'INCIDENCE DE LA GRANULARITE SUR**  
**LA COMPACITE DES MELANGES GRANULAIRES**

Jury De SOUTENANCE

M <sup>r</sup> N. ABOUBEKR	Pr	Univ. Tlemcen	Président
M <sup>r</sup> M. MEGHACHOU	Pr	Univ. Sidi-Bel-Abbes	Examineur
M <sup>r</sup> A. BAGHLI	MAA	Univ. Tlemcen	Examineur
M <sup>r</sup> F. GHOMARI	Pr.	Univ. Tlemcen	Encadreur
M <sup>r</sup> M.A. BOUKLI HACENE	MCA	Univ. Tlemcen	Encadreur

## RESUME

L'optimisation granulaire est une étape primordiale dans la formulation du béton. Un squelette granulaire plus compact diminue le volume de vides dans le béton et laisse moins d'espace à occuper par la pâte de ciment, ce qui conduit à une bonne résistance et une diminution du retrait et du fluage, ainsi qu'à une économie.

La compacité d'un milieu granulaire dépend de certaines propriétés telles que la distribution de taille et la forme des particules, la paroi du récipient et du gros granulat, le desserrement entre particules ainsi que le mode de mise en place.

Ce travail présente une étude comparative de la compacité des mélanges granulaires sur des granulats calcaires concassés provenant de l'ENG, 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. Deux cents quatre essais ont 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, logiciel René lcpc.

## ملخص

إن تحسين الهيكل الحبيبي يشكل خطوة أساسية في تركيب الخرسانة. الهيكل الحبيبي المرصوص يساعد على انقاص حجم الفراغات و ترك مجال صغير لعجينة الاسمنت مما يؤدي إلى مقاومة جيدة و انقاص نسبة التقلص و التشويه على المدى الطويل.

إن تراص الهيكل الحبيبي يعتمد على خصائص معينة مثل توزيع الحجم وشكل الجسيمات, جدار الحاوية والقطر الكبير للحصى, الرخاوة بين الحبيبات وطريقة الرص.

هذا العمل يقدم دراسة مقارنة لتراص خليط من الحصى أحضرت من الشركة الوطنية للحصى. عملية الرص قمنا بها في المخبر على النحو الموصى به من قبل طريقة (رقم LCPC 61). كما قمنا بها بطريقة نظرية استنادا إلى نموذج الهيكل المضغوط. قمنا بأجاز مئتان و اربعة تجارب و النموذج قدم لنا معدل ارتباط مقبول جدا مقارنة بالنتائج التجريبية.

**الكلمات الرئيسية :** الحصى، التراص ، خليط، خرسانة، برنامج René lcpc، طاولة قابلة للهبز

## ABSTRACT

The granular optimization is an essential step in the formulation of concrete. A more compact granular skeleton decreases the volume of voids in the concrete, leaving less space to be occupied by the cement paste, leading to strong resistance and reduced shrinkage and creep, as well as an economy.

The compactness of a granular mixture depends on certain properties such as size distribution and particle shape, the container wall and large granulat, looseness between particles and the method of implementation.

This work presents a comparative study of the compactness of granular mixtures of crushed limestone aggregate from the ENG, optimized experimentally using a test done locally in our laboratory as recommended by the method (LCPC N° 61) and by theoretical, based on the concept of stacking compressible model. Two hundred four trials have been conducted and the model gave us a very acceptable correlation rate compared to experimental results.

**Key words:** aggregates, compactness, mixture, concrete, shaking table, software René lcpc.

## REMERCIEMENTS

J'aimerais exprimer ma profonde gratitude à Messieurs GHOMARI Fouad, Professeur à l'Université de Tlemcen et BOUKLI HACENE Sidi Mohammed El Amine, Maître de conférences à l'Université de Tlemcen, qui m'ont fait confiance en acceptant de m'encadrer. Je leur suis très reconnaissant de l'opportunité qu'ils m'ont offerts pour élaborer ce modeste travail. Leurs remarques pertinentes et leurs esprits de synthèse m'ont permis d'avoir une autre vision sur la problématique abordée.

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance à monsieur ABOUBEKR Nabil, Professeur à l'université de Tlemcen, qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider le jury.

Mes vifs remerciements s'adressent à Monsieur MEGACHOU Mourad, Professeur à l'Université de Sidi Belabbes et Monsieur BAGHLI Abdellatif, Chargé de cours à l'Université de Tlemcen, pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à ce travail en acceptant de l'examiner et de participer à mon jury de soutenance.

Un remerciement particulier à tous mes collègues de travail qui ont participés de près où de loin au bon déroulement de ce travail.

Enfin, je voudrais exprimer mes plus profonds remerciements à mon père, à ma mère, à mes frères, à mes soeurs, et à toute ma grande famille pour leur soutien constant,leur patience et leur encouragement tout au long de ces années d'etudes.

# SOMMAIRE

Résumé

Abstract

Remerciements

Liste des figures.....	4
Liste des tableaux.....	7
Liste des notations.....	8
<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>10</b>
<b>Chapitre 1. Empilements et porosités des milieux granulaires.....</b>	<b>12</b>
<b>1.1 Introduction.....</b>	<b>13</b>
<b>1.2 L'empilement granulaire dans le béton.....</b>	<b>13</b>
<b>1.3 L'empilement des milieux granulaires secs.....</b>	<b>14</b>
1.3.1 Empilement de sphères dans un plan (2 dimensions).....	14
1.3.2 Empilement de sphères en 3 dimensions.....	15
<b>1.4 Méthodes de mesure de la compacité.....</b>	<b>16</b>
1.4.1 Méthode de versement simple.....	16
1.4.2 Méthode de Piquage.....	17
1.4.3 Méthode de vibration avec compression.....	17
1.4.4 Essai de compacité des fractions granulaires à la table à secousses.....	18
<b>1.5 Facteurs influant l'empilement granulaire.....</b>	<b>18</b>
1.5.1 Effet de la taille et la forme des grains.....	18
1.5.2 Effet de la paroi et de desserrement.....	19
1.5.3 Effet du mode de mise en place (l'énergie de serrage).....	20
1.5.4 Effet de la ségrégation.....	21
1.5.5 Effet de l'étendue granulaire.....	21
<b>1.6 Méthodes de formulations.....</b>	<b>22</b>
1.6.1 Introduction.....	22
1.6.2 Méthodes classiques de formulation des bétons.....	23
1.6.3 Méthodes récentes de formulation des bétons.....	25

<b>1.7 Conclusion</b> .....	<b>26</b>
<b>Chapitre 2. Modèles de prévision de la compacité des milieux granulaires</b> .....	<b>27</b>
<b>2.1 Introduction</b> .....	<b>28</b>
<b>2.2 Evolution des modèles de prévision de la compacité</b> .....	<b>28</b>
2.2.1 Le modèle linéaire de compacité (MLC).....	28
2.2.2 Le modèle d'empilement virtuel.....	32
2.2.3 Le modèle de suspension solide (MSS).....	34
2.2.4 Le modèle d'empilement compressible (MEC).....	36
<b>2.3 Intégration du modèle d'empilement compressible dans un logiciel</b> .....	<b>41</b>
2.3.1 Logiciel René LCPC.....	41
2.3.2 Fonctionnement du logiciel.....	43
<b>2.4 Conclusion</b> .....	<b>50</b>
<b>Chapitre 3. Etude expérimentale et prévisionnelle des compacités des milieux granulaires</b> .....	<b>51</b>
<b>3.1 Introduction</b> .....	<b>52</b>
<b>3.2 Présentation de la carrière</b> .....	<b>52</b>
3.2.1 Situation géographique.....	52
3.2.2 Aperçu géologique.....	53
<b>3.3 Identification des granulats</b> .....	<b>53</b>
3.3.1 Caractéristiques géométriques.....	53
3.3.2 Caractéristiques physiques.....	54
3.3.3 Caractéristiques mécaniques.....	55
<b>3.4 Programme expérimental</b> .....	<b>56</b>
<b>3.5 Présentation de l'essai de compacité (Méthode d'essai n° 61 LCPC)</b> .....	<b>57</b>
3.5.1 Appareillage.....	58
3.5.2 Mode opératoire.....	59
3.5.3 Expression des résultats.....	60
<b>3.6 Résultats expérimentaux</b> .....	<b>61</b>
3.6.1 Compacité des classes élémentaires.....	61
3.6.2 Compacité des mélanges binaires.....	62
3.6.3 Compacité des mélanges ternaires.....	64
3.6.4 Compacité des mélanges quaternaires.....	66
<b>3.7 Comparaison des résultats expérimentaux avec les résultats obtenus par le modèle d'empilement compressible (logiciel René LCPC)</b> .....	<b>68</b>
<b>3.8 Conclusion</b> .....	<b>73</b>

<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>74</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>76</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>79</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Mélange de grains de tailles différentes.....	13
Figure 1.2	Empilements ordonnés de sphères unimodale : empilement cubique (à gauche) et hexagonal (à droite).....	14
Figure 1.3	Empilements ordonnés de sphères multimodales : empilement cubique (à gauche) et hexagonal (à droite) (Pietsch, 1991 et 2002)....	15
Figure 1.4	Compacités théoriques et expérimentales (Geary, 1961) de mélanges binaires : représentation en fonction des pourcentages massiques de grosses particules et du rapport de taille.....	16
Figure 1.5	Dispositif de mesure de la compacité (El Barrak, 2005).....	17
Figure 1.6	Variation de compacité en fonction de la forme des particules.....	18
Figure 1.7	Valeur des compacités pour des grains roulé et concassé (de Larrard, 2000) .....	19
Figure 1.8	Effet de la paroi du récipient (de Larrard, 2000).....	19
Figure 1.9	Effet de paroi entre granulats (de Larrard, 1988).....	19
Figure 1.10	Effet de desserrement (de Larrard, 1988).....	20
Figure 1.11	Compacité pour différents modes de mise en place des grains concassés (de Larrard, 2004).....	20
Figure 1.12	Rôle du rapport $d_2 / d_1$ sur la compacité (Kechkar et Cherait, 2008)....	22
Figure 2.1	Mélange binaire sans interaction gros grains dominants (Sedran, 1999).....	29
Figure 2.2	Mélange binaire sans interaction grains fins dominants (Sedran, 1999)	29
Figure 2.3	Effet de paroi et de desserrement (Sedran, 1999).....	30
Figure 2.4	Valeurs théoriques et expérimentales de la compacité pour divers mélanges en fonction de la proportion de la classe la plus fine (Kechkar et Cherait, 2008).....	32
Figure 2.5	Les deux classes ont le même diamètre (Sedran, 1999).....	33
Figure 2.6	Variation de K en fonction de la compacité (de Larrard, 2000).....	37
Figure 2.7	Compacités des mélanges binaires de granulats roulés. Compacité en fonction de la proportion de grains fins, points expérimentaux et lissages fournis par le modèle (de Larrard, 2000).....	39
Figure 2.8	Compacités des mélanges binaires de granulats concassés. Compacité en fonction de la proportion de grains fins, points expérimentaux et lissages fournis par le modèle (de Larrard, 2000)...	39

Figure 2.9	Comparaison entre prévision et mesures pour les mélanges ternaires (de Larrard ; 2000).....	41
Figure 2.10	Schéma fonctionnel du logiciel René-LCPC (Sedran, 1999).....	43
Figure 2.11	Fenêtre "Bibliothèque de constituant".....	43
Figure 2.12	diamètre min et max des grains.....	44
Figure 2.13	Fenêtre "propriété du constituant".....	45
Figure 2.14	Fenêtre "Compacités propres des classes granulaires".....	45
Figure 2.15	La valeur d'indice de compaction.....	46
Figure 2.16	Fenêtre "confinement".....	47
Figure 2.17	Fenêtre " Choix des matériaux pour le mélange ".....	47
Figure 2.18	Fenêtre " données de calculs ".....	48
Figure 2.19	Fenêtre « résultats ».....	50
Figure 3.1	Plan de situation du gisement de Djebel Abiod (Boukli Hacène, 2009).	52
Figure 3.2	Courbes granulométriques des granulats Djebel Abiod.....	54
Figure 3.3	Approche pour la réalisation du programme expérimental.....	57
Figure 3.4	Table à choc de la Faculté de Technologie, Tlemcen.....	58
Figure 3.5	Table à choc du LCPC, Paris.....	58
Figure 3.6	Schéma de la table à secousses.....	59
Figure 3.7	Partie supérieure de la table à secousses.....	60
Figure 3.8	Variation de la compacité en fonction des proportions des grains fins pour des mélanges binaires (sable+gravier).....	63
Figure 3.9	Variation de la compacité en fonction des proportions des grains fins pour des mélanges binaires (gravier).....	63
Figure 3.10	Variation de la compacité de mélanges ternaires préliminaires.....	65
Figure 3.11	Variation de la compacité des mélanges ternaires.....	66
Figure 3.12	Variation de la compacité des mélanges quaternaires.....	67
Figure 3.13	Variation des Compacités expérimentales et théoriques pour des mélanges binaires en fonction des diamètres des grains fins.....	70

Figure 3.14	Variation des Compacités expérimentales et théoriques pour des mélanges ternaires en fonction des diamètres des grains fins.....	71
Figure 3.15	Variation des Compacités expérimentales et théoriques pour des mélanges quaternaires en fonction des diamètres des grains fins.....	72

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Compacités des granulats concassés pour différents modes de mise en place (Bouterfas, 2012).....	21
Tableau 2.1	Compacités des mélanges binaires de granulats roulés (Sedran, 1999).....	35
Tableau 2.2	Compacités des mélanges binaires de granulats concassés (Sedran, 1999).....	35
Tableau 2.3	Viscosités relatives de référence correspondant à divers types de mise en place (Sedran, 1999).....	36
Tableau 2.4	Compacités des mélanges binaires de granulats concassés (de Larrard, 2000).....	38
Tableau 2.5	Compacités des mélanges binaires de granulats concassés (de Larrard, 2000).....	38
Tableau 2.6	Résumé des valeurs de K (indice de serrage) pour différents procédés de remplissage (de Larrard, 2000).....	40
Tableau 2.7	Compacités mesurées (grains roulés et concassés) et prévisions du modèle (de Larrard, 2000).....	40
Tableau 3.1	Composition chimique de la roche exploitée dans la carrière de Djebel Abiod.....	53
Tableau 3.2	Identification des propriétés des granulats de Djebel Abiod (Boukli Hacène et Ghomari, 2007).....	56
Tableau 3.3	Valeur de compacité des classes élémentaires.....	61
Tableau 3.4	Compacités expérimentales des mélanges binaires.....	62
Tableau 3.5	Compacités de mélanges ternaires préliminaires.....	64
Tableau 3.6	Compacités des mélanges ternaires retenus.....	65
Tableau 3.7	Compacités des mélanges quaternaires.....	67
Tableau 3.8	Les données d'entrée du logiciel (René LCPC).....	68
Tableau 3.9	Compacités expérimentale et théoriques des mélanges binaires	69
Tableau 3.10	Compacités expérimentale et théorique des mélanges ternaires	71
Tableau 3.11	Compacités expérimentale et théorique des mélanges quaternaires.....	72

## LISTE DES NOTATIONS

$\pi$	porosité du mélange granulaire.
$e$	indice des vides d'un mélange granulaire.
$C$	Compacité du mélange granulaire.
$\rho$	Masse volumique réelle des granulats.
$A$	Constante de Bolomey.
$G$	coefficient caractérisant la qualité des granulats selon Dreux
$m$	indice de consistance (Pa.s)
$k_{\text{Abrams}}$	coefficient d'Abrams relatif à la nature du ciment et de l'âge du mortier.
$k_{\text{Bolomey}}$	coefficient de Bolomey relatif à la nature du ciment et de l'âge du mortier.
$k_{\text{Féret}}$	coefficient de Féret relatif à la nature du ciment et de l'âge du mortier.
$p_{\text{Bolomey}}$	porosité du mélange granulaire selon Bolomey.
$p_{\text{Fuller}}$	porosité du mélange granulaire selon Fuller Thompson.
$d, D$	diamètre min et diamètre max de granulat.
$v_0$	constante définie expérimentalement selon Caquot.
$v$	volume des vides d'une classe granulaire $d/ D$ .
$E$	masse d'eau ( $\text{kg/m}^3$ )
$c$	masse de ciment ( $\text{kg/m}^3$ )
$\sigma_{c28}$	classe vraie du ciment relatif à Dreux (MPa.)
$n$	nombre de classes granulaires
$d_i$	diamètre moyen de la classe $i$ prise isolément.
$\alpha_i$	compacité expérimentale de la classe " $i$ " prise isolément.
$\beta_i$	compacité virtuelle de la classe $i$ prise isolément.
$C_{\text{MLC}i}$	compacité virtuelle du mélange pour la classe " $i$ " dominante.
$C_{\text{MLC}}$	compacité virtuelle du mélange.
$F(i, j)$	fonction d'interaction " effet d'interférence "
$g(i, j)$	fonction d'interaction " effet de paroi ".

$\gamma_i$	compacité virtuelle du mélange pour la classe "i" dominante.
$\gamma$	compacité virtuelle du mélange.
$a_{ij}$	effet de desserrement exercé par la classe j sur la classe i dominante.
$b_{ij}$ :	effet de paroi exercé par la classe j sur la classe I dominante..
$\phi_1, \phi_2$	volumes partiels de chaque classe dans un volume unité.
$Y_i$	proportions volumiques de la classe i (par rapport au volume solide total).
$C_{MSS}$	compacité réelle (modèle de suspension solide).
$C_{MEC}$	compacité réelle (modèle d'empilement compressible).
K	indice de serrage.
$\eta_r^*$	viscosité de référence.
C exp	compacité expérimentale
C théo	compacité théorique.
fc	résistance en compression du matériau (MPa)
$y_1, y_2$	proportions volumiques de la classe 1 et 2.
$d_1, d_2$	diamètre moyen de la classe 1 et la classe 2.

## INTRODUCTION GENERALE

Le béton est un matériau utilisé depuis des millénaires à cause de la facilité de sa fabrication, de sa simple mise en place à l'état frais, de ses propriétés mécaniques et de durabilité à l'état durci. Aujourd'hui le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde.

Il est clair que formuler un béton est avant tout un problème de compacité. Toutes les méthodes existantes reconnaissent ce principe en suggérant, pour certaines de mesurer les compacités des constituants (ACI 211) ou, pour d'autres, de s'approcher d'une « courbe granulaire idéale » supposée donner la compacité maximale avec les matériaux utilisés. Cependant, aucune des méthodes de cette dernière approche ne repose sur un corpus scientifique à la fois solide et explicite.

Les modèles développés par de Larrard et ses collègues, fruits de douze années de recherche depuis 1988 (modèle linéaire de compacité) jusqu'à 2000 (modèle d'empilement compressible), permettent de résoudre le problème de la compacité des mélanges secs avec une précision suffisante pour des applications pratiques. La théorie concorde avec la plus part des résultats classiques et montre que les proportions idéales d'un mélange de granulats dépendent non seulement de la granularité mais aussi de la compacité de chacune des tranches granulaires, y compris les fines (de Larrard, 2000).

Pour valider ces modèles un programme expérimental colossal a été effectué au laboratoire central des ponts et chaussées en France sur des granulats de nature et de provenance différentes : tendres, durs, roulés, concassés, etc. ; toutefois, nous n'avons pas la certitude que les résultats obtenus peuvent être extrapolés sur les granulats les plus utilisés de notre région. C'est dans ce contexte que s'inscrit le travail de recherche que nous nous sommes proposé d'aborder dont l'objectif principal est d'optimiser la compacité du squelette granulaire des granulats locaux.

Dans ce mémoire nous présentons donc un travail de recherche effectué au sein du Laboratoire EOLE de la faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen. Cette étude s'inscrit dans la continuité des travaux effectués par Mr Bouterfas M. (2011), qui a travaillé sur l'optimisation du squelette granulaire des classes courantes (0/4,4/8,8/16,16/25) dont l'objectif est de chercher le mélange quaternaire final qui offre la compacité maximale. En revanche, notre étude s'est inspiré des travaux de F. de Larrard, elle consiste à travailler sur des classes granulaires serrées, recommandées par les études du LCPC en vue de comparer les compacités réelles et théoriques utilisant le modèle d'empilement compressible et pour vérifier la validité de ce dernier avec les granulats de notre région.

Le mémoire est composé de trois chapitres:

Dans le premier chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur les différents bancs d'essais utilisés pour la mesure de la compacité des granulats et les différents facteurs ayant une influence sur la compacité des mélanges granulaires secs sur les quels on pourra

compter pour l'amélioration de cette dernière. Nous présentons aussi par la suite les différentes méthodes (classiques et récentes) de formulation du béton.

Concernant le deuxième chapitre, nous avons suivis l'évolution des différents modèles de prévision de la compacité des milieux granulaires. Nous avons commencé par le modèle linéaire de compacité qui prédit la compacité virtuelle et terminer par le modèle actuel développé par de Larrard appelé "modèle d'empilement compressible" qui permet de calculer la compacité réelle, validé à l'aide des données provenant de différentes origines. Nous nous sommes focalisé par la suite, sur les résultats des travaux effectués au LCPC (Paris) pour en déduire l'approche à retenir dans le cadre de notre travail expérimental. Enfin, nous avons présenté le logiciel nommée « René LCPC » qui utilise le modèle d'empilement compressible.

Dans le troisième chapitre, nous avons commencé par l'identification des caractéristiques physiques et mécaniques des agrégats utilisés (analyse granulométrique, propreté, forme, dureté, etc.) pour ensuite mesurer la compacité de chacun de ces granulats seuls : sables (0.315/1.25, 1.25/4) et graviers (4/6.3, 6.3/10, 10/16, 16/20 et 20/25). Nous avons par la suite, procédé grâce à une approche méthodologique, à l'optimisation de la compacité des mélanges binaires en considérant toutes les combinaisons possibles, suivie de certains mélanges ternaires choisis ainsi que les mélanges quaternaires. Ce programme a nécessité la réalisation de 204 essais. Enfin, nous avons comparé quelques résultats expérimentaux avec les résultats obtenus par le modèle d'empilement compressible.

Nous avons terminé le mémoire par une conclusion générale qui présente les résultats les plus significatifs ainsi que des perspectives.

# ***Chapitre 1***

## ***Empilements et porosités des milieux granulaires***

## 1.1 Introduction :

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans les domaines du bâtiment et des travaux publics à cause de ses nombreuses qualités mécaniques et de durabilité. Toutefois, la manière dont est formulé ce matériau composite a une incidence directe sur ces propriétés intrinsèques. A ce titre, une bonne composition est conditionnée par plusieurs paramètres et notamment par le choix judicieux de la phase inerte car elle occupe plus de 70% du volume total du béton ce qui constitue par conséquent le squelette résistant de ce matériau.

Dans ce chapitre nous présentons d'une part, les différents facteurs ayant une influence sur les empilements granulaires secs induisant un volume des vides minimal, et d'autre part un état de l'art sur les différents bancs d'essais utilisés pour la mesure de la compacité du mélange granulaire. Enfin, nous présentons les différentes méthodes à la fois classiques et récentes relatives à la formulation du béton.

## 1.2 L'empilement granulaire dans le béton :

L'optimisation granulaire est une phase très importante dans la formulation du béton. Pour un squelette granulaire composé de sable et de gravillon, il existe un mélange optimum qui permet d'obtenir la compacité maximale du système, c'est-à-dire le pourcentage minimum de vides entre les grains solides.

La compacité d'un mélange granulaire est égale par définition, au volume solide  $\Phi$  dans le volume unité. Elle peut être déduite de la porosité  $n$  :

$$\pi = 1 - C \quad 1.1$$

Ou de l'indice des vides :

$$e = \frac{n}{C} = \frac{1}{C} - 1 \quad 1.2$$

La compacité d'un mélange de grains dépend de trois paramètres principaux :

- la taille des grains considérés (décrite par la courbe granulométrique),
- la forme des grains (morphologie, état de surface, etc.),
- la façon dont est réalisé l'empilement.

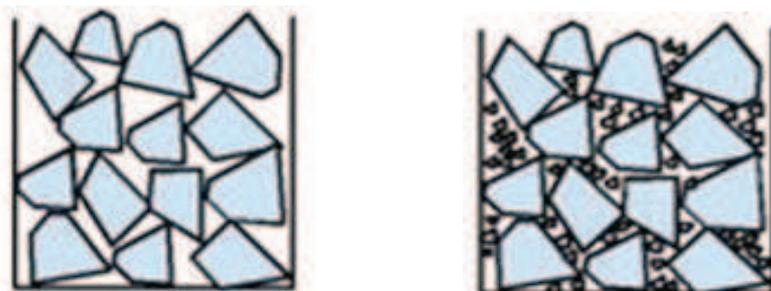


Figure 1.1 Mélange de grains de tailles différentes. (Il y a moins de vides à droite qu'à gauche grâce au remplissage des petits grains (le sable) dans les espaces entre les gros grains (le gravillon))

La recherche de l'optimum peut s'effectuer théoriquement, par des modèles plus ou moins sophistiqués, ou expérimentalement. On s'aperçoit en effet qu'à l'optimum granulaire, le béton est le plus fluide. Il suffit donc, de mesurer cette fluidité sur des mélanges pour lesquels on a fait varier la proportion de sable par rapport au gravillon, en gardant le pourcentage total de granulats constant (Baron, 1996).

En général, l'optimum granulaire est obtenu pour une proportion de sable comprise entre 70 et 100 % du volume de gravillon ; c'est-à-dire pour un G/S variant dans l'intervalle [1 à 1.43].

Dans la figure 1.1, il est clair qu'il faudra plus de pâte de ciment pour remplir les vides du mélange de gauche que ceux du mélange de droite. Autrement dit, en partant d'un squelette granulaire le plus compact possible, on a besoin d'un minimum de pâte de ciment, donc moins de ciment, pour atteindre la fluidité souhaitée. C'est d'après cette idée qu'on explique pourquoi les mortiers doivent contenir plus de ciment que les bétons.

L'optimisation granulaire conduit, par la diminution de la masse de ciment, à une diminution du retrait et du fluage, ainsi qu'à une économie.

### 1.3 L'empilement des milieux granulaires secs :

Dans un milieu granulaire, on peut distinguer deux types d'empilement, les empilements ordonnés qui présentent une structure périodique et une compacité élevée, et les empilements désordonnés avec des compacités plus faibles qui peuvent évoluer d'une configuration à une autre, si nous utilisons des moyens de serrage (vibration par exemple) (German, 1989).

Le nombre de coordination «  $k$  » est le nombre de points de contact sur chaque particule. Plus ce nombre est élevé, plus la particule est stable. Une particule est considérée instable dans un empilement en trois dimensions, si son nombre de coordination est inférieur à 4 (Cumberland, 1987 ; German, 1989).

#### 1.3.1 Empilement de sphères dans un plan (2 dimensions) :

Dans un plan, il y a deux façons d'empiler des disques identiques de façon ordonnée :

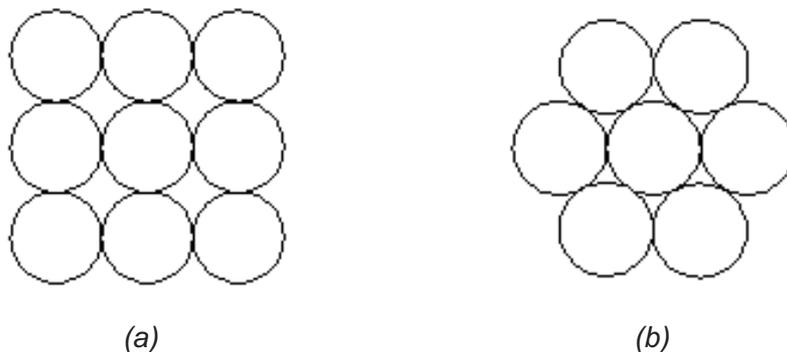


Figure 1.2 Empilements ordonnés de sphères unimodales : empilement cubique (à gauche) et hexagonal (à droite)

La figure (1.2.a) présente un arrangement cubique qui permet d'obtenir une fraction de surface recouverte (compacité de 0.7854) et un nombre de coordination de 4.

La figure (1.2.b) présente un arrangement hexagonal, il permet d'atteindre le recouvrement maximal de la surface avec une compacité de  $0.9069 (\pi / 2\sqrt{3})$  et un nombre de coordination égale à 6 (German, 1989).

La compacité de l'assemblage peut être augmentée en insérant la plus grosse sphère possible entre les sphères initiales (figure 1.3). Les nouveaux interstices formés sont remplis ainsi de suite en suivant la même méthode (Pietsch, 2002). C'est le principe des empilements Apolloniens (Borkovec, 1994).

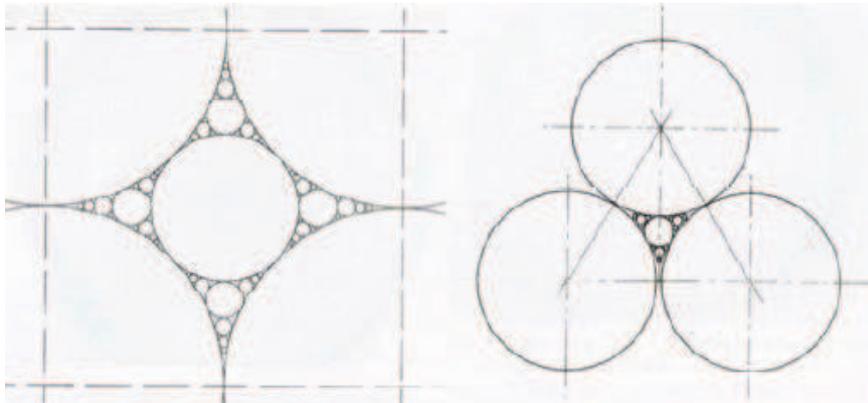


Figure 1.3 Empilements ordonnés de sphères multimodales : empilement cubique (à gauche) et hexagonal (à droite) (Pietsch, 1991 et 2002)

Dans le cas d'un mélange binaire de sphères, le recouvrement maximal d'une surface est obtenu grâce à un arrangement hexagonal des grosses et des fines particules disposées dans les interstices. Dans ce cas, la compacité  $C$  est égale à 0,9913.

### 1.3.2 Empilement de sphères en 3 dimensions :

Dans un empilement de sphères unimodales en 3 dimensions, la compacité maximale est obtenue avec un arrangement de type cubique faces centrées et elle est égale à 0.7405 et le nombre de coordination égale à 12. Pour un empilement désordonné et non dense de sphères unimodales, la compacité est proche de 0,6 avec une coordinance comprise entre 7 et 8. Pour un empilement désordonné et dense, la compacité est de 0,64 et la coordinance est comprise entre 8 et 9 (Pietsch, 2002).

Un mélange granulaire binaire est composé de deux populations présentant chacune un diamètre médian différent. Si on utilise un rapport optimal de tailles et une quantité appropriée de fines, l'insertion des petites particules entre les grosses permet d'atteindre des compacités plus élevées que pour des mélanges unimodales. Cependant, une quantité trop importante de fines particules entraîne un espacement des grosses et une diminution de la compacité (German, 1989).

Dans la littérature, on trouve des résultats permettant de comparer les valeurs théoriques et expérimentales de la compacité (Mc Geary, 1961), représentées en fonction du pourcentage massique de grosses particules et du rapport de tailles, pour différents mélanges binaires (figure 1.4). La partie expérimentale a permis de constituer des mélanges binaires de sphères denses, en versant des fines particules ( $d = 0.91, 0.66, 0.28$  et  $0.191$  mm) dans un

mélange unimodal de grosses particules ( $d = 3.15 \text{ mm}$ ) en vibration. Les résultats montrent que la compacité expérimentale reste inférieure à la compacité théorique maximale (0.86), et devient constante (0.84) au-delà d'un ratio des diamètres des sphères grosses/fines, égal à 10 (Cumberland, 1987).

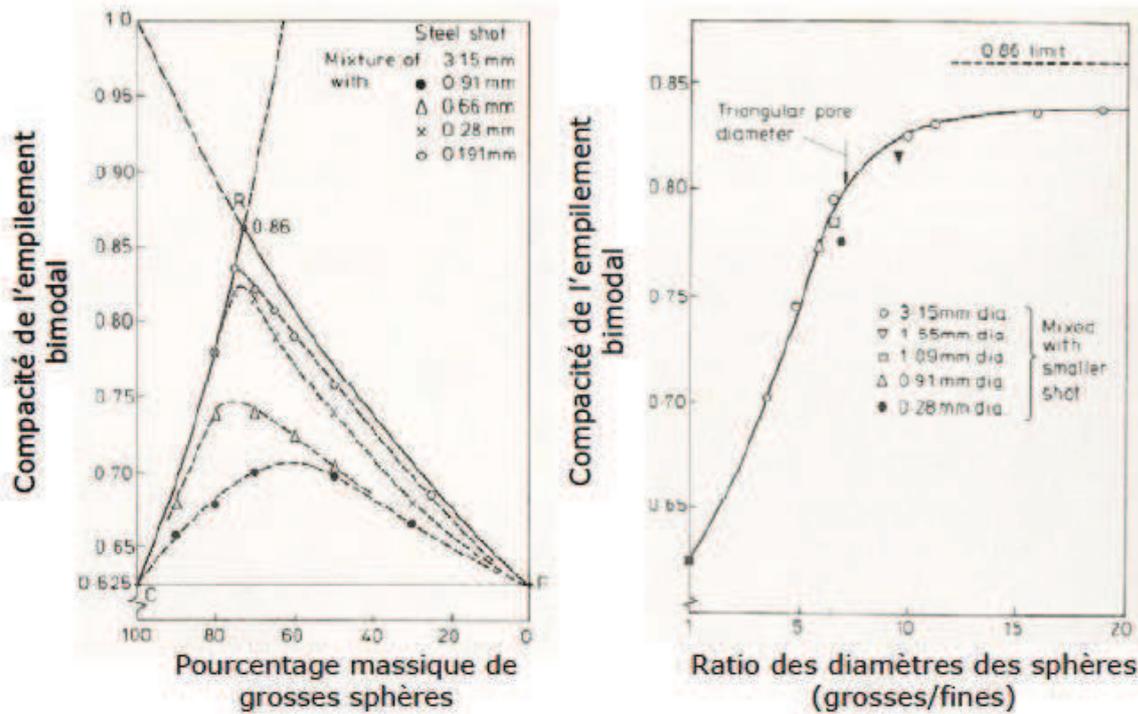


Figure 1.4 Compacités théoriques et expérimentales (Mc Geary, 1961) de mélanges binaires : représentation en fonction des pourcentages massiques de grosses particules et du rapport de tailles.

## 1.4 Méthodes de mesure de la compacité :

### 1.4.1 Méthode de versement simple :

C'est une méthode qui consiste, à remplir un récipient de volume  $V$  connu, en laissant s'écouler le matériau sous l'effet de la gravité, sans aucune autre sollicitation, puis en pesant la masse  $M$  du récipient après arasement.  $M_0$  étant la masse du récipient à vide, et  $\rho$  la masse volumique réelle de l'échantillon alors, la compacité  $C_{exp}$ , s'écrit :

$$C_{exp} = \frac{M - M_0}{\rho \cdot V} \quad 1.3$$

Dans cette méthode décrite dans la norme NF EN 1097-3, le cylindre utilisé est d'une hauteur de 200 mm et d'un volume égal à 3,98 l pour les gravillons, tandis que pour les sables, le cylindre utilisé est d'une hauteur de 80 mm et son volume est égal à 0,56 l.

### 1.4.2 Méthode de Piquage :

Pour cet essai, les cylindres utilisés sont identiques à ceux du précédent mode opératoire. Pour améliorer le compactage du matériau dans le cylindre, nous utilisons une tige, que nous enfonçons plusieurs fois dans l'échantillon (méthode inspirée de la méthode (ASTM C29-78). Pour les gravillons, la tige utilisée est en acier elle est à tête hémisphérique et à 600 mm de long avec un diamètre de 16 mm. En revanche, pour les sables, la longueur utile est de 130 mm avec un diamètre de 6 mm.

Les cylindres cette fois ci sont remplis en trois couches successives, chacune piquée vingt-cinq fois. L'échantillon fait l'objet d'une première mesure après simple versement, puis nous vidons le cylindre et nous partageons l'échantillon en trois parties égales, et nous appliquons le présent mode opératoire.

### 1.4.3 Méthode de vibration avec compression :

Dans cette méthode, la masse de l'échantillon  $M_s$  prise pour les graviers est de 7.5 kg et pour les sable 3 kg. Le cylindre utilisé à un diamètre de 16 cm et une hauteur de 32 cm. Le cylindre est équipé d'un disque interne de même diamètre et qui permet d'appliquer une charge uniformément répartie sur toute la surface des granulats. L'ensemble est solidarisé à une table vibrante. Un poids ( $P$ ) est solidarisé avec le cylindre interne, appliquant une pression totale de 10 KPa sur l'échantillon compacté. Une masse  $M_s$  de granulats est malaxée à sec de manière à homogénéiser l'ensemble, puis versée dans le cylindre. La vibration est lancée après l'application de la pression (10 KPa) (El Barrak, 2005). Cet échantillon est soumis à une vibration de 150 Hz pendant une minute et la compacité est donnée par la moyenne (sur un minimum de deux échantillons) selon l'expression (1.4), (de Larrard, 2000) :

$$C_{exp} = \frac{M_s}{\rho} \cdot V \quad 1.4$$

Avec :

$\rho$  : Masse volumique réelle en  $\text{kg/m}^3$  et  $V$  : volume total final en  $\text{m}^3$

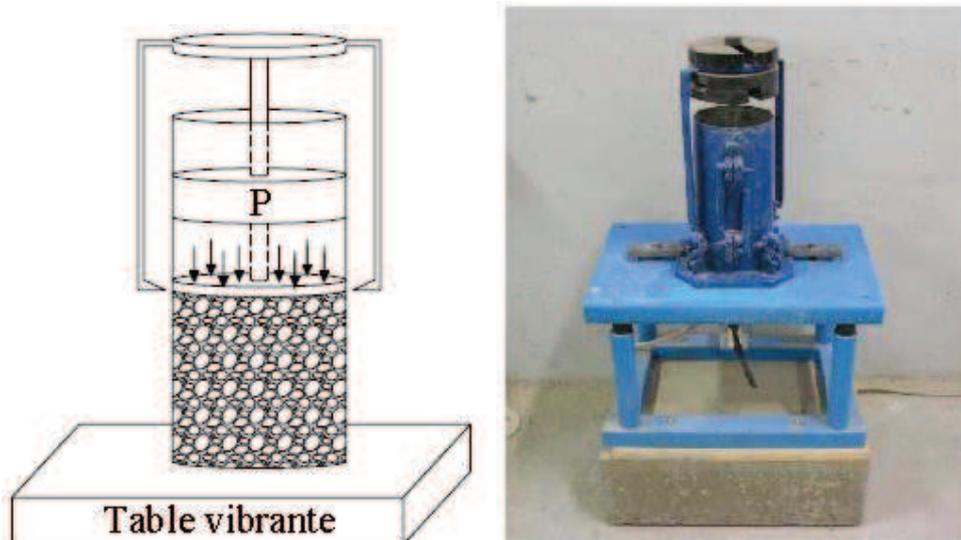


Figure 1.5 Dispositif de mesure de la compacité (El Barrak, 2005).

#### 1.4.4 Essai de compacité des fractions granulaires à la table à secousses :

C'est un nouveau mode opératoire apparu en juillet 2004 développé par François de Larrad et son équipe dans le but de mesurer la compacité des fractions granulaires. La seule différence entre cet essai et l'essai précédent, est le mode de vibration qui est modifié par des secousses sans alimentation électrique.

Ce matériel est simple, peu coûteux, et ayant des probabilités de présenter une reproductibilité acceptable. Il devait également fournir un résultat utilisable dans les nouvelles approches d'optimisation de la granularité des matériaux de génie civil. Nous allons présenter ce matériel en détail dans le chapitre 3.

### 1.5 Facteurs influant l'empilement granulaire:

#### 1.5.1 Effet de la taille et la forme des grains :

La distribution des tailles et la forme des grains sont les deux principales propriétés qui affectent l'empilement. Pour des particules sphériques unimodales supérieures à 100 microns, la compacité est indépendante du diamètre moyen et ne dépend que de l'énergie de serrage. En revanche, pour des particules inférieures à 100 microns, la compacité diminue avec la diminution du diamètre moyen. Ceci est causé par la prépondérance des forces cohésives par rapport aux forces gravitationnelles.

En ce qui concerne les mélanges constitués de particules de formes irrégulières et présentant des distributions granulométriques larges, la compacité diminue si la forme des particules s'éloigne de la sphéricité (figure 1.6). D'autre part, la compacité augmente avec l'étalement de la distribution granulométrique car les petites particules peuvent se loger dans les interstices créés entre les plus grosses (Cumberland, 1987 ; German, 1989).

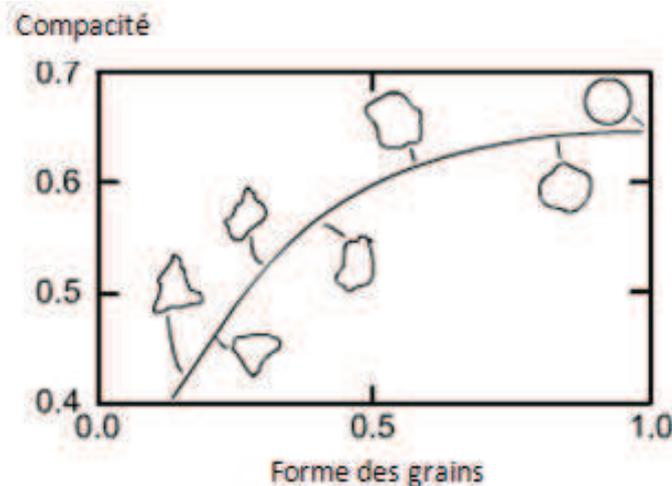


Figure 1.6 Variation de compacité en fonction de la forme des particules.

Pour un mélange de grain de même taille, les granulats roulés avec leurs formes sont plus compacts que les grains concassés (de Larrad, 2000). La figure (1.7) montre bien que pour les grains roulés, la compacité réelle est comprise entre 0,6 et 0,64, tandis qu'elle est plus faible pour les grains concassés et elle est de l'ordre de 0,53 à 0,58 selon l'intensité de serrage.



Figure 1.7 valeur des compacités pour des grains roulé et concassé (de Larrard, 2000)

## 1.5.2 Effet de la paroi et de desserrement :

### 1.5.2.1 Effet de la paroi du récipient:

Contre et près de la paroi du récipient, le positionnement des particules n'est pas libre et des irrégularités dans l'empilement apparaissent. La compacité y est donc plus faible qu'au milieu du récipient. Cet effet, plus prononcé au niveau des coins du récipient ou pour des particules irrégulières, disparaît pour un rapport « diamètre du récipient  $d_R$  / diamètre des particules  $d$  »  $> 10$ .

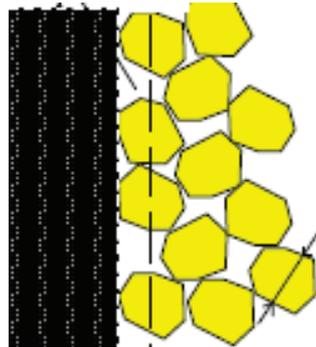


Figure 1.8 Effet de la paroi du récipient (de Larrard, 2000)

### 1.5.2.2 Effet de la paroi des gros granulats:

Traduit le fait qu'à la proximité d'un grain de taille supérieure, l'empilement de grains de taille inférieure est relâché (de Larrard et col. Partie I -1994).

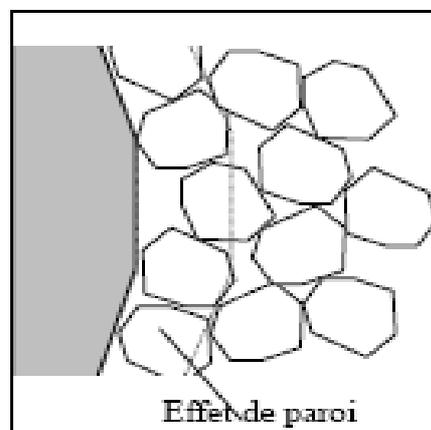


Figure 1.9 Effet de paroi entre granulats (de Larrard, 1988).

### 1.5.2.3 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, il induit un relâchement de la structure (de Larrard et Coll, Partie I -1994).

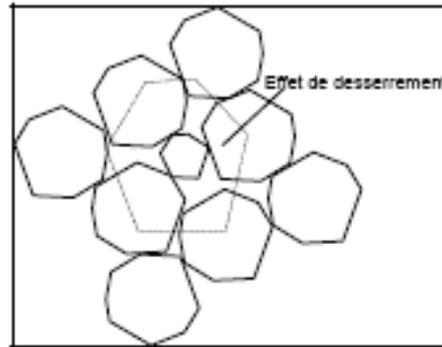


Figure 1.10 Effet de desserrement (de Larrard, 1988).

### 1.5.3 Effet du mode de mise en place (l'énergie de serrage) :

Le fait d'appliquer une énergie de serrage sur l'empilement, par exemple à l'aide de vibrations ou de chocs appliqués sur le récipient, permet d'augmenter la compacité. Ceci favorise la migration des fines particules dans les interstices formés entre les grosses (German, 1989). Dans la figure 1.11 nous remarquons que la compacité varie d'une façon croissante avec l'augmentation de l'énergie de serrage.

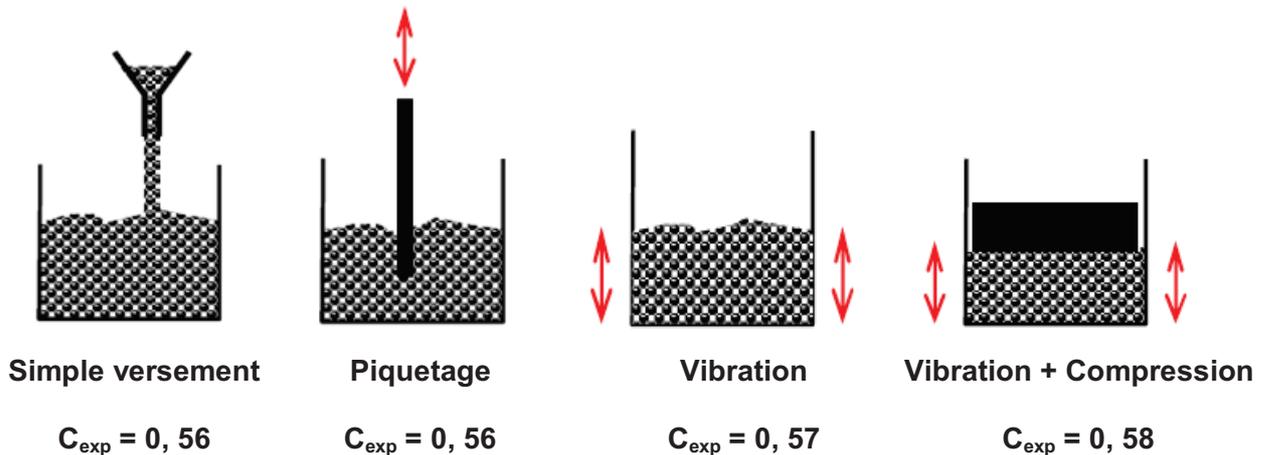


Figure 1.11 Compacité pour différents modes de mise en place des grains concassés (de Larrard, 2004)

Bouterfas a réalisé en 2012, des essais de compacité sur des granulats concassés où il a utilisé plusieurs méthodes : méthode de versement simple, méthode de la tige et la méthode vibration+compression (voir Tableau 1.1). Les granulats utilisés proviennent de la carrière de l'ENG de Sidi Abdelli (wilaya de Tlemcen) : sable 0/4, et graviers de carrière 4/8, 8/16, 16/25. Les résultats trouvés montrent que les valeurs des compacités les plus grandes sont

obtenues grâce à la table à secousses dont l'énergie des chocs répétés offre à l'échantillon le meilleur arrangement des grains.

Tableau 1.1 Compacités des granulats concassés pour différents modes de mise en place (Boutefas, 2012).

Calibre granulats	Sable 0/4 $d > 0.063$ mm	G1 4/8	G2 8/16	G3 16/25
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.55	2.52	2.53	2.54
$C_{\text{exp}}$ (versement)	0.588	0.524	0.518	0.520
$C_{\text{exp}}$ (Tige)	0.600	0.536	0.530	0.535
$C_{\text{exp}}$ (table à choc)	0.655	0.591	0.577	0.579

#### 1.5.4 Effet de la ségrégation :

La ségrégation est principalement causée par des différences de tailles (à partir d'un rapport de tailles supérieur à 6) et de masses volumiques réelles entre particules. Ceci se traduit par une séparation entre les grosses qui migrent à la surface de l'empilement, et les plus fines qui se retrouvent au fond du récipient en passant à travers le squelette granulaire formé par les grosses. Ce phénomène est cependant moins marqué pour des particules cohésives ( $d < 100\mu\text{m}$ ) et de formes irrégulières (German, 1989).

La compacité maximale ne conduit pas à la ségrégabilité minimale. La ségrégabilité est minimisée par l'augmentation des classes intermédiaires au détriment de la plus grossière. Chaque classe granulaire doit occuper l'espace inter granulaire lui conférant sa compacité maximale. La granularité est plus « régulière ».

#### 1.5.5 Effet de l'étendue granulaire:

Kechkar et Cherait, 2008 ont effectué une étude systématique sur des mélanges binaires obtenus par une combinaison de deux classes unimodales, préalablement séparées. Pour la réalisation des mélanges, ils ont procédé à une homogénéisation manuelle.

Sept classes ont été préparées ( $a-b-c-d-e-f-g$ ) du granulat, les tailles des grains au sens des tamis étaient les suivantes:  $0.3 < a < 0.425 < b < 0.6 < c < 1.18 < d < 2 < e < 3.35 < f < 5 < g < 6.63$  mm.

Neuf mélanges, d'étendue variable, ont été préparés de 0.13 à 0.74. Pour la réalisation des mélanges, les auteurs ont choisi des proportions de petits grains  $y_2$  par incrément successif de 10%. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 1.12.

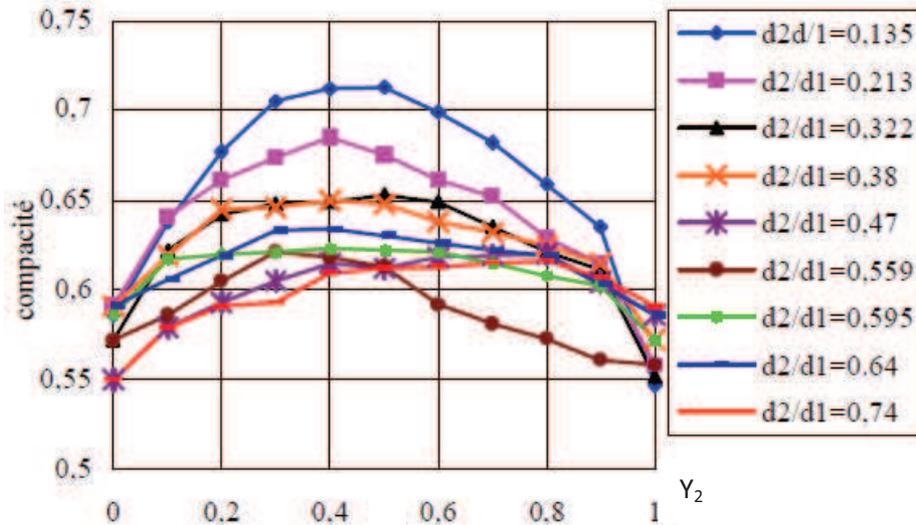


Figure 1.12 Rôle du rapport  $d_2/d_1$  sur la compacité (Kechkar et Cherait, 2008)

La figure 1.12 montre bien que la compacité diminue lorsque le rapport  $d_2/d_1$  augmente. Ce fait expérimental confirme les travaux de Caquot sur les mélanges granulaires. Nous remarquons aussi que la variation de la compacité est plus rapide du côté des gros dominants (petits pourcentages de grains fins  $y_2 \leq 0,4$ ) que du côté des petits.

## 1.6 Méthodes de formulations :

### 1.6.1 Introduction :

La formulation des bétons permet de lier la composition du béton à ses propriétés. L'objectif est alors de rechercher une composition utilisant au mieux les ressources locales, qui soit la plus économique possible et qui possède les propriétés désirées.

Un béton est constitué d'un squelette granulaire et de l'eau (contenant éventuellement des adjuvants). Le squelette est lui-même composé d'un ensemble de grains solides de tailles différentes, du micron (pour les fines du ciment ou des additions minérales) à la dizaine de millimètres (pour les gravillons). Sa compacité joue un rôle « clé » sur les propriétés du béton, notamment sur l'ouvrabilité. Nous pouvons illustrer ce fait de façon très schématique: l'eau mise dans un béton va, dans un premier temps, combler les vides constituant la porosité du squelette, puis une fois cette porosité comblée, écarter les grains. Nous pouvons donc faire l'hypothèse que c'est la seconde partie de l'eau qui donne au béton son ouvrabilité. Ainsi pour une ouvrabilité donnée, maximiser la compacité du squelette permet de diminuer la quantité d'eau dans le béton donc de faire des bétons plus économiques et plus résistants. De façon corollaire, maximiser la compacité permet d'augmenter l'ouvrabilité pour une teneur en eau fixée (Sedran, 1999).

Plusieurs méthodes ont été développées. Même s'il reste beaucoup d'empirisme, toutes ces méthodes reposent sur les mêmes principes de compacité optimale. Mais au préalable, il est nécessaire de faire un historique des différentes méthodes de formulation afin de comprendre les procédés actuels.

## 1.6.2 Méthodes classiques de formulation des bétons :

### 1.6.2.1 Méthode de Féret (Féret, 1892):

Cette méthode travaille sur un principe de compacité optimale. Initialement, une compacité est déterminée sur un mélange ternaire de sables puis une matrice cimentaire y est insérée. Cette méthode donne un mortier avec une granularité discontinue sans obtenir le matériau le plus compact à l'état durci. Au travers de l'équation (1.5), Féret relie une résistance en compression aux proportions volumiques et notamment en utilisant le rapport volumique E/C.

$$f_c = K_{Féret} + \left( \frac{1}{1+(e+v)/c} \right) \quad 1.5$$

### 1.6.2.2 Méthode de Fuller et Thompson (Fuller, 1907):

Cette méthode est basée sur une compacité maximale d'un mélange à granulométrie continue. L'aspect novateur de la méthode se situe dans la prise en compte du ciment mais aussi des dimensions extrêmes des grains d (plus petite dimension) et D (plus grande dimension) (équation 1.6). En revanche, la forme des grains n'intervient pas dans la méthode.

$$P_{Fuller} = 100 * \sqrt[5]{d/D} \quad 1.6$$

### 1.6.2.3 Méthode d'Abrams (Abrams, 1923) :

Dans cette méthode le dosage en ciment et la dimension maximale des granulats sont les paramètres prépondérants (équation 1.7). Elle fait intervenir au travers du coefficient k d'Abrams (k Féret amélioré) la nature et la forme des granulats.

$$f_c = K_{Abrams} \left( \frac{1}{7,5(1,5E/C)} \right) \quad 1.7$$

### 1.6.2.4 Méthode de Bolomey (Bolomey, 1925):

Pour avoir une compacité maximale du mélange sec, Bolomey propose une courbe granulométrique de référence, et qui répond à la formule :

$$P_{Bolomey} = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}} \quad 1.8$$

Le principe est de construire une composition granulaire à partir des classes de granulats disponibles et dont la courbe granulométrique soit la plus proche que possible de la courbe de référence. Cette méthode aboutit généralement à une granularité continue.

### 1.6.2.5 Méthode de Caquot (Caquot, 1937):

Généralise sa recherche de compacité maximale à un nombre infini de classes granulaires à partir de la courbe de l'indice des vides d'un mélange de deux granulats de tailles différentes. Il définit expérimentalement une relation en prenant comme principe, que le volume des vides dépend essentiellement des diamètres d et D (équation 1.9). Il obtient

donc une granulométrie optimale infinie. Mais, en réalité, les dimensions des grains sont bornées ce qui entraîne une correction sur la proportion des plus petits et des plus gros granulats. De plus, il introduit l'effet de paroi engendré par les granulats de grosses dimensions.

$$V = V_0 \sqrt[5]{\frac{d}{D}} \quad 1.9$$

#### 1.6.2.6 Méthode de Faury (Faury, 1944) :

La courbe de référence proposée par Faury favorise une loi de granulation de type continue. Il s'inspira de la théorie de Caquot relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen. Cette méthode permet de prolonger l'étendue granulaire jusqu'à 6,5 $\mu$ m, en incorporant le ciment, et prend aussi en compte l'effet de paroi.

#### 1.6.2.7 Méthode de Joisel (Joisel, 1952):

Inspirée comme celle de Faury de la théorie de Caquot, la méthode de Joisel est plus généralisante. Il considère que la loi de granulation conduisant à la compacité maximale est fonction de  ${}^m\sqrt{D}$ , où « m » dépend de la compacité avec laquelle se serre un granulat de dimensions uniforme suivant les moyens de serrage, « m » peut alors varier de 3 à 10.

En utilisant  ${}^m\sqrt{D}$  comme graduation des abscisses, Joisel utilisa une courbe de référence de forme linéaire.

#### 1.6.2.8 Méthode de Dreux et Gorisse (Dreux, 1995):

Dreux et Gorisse ont mis en œuvre une méthode, basée sur l'optimum granulaire encore couramment utilisée pour des bétons ordinaires. C'est une approche empirique basée sur une courbe granulaire de référence (2 segments de droite dans un diagramme semi logarithmique). Contrairement à Faury, le ciment ne fait pas partie de la courbe de référence du mélange, sa quantité massique C étant déterminée séparément.

Il s'agit d'une méthode complète dans le sens où elle prend en compte un grand nombre de paramètres (équation 1.10) : la géométrie de la pièce à couler, le type et le dosage du ciment, la finesse, la forme, la qualité et les dimensions de granulats, la consistance et la résistance du béton, etc.

$$f_c = G \times \sigma_{c28} \left( \frac{C}{E} - 0.5 \right) \quad 1.10$$

#### 1.6.2.9 Méthode de Baron et Lesage (Baron 1976):

Cette méthode n'est pas en soi une méthode de formulation, mais plus une technique pour optimiser le squelette granulaire d'un béton. L'essai utilisé pour caractériser la maniabilité est le maniabilimètre LCL (ou essai d'écoulement). Le principe est de mesurer le temps mis par un échantillon de béton pour s'écouler sous vibration jusqu'à un certain repère. Les proportions optimales des granulats sont supposées donner le temps d'écoulement minimum, pour une quantité donnée de ciment et d'eau. Une fois les proportions granulaires repérées, les dosages en eau et ciment sont ajustés expérimentalement, de sorte que le mélange présente la maniabilité et la résistance souhaitées. Nous supposons, dans cette méthode, que les proportions optimales de granulats ne dépendent pas de la quantité de ciment.

Enfin, nous pouvons dire que, la variation des nombreux paramètres liés à la géométrie des grains, leurs natures, leurs granulométries etc. a toujours été prise en compte par l'introduction dans les formules d'un coefficient d'une manière empirique. Toutefois, La méthode Baron-Lesage, comparée aux autres méthodes, suppose des manipulations relativement nombreuses (de quelques gâchées jusqu'à une trentaine, lorsqu'on a quatre classes de granulats). Son emploi est cependant justifié pour les chantiers importants (gros volumes de béton à mettre en place), et/ou lorsqu'on exige un béton de grande qualité. C'est le cas dans la plupart des applications de béton à hautes performances.

### 1.6.3 Méthodes récentes de formulation des bétons:

#### 1.6.3.1 Méthode de Baron et Ollivier (Baron, 1996):

Cette méthode est dérivée de celle de Dreux-Gorisse avec des modifications pour une adaptation aux bétons actuels. Elle permet d'englober un grand nombre de paramètres déjà cités avec, en plus, la prise en compte de l'adjuvantation et l'incorporation d'additions minérales.

#### 1.6.3.2 Méthode de plans d'expériences:

Les plans d'expériences sont un instrument bien adapté à la recherche-développement chaque fois qu'intervient un grand nombre de paramètres (*Aïtcin 1994, Louvet 1996*).

Bien utilisés, ils permettent de réduire fortement le nombre d'essais, de gagner du temps et de l'argent, tout en parvenant à un résultat encore mieux assuré. Leur application au béton s'impose chaque fois que l'on veut concilier au mieux de nombreuses exigences différentes.

Trois éléments sont indispensables pour réussir cette démarche : d'abord, la planification des essais et la qualité de l'expérience, ensuite, la maîtrise d'outils mathématiques tels que la régression linéaire multiple et enfin, l'apport des statistiques pour la validation globale des modèles et la détermination des effets significatifs.

#### 1.6.3.3 Méthode numérique (Sedran, 1999 ; de Larrard 2000):

L'une des percées majeures dans le domaine de la formulation des mélanges de béton fut l'introduction des méthodes théoriques. En effet, elles permettent de minimiser la porosité (ou maximiser la compacité) du squelette granulaire en optimisant les proportions des différentes classes granulaires (sable, gravier, ciment, ajouts minéraux).

La faible porosité permettra un bon enrobage des granulats par la très faible quantité de pâte de ciment, ainsi que des propriétés mécaniques optimisées.

Parmi les méthodes théoriques de prévision de la compacité d'un empilement granulaire, le Modèle d'Empilement Compressible (MEC) anciennement appelé Modèle de suspension solide (MSS), développé par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) en France. Le MEC, permet le calcul de la compacité d'un mélange granulaire à partir de la compacité et de la granulométrie des constituants, des proportions du mélange et d'un paramètre  $k$ , nommé indice de serrage et qualifiant l'intensité du compactage. Le MEC est basé sur l'optimisation de la compacité d'un empilement de grains de tailles différentes. La combinaison des constituants par cette méthode permet de produire un mélange sec à compacité optimale pour une maniabilité donnée.

## **1.8 Conclusion:**

Dans un empilement granulaire, il ya deux façons d'arranger les grains : un arrangement ordonné des empilements qui présente une compacité élevée (théorique) inaccessible à l'expérience, et un arrangement désordonné avec une compacité plus faible, améliorée à l'aide des moyens de serrage.

La compacité d'un milieu granulaire est influencée directement par l'espace et le nombre de contacts entre les particules. Elle dépend de certaines propriétés comme (la distribution de taille et la forme des particules, la paroi du récipient et du gros granulat, le desserrement entre particules ainsi que le mode de mise en place).

Les diverses méthodes de formulation que nous avons cité ont un point commun : elles utilisent des successions d'étapes simples basés sur l'expérience individuelle. Le choix de la formulation d'un béton doit être basé sur des calculs préliminaires comme ceux décrits ci-dessus, suivi par plusieurs gâchées d'essais. Cependant, l'application réussie de la formulation nécessite l'expérimentation, combinée à une connaissance de l'influence des nombreux paramètres sur les propriétés du béton. Cette connaissance, doit être fondée sur la compréhension du comportement du béton.

## ***Chapitre 2***

### ***Modèles de prévision de la compacité des milieux granulaires***

## 2.1 Introduction:

La prévision de la compacité (ou de la porosité) d'un mélange de grains secs est une vieille question, commune à bien des domaines techniques et scientifiques. Dans le domaine de la formulation des matériaux granulaires, on se restreint généralement à la question de la détermination des granularités conduisant aux compacités les plus fortes. Devant les difficultés théoriques qu'elle soulève, l'approche générale consiste à rechercher, par l'expérience, des distributions granulaires compactes et à tenter de s'en rapprocher en combinant les matériaux dont on dispose (Sedran, 1999).

En reprenant le problème dans son contexte général, plusieurs modèles ont été développés antérieurement et qui permettent de prédire la compacité d'un mélange granulaire. Ils nécessitent pour cela la connaissance de quelques données de bases sur les constituants qui composent le mélange.

### 2.2.1 Le modèle linéaire de compacité (MLC):

La prévision de la compacité maximale des mélanges granulaires a occupé plusieurs générations de chercheurs et devant la complexité de ce problème un modèle théorique fondé sur une approche essentiellement géométrique a été développé au laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) appelé « modèle linéaire de compacité », dont l'objectif est de prévoir la compacité d'un mélange de grains sec d'étendu fini à partir des données suivantes (Stovall et col. 1986) :

- La granularité du mélange et les compacités propres des tranches monodimensionnelles,
- Les fonctions d'interactions entre grains (effets de paroi et d'interférence).

#### 2.2.1.1 Fondements du modèle :

##### ❖ Mélanges binaires sans interactions :

Dans un empilement de grains 1 et 2 de diamètres  $d_1$  et  $d_2$ , les deux classes de grains sont dites sans interaction si :  $d_1 \gg d_2$ , c-a-d que l'arrangement local d'un ensemble des grains n'est pas perturbé par la présence des grains de l'autre taille (Stovall et col, 1986).

Pour calculer la compacité  $c$  d'un mélange de ces grains, il faut tout d'abord connaître les compacités  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  de chaque classe prise isolément.

Par définition,  $\phi_1$  et  $\phi_2$  sont les volumes partiels de chaque classe dans un volume unité et,  $y_1$  et  $y_2$  les proportions volumiques soit :

$$y_1 + y_2 = 1 \quad 2.1$$

$$y_1 = \frac{\phi_1}{\phi_1 + \phi_2} \quad \text{et} \quad y_2 = \frac{\phi_2}{\phi_1 + \phi_2} \quad 2.2$$

Le premier cas auquel on s'intéresse est celui des mélanges binaires sans interactions, c'est-à-dire pour lesquels on peut écrire :

$$d_1 \gg d_2 \quad 2.3$$

- Dans le cas des gros dominants (figure 2.1) on a :

$$C_{MLC} = C_{MLC1} = \Phi_1 + \Phi_2 \tag{2.4}$$

$$= \alpha_1 + \Phi_2 \tag{2.5}$$

$$= \frac{\alpha_1}{1 - y_2} \tag{2.6}$$

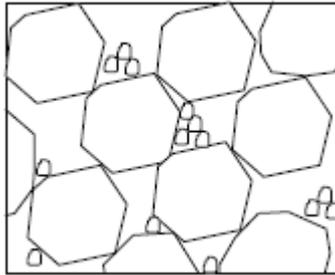


Figure 2.1 Mélange binaire sans interaction gros grains dominants (Sedran, 1999).

De celui des petits dominants (figure 2.2), où il vient :

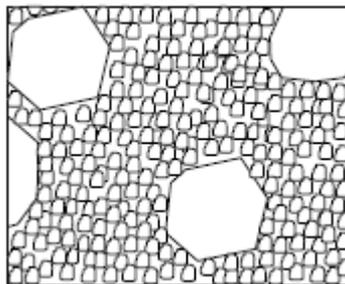


Figure 2.2 Mélange binaire sans interaction grains fins dominants (Sedran, 1999)

$$C_{MLC} = C_{MLC2} = \Phi_1 + \Phi_2 \tag{2.7}$$

$$= \Phi_1 + \alpha_2(1 + \Phi_1) \tag{2.8}$$

$$= \frac{\alpha_2}{1 - (1 - \alpha_2)y_1} \tag{2.9}$$

Le cas général est donné par :  $C_{MLC} = \inf(C_{MLC1}, C_{MLC2})$  2.10

❖ **Mélange de n classes sans interactions :**

Une première généralisation est opérée en supposant n quelconque et non plus égal à 2. Par le même type de raisonnement, on trouve :

$$C_{MLC} = \inf (C_{MLC}^i) ; 0 \leq i \leq 1 \quad 2.11$$

Avec :

$$C_{MLC}^i = \frac{\alpha_i}{1 - y_i \dots - y_{i-1} - (1 - \alpha_i)(y_{i+1} \dots + y_n)} \quad 2.12$$

❖ **Cas général (mélange de n classes avec interaction) :**

Une seconde généralisation consiste à introduire deux types d'interactions binaires, afin de couvrir le cas des étendues granulaires adjacentes :

**L'effet de desserrement :**

Traduit le fait que, lorsqu'un grain 2 de taille inférieure n'est pas suffisamment fin pour s'introduire dans les vides de l'empilement des gros grains (figure 2.3), une déstructuration de ce dernier apparaît. Lorsque les tétraèdres élémentaires des gros grains 1, dilatés par la présence d'un petit grain, sont suffisamment éloignés les uns des autres, la perturbation est linéaire par rapport au volume de grains étrangers  $\Phi_2$  (de Larrard, 1988).

**L'effet de paroi :**

C'est au contraire l'empilement des petits grains 2 qui est relâché au voisinage de l'interface avec un grain 1 (figure 2.3). Là encore, lorsque la distance entre les gros grains est grande devant  $d_2$  la perturbation est linéaire en  $\Phi_1$  (de Larrard 1988).

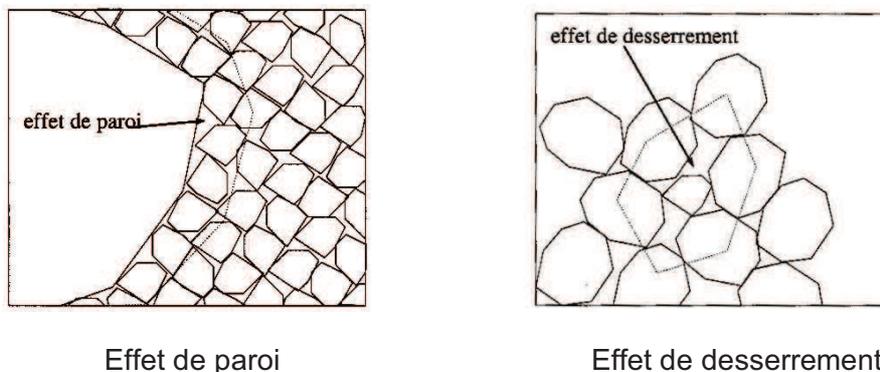


Figure 2.3 Effet de paroi et de desserrement (Sedran, 1999).

Cette hypothèse justifie l'appellation de modèle linéaire. La richesse de ce concept réside dans le fait que, dans un mélange multimodal, une classe i subira de façon additive les interactions binaires exercées par les classes étrangères ; l'analyse des mélanges binaires suffit alors à construire un modèle pour un nombre quelconque de classes. Le passage au continu se fait naturellement, et l'on obtient finalement l'expression :

$$C_{MLC}^i = \frac{\alpha_i}{1 - (1 - \alpha_i) \sum_{j=1}^{i-1} g(i,j)y_j - \sum_{j=i+1}^n f(i,j)y_j} \quad 2.13$$

Avec:

- $C_{MLC}^i$ : compacité virtuelle du mélange pour la classe "i" dominante
- n : nombre de classes granulaires.
- $\alpha_i$ : compacité expérimentale de la classe "i" prise isolément.
- $y_j$ : proportions volumiques (par rapport au volume solide total).
- $f(i, j)$ : fonction d'interaction " effet d'interférence "
- $g(i, j)$ : fonction d'interaction " effet de paroi "

Ce modèle, bien que fort intéressant, il présente deux inconvénients:

- il ne permet pas de traiter le cas d'un mélange de grains de tailles égales mais de compacités propres différentes. Ceci est problématique car les constituants utilisés pour le génie civil ont souvent des granularités qui se recouvrent partiellement.
- le modèle surestime les valeurs dans le domaine des fortes compacités, qui intéressent justement l'ingénieur.

Kechkar et Cherait, 2008 ont effectué une étude comparative entre le modèle linéaire (calcul fait par le programme) et des résultats expérimentaux d'une étude menée par Joisel (sur des mélanges binaires et des mélanges de 4 classes granulaires).

Joisel, pour ses expériences, a utilisé six classes (a - b - c - d - e - f) d'un granulat roulé (issue de la Seine), de tailles (au sens des tamis) suivantes (de Larrard et Col., 1994) :  
 $0.2 \text{ mm} < a < 0.4 < b < 0.8 < c < 1.6 < d < 3.2 < e < 6.4 < f < 12.8 \text{ mm}$ .

Quelques résultats sont reportés dans la figure 2.4 :

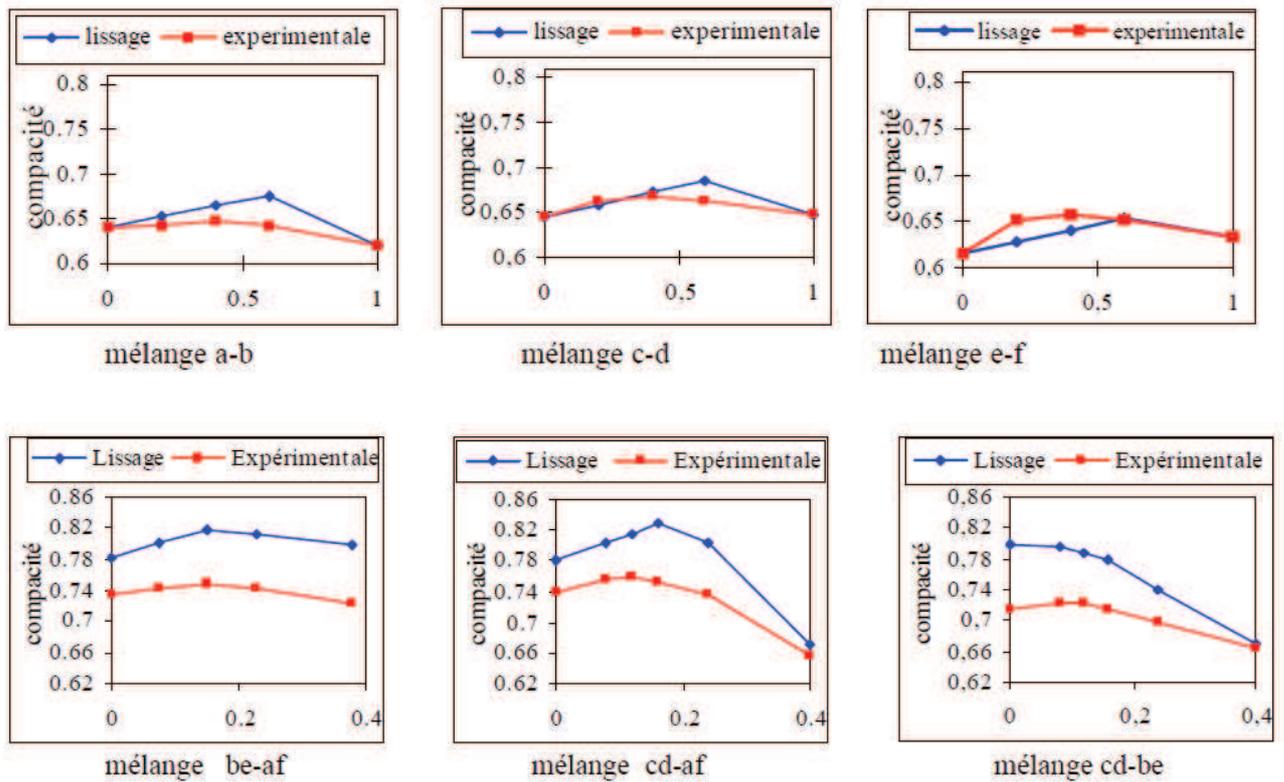


Figure 2.4 Valeurs théoriques et expérimentales de la compacité pour divers mélanges en fonction de la proportion de classe la plus fine (Kechkar et Cherait, 2008).

La figure 2.4 montre que l'allure générale des courbes reste fidèle, mais le modèle donne des compacités généralement un peu plus fortes surtout au voisinage de l'optimum.

Sur l'ensemble des mesures effectuées, le modèle donne un taux de corrélation de 94%, par rapport aux résultats expérimentaux de Joisel. Ce taux de corrélation très acceptable laisse à penser que le modèle linéaire utilisant des valeurs de fonctions d'interactions déduites expérimentalement constitue un bon outil d'études des empilements granulaires.

### 2.2.2 Le modèle d'empilement virtuel :

Le modèle d'empilement virtuel est une version raffinée du modèle de compacité linéaire. Il est développé au LCPC et décrit par de Larrard (1988). La différence entre ce modèle et le modèle linéaire est la prise en compte dans les calculs, le cas d'un mélange de grain de même taille mais de compacités propres différentes (figure 2.5), il est utilisé pour prédire les compacités virtuelles.

Les notations des compacités ( $\alpha$  et  $C_{MLC}$ ) du modèle linéaire ont été remplacées dans le modèle d'empilement virtuel par ( $\beta$  et  $\gamma$ ). avec  $\beta$  est la compacité virtuel de chaque classe prise isolément et  $\gamma$  la compacité virtuel du mélange.

Pour finaliser le modèle linéaire, de Larrard a considéré deux classes de grains, de compacités propres virtuelles  $\beta_1$  et  $\beta_2$  avec :  $d_1 = d_2$  mais  $\beta_1 \neq \beta_2$ . Il a supposé que le volume unité est rempli d'un côté par la classe 1 et l'autre partie par la classe 2 (figure 2.5).

Alors, il vient que :

$$\frac{\phi_1}{\beta_1} + \frac{\phi_2}{\beta_2} = 1 \quad 2.14$$

$$\gamma = \gamma_1 = \frac{\beta_1}{1 - \gamma_2 (1 - \beta_1 / \beta_2)} \quad 2.15$$

Et de façon symétrique :

$$\gamma = \gamma_2 = \frac{\beta_2}{1 - \gamma_1 (1 - \beta_2 / \beta_1)} \quad 2.16$$

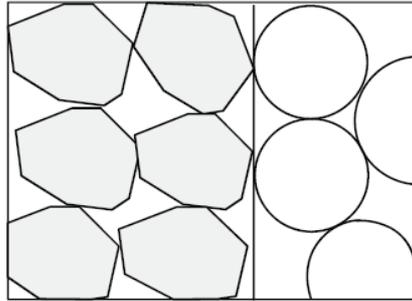


Figure 2.5 Les deux classes ont le même diamètre (Sedran, 1999).

Si on revient à la première étape de construction du modèle linéaire et en remplaçant de compacité, on se souvient que pour  $d_1 \gg d_2$  (mélange sans interactions), on a :

- Cas de gros grains dominants :

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{1 - \gamma_2} \quad 2.17$$

- Cas de petits grains dominants

$$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{1 - (1 - \alpha_2) \gamma_1} \quad 2.18$$

donc, de Larrard a intégré les trois cas précédents et il a écrit une formulation générale :

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{1 - (1 - a_{12} \beta_1 / \beta_2) \gamma_2} \quad 2.19$$

et

$$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{1 - [1 - \beta_2 + b_{21} \beta_2 (1 - 1/\beta_1)] \gamma_1} \quad 2.20$$

Le coefficient  $a_{12}$  exprime le desserrement exercé par les grains 2 sur l'empilement des grains 1. Il est égal à 0 pour une interaction nulle ( $d_1 \gg d_2$ ) et à 1 pour une interaction totale ( $d_1 = d_2$ ). De même, le coefficient  $b_{21}$  illustre l'effet de paroi subi par l'empilement des grains 2 au voisinage d'un grain 1. Il admet les mêmes conditions aux limites que le coefficient  $a_{12}$ . D'un point de vue pratique, leurs expressions sont déterminées en utilisant des données expérimentales pour des mélanges binaires.

Finalement, pour le cas d'un mélange de  $n$  classes, l'expression de la compacité virtuelle d'un empilement s'écrit comme suit :

$$\gamma = \min(\gamma_i) \quad \text{avec: } 1 \leq i \leq n \quad 2.21$$

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} y_j \left(1 - a_{ij} \frac{\beta_i}{\beta_j}\right) - \sum_{j=i+1}^n y_j \left(1 - \beta_j + b_{ij} \beta_i \left(1 - \frac{1}{\beta_j}\right)\right)} \quad 2.22$$

Avec :

- $\gamma_i$  : compacité virtuelle du mélange pour la classe "  $i$  " dominante.
- $n$  : nombre de classes granulaires.
- $\beta_i$  : compacité propre virtuel de la classe "  $i$  ".
- $y_i$  : proportions volumiques (par rapport au volume solide total).
- $a_{ij}$  : effet de desserrement.
- $b_{ij}$  : effet de paroi.

Ce modèle doit donc être complété par la détermination des fonction  $a_{i,j}$  et  $b_{i,j}$ .

### 2.2.3 Le modèle de suspension solide (MSS)(Sedran et col., 1994) :

Le Modèle de Suspension Solide est une première tentative de prédiction de compacités réelles (expérimentales). Il est dérivé des travaux de Mooney, sur la viscosité de suspensions concentrées de particules solides ( Mooney, 1951). Ce modèle s'appuie sur l'hypothèse que la viscosité relative de référence ( $\eta_r^*$ ) d'un arrangement de grains consolidé est une valeur finie.

La viscosité de référence est définie comme étant l'indice de l'énergie requise pour bien consolider le béton. Plus la technique de mise en place est énergétiquement, plus la viscosité de référence du béton est grande. Pour un arrangement unimodal de grains de diamètre  $d_i$ , la viscosité de référence peut être calculée par l'équation suivante :

$$\eta_r^* = \exp \left( \frac{2,5}{\frac{1}{\alpha_i} - \frac{1}{\beta_i}} \right) \quad 2.23$$

Avec :

- $\beta_i$  représente la compacité virtuelle d'une classe de grains ( $i$ ).
- $\alpha_i$  : compacité propre de la classe "  $i$  ".

Pour des sphères, en prenant  $\alpha_i = 0,64$  et  $\beta_i = 0,74$ , on trouve  $\eta_r^* = 1,36 \cdot 10^5$ . La compacité d'un empilement multimodal est alors donnée par l'équation implicite suivante :

$$\eta_r^* = \exp \left( \frac{2,5 y_i}{C_{MSS} - \frac{1}{\gamma_i}} \right) \quad 2.24$$

Ou  $\gamma_i$ , est la compacité virtuelle du mélange atteinte lorsque la classe i, de compacité propre virtuelle  $\beta_i$ , est dominante, elle est calculée par la formule (2.22) et  $C_{MSS}$  est la compacité réelle de l'empilement, elle est calculée par la formule (2.24).

**2.2.3.1 Calibration du modèle:**

Pour le calcul de la compacité réelle  $C_{MSS}$ , il convient à présent de déterminer les coefficients d'interaction  $a_{ij}$ , et  $b_{ij}$  par voies expérimentales, puis d'évaluer la précision du modèle par comparaison de ses prévisions avec l'expérience. Pour ce faire 5 classes élémentaire ont été choisie pour deux familles des granulats roulés ( $0.5 < R_{05} < 0.63$ ,  $1 < R_1 < 1.25$ ,  $2 < R_2 < 2.5$ ,  $4 < R_4 < 5$  et  $8 < R_8 < 10$ ) et concassés ( $0.5 < C_{05} < 0.63$ ,  $1 < C_1 < 1.25$ ,  $2 < C_2 < 2.5$ ,  $4 < C_4 < 5$  et  $8 < C_8 < 10$ ). Sedran et col. (1994) ont montré que l'hypothèse selon laquelle les coefficients d'interaction ne dépendent que du rapport des tailles n'était qu'une approximation commode. Il était donc important de réaliser des mélanges binaires aux deux extrêmes du spectre des tailles, du côté des gros, puis des petits grains. Pour le plus grand rapport seulement, on ne pouvait réaliser qu'un mélange binaire par famille. Pour chaque mélange, ils s'attendaient à ce que la variation de la compacité soit plus rapide du côté des gros dominants (petits pourcentages de grains fins) que du côté des petits dominants. C'est pourquoi ils ont choisi à priori des proportions de petits grains par incréments successifs de 5 % entre 0 et 30 %, puis de 10 % entre 30 et 100 %. Les valeurs obtenues sont récapitulées sur les tableaux 2.1, 2.2.

Tableau 2.1 Compacités des mélanges binaires de granulats roulés (Sedran, 1999).

% petit	R8R05		R8R1		R4R05		R8R2		R2R05		R8R4		R1R05	
	C exp	C théo	C exp	C théo	C exp	C théo	C exp	C théo						
0	0,628	0,632	0,628	0,632	0,6195	0,629	0,628	0,632	0,616	0,62	0,628	0,632	0,609	0,613
5	0,657	0,6553	0,6545	0,6524	0,645	0,6489	0,653	0,648	0,635	0,6354	0,6375	0,6419	0,624	0,622
10	0,6865	0,6796	0,6795	0,6735	0,6715	0,6696	0,682	0,6643	0,663	0,651	0,643	0,6517	0,633	0,631
15	0,71	0,7045	0,707	0,695	0,689	0,6905	0,697	0,6807	0,678	0,6667	0,654	0,6611	0,64	0,6397
20	0,729	0,7286	0,724	0,7159	0,706	0,7107	0,714	0,6964	0,692	0,6819	0,66	0,6701	0,656	0,6478
25	0,754	0,7486	0,742	0,7343	0,7265	0,7283	0,7235	0,7106	0,708	0,6955	0,663	0,678	0,666	0,655
30	0,758	0,7595	0,748	0,747	0,7485	0,7397	0,728	0,7214	0,718	0,7058	0,6595	0,6845	0,6705	0,6608
40	0,753	0,7503	0,7285	0,7476	0,736	0,7369	0,723	0,7274	0,708	0,7103	0,6565	0,6911	0,6635	0,666
50	0,7385	0,7241	0,7095	0,7285	0,725	0,7152	0,705	0,716	0,693	0,6968	0,6535	0,6887	0,6545	0,6617
60	0,7165	0,6955	0,6965	0,7045	0,7	0,6894	0,689	0,6978	0,67	0,6766	0,649	0,68	0,644	0,651
70	0,68	0,6677	0,677	0,6801	0,6745	0,6636	0,671	0,6778	0,656	0,6551	0,6445	0,6684	0,636	0,6375
80	0,652	0,6414	0,6585	0,6565	0,648	0,639	0,646	0,6579	0,633	0,6338	0,638	0,6555	0,6215	0,623
90	0,6195	0,6169	0,635	0,6341	0,614	0,6158	0,632	0,6385	0,613	0,6134	0,629	0,6422	0,61	0,6084
100	0,592	0,594	0,609	0,613	0,592	0,594	0,616	0,62	0,592	0,594	0,6195	0,629	0,592	0,594

Tableau 2.2 Compacités des mélanges binaires de granulats concassés (Sedran, 1999).

% petit	C8C05		C8C1		C4C05		C8C2		C2C05		C8C4		C1C05	
	C exp	C théo												
0	0,572	0,585	0,572	0,585	0,537	0,557	0,572	0,585	0,529	0,525	0,572	0,585	0,507	0,528
5	0,62	0,6065	0,613	0,6033	0,591	0,575	0,597	0,5986	0,54	0,539	0,5825	0,5934	0,527	0,5365
10	0,642	0,6291	0,646	0,6224	0,6185	0,5939	0,611	0,6126	0,552	0,5535	0,5875	0,6018	0,532	0,5452
15	0,676	0,6526	0,6755	0,642	0,638	0,6136	0,625	0,6265	0,5515	0,5685	0,588	0,61	0,545	0,5538
20	0,705	0,6761	0,699	0,6615	0,669	0,6337	0,634	0,6401	0,566	0,5839	0,592	0,6177	0,552	0,5623
25	0,731	0,6972	0,7215	0,6792	0,693	0,6532	0,643	0,6523	0,573	0,5993	0,5955	0,6246	0,5485	0,5705
30	0,7365	0,7103	0,7245	0,6919	0,711	0,6697	0,651	0,6614	0,594	0,6138	0,594	0,6303	0,555	0,5779
40	0,723	0,6995	0,7025	0,6887	0,691	0,6772	0,643	0,6622	0,588	0,6328	0,5875	0,6352	0,556	0,588
50	0,6941	0,6677	0,6705	0,6625	0,667	0,655	0,6335	0,6431	0,582	0,6271	0,587	0,6301	0,549	0,5879
60	0,6585	0,6343	0,638	0,6325	0,64	0,6261	0,6245	0,6181	0,579	0,6077	0,587	0,6181	0,546	0,5788
70	0,616	0,6028	0,611	0,6034	0,603	0,5975	0,5975	0,5928	0,568	0,5855	0,572	0,6033	0,5425	0,5657
80	0,583	0,5738	0,5965	0,5762	0,571	0,5707	0,5695	0,5687	0,5555	0,5635	0,564	0,5877	0,537	0,5515
90	0,5655	0,5473	0,5435	0,5511	0,545	0,5459	0,5435	0,5461	0,534	0,5427	0,553	0,5722	0,53	0,5371
100	0,516	0,523	0,507	0,528	0,516	0,523	0,529	0,525	0,516	0,523	0,537	0,557	0,516	0,523

Le point important est de remarquer que les mêmes fonctions d'interactions granulaires s'appliquent pour traiter les deux familles de granulats étudiées. C'est pourquoi, dans la phase de validation, on parvient à prédire tous les résultats expérimentaux relatifs à des grains de taille et de forme diverses avec une précision généralement meilleure que 1 %, après calibrage du modèle les coefficients d'interactions sont donnés par les formules suivantes:

$$a_{i,j} = \sqrt{d_i/d_j} \quad 2.25$$

$$b_{i,j} = d_i/d_j \quad 2.26$$

La valeur de la viscosité de référence ( $\eta_r^*$ ) doit être connue pour utiliser l'équation (2.24). Rappelons que la viscosité de référence dépend de l'énergie nécessaire pour consolider adéquatement le matériau. Pour un béton conventionnel, la notion de viscosité peut être plus ou moins reliée à l'affaissement du béton. Le tableau (2.3) résume les différentes valeurs des viscosités relatives de référence correspondant à divers types de mise en place.

Tableau 2.3 Viscosités relatives de référence correspondant à divers types de mise en place (Sedran, 1999).

Mise en place	Simple versement	Piquage	Vibration	Vibration + compression 10 kPa
$\eta_r^*$	460	1500	2600	136000

A l'usage, le modèle de suspension solide s'est avéré souffrir de deux défauts. La notion de viscosité de référence portait à confusion pour des empilements et aurait pu s'avérer ambiguë pour des applications à la rhéologie des bétons. Deuxièmement, de Larrard a montré que les fonctions d'interactions n'étaient pas satisfaisantes dans leur forme mathématique. Un nouveau formalisme prenant en compte ces remarques est le modèle d'empilement compressible.

#### 2.2.4 Le modèle d'empilement compressible (MEC) (de Larrard et col, 2000):

Le modèle d'empilement compressible (MEC), est la troisième génération des modèles développés au LCPC. Grâce à ce modèle, la compacité réelle d'un mélange (noté  $C_{MEC}$ ) à plusieurs classes est prédite à partir de la connaissance des compacités de chaque classe unidimensionnelle, de la distribution granulaire du système et de l'énergie de la mise en place. Il s'appuie sur les notions de compacité virtuelle ( $\gamma$ ) et d'indice de serrage (K).

La compacité virtuelle ( $\gamma$ ) est inaccessible à l'expérience. Donc, la formule (2.22) ne peut pas être utilisée directement pour la prédiction de la compacité réelle du mélange granulaire. Il est nécessaire de compléter cette formule. A partir de la formule théorique de compacité virtuelle, on constate que la compacité virtuelle ne dépend que de la caractéristique propre du matériau dans le mélange.

En réalité, la compacité dépend non seulement du matériau mais également du mode de mise en place. Pour décrire la corrélation entre la compacité et le protocole de compaction,

de Larrard a introduit un paramètre appelé : indice de serrage « K » et développé un nouveau modèle appelé « modèle d'empilement compressible ».

Ce modèle permet de déterminer la compacité réelle d'un mélange connaissant sa compacité virtuelle et l'indice associé au protocole de compaction. L'expression du modèle est présentée par l'équation suivante :

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n \frac{Y_i/\beta_i}{\frac{1}{C_{MEC}} - \frac{1}{\gamma_i}} \quad 2.27$$

Avec :

- $C_{MEC}$  : compacité réelle du mélange, équation (2.27)
- K : indice de serrage pour le mélange, équation (2.27)
- $\gamma_i$  : compacité virtuelle lorsque la classe i est dominante, équation (2.22)
- n : nombre de classes dans le mélange,
- $\beta_i$  : compacité virtuel de classe i, équation (2.28)

Le paramètre K dépend du processus de mise en place du mélange granulaire. Ce terme, K, résulte de la sommation de plusieurs fonctions. C'est une fonction strictement croissante de  $C_{MEC}$  (figure 2.6), ce qui montre qu'il existe bien, pour toute valeur positive de K, une valeur unique de C qui satisfasse l'équation (2.27).

Pour un empilement de grains de même taille, K prend la forme suivante :

$$K = \frac{1}{\frac{\beta_i}{\alpha_i} - 1} \quad 2.28$$

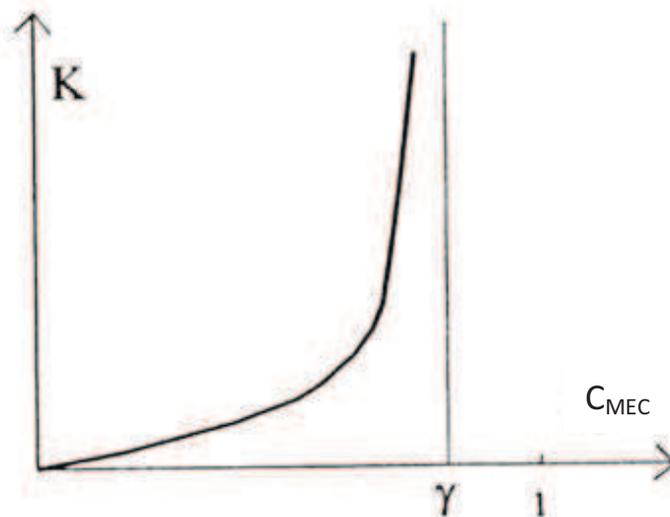


Figure 2.6 Variation de K en fonction de la compacité (de Larrard, 2000).

### 2.2.4.1 Calibration du modèle :

Ce modèle a été validé sur de nombreux mélanges de matériaux utilisés dans le génie civil : mélange binaire, ternaire, pour des granulats roulés ou concassés et avec le procédé de mise en place : vibration associée à une force de compression de 10 kPa. À partir des résultats expérimentaux sur des mélanges binaires, deux formules pour déterminer les coefficients d'interaction ont été proposées par de Larrard :

$$a_{ij} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i}\right)^{1.02}} \quad 2.29$$

$$b_{ij} = 1 - \left(1 - \frac{d_i}{d_j}\right)^{1.50} \quad 2.30$$

Après avoir obtenu les valeurs de a et b, pour une valeur de K égale à 9, de Larrard a trouvé des résultats satisfaisants comparables aux résultats expérimentaux (Tableau 2.4, 2.5 et figure 2.7, 2.8). Il a indiqué également qu'un meilleur ajustement est obtenu par des grains roulés avec une erreur absolue de 0,77 % contre 1,71 % pour des grains concassés.

Tableau 2.4 Compacités des mélanges binaires de granulats roulés (de Larrard, 2000)

% fins	RSR05		RSR1		R4R05		RSR2		R2R05		RSR4		R1R05	
	Exp.	Théo.	Exp.	Théo.	Exp.	Théo.	Exp.	Théo.	Exp.	Théo.	Exp.	Théo.	Exp.	Théo.
0	0.628	0.632	0.628	0.632	0.6195	0.629	0.628	0.632	0.616	0.620	0.628	0.632	0.609	0.613
5	0.657	0.6557	0.6545	0.6526	0.645	0.6492	0.653	0.6481	0.635	0.6354	0.6375	0.6416	0.624	0.6217
10	0.6865	0.6808	0.6795	0.6743	0.6715	0.6703	0.682	0.6646	0.663	0.6512	0.643	0.6511	0.633	0.6304
15	0.710	0.7069	0.707	0.6966	0.689	0.692	0.697	0.6813	0.678	0.6667	0.654	0.6603	0.640	0.6386
20	0.729	0.733	0.724	0.7189	0.706	0.7136	0.714	0.7976	0.692	0.6826	0.660	0.6689	0.656	0.6462
25	0.754	0.7558	0.742	0.7391	0.7265	0.7326	0.7235	0.7122	0.708	0.6964	0.663	0.6762	0.666	0.6526
30	0.758	0.7877	0.748	0.7528	0.7785	0.7446	0.728	0.7229	0.718	0.7063	0.6595	0.6817	0.6705	0.6578
40	0.753	0.7544	0.7285	0.7496	0.736	0.7379	0.723	0.7251	0.708	0.7067	0.6565	0.6853	0.6635	0.659
50	0.7385	0.7256	0.7095	0.7277	0.725	0.7138	0.705	0.7111	0.693	0.6909	0.6535	0.6806	0.6545	0.6525
60	0.7165	0.6959	0.6965	0.7029	0.700	0.6875	0.689	0.6927	0.670	0.6709	0.649	0.6719	0.644	0.6421
70	0.680	0.6677	0.677	0.6786	0.6745	0.662	0.671	0.6737	0.656	0.6506	0.6445	0.6616	0.636	0.6303
80	0.652	0.6414	0.6585	0.6554	0.648	0.6379	0.646	0.6551	0.633	0.6308	0.638	0.6508	0.6215	0.6181
90	0.6195	0.6168	0.635	0.6336	0.614	0.6152	0.632	0.6361	0.613	0.6119	0.629	0.6398	0.610	0.6059
100	0.592	0.594	0.609	0.613	0.592	0.594	0.616	0.620	0.592	0.594	0.6195	0.629	0.592	0.594

Tableau 2.5 Compacités des mélanges binaires de granulats concassés (de Larrard, 2000).

% fins	C8C05		C8C1		C4C05		C8C2		C2C05		C8C4		C1C05	
	Exp.	Théo.												
0	0.572	0.585	0.572	0.585	0.537	0.557	0.572	0.585	0.529	0.525	0.572	0.585	0.507	0.528
5	0.620	0.6066	0.613	0.6034	0.591	0.575	0.597	0.5986	0.54	0.5388	0.5825	0.5931	0.527	0.5362
10	0.642	0.6295	0.646	0.6226	0.6185	0.594	0.611	0.6125	0.552	0.5531	0.5875	0.6011	0.532	0.5444
15	0.676	0.6535	0.6755	0.6425	0.638	0.6137	0.625	0.6264	0.5515	0.5679	0.588	0.6087	0.545	0.5524
20	0.705	0.6779	0.699	0.6624	0.669	0.634	0.634	0.6398	0.566	0.583	0.592	0.6158	0.552	0.5602
25	0.731	0.7001	0.7215	0.6806	0.693	0.6536	0.643	0.6516	0.573	0.5979	0.5955	0.6217	0.5485	0.5673
30	0.7365	0.7135	0.7245	0.693	0.711	0.670	0.651	0.6594	0.594	0.6115	0.594	0.6259	0.555	0.5733
40	0.723	0.6998	0.7025	0.6861	0.691	0.6741	0.643	0.6554	0.588	0.626	0.5875	0.6271	0.556	0.5792
50	0.6941	0.6666	0.6705	0.6586	0.667	0.6502	0.6335	0.6349	0.582	0.617	0.587	0.6198	0.549	0.576
60	0.6585	0.6331	0.638	0.629	0.640	0.6219	0.6245	0.6111	0.579	0.5987	0.587	0.6084	0.546	0.5675
70	0.616	0.6019	0.611	0.6008	0.603	0.5945	0.5975	0.5877	0.568	0.5788	0.572	0.5956	0.5425	0.5567
80	0.583	0.5732	0.5965	0.5746	0.571	0.5688	0.5695	0.5654	0.5555	0.5493	0.564	0.5825	0.537	0.5455
90	0.5655	0.547	0.5435	0.5504	0.545	0.545	0.5435	0.5445	0.534	0.5406	0.553	0.5696	0.530	0.5341
100	0.516	0.523	0.507	0.528	0.516	0.523	0.529	0.525	0.516	0.523	0.5537	0.547	0.516	0.523

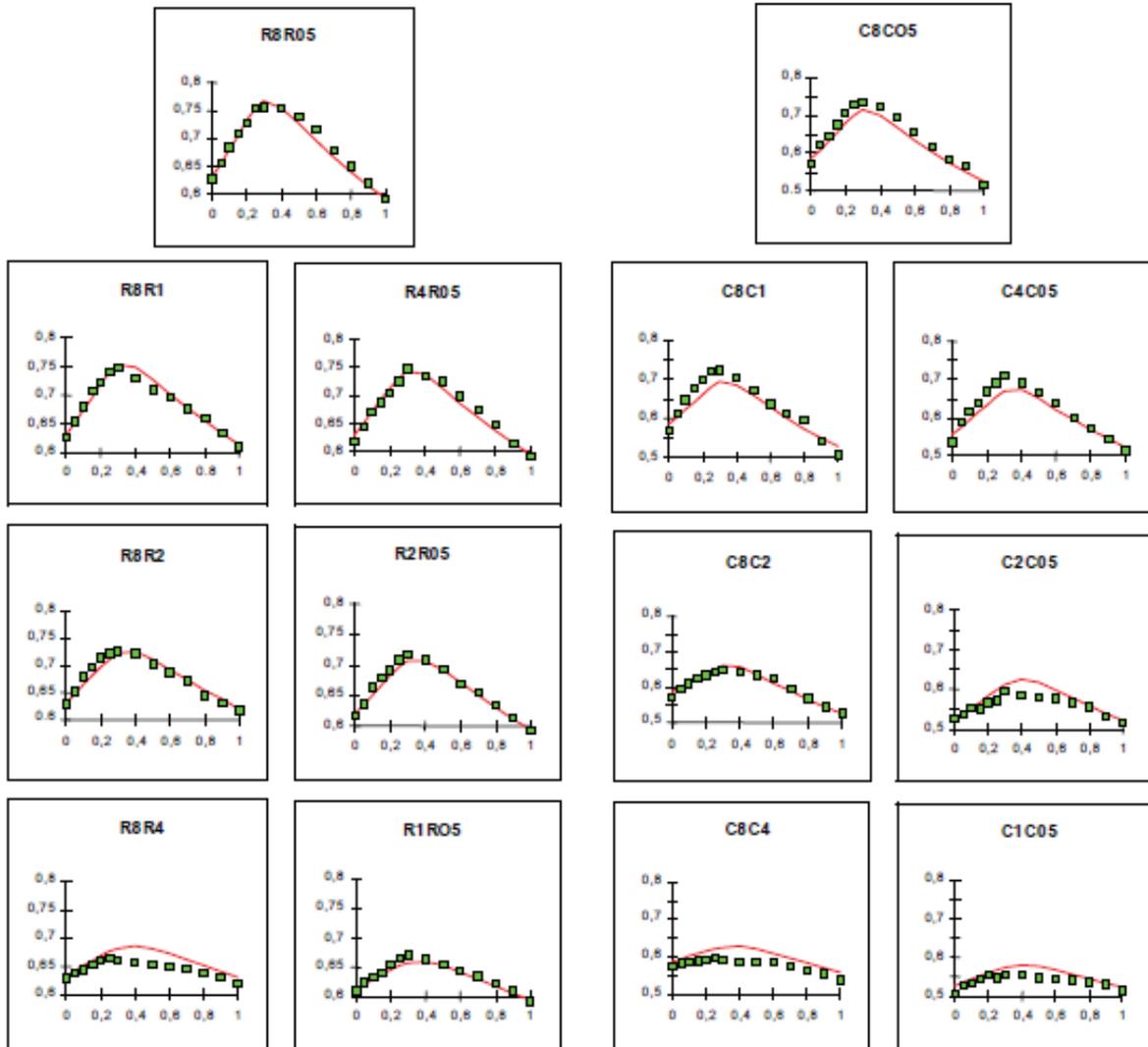


Figure 2.7 : Compacités des mélanges binaires de granulats roulés. Compacité en fonction de la proportion de grains fins, Points expérimentaux et lissages fournis par le modèle (de Larrard, 2000)

Figure 2.8: Compacités des mélanges binaires de granulats concassés. Compacité en fonction de la proportion de grains fins, Points expérimentaux et lissages fournis par le modèle (de Larrard, 2000)

**2.2.4.2 Validation du modèle avec des données provenant de différentes origines :**

Le modèle d'empilement compressible est validé par comparaison entre prévision théorique et résultats expérimentaux, pour diverses données originales tirées de la littérature.

Dans le second cas lorsque le procédé de mise en place est différent de celui proposé, l'indice de serrage K a été ajusté de façon à obtenir la meilleure coïncidence possible. Le modèle a été validé successivement sur des mélanges binaires et ternaires, sur six fractions discontinues de granulats et six fractions continues, et sur une large gamme d'autres mélanges binaires. Les précisions obtenues sont aussi bonnes avec les données de la littérature qu'avec les données originales. L'analyse de différents procédés de mise en place

a permis de fixer une échelle des indices de compaction comme indiqué ci-après (tableau 2.6).

Tableau 2.6 Résumé des valeurs de  $K$  (indice de serrage) pour différents procédés de remplissage (de Larrard, 2000)

Procédé de remplissage	Déversement (Cintré, 1988)	Piquage avec une tige (Khanta Rao et col., 1993)	Vibration (Joisel, 1952)	Pression statique 10MPa	Vibration + pression 10kPa (de Larrard et col., 1994b)
Indice de compaction	4,1	4,5	4,75	7	9

Dans le même programme d'étalonnage du modèle, plusieurs mélanges ternaires ont été testés par de Larrard. Après avoir arbitrairement sélectionné les classes <0,5, 1 et 8, les combinaisons les plus compactes ont été recherchées par essais expérimentaux successifs (tableau 2.7). Ces mesures ont ensuite été simulées avec le Modèle d'Empilement Compressible, en prenant la valeur 9 pour  $K$ .

Tableau 2.7 Compacités mesurées (grains roulés et concassés) et prévisions du modèle (de Larrard, 2000)

%R<05	%R1	%R8	$C_{théo}$	$C_{exp}$	%C<05	%C1	%C8	$C_{théo}$	$C_{exp}$
25	0	75	0,762	0,752	22	10	68	0,755	0,775
30	0	70	0,775	0,753	27	10	63	0,778	0,776
22	10	68	0,787	0,772	32	10	58	0,786	0,797
27	10	63	0,788	0,777	37	10	53	0,781	0,79
32	10	58	0,779	0,764	42	10	48	0,77	0,787
37	10	53	0,764	0,756	12	20	68	0,734	0,734
42	10	48	0,748	0,738	17	20	63	0,761	0,744
12	20	68	0,781	0,767	22	20	58	0,779	0,752
17	20	63	0,795	0,775	27	20	53	0,785	0,777
22	20	58	0,795	0,779	32	20	48	0,782	0,788
27	20	53	0,785	0,782	37	20	43	0,772	0,786
32	20	48	0,771	0,774	42	20	38	0,76	0,781
37	20	43	0,755	0,76	17	30	53	0,753	0,77
42	20	38	0,739	0,746	22	30	48	0,762	0,769
17	25	58	0,794	0,791	27	30	43	0,765	0,775
22	25	53	0,79	0,795	32	30	38	0,762	0,778
27	25	48	0,779	0,785	37	30	33	0,755	0,769
12	30	58	0,784	0,781	42	30	28	0,745	0,765
17	30	53	0,786	0,783	32	15	53	0,786	0,799
22	30	48	0,782	0,784					
27	30	43	0,771	0,776					
32	30	38	0,758	0,761					
37	30	33	0,743	0,747					
39	31,5	29,5	0,735	0,736					
17	35	48	0,776	0,772					
22	35	43	0,771	0,769					

Concernant les granulats concassés, de Larrard a trouvé la même tendance que lors des expériences d'étalonnage, avec toutefois une erreur moyenne supérieure à celle des granulats roulés, égale ici à 1,31%. L'optimum expérimental est obtenu pour le mélange 0,32/0,15/0,53, avec une compacité de 0,7993. L'optimum théorique est obtenu pour les proportions 0,29/0,15/0,56, avec une valeur optimale égale à 0,7854 et la compacité expérimentale correspondante, calculée par interpolation linéaire, est de 0,7826. L'erreur est ici égale à 1,67%.

Pour les séries correspondant aux grains roulés, l'erreur moyenne est de 0,76%, valeur comparable à celle des expériences d'étalonnages sur mélanges binaires. Le mélange 0,22/0,25/0,53 conduit à la valeur expérimentale optimale de 0,7945 tandis que la valeur théorique de cette combinaison est de 0,7897. D'après le modèle, l'optimum doit être obtenu pour le mélange 0,20/0,19/0,61, avec une compacité de 0,7959 ; la valeur expérimentale correspondante, obtenue par interpolation linéaire, est de 0,7764. On peut ainsi juger la fiabilité du modèle qui n'a "manqué" la compacité réelle que de 0,0179 points.

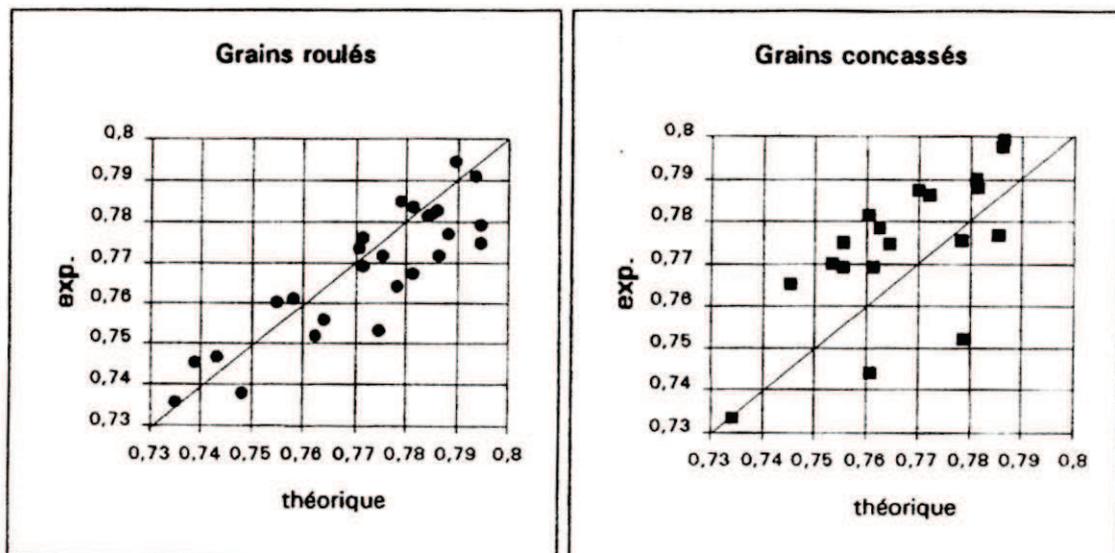


Figure 2.9 Comparaison entre prévision et mesures pour les mélanges ternaires  
(de Larrard ; 2000)

## 2.3 Intégration du modèle d'empilement compressible dans un logiciel :

Afin de pouvoir utiliser de façon pratique le modèle d'empilement compressible, de Larrard et Sedran ont intégré ce modèle dans un logiciel convivial sous l'interface Windows. Ce logiciel a été nommé René-LCPC. Il permet d'accéder avec une bonne précision, aux proportions optimales des constituants d'un mélange granulaire.

### 2.3.1 Logiciel René LCPC :

René-LCPC met en œuvre le Modèle d'Empilement Compressible à partir d'un jeu de constituants caractérisés par leur distribution granulaire et par les compacités des tranches monodimensionnelles. Le logiciel prédit la compacité de toute combinaison des constituants définie par l'utilisateur. L'énergie de mise en place de l'empilement granulaire est décrite par

l'indice de serrage. Si l'utilisateur introduit la valeur de l'indice de serrage, le logiciel calcule la compacité. Inversement, si la compacité est connue, c'est l'indice de serrage qui sera prédit. Le logiciel s'applique à tout matériau granulaire pour lequel les forces de surface entre particules sont petites devant celles provoquées par les actions de malaxage et de mise en place. Il n'y a pas de limitation sur l'étendue granulaire, qui peut atteindre 4 ou 5 puissances de 10.

Les données d'entrée sont les suivantes:

- Les masses volumiques réelles des différents constituants (ciment, sable, gravillons, fines, etc.) ;
- la granulométrie des différents constituants;
- la compacité de l'empilement individuel de chaque constituant;
- l'indice de compaction du constituant et l'effet de paroi associée à la mesure de ces compacités.

A l'issue d'un calcul pour un squelette granulaire donné, le logiciel fournit les grandeurs suivantes:

- l'indice de compaction du mélange.
- la porosité du mélange.
- la masse volumique à sec du mélange (en  $\text{kg/m}^3$ ) : c'est le poids solide contenu dans un volume unité du mélange
- La masse volumique à l'état saturé: c'est le poids d'un volume unité du mélange en supposant que le liquide suspendant est de l'eau.

Le Modèle d'Empilement Compressible est important dans la mesure où il rend possible l'obtention d'excellentes propriétés mécaniques à court et à long terme et la réduction de la quantité de liant, d'où une réduction de la fissuration de retrait. De plus, le MEC ne nécessite pas beaucoup d'essais au laboratoire pour l'obtention d'un béton optimal.

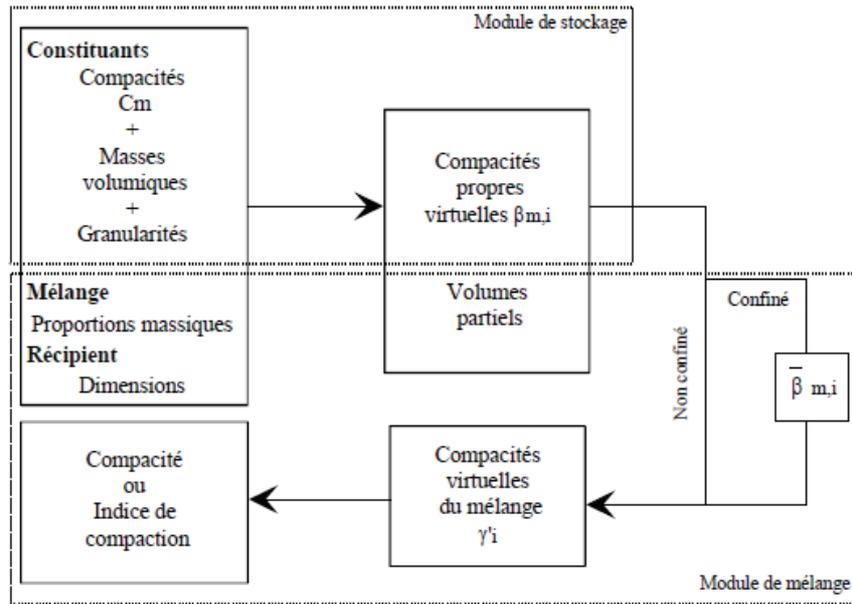


Figure 2.10 Schéma fonctionnel du logiciel René-LCPC (Sedran, 1999)

### 2.3.2 Fonctionnement du logiciel:

#### 2.3.2.1 Menu "Constituants" :

Lors de l'installation du logiciel, la bibliothèque contient un dossier appelé « exemple.mat » avec quelques constituants et pour préciser le fonctionnement de ce dernier, nous allons prendre le cas du constituant nommé (sable2).

#### ❖ Fenêtre "Bibliothèque de constituants" :

C'est la première fenêtre qui s'affiche quand nous appuyons sur le menu constituant. Elle permet d'accéder aux propriétés des constituants à partir des quels nous allons composer nos mélanges granulaires (figure 2.11).

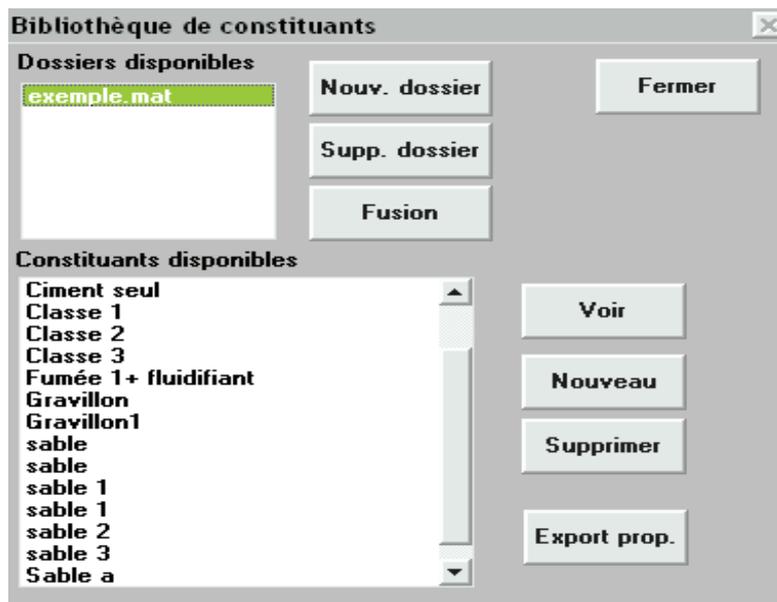


Figure 2.11 Fenêtre "Bibliothèque de constituant"

Tous les constituants sont classés dans des dossiers dont le nom se termine par ".mat". La liste de ces dossiers apparaît en haut de la fenêtre. Ces dossiers doivent obligatoirement se trouver dans le répertoire où a été installé **rene.exe**, pour pouvoir figurer dans la liste. Un second utilisateur peut ainsi accéder à ces propres matériaux grâce à une simple copie de ses dossiers dans ce répertoire.

Lorsqu'un dossier est sélectionné dans la liste, la seconde liste indique immédiatement les matériaux disponibles dans ce dossier.

La fenêtre "Bibliothèque de constituants" contient huit boutons de commande:

**Bouton "Nouv. dossier"**: crée un nouveau dossier de matériaux dont le nom est de forme (\*.mat).

**Bouton "Supp. dossier"**: supprime un dossier existant;

**Bouton "Fusion"**: permet de transférer des matériaux d'un dossier à un autre. La pression de ce bouton ouvre la fenêtre "Fusion".

**Bouton "Supprimer"**: supprime du dossier le constituant sélectionné;

**Bouton "Voir"**: permet de consulter et de modifier les propriétés d'un constituant déjà existant. La pression de ce bouton ouvre la fenêtre "Propriétés du constituant".

**Bouton "Nouveau"**: permet de créer un nouveau constituant. La pression de ce bouton ouvre successivement deux fenêtres qui nous permette d'entrer les diamètres extrêmes du constituant (figure 2.12). Le logiciel ouvre ensuite la fenêtre "Propriétés du constituant".

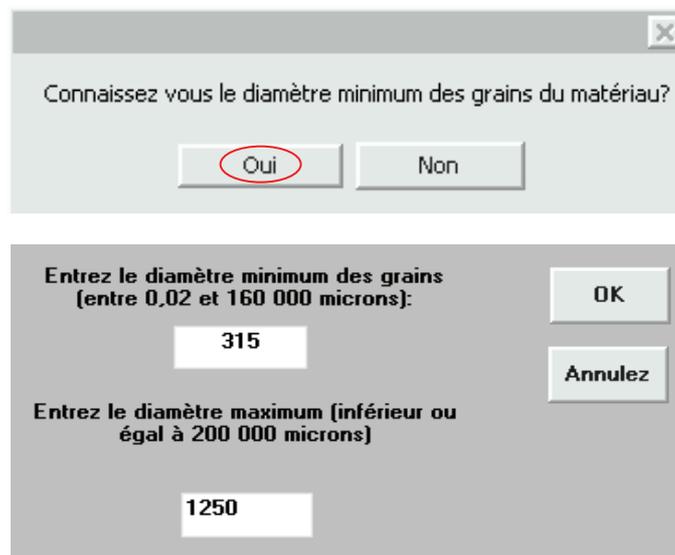


Figure 2.12 diamètre min et max des grains

**Bouton "Fermer"**: ferme la feuille "Bibliothèque de matériaux";

**Bouton "Export prop"**: colle dans le presse-papier les caractéristiques du constituant sélectionné. Nous pouvons donc aisément insérer avec la fonction collé (ctrl v) ces données dans un tableau Excel™ ou Word™ pour la rédaction de rapports ou de documents divers.

❖ Fenêtre "Propriétés du constituant" :

Cette fenêtre permet d'introduire le dossier, le nom, la masse volumique absolue et la granularité du constituant.

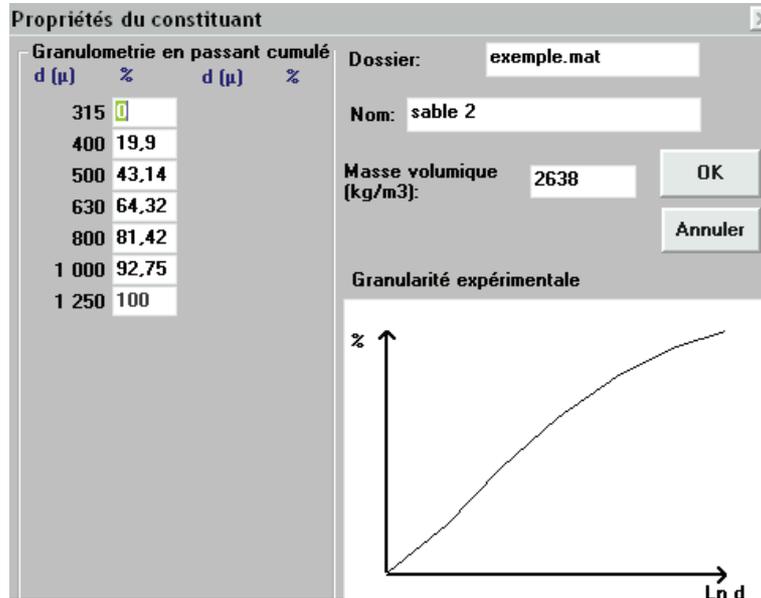


Figure 2.13 Fenêtre "propriété du constituant"

Après le remplissage des données, une pression sur le bouton "OK" ouvrira la fenêtre "Compacités propres des classes granulaires".

❖ Fenêtre "Compacités propres des classes granulaires" :

Cette fenêtre nous permettra d'entrer la compacité propre (notée c(d)) de chaque classe granulaire mesurée expérimentalement.

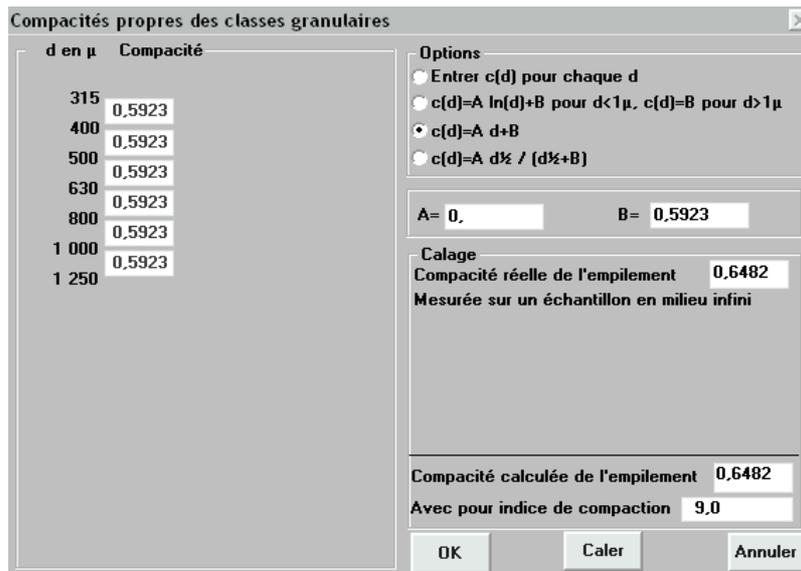


Figure 2.14 Fenêtre "Compacités propres des classes granulaires"

Quatre options d'entrée nous seront proposées:

- Entrée individuelle de chaque compacité propre;
- $c(d) = A \ln(d) + B$  si  $d < 1 \mu\text{m}$  et  $c(d) = B$  si  $d > 1 \mu\text{m}$  : cette option peut être choisie pour les ultrafines (fumée de silice...);
- $c(d) = A d + B$  : cette option peut être choisie pour des granulats concassés;
- $c(d) = A d^{1/2} / (d^{1/2} + B)$  : cette option peut être choisie pour des granulats roulés.

Ces options ont été proposées dans un premier temps pour des raisons de recherche. En principe, les valeurs A et B étaient choisies de telle sorte que la fonction  $c(d)$  soit croissante (ceci traduisant le fait expérimental suivant: pour une même nature de grain, les grains de petit diamètre se compactent moins bien que ceux de plus grand diamètre).

Toutefois, d'un point de vue pratique, nous choisissons toujours  $c(d) = B$  (soit  $A=0$  dans l'option 2 et l'option 3).

Le bouton "OK" nous permettra d'enregistrer toutes les données de notre constituant. Nous devons toutefois au préalable effectuer un calage comme expliqué au paragraphe suivant.

#### **Calage :**

Lorsque nous avons choisi une des quatre options, nous devons impérativement cliquer sur le bouton "Caler". Ceci a deux conséquences:

- Enregistrer des informations nécessaires à René-LCPC;
- Afficher la compacité de l'empilement global du constituant calculée par le logiciel. Ainsi, par essais successifs, nous devons ajuster les valeurs de compacités propres de chaque classe granulaire du constituant, pour que cette valeur calculée corresponde à la compacité expérimentale.

Lorsque nous cliquons sur le bouton "Caler", le logiciel nous demande l'indice de compaction. Comme expliqué dans la figure (2.15), cette valeur caractérise l'efficacité du compactage utilisé lors de la mesure de la compacité de l'empilement du constituant. Elle est égale à 9 (vibration+ compression 10 kPa).

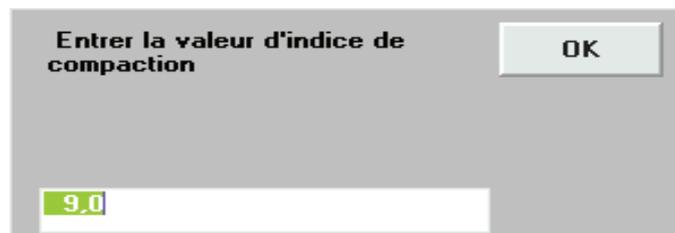


Figure 2.15 La valeur d'indice de compaction

Le programme nous demande ensuite si la mesure de la compacité a été effectuée en milieu confiné ou infini. En théorie, la mesure est toujours effectuée en milieu confiné ; toutefois l'effet de paroi devient négligeable lorsque le diamètre des grains est petit devant les dimensions du récipient. On peut considérer que la mesure de compacité des sables est effectuée en milieu infini. Si nous choisissons l'option milieu confiné, le logiciel ouvre la

fenêtre "Confinement" (figure 2.16). Lorsque le calage du constituant est effectué, le logiciel calcule et stocke des propriétés intrinsèques à ce constituant (granularité et compacités propres virtuelles en milieu infini). Ainsi calé, il pourra être utilisé dans le calcul de mélanges dont l'indice de compaction et le confinement sont quelconques.

#### Confinement:

Le confinement, subi par un échantillon dans un contenant, peut être caractérisé par le rapport  $v/V$  exprimant le rapport du volume non perturbé par l'effet de paroi, sur le volume total de l'échantillon. Ce rapport s'exprime, en général, par un polynôme du 3<sup>ème</sup> degré en  $d$  (diamètre des grains en mm). La fenêtre "Confinement" nous permettra d'entrer les coefficients de ce polynôme.

Le bouton "Cylindre" est un utilitaire qui calcule, pour nous, ces coefficients dans le cas d'un récipient cylindrique.

**Confinement**

Entrer les paramètres du polynôme  $P(x)=Ax^3+Bx^2+Cx+D$  exprimant le rapport du volume non perturbé sur le volume total en fonction du diamètre du grain (en mm)

A= -1,69837E-07

B= 9,341032E-05

C= -1,684783E-02

D= 0

OK

Annuler

Cylindre

Figure 2.16 Fenêtre "confinement"

#### 2.3.2.2 Menu " mélange " :

Lorsque nous cliquons sur ce menu, trois listes apparaissent à l'écran:

**Choix des matériaux pour le mélange**

Dossiers disponibles  
exemple.mat

Constituants disponibles  
Fumée 1+ fluidifiant  
Gravillon  
Gravillon1  
sable  
sable  
sable 1  
sable 1  
sable 2

Constituants sélectionnés pour le mélange  
exemple.mat:\sable 2  
exemple.mat:\Gravillon1

OK

Sélectionner

Enlever

Figure 2.17 Fenêtre " Choix des matériaux pour le mélange "

- Les listes des dossiers et des constituants disponibles (en haut). Ce sont ceux qui se trouvent dans notre bibliothèque de constituants;
- La liste de constituants sélectionnés (en bas). Ce sont ceux dont nous allons étudier des mélanges en différentes proportions (par exemple un mélange binaire composé de sable 2 et gravillon 1). Les constituants sont repérés par le nom du dossier auquel ils appartiennent suivi de leur propre nom.

Le bouton "**Sélectionner**" nous permettra de transférer dans la liste du bas, les constituants sélectionnés avec la souris dans la liste du haut.

Le bouton "**Enlever**" permet de supprimer les constituants sélectionnés à la souris dans la liste du bas.

### 2.3.2.3 Menu "Calcul":

Ce menu n'est accessible que si des constituants apparaissent dans la liste de constituants sélectionnés du menu "Mélange". Lorsque nous cliquons sur ce menu, les menus "Mélange" et "Constituants" deviennent inaccessibles, la fenêtre "Données des calculs" s'ouvre et quatre boutons de calcul apparaissent. Il est important de comprendre que les indices de compaction et les caractéristiques de confinement introduits dans le calcul de mélanges sont propres à ces mélanges et sont totalement indépendantes des valeurs utilisées pour caler chaque constituant individuellement. Ainsi, nous pourrions chercher la porosité d'un mélange binaire ayant un indice de compaction de 12, en milieu infini, même si les deux constituants ont été calés en milieu confiné, avec un indice de compaction de 6.7 et 9 respectivement.

#### ❖ Fenêtre "Données des calculs" :

Cette fenêtre permet d'entrer les proportions massiques des constituants par rapport à la masse totale du solide.

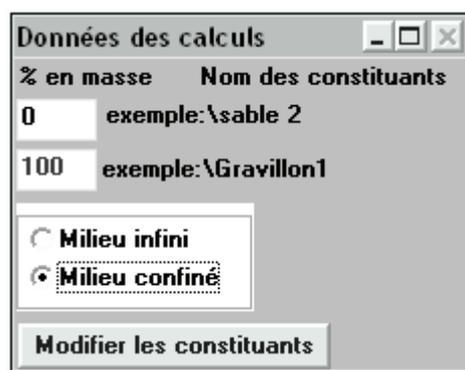


Figure 2.18 fenêtre " données de calculs "

Le constituant gravillon contenu dans la bibliothèque a pour étendue granulaire 8mm-25 mm.

La mesure de sa compacité a été effectuée sur un échantillon cylindrique de diamètre 160 mm et de hauteur 600 mm selon la méthode que nous exposons dans le chapitre 3. L'indice de compaction est donc 9. L'effet de paroi doit être pris en compte pour les calculs puisque les diamètres des grains ne sont pas très petits devant les dimensions du contenant.

Le bouton "**Modifier les matériaux**" nous permettra de sortir du menu "Calcul".

Lorsque nous avons choisi nos proportions de mélange, nous effectuons nos calculs en cliquant sur un des quatre boutons présentés dans les paragraphes suivants.

❖ **Bouton "Compacité virtuelle" :**



Lorsque nous cliquons sur ce bouton, le logiciel calcule la valeur de la compacité virtuelle du mélange et l'imprime sur la feuille "Résultats". Cette compacité virtuelle est une valeur théorique correspondant à un indice de compaction infini.

❖ **Bouton "Porosité à indice de compaction fixé"**



Lorsque nous cliquons sur ce bouton, le logiciel nous demande l'indice de compaction souhaité pour la suspension, il calcule la porosité correspondante, et imprime les données sur la feuille "Résultats".

❖ **Bouton "Indice de compaction à porosité fixée"**



Lorsque nous cliquons sur ce bouton, le logiciel nous demande la porosité visée pour la suspension, il calcule l'indice de compaction correspondant, et imprime les données sur la feuille "Résultats".

❖ **Bouton "Optimisation d'un mélange binaire"**



Lorsque nous cliquons sur ce bouton, une seconde feuille de proportions massiques apparaît à l'écran. Lorsque nous validons ce second jeu de proportions, le logiciel calcule tous les mélanges binaires, à indice de compaction ou porosité fixé.

❖ **Fenêtre "Résultats":**

C'est dans cette fenêtre que s'affichent les résultats des calculs. Les données affichées sont les suivantes :

- Les noms des constituants des mélanges;
- Les proportions massiques des constituants;
- La porosité du mélange;
- L'indice de compaction du mélange;
- La masse volumique à sec du mélange;
- La masse volumique à l'état saturé du mélange;

En Prenant l'exemple d'un mélange binaire (sable 2 et gravillon 1). Après avoir sélectionné



ces deux constituants nous lançons le calcul en appuyant sur le bouton et en prenant 9 pour indice de compaction. Les résultats suivants s'affichent (figure 2.19).

Constituant n°0 %	Constituant n°1 %	Porosité	Indice de compaction	Masse vol. à sec
100	0	0,3527	9,0	1707,5
90	10	0,3312	9,0	1753,7
80	20	0,3088	9,0	1801,9
70	30	0,2854	9,0	1851,9
60	40	0,2615	9,0	1902,7
50	50	0,2382	9,0	1951,3
40	60	0,2204	9,0	1985,3
30	70	0,2281	9,0	1954,5
20	80	0,2699	9,0	1837,9
10	90	0,3177	9,0	1708,0
0	100	0,3615	9,0	1589,1

Figure 2.19 fenêtre « résultats »

## 2.4 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre l'évolution des différents modèles de prévision de la compacité des milieux granulaires, commençant par le modèles linéaires de compacité qui permettent de prédire (la compacité virtuelle) jusqu'à arrivé à la dernière version développée au LCPC appelée "modèle d'empilement compressible" qui permet de calculer la compacité réelle et qui a été validé à partir de données de la littérature provenant de différentes origines. Afin de pouvoir utiliser de façon pratique le modèle d'empilement compressible (notamment la validation du modèle), il est apparu nécessaire de l'intégrer dans un logiciel convivial sous l'interface Windows. Ce logiciel a été nommé René-LCPC. Il permet de réduire le calcul mathématique du modèle et d'accéder avec une bonne précision, aux proportions optimales des constituants d'un mélange granulaire.

La compacité réelle peut être mesurée au laboratoire en utilisant différents procédés de mise en place (déversement, piquage, vibration et vibration+compression 10 kPa), chacun étant caractérisé par un indice de serrage. L'expérience montre que les méthodes qui conduisent à un empilement compact (avec un indice de serrage élevé) sont préférables surtout au niveau de l'application au béton ferme. Il est donc conseillé d'utiliser la méthode de vibration associée à une force de compression de 10 kPa afin d'assurer aux mélanges granulaires à sec, un serrage maximum (indice de serrage égal à 9).

## ***Chapitre 3***

***Etude expérimentale et prévisionnelle des  
compacités des milieux granulaires***

### 3.1 Introduction:

Toutes les études de formulation des bétons sont basées sur la recherche en leur sein d'un arrangement maximal des composantes en vue d'offrir au mélange les meilleures performances. La compacité maximale du squelette granulaire joue donc un rôle « clé » sur les propriétés du béton, à l'état frais notamment sur l'ouvrabilité comme à l'état durci particulièrement sur les résistances mécaniques.

Dans ce chapitre, nous faisons une étude comparative de la compacité des mélanges granulaires sur des granulats calcaires concassés, optimisé par voie expérimentale à l'aide d'un banc d'essai réalisé localement au niveau de notre laboratoire et par voie théorique, en se basant sur le concept du modèle d'empilement compressible intégré dans un logiciel nommé « René-LCPC » et développé par F. de Larrard et T. Sedran (sedran, 1999).

### 3.2 Présentation de la carrière :

La carrière que nous avons choisie pour l'approvisionnement des granulats est celle de Sidi Abdelli qui appartient à l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG). Le choix retenu pour cette étude est dicté par le fait que c'est une grande carrière qui approvisionne principalement la région. Les réserves du gisement s'élèvent à 51125169 tonnes. Compte tenu des pertes d'exploitation (5 %) et des pertes de traitement (10 %), il est possible d'en fabriquer 43456394 tonnes d'agrégats. Donc, les réserves sont suffisantes pour assurer l'alimentation d'un concasseur ayant une capacité annuelle de production de 500 000 tonnes pendant 86,9 ans (Tchemiakine, 1988).

#### 3.2.1 Situation géographique:

La carrière est située à Djebel Abiod à 28 km au Nord Est de la ville de Tlemcen et 4 km de la Commune de Sidi Abdelli, Daira de Bensekrane, Wilaya de Tlemcen, sur la route nationale N°53 dont les coordonnées Lambert sont : X=149450 ; Y=199500 (fig. 3.1).

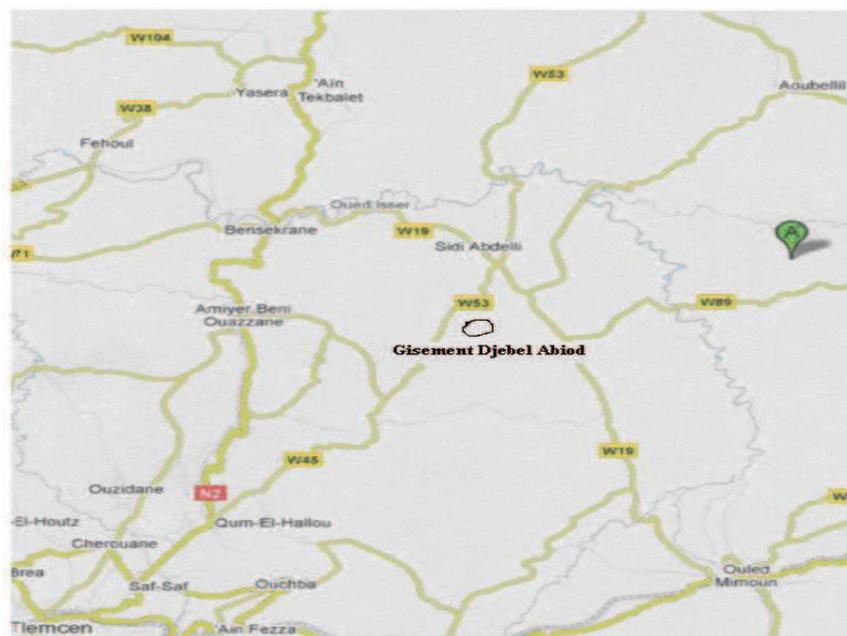


Figure 3.1 Plan de situation du gisement de Djebel Abiod (Boukli Hacène, 2009).

### 3.2.2 Aperçu géologique :

Le gisement renferme des roches carbonatées appartenant au kimméridgien inférieur au jurassique supérieur. Elles sont d'origine organogène et chimique. Ce gisement est limité par des failles d'Est en Ouest et est coupé par une autre en deux gros blocs oriental et occidental dans les directions Nord-est et Sud-Ouest.

Les roches du gisement plongent vers le Sud-Ouest suivant un azimuth de 25° sous 15° à 17° dans le bloc occidental et sous 5 à 7° dans le bloc oriental. La montagne d'Abiod est constituée de Karsts dont la répartition est irrégulière. Les roches les plus Karstifiées se rencontrent à proximité des zones de failles.

Les plus développées et constituant l'assise utile sont :

- les calcaires pelitomorphes gris clairs, massifs, compacts à fines passées de calcite.
- les calcaires dolomitiques et dolomies calcaires grises finement cristallines, massives et dures.
- les dolomies, moins répandues, grises foncées à petites cavités dues au lessivage.

Le tableau (3.1) montre la composition chimique de la roche exploitée dans la carrière.

Tableau 3.1 Composition chimique de la roche exploitée dans la carrière de Djebel Abiod.

Eléments	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	P.F.
Min%	0.34	0.23	0.13	32.52	0.22	0.40	42.91
Max%	0.42	0.27	0.29	55.21	20.11	0.85	45.76
Moy%	0.38	0.25	0.23	44.38	9.88	0.66	44.30

### 3.3 Identification des granulats:

#### 3.3.1 Caractéristiques géométriques:

##### 3.3.1.1 Granularité :

Les granulats utilisés sont des granulats calcaires concassés commercialisés en tant que classes granulaires : sable 0/4 et gravillons de classes 4/8, 8/16, 16/25.

Les échantillons ont été préparés suivant les prescriptions de la norme NA 453 et les analyses granulométriques faites conformément à la norme NA 2607. Les courbes granulométriques des gravillons sont présentées sur la figure (3.2).

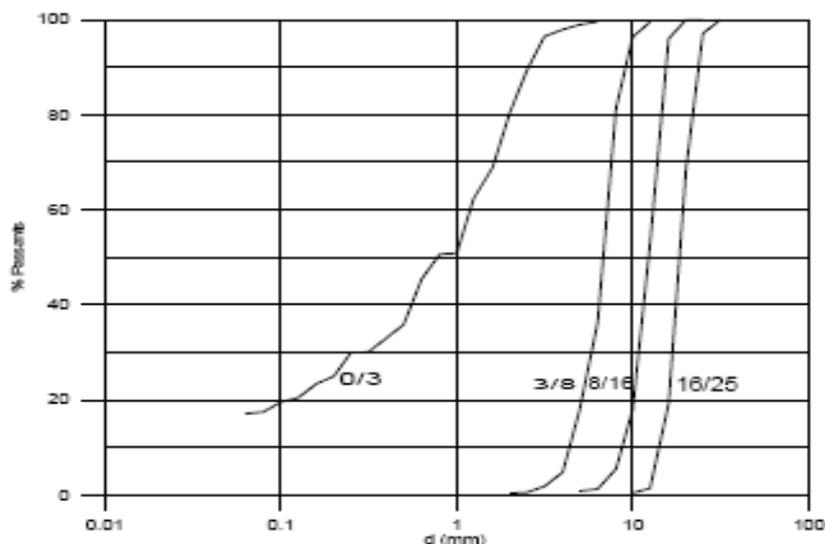


Figure 3.2 Courbes granulométriques des granulats Djebel Abiod.

La carrière de Djebel Abiod produit un sable avec un module de finesse grossier égal à 2.95 et avec de légères discontinuités (figures 3.2). L'analyse granulométrique a donné, une teneur en fines de 17%.

La norme P 18-541 (Baron et Ollivier, 1996), tenant compte des caractéristiques des gisements, fixe les limites pour le module de finesse de 1.8 à 3.2 et prescrit un module optimum de 2,5.

### 3.3.1.2 Forme des granulats : Coefficient d'aplatissement

La forme des granulats est déterminée par l'essai d'aplatissement conformément aux prescriptions de la norme NA 256. Le coefficient d'aplatissement caractérise la forme du granulat à partir de sa plus grande dimension et de son épaisseur. Plus le coefficient d'aplatissement est élevé, plus le granulat contient d'éléments plats. Une mauvaise forme à une incidence sur la maniabilité et favorise la ségrégation.

Les graviers présentent une forme favorable qui répond aux exigences de la norme P18-541 ( $\leq 30\%$ ). Les coefficients de forme des différents graviers sont récapitulés dans le tableau 3.2.

## 3.3.2 Caractéristiques physiques:

### 3.3.2.1 Masses volumiques:

Les masses volumiques apparentes et absolues des granulats sont déterminées conformément à la norme NA 255. Les granulats ont donné des masses volumiques (apparente et absolue) qui répondent aux spécifications de la norme NF EN 12620. La masse volumique apparente est comprise entre  $1300 \text{ kg/m}^3$  et  $1600 \text{ kg/m}^3$  et la masse volumique absolue est comprise entre  $2500 \text{ kg/m}^3$  et  $2700 \text{ kg/m}^3$ . Les résultats des masses volumiques obtenus pour les différents granulats, sont récapitulés sur le tableau 3.2.

### 3.3.2.2 Propreté des granulats:

Les granulats utilisés doivent être propre car la présence des impuretés peuvent perturber l'hydratation du ciment ou entraîner des défauts d'adhérence granulats-pâte, ce qui provoque une incidence sur la résistance du béton. La propreté traduit l'absence d'éléments fins indésirables dans les granulats. Elle désigne essentiellement la teneur en fines argileuses, dont la valeur doit être limitée.

- **Essai de propreté des graviers :**

Les graviers de carrière présentent une propreté satisfaisante puisque, selon les spécifications exigées par la norme P 18-541, le pourcentage d'éléments inférieurs à 0.5 mm doit être inférieur à 3 % dans le cas des granulats concassés.

- **Essai d'équivalent de sable :**

La détermination de la caractéristique « équivalent de sable » faite sur la fraction de granulat passant au tamis à mailles carrées de 5 mm, permet d'avoir une idée globale de la quantité et de la qualité des éléments fins contenus dans cette fraction en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les éléments fins (argile, impuretés...). L'équivalent de sable est le rapport multiplié par 100, de la hauteur de la partie sédimentée à la hauteur totale du flocculat et de la partie sédimentée et ceci conformément à la norme NA 455.

Pour les sables, le dispositif de contrôle est à double détente. Dans notre cas, les essais d'équivalent de sable ont donnés des résultats conformes à la norme suscitée, de ce fait, l'essai de bleu à la tache ( $V_{Bta}$ ) n'est pas exigé (Baron et Ollivier, 1996).

### 3.3.3 Caractéristiques mécaniques:

#### 3.3.3.1 Essai Micro-Deval :

L'essai permet de déterminer la résistance à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat. Cette résistance est caractérisée par le coefficient Micro-Deval qui représente la proportion d'éléments fins produits pendant l'essai. Plus le coefficient n'est faible, plus la résistance à l'usure des graviers est élevée. L'essai ainsi que le calcul du coefficient Micro-Deval ont été effectués conformément à la norme NA 457. Les graviers présentent une bonne résistance à l'usure, sachant que, en fonction des usages, la norme XP P 18-545 exige des valeurs maxima tolérées inférieures à 35 %.

#### 3.3.3.2 Essai Los Angeles :

La résistance à la fragmentation est déterminée par le coefficient Los Angeles. L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets métalliques normalisés et aux frottements réciproques dans la machine Los Angeles pendant 15 minutes. L'essai ainsi que le calcul du coefficient Los Angeles ont été effectués conformément à la norme NA 458. La carrière Djebel Abiod produit des graviers qui répondent aux exigences de la norme P 18-541 qui exige des valeurs maximales tolérées inférieures à 40 %.

Les résultats de tous les essais réalisés, sur les agrégats, concernant les caractéristiques géométriques et les caractéristiques physiques et mécaniques sont récapitulés sur le tableau 3.2 (Boukli Hacène et Ghomari, 2007).

Tableau 3.2 : Identification des propriétés des granulats de Djebel Abiod (Boukli Hacène et Ghomari, 2007)

Caractéristiques des granulats :	Classes granulaires			
	0/4	4/8	8/16	16/25
Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	1426	1355	1423	1374
Masse volumique absolue (kg/m <sup>3</sup> )	2550	2535	2540	2543
Equivalent de sable (%)	63.2	-	-	-
Essai de propreté (impuretés) (%)	-	1.92	1.3	0.73
Coefficient d'aplatissement (%)	-	19	8	8
Module de finesse	2.95	-	-	-
Teneur en fines (%)	17	-	-	-
Essai Los Angeles (%)	-	<u>4/6.3</u> 27	<u>6.3/10</u> 31	<u>10/14</u> 31
Essai Micro Deval (%)	-	<u>4/6.3</u> 15	<u>6.3/10</u> 11	<u>10/14</u> 8

### 3.4 Programme expérimental:

Sept classes élémentaires ont 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 dans le but de mesurer la compacité des différents mélanges (binaire, ternaire et quaternaire) en vue de déterminer l'optimum correspondant. Le détail du programme expérimental, dont l'approche méthodologique est consignée sur la figure 3.3, consiste à réaliser 204 essais. Il est défini comme suit :

- Mesure de la compacité des différentes classes élémentaires, pour ce faire 7 essais ont été effectués.
- Mesure de la compacité des mélanges binaires. 21 combinaisons de mélanges ont été préconisées ; ce qui a donné un nombre d'essais de 147.
- Mesure de la compacité des mélanges ternaires. Cinq mélanges ont été retenus après quelques essais préliminaires en vue de cerner les mélanges qui offrent les plus grandes compacités ; donc 18 essais ont été effectués.
- Mesure de la compacité des mélanges quaternaires. Huit mélanges ternaires ont été considérés parmi ceux qui offraient les plus grandes compacités et nous avons retenu 3 pourcentages de mélange ; ce qui a conduit à 32 essais.

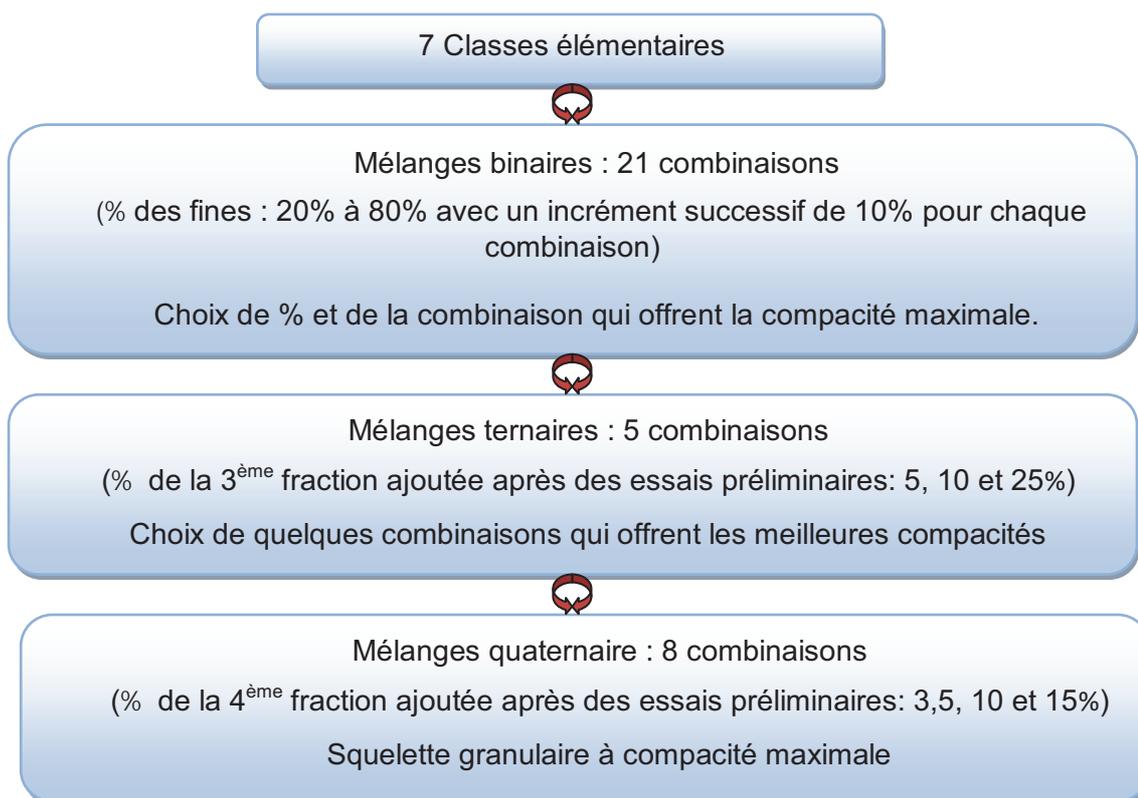


Figure 3.3 Approche pour la réalisation du programme expérimental

L'essai utilisé pour mesurer la compacité c'est « l'essai de compacité des fractions granulaires à la table à secousse ». Le banc d'essai utilisé est réalisé localement au laboratoire structures de la faculté de Technologie à l'université de Tlemcen (fig. 3.4) conformément aux recommandations de la méthode N°61 du laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) France (Bouterfas, 2012) (fig. 3.5).

### 3.5 Présentation de l'essai de compacité (Méthode d'essai n° 61 LCPC) :

L'essai consiste à mesurer la compacité des fractions granulaires lorsqu'elles sont soumises 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 d'en calculer la compacité.

Cet essai s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle utilisés dans le domaine du bâtiment et du génie civil. Il ne s'applique ni aux granulats tendres ( $LA > 50$ ) ni aux granulats grossiers ( $D_{max} > 31.5\text{mm}$ ).

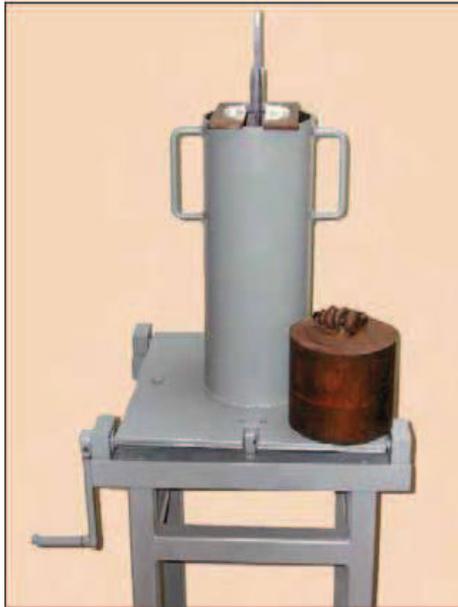


Figure 3.4 Table à choc Faculté de Technologie de Tlemcen



Figure 3.5 Table à choc LCPC, Paris

### 3.5.1 Appareillage:

Nous avons besoin avec la table à secousses d'un matériel d'usage courant pour effectuer les différentes mesures. Il s'agit de :

- Balance capable de peser des masses allant jusqu'à 10 kg avec une précision de  $\pm 1g$ ,
- étuve ventilée, capable de maintenir une température de  $(110 \pm 5) ^\circ C$ ,
- équipement nécessaire pour effectuer la réduction de l'échantillon au laboratoire en prise d'essai, conformément à la norme NF EN 932-2,
- jauge de profondeur permettant une lecture à  $\pm 0,1 \text{ mm}$ .

#### 3.5.1.1 Table à secousses:

La table comprend une partie fixe constituée d'un châssis en acier solidaire d'un socle massif formant un lest (environ 100 kg), et sur lequel sont montées deux parties mobiles qui sont, d'une part, une table plane en acier, articulée au châssis sur l'un de ses cotés par l'intermédiaire d'une charnière et, d'autre part, un arbre à came entraîné en rotation par une manivelle. La came est en acier dur. Sa forme permet une chute libre de la table sur une hauteur de  $1 \pm 0,05 \text{ cm}$ .

Du côté opposé à la charnière, la table prend appui sur le châssis par l'intermédiaire de deux épaulements métalliques supportant l'arbre à came. Une pièce d'usure en laiton, fixée sous la table, assure le contact de cette dernière avec la came (fig. 3.6).

Afin de garder l'intégrité de la came, et ainsi garantir la hauteur de chute de la table, la pièce d'usure sera changée régulièrement, avant que la came n'entre en contact direct avec la table.

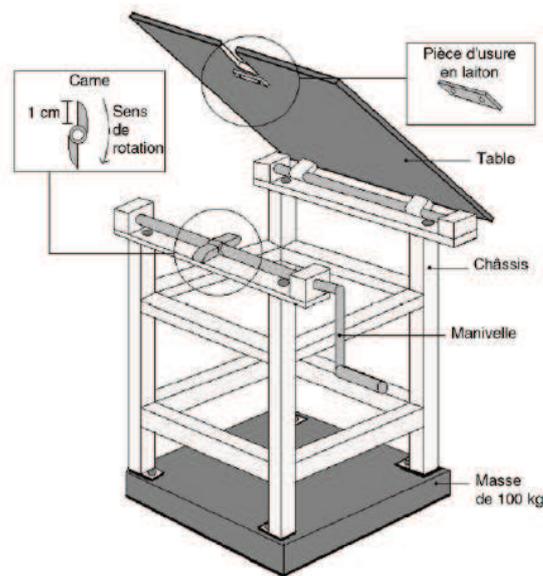


Figure 3.6 Schéma de la table à secousse.

### 3.5.1.2 Moule:

Le moule est constitué d'un cylindre en acier creux d'une profondeur de  $600 \pm 10$  mm et d'un diamètre intérieur de  $160 \pm 2$  mm. Afin que la paroi du cylindre puisse être considérée comme indéformable, son épaisseur sera d'au moins 4 mm. Pour notre cas le moule est une partie intégrante de la table.

### 3.5.1.3 Piston :

Le piston est constitué d'un cylindre en acier plein, de diamètre extérieur égal au diamètre intérieur du moule moins 1 mm de façon à assurer son libre coulisement à l'intérieur du moule, et d'une masse qui, calculée en fonction du diamètre intérieur du moule et de la densité du métal, doit permettre d'appliquer sur le matériau une pression de 10 kPa (à titre indicatif, cette masse est égale à 20 kg). Il est conseillé d'équiper ce piston d'une poignée afin d'en faciliter la manipulation, mais la masse de cette poignée doit être intégrée dans le calcul de la pression.

### 3.5.1.4 Cales :

Les cales sont des plaques métalliques rigides à faces planes et parallèles. Leur longueur doit être supérieure au diamètre du moule.

## 3.5.2 Mode opératoire :

La préparation du matériau pour l'essai de compacité se fait au laboratoire sur un échantillon prélevé dont la masse doit être au moins égale à 30 kg. Dans le cas où la fraction testée serait un 0/D, nous devons :

- couper par lavage au tamis de 63 microns.
- sécher le matériau à l'étuve à  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ , jusqu'à masse constante.

- réduire aux dimensions d'une prise d'essai l'échantillon de laboratoire préparé conformément à la norme NF EN 932-2. La prise d'essai doit consister en deux éprouvettes, d'une masse de  $(7 \text{ kg} \pm 3 \text{ g})$  chacune.

Ensuite, nous vérifions la profondeur à vide du moule. Ce dernier doit être nettoyé soigneusement à l'air comprimé puis nous descendons le piston au fond du moule vide en s'assurant que la descente est complète en positionnant les deux cales en haut du moule et, à l'aide de la jauge de profondeur, nous mesurons la distance entre le sommet des cales et le sommet du piston. Cette mesure est effectuée en deux points symétriques et les lectures de profondeurs, notées  $H_{v1}$  et  $H_{v2}$  sont faites à 0,1 mm près. La jauge, les cales et le piston sont retirées par la suite et nous calculons la profondeur moyenne  $H_v$  (en cm).

L'échantillon est mis en place dans le moule en coupant la première éprouvette en trois parties de masses à peu près équivalentes, que nous répartissons dans des récipients différents. Nous versons une première fraction dans le moule et nous appliquons 20 secousses (le rythme des secousses est d'environ 2 par seconde). Nous répétons cette opération avec la deuxième, puis la dernière fraction et nous descendons le piston dans le moule que nous posons sur les granulats. Nous appliquons par la suite, 40 nouvelles secousses. Nous positionnons les deux cales en haut du moule et, à l'aide de la jauge de profondeur, nous procédons à la mesure de la distance entre le sommet des cales et le sommet du piston (figure 3.7). Cette mesure est effectuée en deux points symétriques. Les valeurs lues, désignées  $H_{c1}$  et  $H_{c2}$ , sont précises à 0,1 mm près et nous calculons en dernier la moyenne arithmétique  $H_c$  (en cm).

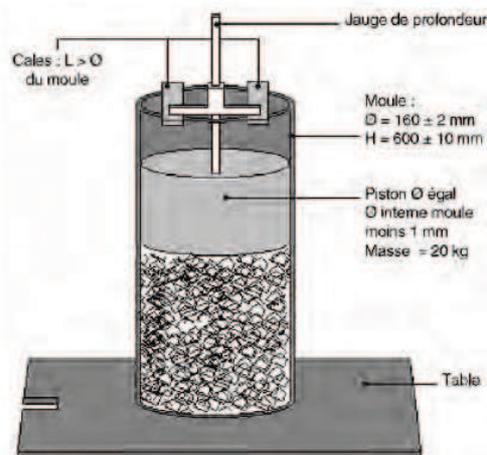


Figure 3.7 Partie supérieure de la table à secousses.

### 3.5.3 Expression des résultats :

#### 3.5.3.1 Calcul du volume apparent du matériau :

Le volume apparent occupé en fin d'essai par le matériau est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$V = S \cdot h \text{ (en cm}^3\text{)}$$

avec :

$$S = \pi D^2 / 4 \text{ (} D = \text{diamètre du cylindre en cm) et } h = H_v - H_c \text{ (en cm).}$$

### 3.5.3.2 Calcul de la compacité :

Pour chaque éprouvette, la compacité est calculée selon la formule :

$$C = \rho_a / \rho_{rd}$$

avec :  $\rho_{rd}$  = masse volumique réelle au sens de la norme NF EN 1097-6 (g/cm<sup>3</sup>),

et  $\rho_a$  = masse volumique apparente du matériau, calculée selon l'expression suivante :

$$\rho_a = M / V \text{ avec } M : \text{masse de l'échantillon en (g).}$$

$$V : \text{volume apparent calculé (cm}^3\text{)}$$

Le résultat de l'essai est la valeur moyenne des compacités obtenues sur deux (02) éprouvettes. Il sera exprimé avec 3 décimales.

Selon le mode opératoire, la réalisation de deux essais est recommandée dans un souci de reproductibilité. La valeur finale de la compacité est donc la moyenne des deux essais.

Bouterfas, 2012 a réalisé une dizaine d'essais de répétabilité et de reproductibilité pour chaque constituant (agrégat) au lieu des trois essais recommandés. Les valeurs des écarts-types 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 et c'est la raison pour laquelle nous n'avons effectué, pour l'ensemble de nos essais expérimentaux, qu'un seul essai pour chacune des combinaisons au lieu de deux essais recommandés.

A la fin de l'essai un formulaire doit être renseigné par l'opérateur (voir Annexe), regroupant les résultats de l'essai.

## 3.6 Résultats expérimentaux :

### 3.6.1 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 le tableau suivant :

Tableau 3.3 Valeur de compacité des classes élémentaires

Fractions usuelles		Compacité
D min	D max	
0.315	1.25	0.626
1.25	4	0.591
4	6.3	0.551
6.3	10	0.554
10	16	0.557
16	20	0.537
20	25	0.529

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.

### 3.6.2 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. 21 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 le tableau 3.4 ainsi que sur les figures 3.8 et 3.9.

Tableau 3.4 Compacités expérimentales des mélanges binaires

% fins	0,315-1,25/1,25-4	0,315-1,25/4-6,3	0,315-1,25/6,3-10	0,315-1,25/10-16	0,315-1,25/16-20	0,315-1,25/20-25	1,25-4/4-6,3
0	0.591	0.551	0.554	0.557	0.537	0.529	0.551
20	0,6363	0,5994	0,6111	0,6422	0,6154	0,6194	0,5754
30	0,6541	0,645	0,65884	0,698	0,6824	0,6745	0,5912
40	0,6652	0,6928	0,7041	0,7352	0,7241	0,7154	0,6092
50	0,6767	0,6953	0,7091	0,7312	0,7222	0,7203	0,6145
60	0,669	0,6852	0,6975	0,7247	0,7154	0,7124	0,6198
70	0,656	0,665	0,6697	0,6988	0,6845	0,689	0,6098
80	0,6433	0,6395	0.651	0,6745	0,659	0,66	0,5985
100	0.626	0.626	0.626	0.626	0.626	0.626	0.591
% fins	1,25-4/6,3-10	1,25-4/10-16	1,25-4/16-20	1,25-4/20-25	4-6,3/6,3-10	4-6,3/10-16	4-6,3/16-20
0	0.554	0.557	0.537	0.529	0.554	0.557	0.537
20	0,5895	0,6047	0,5891	0,5812	0,5595	0,5822	0,5798
30	0,608	0,6358	0,64584	0,629	0,5696	0,5978	0,6049
40	0,6179	0,6548	0,6538	0,6606	0,5745	0,609	0,6214
50	0,6207	0,64954	0,6512	0,6565	0,5728	0,6112	0,6189
60	0,6164	0,64451	0,64215	0,6485	0,5694	0,6075	0,6125
70	0,6127	0,6284	0,6345	0,6261	0,562	0,5922	0,595
80	0,6012	0,605	0,61457	0,6095	0,5578	0,5814	0,5785
100	0.591	0.591	0.591	0.591	0.551	0.551	0.551
% fins	4-6,3/20-25	6,3-10/10-16	6,3-10/16-20	6,3-10/20-25	10-16/16-20	10-16/20-25	16-20/20-25
0	0.529	0.557	0.537	0.529	0.537	0.529	0.529
20	0.5762	0,558	0,5547	0,5612	0,5465	0,542	0,5325
30	0.6025	0,56	0,5665	0,5725	0,5547	0,552	0,5342
40	0.6162	0,562	0,5727	0,5801	0,5636	0,5622	0,5375
50	0.6141	0,5615	0,5711	0,5812	0,5651	0,5621	0,5391
60	0.6101	0,5609	0,5668	0,5809	0,562	0,5605	0,539
70	0.594	0,5574	0,5643	0,5758	0,5602	0,5591	0,5388
80	0.5745	0,5529	0,5611	0,5678	0,5592	0,5582	0,5387
100	0.551	0.554	0.554	0.554	0.557	0.557	0.537

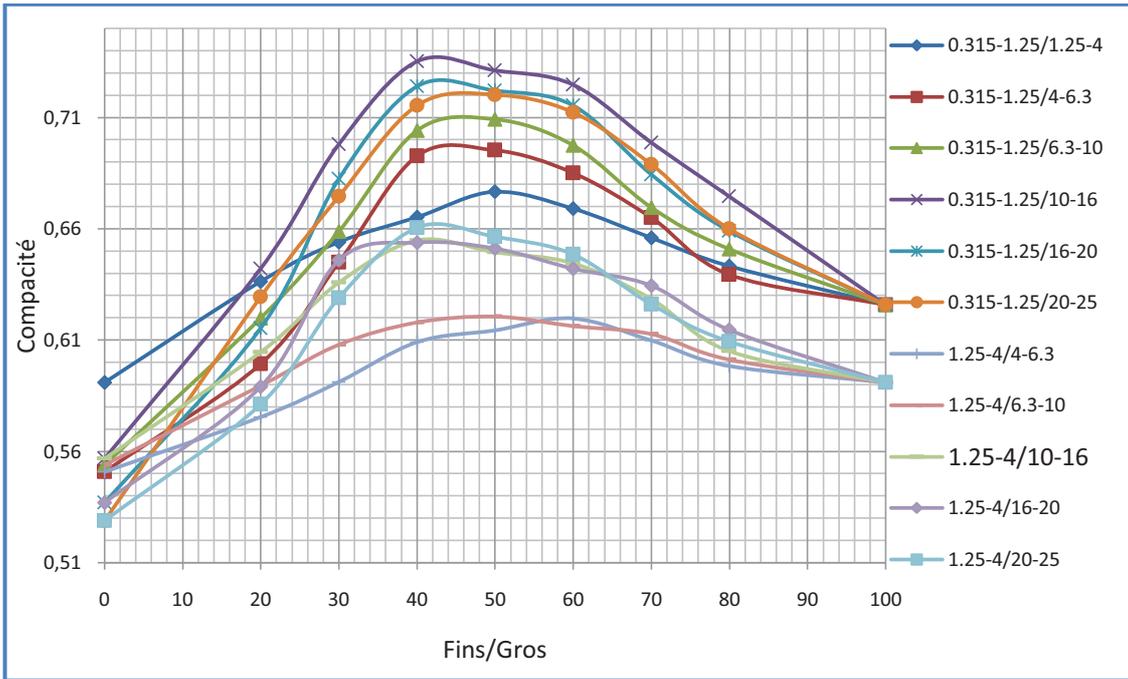


Figure 3.8 Variation de la compacité en fonction des proportions des grains fins pour des mélanges binaires (sable+gravier).

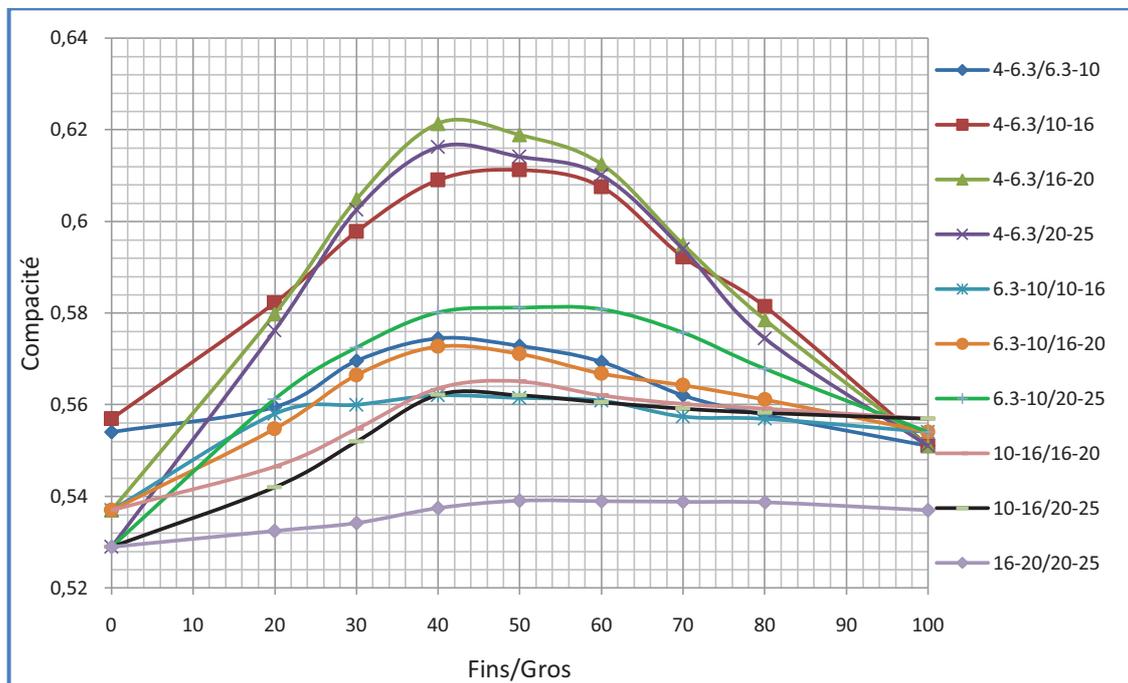


Figure 3.9 Variation de la compacité en fonction des proportions des grains fins pour des mélanges binaires (gravier).

Sur la figure 3.8, nous présentons les résultats de compacités obtenus pour les différentes combinaisons étudiées concernant les mélanges binaires (sable+gravier). 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%.

La figure 3.9 présente les courbes de mélanges binaires uniquement pour les classes de graviers, nous remarquons bien que l'optimum se trouve à un taux d'introduction des grains fins  $\leq 50\%$  et le mélange qui a donné la compacité maximale est celui de (40% de la classe 4/6.3 et 60% pour la classe 16/20) avec un optimum de 62%.

Nous remarquons, aussi, dans la figure 3.8 que la présence du sable donne au mélange une meilleure compacité tandis que son absence (figure 3.9) contribue à une compacité relativement faible.

Pour tous les mélanges binaires où le sable est introduit à différents pourcentages [20% à 80%], nous avons balayé une large gamme de rapports G/S qui varient de 0.25 à 4 ; c'est le rapport G/S = 1.5 qui nous a offert la meilleure compacité pour la majorité des mélanges binaires précités.

Les résultats de la littérature (Sedran, 1994) montrent que l'optimum se situe à 30%, tandis que nos résultats expérimentaux donnent un optimum à 40%, cette différence est due à l'origine et la nature des granulats utilisés.

### 3.6.3 Compacité des mélanges ternaires :

Sur la base des résultats des mélanges binaires, nous avons préconisé de garder l'optimum des mélanges binaires (40% sable 0.315/1.25 et 60% gravillon 10/16) comme base de travail et nous avons balayé tous les pourcentages en ajoutant la troisième fraction (5, 10, 25, 40, 60 et 80%) pour localiser l'optimum (tableau 3.5).

Tableau 3.5 compacité de mélanges ternaire préliminaire

% fin	Sable 0,315/1,25	Gravillon 10/16	Gravillon 1,25/4	Compacité
5	38,09	57,15	4,76	0,7203
10	36,36	54,54	9,1	0,728
25	32	48	20	0,7147
40	28,57	42,86	28,57	0,711
60	25	37,5	37,5	0,7014
80	22,22	33,33	44,45	0,6975

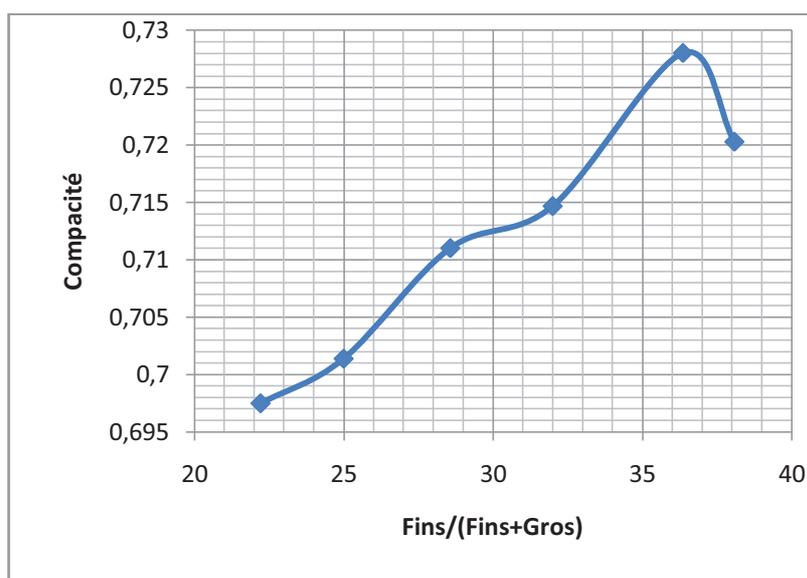


Figure 3.10 Variation de la compacité de mélange préliminaire

D'après les résultats trouvés (figure 3.10), nous avons pu affiner l'intervalle de variation des plus grandes compacités pour éliminer tous les pourcentages inutiles. Ce qui nous a permis de garder trois pourcentages pour la troisième fraction granulaire : 5, 10, 25 pour les autres mélanges. Cinq mélanges ont été sélectionnés et nous avons effectué 18 essais.

Tableau 3.6 Compacités des mélanges ternaires retenus

N° de mélange		1	2	3	4	5
% Mélanges	G/S	(0,315-1,25/10-16) +1,25-4	(0,315-1,25/10-16) +4-6,3	(0,315-1,25/10-16) +6,3-10	(0,315-1,25/10-16) +16-20	(0,315-1,25/10-16) +20-25
(38.1+57.14)+4.76	1.62	0,7203	0,7222	0,7184	0,6947	0,6912
(36.36+54.54)+9.1	1.75	0,728	0,7299	0,728	0,7018	0,6983
(32+48)+20	2.12	0,7147	0,7165	0,7145	0,667	0,658

Le mélange qui nous a donné la valeur maximale de la compacité (73 %) est celui dont la composition est de 36% de sable 0.315-1.25 + 9% de gravier 4-6.3 + 55% de gravier 10-16. Pour l'ensemble des mélanges étudiés, c'est l'ajout des 10% de la troisième fraction qui donne la plus grande compacité dont le G/S = 1,75 (figure 3.11).

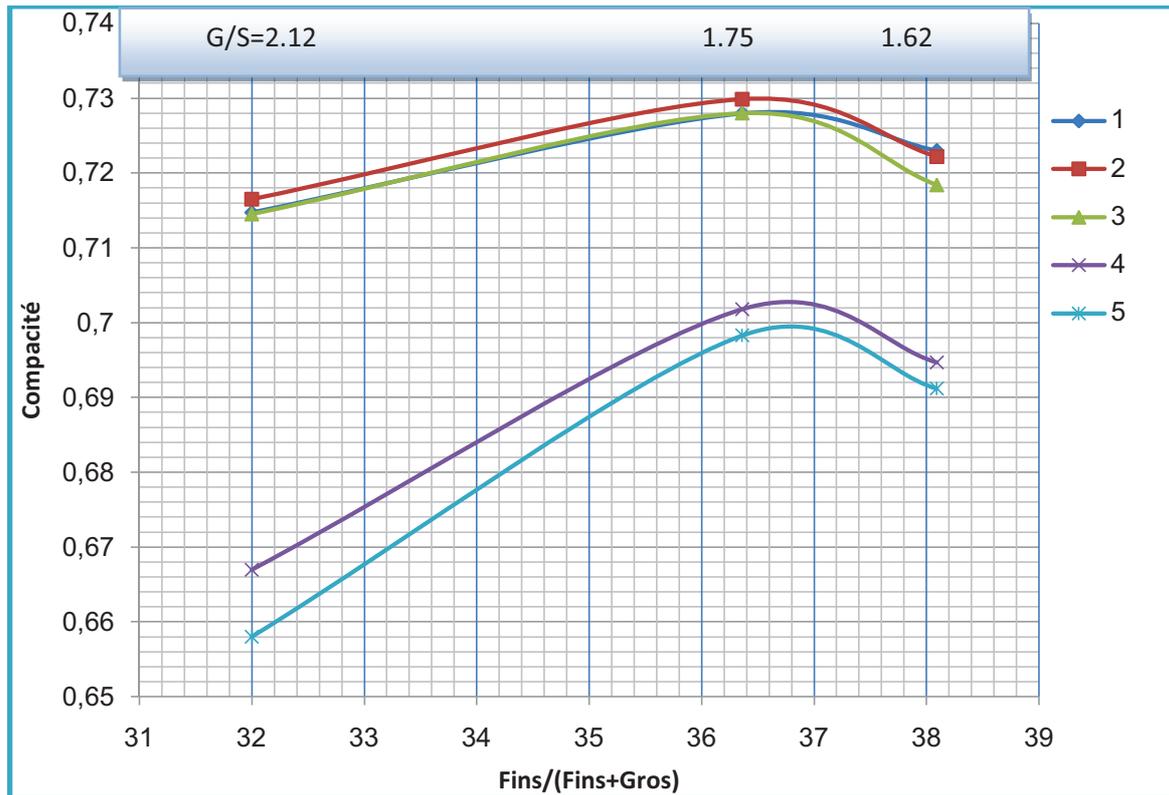


Figure 3.11 Variation de la compacité des mélanges ternaires.

Pour les mélanges 1, 2 et 3 (figure 3.11), nous remarquons que les valeurs des compacités sont très proches entre elles car les troisièmes fractions ajoutées sont des classes intermédiaires entre les classes granulaires du mélange binaire choisi, donc elles contribuent au réarrangement des grains et diminuent l'effet de paroi et de desserrement. Concernant les mélanges 4 et 5, il est clair que la diminution des valeurs des compacités est due à l'effet de paroi des troisièmes fractions ajoutées.

### 3.6.4 Compacité des mélanges quaternaires :

Nous avons suivi la même démarche pour les mélanges quaternaires ; mais cette fois nous avons pris le mélange ternaire N° 2 qui a présenté la compacité optimale pour deux fractions de sable 36% et 38%, auxquelles nous ajoutons la quatrième fraction à un pourcentage variant de : 3, 5, 10, et 15% (voir tableau 3.7). Huit mélanges ont donc été étudiés avec 24 essais au total.

Tableau 3.7 compacités des mélanges quaternaires

N° de mélange		1	2	3	4
% Mélanges	G/S	(0,315-1,25/10-16/4-6.3) +1,25-4	(0,315-1,25/10-16/4-6,3) +6,3-10	(0,315-1,25/10-16/4-6.3) +16-20	(0,315-1,25/10-16/4-6.3) +20-25
(37+55.47+4.62)+2.91	1.70	0.7187	0.7308	0.7231	0.7145
(36.28+54.42+4.54)+4.76	1.75	0.7203	0.7319	0.7241	0.7165
(34.63+51.94+4.33)+9.1	1.88	0.7258	0.7274	0.7205	0.7155
(33.13+49.68+4.14)+13.05	2.01	0.719	0.7201	0.7154	0.711

N° de mélange		5	6	7	8
% Mélanges	G/S	(0,315-1,25/10-16/4-6,3) +1,25/4	(0,315-1,25/10-16/4-6,3) +6,3/10	(0,315-1,25/10-16/4-6.3) +16-20	(0,315-1,25/10-16/4-6.3) +20-25
(35.3+52.95+8.84)+2.91	1.83	0.7318	0.7424	0.7317	0.7298
(34.63+51.94+8.67)+4.76	1.88	0.7338	0,7496	0.7319	0.7311
(33.05+49.58+8.27)+9.1	2.02	0.7277	0.7384	0.7314	0.7288
(31.62+47.42+7.91)+13.05	2.16	0.7212	0.7294	0.7266	0.7225

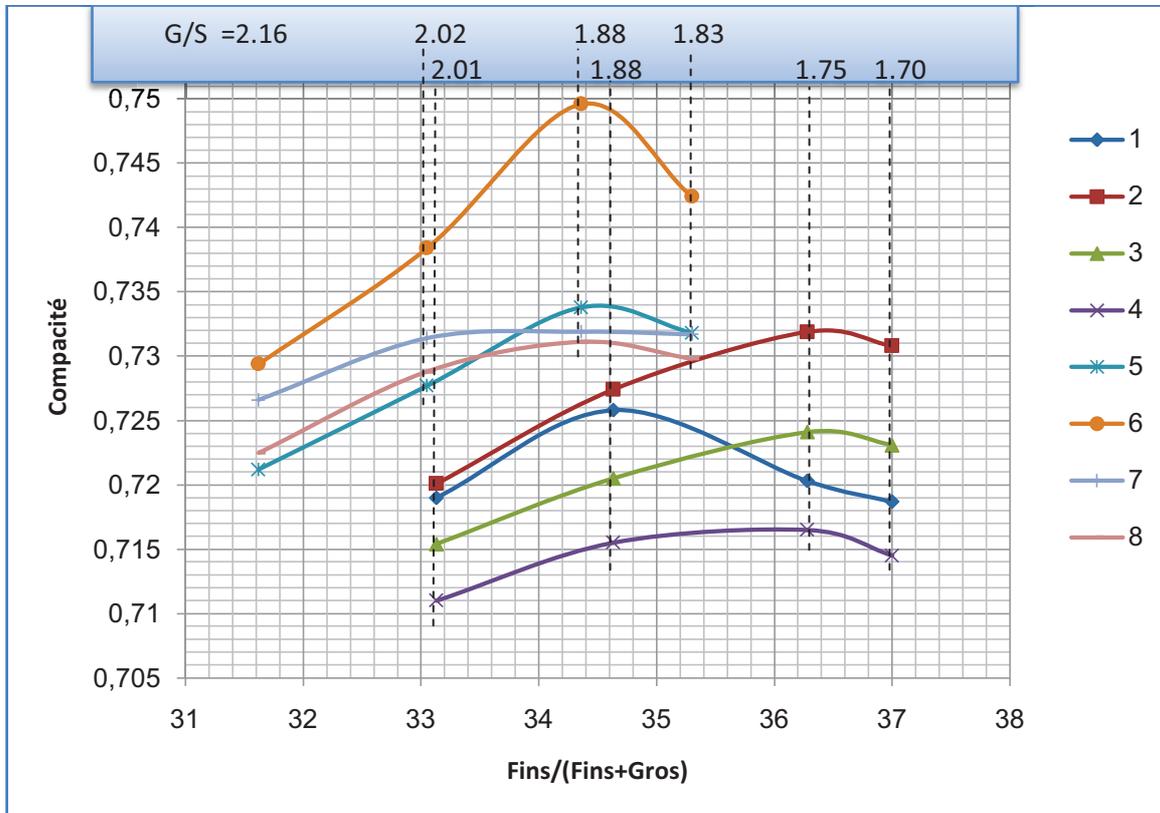


Figure 3.12 variation de la compacité des mélanges quaternaires.

La figure 3.12 montre que la compacité optimale obtenue pour les différents mélanges quaternaires, correspond à un pourcentage de 5% de la quatrième fraction ajoutée au mélange ternaire. La compacité maximale (75 %) est obtenue pour un rapport G/S égal à 1,88. C'est donc, les mélanges quaternaires qui ont offert les meilleures compacités.

La formulation finale qui à donné la compacité maximale est la suivante (34.62% Sable 0.315/1.25 + 8.66% de gravillon 4/6.3 + 4.76% de gravier 6.3/10 + 51.94% de gravier 10/16).

### 3.7 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 (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:

- Les masses volumiques réelles des différents constituants.
- la granulométrie des différents constituants;
- la compacité de l'empilement individuel de chaque constituant;
- l'indice de compaction du constituant.

Les données d'entrée du logiciel sont résumées sur le tableau 3.8.

Tableau 3.8 Les données d'entrée du logiciel (René LCPC)

Diamètre des tamis en (mm)	Granulométrie en Tamisat 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 réelle (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						

Les tableaux 3.9, 3.10 et 3.11 ainsi que les figures 3.13, 3.14 et 3.15 présentent quelques résultats théoriques et expérimentaux pour 12 mélanges binaires, 5 ternaires et 8 quaternaires.

Tableau 3.9 Compacités expérimentales et théoriques des mélanges binaires.

fin %	0.315-1.25/1.25-4		0,315-1,25/4-6,3		0.315-1.25/6.3-10		0.315-1.25/10-16	
	Exp	Théo	Exp	Théo	Exp	Théo	Exp	Théo
0	0,591	0,591	0,551	0,551	0,554	0,554	0,557	0,557
20	0,6363	0,6381	0,5994	0,6284	0,62	0,643	0,6422	0,6533
30	0,6541	0,6569	0,645	0,6714	0,65884	0,6934	0,698	0,7085
40	0,6652	0,672	0,6928	0,7058	0,7041	0,7301	0,7352	0,7453
50	0,6767	0,675	0,6953	0,7112	0,7091	0,7286	0,7312	0,7383
60	0,669	0,6701	0,6852	0,6981	0,6975	0,7099	0,7247	0,7163
70	0,656	0,661	0,665	0,6803	0,6697	0,688	0,6988	0,6923
80	0,6433	0,65	0,6395	0,6615	0,651	0,6662	0,6745	0,6687
100	0,626	0,626	0,626	0,626	0,626	0,626	0,626	0,626
fin %	1.25-4/4-6.3		1.25-4/6.3-10		1.25-4/10-16		1.25-4/16-20	
	Exp	Théo	Exp	Théo	Exp	Théo	Exp	Théo
0	0,551	0,551	0,554	0,554	0,557	0,557	0,537	0,537
20	0,5754	0,5852	0,5895	0,6084	0,6047	0,6239	0,5891	0,6163
30	0,5912	0,6008	0,608	0,635	0,6358	0,6584	0,64584	0,66
40	0,6092	0,6125	0,6179	0,6531	0,6548	0,6806	0,6538	0,6922
50	0,6145	0,6178	0,6207	0,6546	0,64954	0,6776	0,6512	0,6904
60	0,6198	0,6168	0,6164	0,6451	0,64451	0,6618	0,64215	0,6718
70	0,6098	0,6118	0,6127	0,6316	0,6284	0,643	0,6345	0,65
80	0,5985	0,6046	0,6012	0,6169	0,605	0,6239	0,61457	0,6282
100	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591
fin %	4-6.3/10-16		4-6.3/16-20		4-6.3/20-25		6.3-10/10-16	
	Exp	Théo	Exp	Théo	Exp	Théo	Exp	Théo
0	0,557	0,557	0,537	0,537	0,529	0,529	0,557	0,557
20	0,5822	0,5947	0,5798	0,594	0,5762	0,5929	0,558	0,5705
30	0,5978	0,6103	0,6049	0,6217	0,6025	0,6258	0,559	0,5749
40	0,609	0,6172	0,6214	0,6382	0,6162	0,647	0,562	0,577
50	0,6112	0,6132	0,6189	0,634	0,6141	0,6428	0,5615	0,5766
60	0,6075	0,6029	0,6125	0,6194	0,6101	0,6261	0,5609	0,5742
70	0,5922	0,5903	0,595	0,602	0,594	0,6067	0,5574	0,5703
80	0,5814	0,5771	0,5785	0,5845	0,5745	0,5874	0,5569	0,5654
100	0,551	0,551	0,551	0,551	0,551	0,551	0,554	0,554

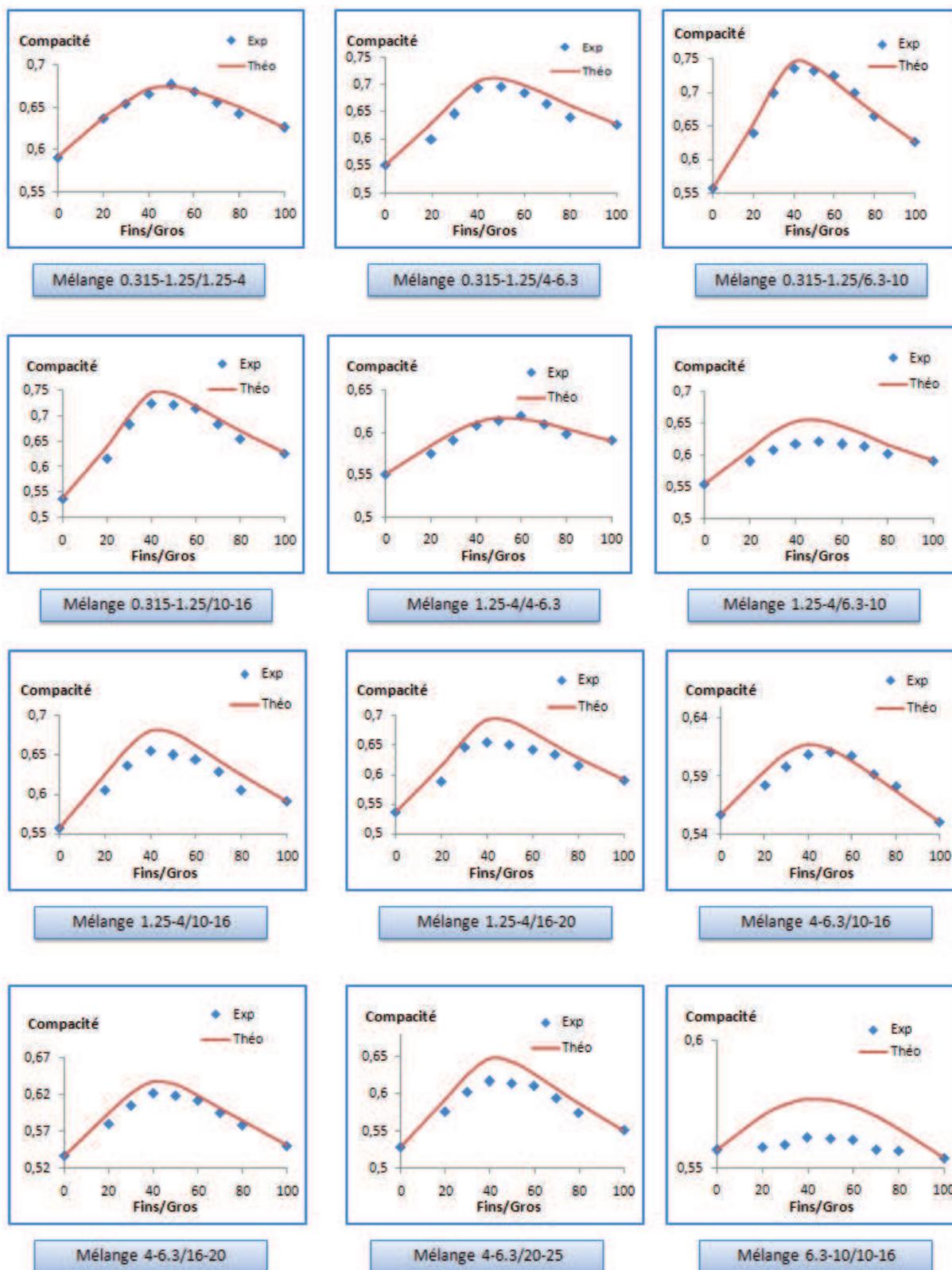


Figure 3.13 Variation des compacités expérimentales et théoriques pour des mélanges binaires en fonction des diamètres des grains fins.

Tableau 3.10 Compacités expérimentale et théoriques des mélanges ternaires.

N° de mélange		1		2		3		4		5	
% Mélanges	G/S	(0,315-1,25/10-16) +1,25-4		(0,315-1,25/10-16) +4-6,3		(0,315-1,25/10-16) +6,3-10		(0,315-1,25/10-16) +16-20		(0,315-1,25/10-16) +20-25	
		Exp	Théo	Exp	Théo	Exp	Théo	Exp	Théo	Exp	Théo
(38.1+57.14)+4.76	1.62	0,7203	0,749	0,7222	0,7477	0,7184	0,7442	0,6947	0,7452	0,6912	0,7475
(36.36+54.54)+9.1	1.75	0,728	0,751	0,7299	0,7491	0,728	0,7419	0,7018	0,7439	0,6983	0,7467
(32+48)+20	2.12	0,7147	0,7498	0,7165	0,7469	0,7145	0,73	0,667	0,7349	0,658	0,7425

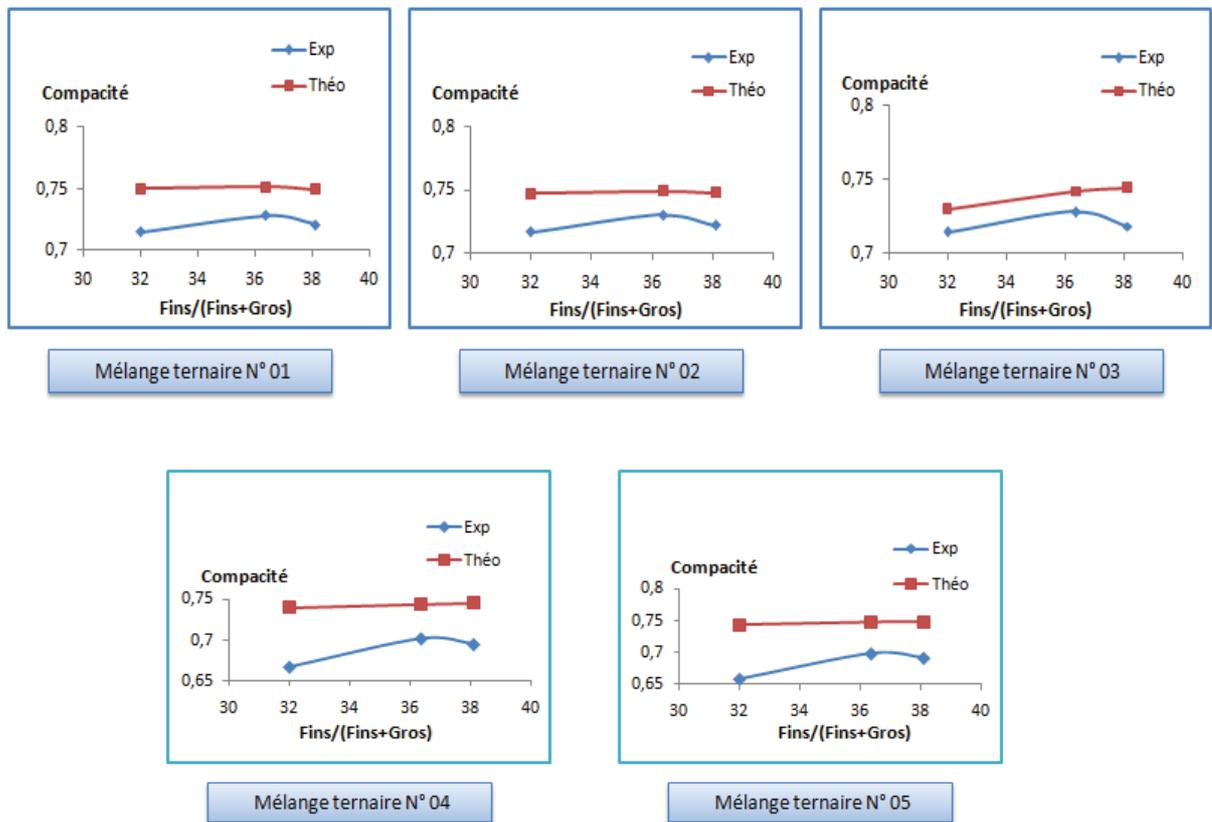


Figure 3.14 Variation des compacités expérimentales et théoriques pour des mélanges ternaires en fonction des diamètres des grains fins.

Tableau 3.11 Compacités expérimentales et théoriques des mélanges quaternaires.

N° de mélange		1		2		3		4	
% Mélanges	G/S	(0,315-1,25/10-16/4-6,3) +1,25/4		(0,315-1,25/10-16/4-6,3) +6,3/10		(0,315-1,25/10-16/4-6,3) +16-20		(0,315-1,25/10-16/4-6,3) +20-25	
		C exp	C théo	C exp	C théo	C exp	C théo	C exp	C théo
(37+55.47+4.62)+2.91	1.70	0.7187	0.7499	0.7308	0.7468	0.7231	0.7477	0.7145	0.7485
(36.28+54.42+4.54)+4.76	1.75	0.7203	0.751	0.7319	0.7459	0.7241	0.7474	0.7165	0.7488
(34.63+51.94+4.33)+9.1	1.88	0.7258	0.7525	0.7274	0.743	0.7205	0.7459	0.7155	0.7489
(33.13+49.68+4.14)+13.05	2.02	0.719	0.7526	0.7201	0.7391	0.7151	0.7435	0.711	0.748
N° de mélange		5		6		7		8	
% Mélanges	G/S	(0,315-1,25/10-16/4-6,3) +1,25/4		(0,315-1,25/10-16/4-6,3) +6,3/10		(0,315-1,25/10-16/4-6,3) +16-20		(0,315-1,25/10-16/4-6,3) +20-25	
		C exp	C théo	C exp	C théo	C exp	C théo	C exp	C théo
(35.3+52.95+8.84)+2.91	1.83	0.7318	0.7511	0.7424	0.7478	0.7317	0.749	0.7298	0.7498
(34.63+51.94+8.67)+4.76	1.88	0.7338	0.7512	0.7496	0.751	0.7319	0.7489	0.7311	0.7501
(33.05+49.58+8.27)+9.1	2.02	0.7277	0.7531	0.7384	0.7432	0.7314	0.7471	0.7288	0.7501
(31.62+47.42+7.91)+13.05	2.16	0.7212	0.7527	0.7294	0.7386	0.7266	0.7446	0.7225	0.7492

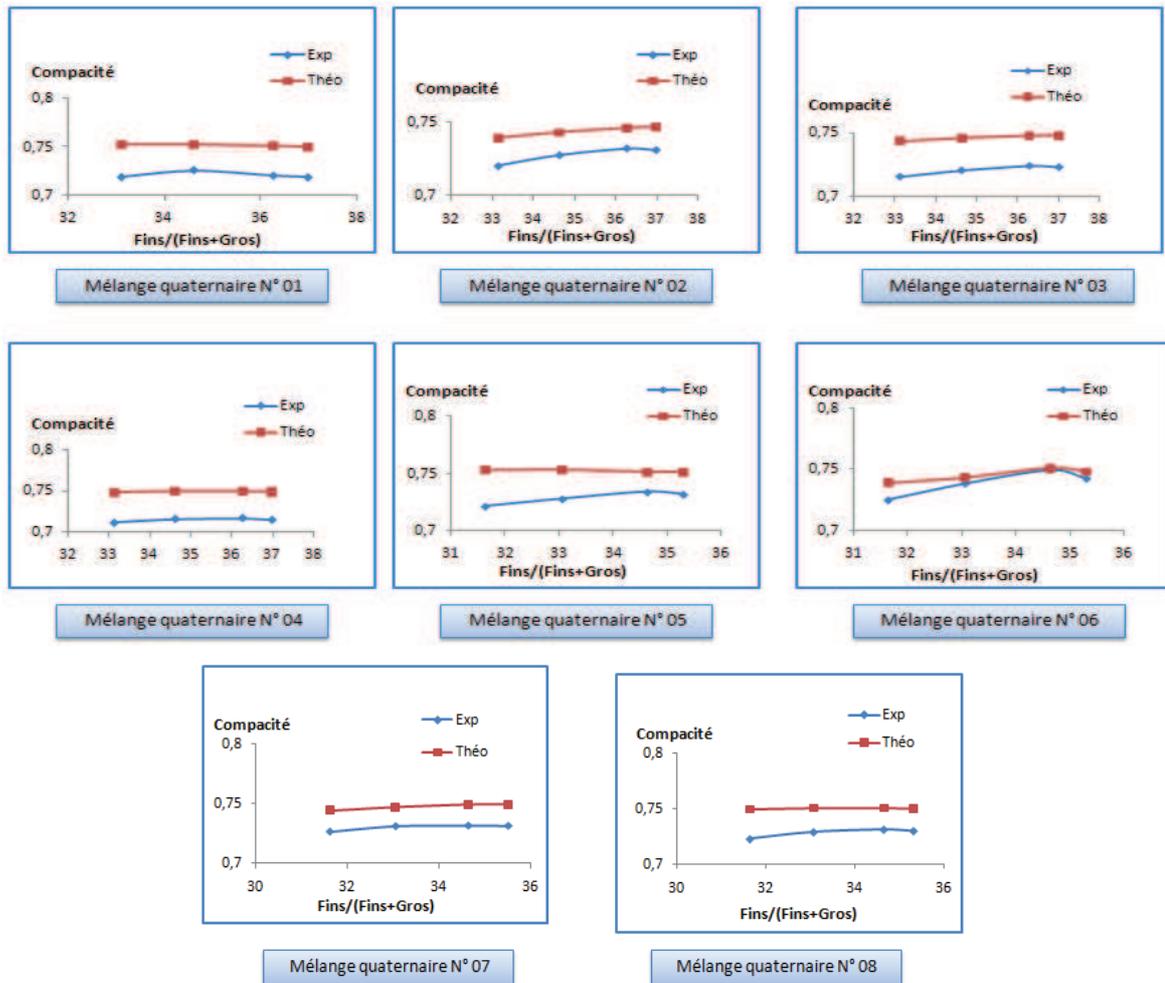


Figure 3.15 Variation des Compacités expérimentales et théoriques pour des mélanges quaternaires en fonction des diamètres des grains fins.

Les figures 3.13, 3.14 et 3.15 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 expérimentaux. Ce pourcentage qui est très acceptable nous laisse à penser que l'utilisation du modèle d'empilement compressible constitue un bon outil d'étude des empilements granulaires.

### **3.8 Conclusion:**

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes caractéristiques des granulats utilisés, ainsi que le programme expérimental qui est basé sur une étude effectuée au niveau de notre laboratoire de structures de la Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen, en utilisant un banc d'essai réalisé localement conforme à la méthode n° 61 LCPC. Ce dernier, nous a permis de mesurer la compacité des fractions granulaires lorsqu'elle est soumise dans un cylindre à des conditions de serrage qui sont considérés comme étant les plus favorables par rapport au serrage des agrégats sans provoquer leur attrition.

L'essai que nous avons sélectionné consiste finalement à mesurer le volume d'une masse de 7 kg de granulats, mise en place dans un cylindre en trois couches, chaque couche étant soumise à une série de chocs, la dernière étant en plus comprimée par un piston exerçant une pression de 10 kPa. Cet essai serait exécuté deux fois pour les coupures granulaires courantes, la valeur moyenne sera retenue comme compacité de la fraction granulaire. Par rapport au mode opératoire initialement utilisé au LCPC (compression + vibration sous 10 kPa), la répétabilité obtenue est du même ordre de grandeur, mais la reproductibilité sera probablement meilleure, compte tenu de l'absence de dispositif vibrant nécessitant une vérification fréquente.

Sur l'ensemble des mélanges effectués, la formulation finale qui a donné la compacité maximale est la suivante: (34.63% Sable 0.315/1.25 + 8.67% de gravillon 4/6.3 + 4.76% de gravier 6.3/10 + 51.94% de gravier 10/16) avec un G/S de 1.88. Donc c'est le mélange quaternaire qui nous a donné la compacité maximale (75%) sur une étendue granulaire de (0.315-16) avec une discontinuité au niveau de la classe (1.25-4). Ces résultats montrent bien que nous pouvons obtenir des compacités acceptables sur un mélange discontinu ou aussi la classe granulaire (16-25) a été éliminé, ceci peut être d'un intérêt surtout pour les bétons fortement ferrailés.

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.

## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'une des percées majeures dans le domaine de la formulation des mélanges de béton, fut l'introduction des méthodes théoriques. En effet, elles permettent de minimiser la porosité (ou maximiser la compacité) du squelette granulaire en optimisant les proportions des différentes classes granulaires (sable, gravier).

De Larrard et son équipe ont développé un modèle récent de compacité qui s'appelle « modèle d'empilement compressible (MEC) », qui permet de déterminer théoriquement la compacité réelle d'un mélange granulaire. Le modèle est basé sur l'optimisation de la compacité d'un empilement de grains de tailles différentes. La combinaison des différents constituants permet de produire un mélange sec à compacité optimale pour une maniabilité donnée. La vérification des résultats théoriques obtenus s'est effectuée grâce à un programme expérimental utilisant plusieurs modes de mise en place : versement, piquage, vibration et vibration+compression à 10KPa. Le modèle a donc été validé et a fait l'objet d'un logiciel de calcul (René LCPC) qui nécessite comme données d'entrée, les compacités des classes granulaires serrées, les masses volumiques réelles de chaque classe ainsi que l'indice de serrage qui définit le mode opératoire utilisé.

On peut mesurer la compacité réelle au laboratoire par différents procédés de mise en place. Les méthodes qui conduisent à un indice de serrage très élevé sont préférables car elles sont compatibles avec l'application des bétons fermes. Donc, il est conseillé d'utiliser la méthode de (vibration + compression 10KPa) afin d'assurer un serrage maximum (indice de serrage égal à 9).

Une table à secousses, inspirée du modèle du LCPC, a été fabriquée au niveau de notre laboratoire pour mesurer la compacité des mélanges granulaires. Des essais de répétabilité ont été effectués sur le banc d'essai et ont présenté des écarts types très faibles montrant sa reproductibilité (Bouterfas, 2012).

Notre programme expérimental consiste à travailler sur des classes granulaires serrées et d'utiliser des granulats calcaires concassés provenant de l'entreprise nationale des granulats (ENG). Il nous a permis d'effectuer 204 essais relatifs aux granulats seuls et différentes combinaisons de mélanges binaires, ternaires et quaternaires.

Sur l'ensemble des mélanges binaires étudiés, nous avons obtenu des compacités maximales à un taux d'introduction des grains fin  $\leq 50\%$  et le mélange qui nous a donné la compacité maximale (73%) est celui de (40% de sable 0.315-1.25 et 60% de gravillon 10-16) avec un rapport G/S=1.5 ; ce dernier étant un mélange sans interaction.

Concernant le mélange ternaire nous avons effectué des essais préliminaires pour pouvoir localiser l'intervalle où se trouve l'optimum en matière de compacité. Pour tous les mélanges retenus, c'est l'ajout de 10% de la troisième fraction qui nous a donné la plus grande compacité dont la composition est de 36% de sable 0.315-1.25 + 9% de gravier 4-6.3 + 55% de gravier 10-16 et le G/S=1.75.

La formulation finale qui nous a donné la compacité maximale (75%) est le mélange quaternaire avec les proportions suivantes : (34.63% Sable 0.315/1.25 + 8.67% de gravillon 4/6.3 + 4.76% de gravier 6.3/10 + 51.94% de gravier 10/16) dont le rapport G/S est égal à 1.88. Donc, c'est la formulation qui présente le moins d'interactions (desserrement et effet de paroi) entre les différentes classes granulaires.

L'utilisation des classes granulaires serrées nous a donné un squelette optimale sur un étendu granulaire de (0.315-16) avec une discontinuité au niveau de la classe (1.25-4). Ces résultats montrent bien qu'on peut arriver à des compacités très acceptables en éliminant la classe granulaire (16-25) ceci peut être d'un intérêt surtout pour les bétons fortement ferraillés.

L'utilisation d'un modèle théorique (modèle d'empilement compressible) permet de réduire le nombre d'essais au laboratoire, il nous a donné un taux de corrélation d'environ 98% par rapport à nos résultats expérimentaux. Ces résultats, très acceptables, laissent à penser que l'optimisation granulaire par des modèles théoriques, constitue un bon outil d'étude des empilements granulaires.

Les résultats de ce travail expérimental ouvrent de nouvelles perspectives où il serait intéressant de :

- étendre cette étude tant aux propriétés mécaniques de ces bétons à l'état durci qu'aux performances de durabilité.
- Optimiser les compacités de bétons destinés pour des emplois spécifiques.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abrams D.A. (1923), "Scientific method of making concrete", Journal of the Society of Chemical Industry, Vol. 42, Issue 46, 16 Novembre, pp. 1094 –1098.

Achour T. (2007) « Étude de l'influence de la nature des granulats sur les propriétés des bétons hydrauliques : cas des granulats calcaires tunisiens », Thèse de Doctorat, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT) et l'Université Henri Poincaré de Nancy (UHP). P205.

Baron J. et Lesage R. (1976), « La composition du béton hydraulique, du laboratoire au chantier », Rapport de Recherche des Laboratoires des Ponts et Chaussées N°64, Décembre.

Boukli Hacène S.M.A (2010), « 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, p. 194.

Bouki Hacène M.A., Ghomari. F. (2007); "Study of the compression resistance of local concretes, Twelfth International Colloquium on Structural and Geotechnical Engineering", ICSGE, Cairo, Egypt, 10-12 December, pp.1005-1014.

Bolomey J.C. (1925), « Durcissement des mortiers et bétons », Paris : Rouge et Cie.

Bouterfas M. (2012), « Optimisation de la compacité du squelette granulaires », Mémoire de magister, Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen, Algérie, p. 66.

Caquot A. (1937), « Le rôle des matériaux inertes dans le béton », Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils de France, pp. 562-582, Juillet-Août.

Cassagnabère F. (2007), « Produits préfabriqués en béton filé : vers l'amélioration des performances du matériau pour mieux gérer le procédé de production », Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, Septembre, p. 297.

Cintré M. (1988), « Recherche d'un mode opératoire de mesure de compacité de mélanges vibrés à sec de classes élémentaires de granulats », Rapport du LRPC de Blois, France, Janvier.

Collet Romain M. (2010), « Critères de malaxabilité des mélanges granulaires humides », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, p. 172.

Cumberland D.J., Crawford R.J., (1987) "The packing of particles, Handbook of powder technology", volume 6, Elsevier.

De Larrard F. (1988), « Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances », Rapports de recherche des LPC, N° 149, Paris, Mars.

De Larrard F. (2000), « Structures granulaires et formulation des bétons », Etudes et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris, France, p. 414.

De Larrard F. (2004), « BétonlabFree3 », Leçons, Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris, France.

Dreux G. et Festa J. (1995), « Nouveau guide du béton et ses constituants », Editions Eyrolles, Paris, France, p. 409.

El Barrak M. (2005), « 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, p. 229.

Faury J. (1944), « Le béton : Influence de ses constituants inertes - Règles à adopter pour sa meilleure composition », sa confection et son transport sur les chantiers, 3<sup>ième</sup> édition, Dunod, Paris, France.

Féret R. (1892), « Sur la compacité des mortiers hydrauliques », Annales des Ponts et Chaussées, série 7, Volume 4, pp. 5-164.

Fuller W.B. et Thompson S. (1907), "The laws of proportioning concrete", Transactions of ASCE, ASCE, Volume 59, pp.67-143.

German R. M., (1989) "Particle packing characteristics", Metal Powder Industries Federation.

Joisel A. (1952), « Composition des bétons hydrauliques », Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, 5<sup>ième</sup> année, N° 58, Série : Béton, béton armé, Octobre, France.

Kechkar.C et Cherait.Y. (2008), « Contribution a l'étude des empilements granulaires », laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH), Université 08 mai 45, Guelma, Algérie.

Lédée V., de Larrard F., Sedran T., Brochu F. (2004), « Essais de compacité des fractions granulaires à la table à secousses », Méthode d'essai N° 61, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France, p. 13.

Lesage R. (1974), « Etude Expérimentale de la mise en place du béton frais », Rapport de recherche des LCPC, N°37, Juin, Paris, France.

Mooney.M. (1951) "The Viscosity of concentrated Suspension of Spherical Particles", Journal of Colloïds and Interfaces Science, vol 6, p.162.

Ngoc Dong Le (2007), « Amélioration de la régularité du béton en production », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, p. 248.

Pietsch W., (2002) "Agglomeration Processes", John Willey VCH.

Pouliot N., Sedran.T., de Larrard F., Marchand J. (2001) « Prédiction de la compacité des bétons compactés à rouleau à l'aide d'un modèle d'empilement granulaire », Bulletin des laboratoires de ponts et chaussées, 233, Juillet-Aout, pp. 23-36.

Sedran T. et de Larrad F. (1994), « RENE-LCPC – Un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux du génie civil », Note technique, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 194, Novembre-Décembre.

Sedran T. (1999), « Rhéologie et rhéométrie des bétons : Application à la formulation des bétons autonivelants », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, Mars.

Sedran.T et de Larrard.F. (2000) « Manuel d'utilisation de René-LCPCversion 6.1d Logiciel d'optimisation granulaire », Septembre, p. 20.

Sedran.T., de Larrard.F., Angot.D. (1994) « Prévion de la compacité des mélanges granulaires par le modèle de suspension solide. Fondements théoriques et étalonnage du modèle », Bulletin des laboratoires de ponts et chaussées, 194, Novembre-décembre.

Stovall.T, de Larrard F., Buil.M. (1986) "Linear Packing Density Model of Grain Mixtures", Powder Technology", vol 48.

Tchemiakin A. (1988) « Projet / Agrégats Tlemcen-2, Gisement Djebel Abiod, Rapport géologique final », Boumerdes, Juin.

# ***ANNEXES***



## ANNEXE2, Exemple de calcul avec le logiciel "René lcpc" pour un mélange binaire, ternaire et quaternaire:

Nous présentons en (ANNEXE2) un exemple de calcul en utilisant le logiciel "René lcpc". Donc nous avons choisi le cas du mélange binaire (0.315-1.25/10-16), le mélange ternaire N°2 et le mélange quaternaire N°8.

Le tableau suivant présente les pourcentages massiques pour chaque classe élémentaire utilisée, dans les mélanges choisis.

Tableau 2.1 Mélanges sélectionnés

Mélanges	Mélange binaire	Mélange ternaire	Mélange quaternaire
		(0.315-1.25+10-16)	(0.315-1.25+10-16) +4-6.3
% dans le mélange	60+40	38.1+57.14+4.76	37+55.47+4.62+2.91

Avant de commencer le calcul avec le logiciel "René lcpc", il faut d'abord introduire les données des différentes classes élémentaires (analyse granulométrique, compacité, masse volumique réelle ainsi que l'indice de serrage). Ces derniers ont été résumés dans le chapitre N°3 tableau 3.8 et la méthode dans laquelle on peut introduire ses données est détaillée dans le chapitre N°2 (partie 2.3.2.1).

Les différentes classes élémentaires ont été introduites dans un dossier nommé "eng.mat" (figure 2.1)

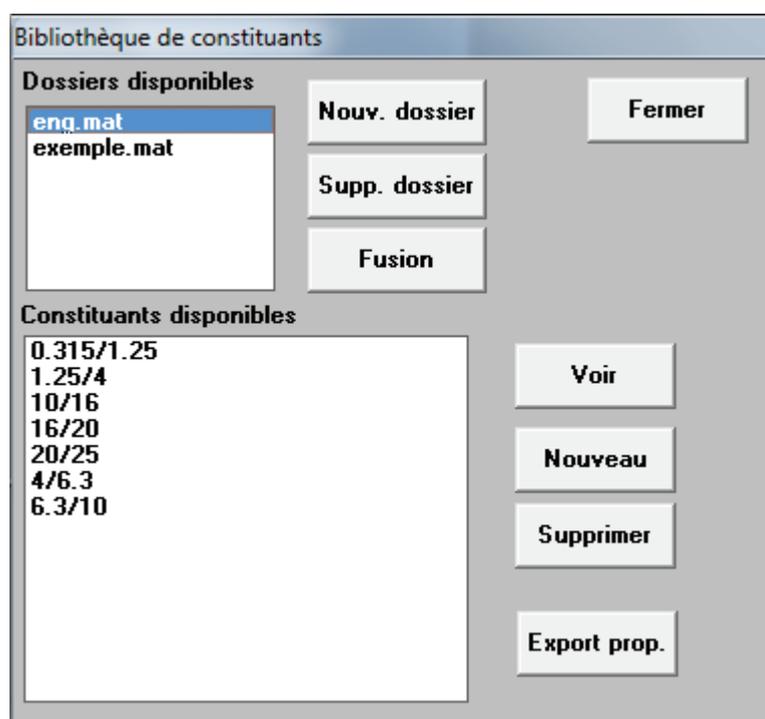


Figure 2.1 Introduction des différentes classes élémentaires

## 2.1 Cas du mélange binaire:

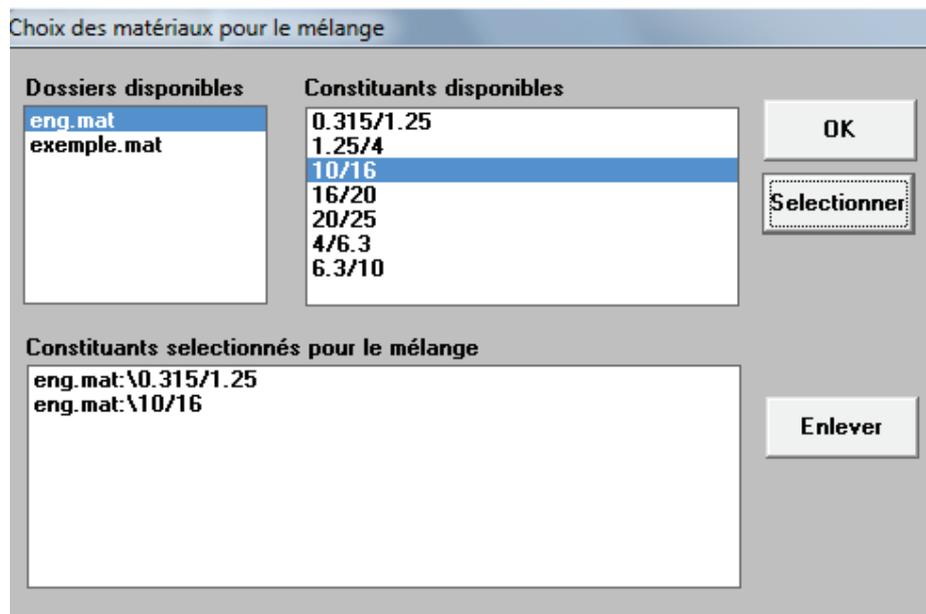


Figure 2.2 S'election du mélange binaire (0.315-1.25+10-16)

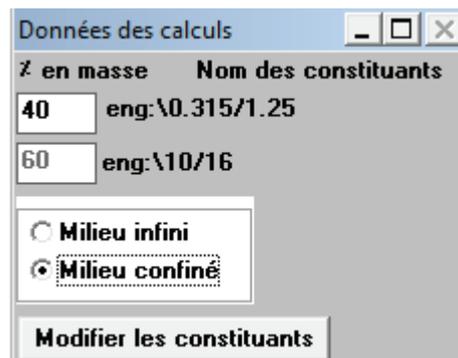


Figure 2.3 Introduction des données (mélange binaire)

Après avoir sélectionné ces deux constituants, nous lançons le calcul en appuyant



sur le bouton  et en prenant 9 pour indice de compaction. Les résultats suivants s'affichent .

Résultats:

Constituant n°0: eng:\0.315/1.25  
 Constituant n°1: eng:\10/16

Constituant n°0	Constituant n°1	Porosité	Indice de compaction	Masse vol. à sec
100	0	0,3751	9,0	1593,6
90	10	0,3538	9,0	1647,2
80	20	0,3313	9,0	1703,8
70	30	0,3077	9,0	1763,2
60	40	0,2837	9,0	1823,7
50	50	0,2617	9,0	1879,0
40	60	0,2547	9,0	1895,9
30	70	0,2915	9,0	1801,7
20	80	0,3467	9,0	1660,6
10	90	0,3981	9,0	1529,4
0	100	0,443	9,0	1414,8

Figure 2.4 Résultats mélange binaire

## 2.2 Cas du mélange ternaire:

Choix des matériaux pour le mélange

Dossiers disponibles	Constituants disponibles
eng.mat exemple.mat	0.315/1.25 1.25/4 10/16 16/20 20/25 4/6.3 6.3/10

Constituants sélectionnés pour le mélange

eng.mat:\0.315/1.25  
 eng.mat:\10/16  
 eng.mat:\4/6.3

OK  
 Sélectionner  
 Enlever

Figure 2.5 S'élection du mélange ternaire (0.315-1.25+10-16+4-6.3)

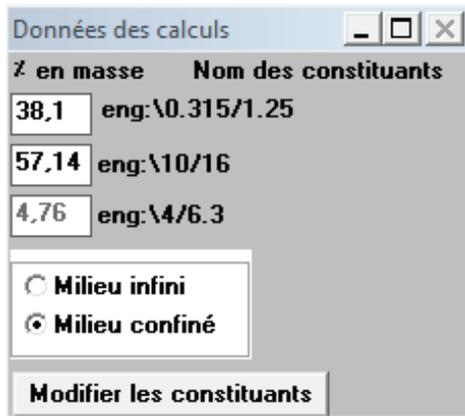


Figure 2.6 Introduction des données(mélange ternaire)

Après avoir sélectionné ces trois constituants, nous lançons le calcul en appuyant



sur le bouton et en prenant 9 pour indice de compaction. Les résultats suivants s'affichent.

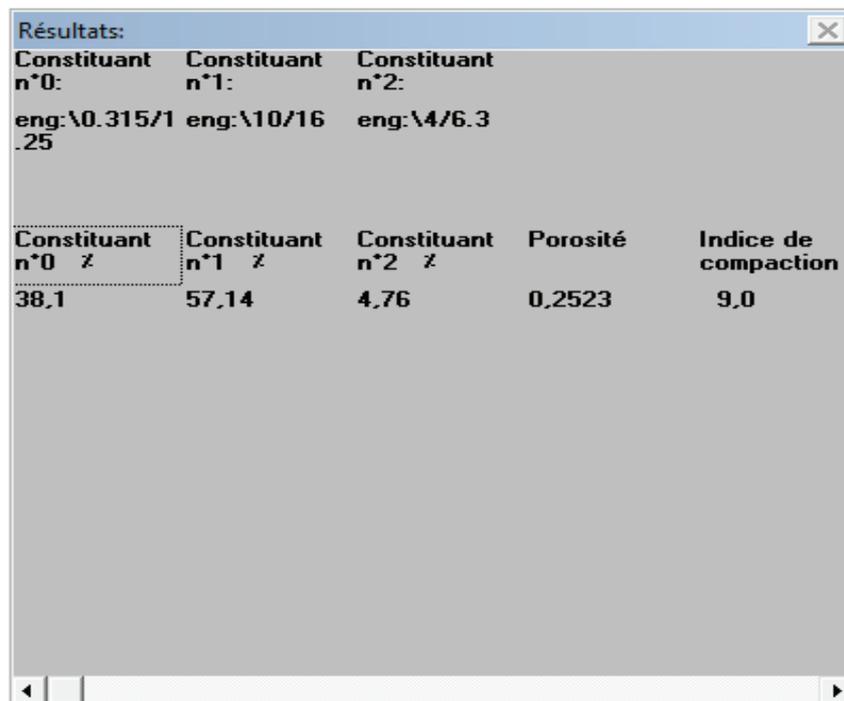


Figure 2.2 Résultats mélange ternaire.

### 2.3 Cas du mélange quaternaire:

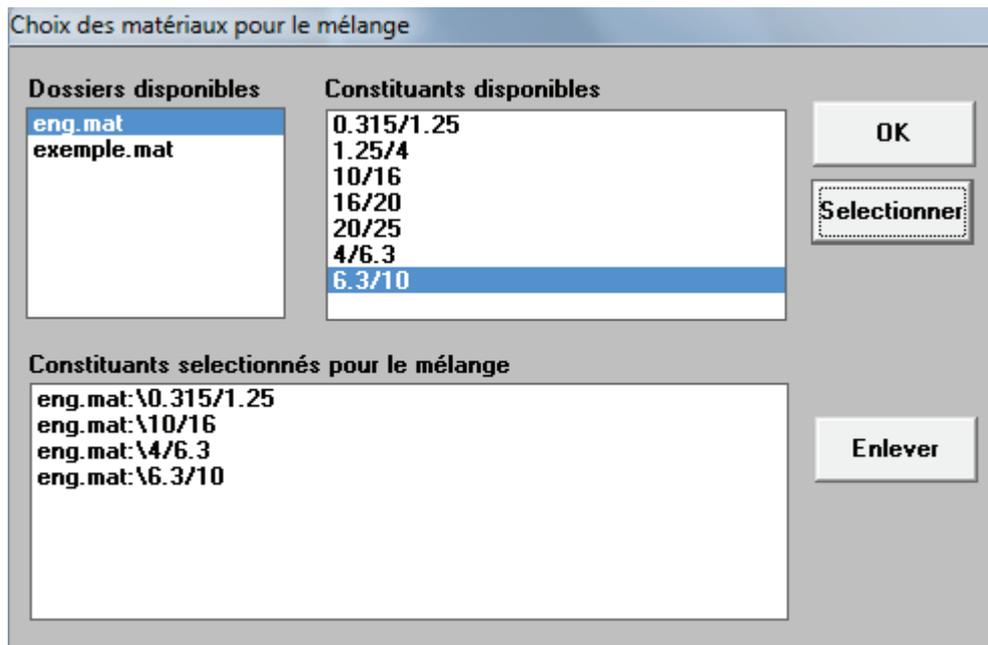


Figure 2.7 S'election du mélange quaternaire (0.315-1.25+10-16+4-6.3+6.3-10)

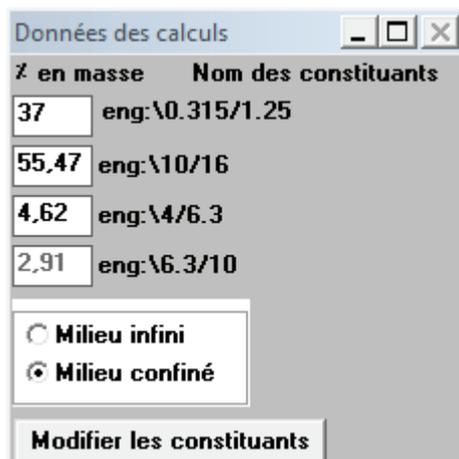


Figure 2.2 Introduction des données (mélange quaternaire)

Après avoir sélectionné ces quatre constituants, nous lançons le calcul en appuyant

sur le bouton  et en prenant 9 pour indice de compaction. Les résultats suivants s'affichent .

Résultats:				
Constituant n°0:	Constituant n°1:	Constituant n°2:	Constituant n°3:	
eng:\0.315/1 .25	eng:\10/16	eng:\4/6.3	eng:\6.3/10	
Constituant n°0 z	Constituant n°1 z	Constituant n°2 z	Constituant n°3 z	Porosité
37	55,47	4,62	2,91	0,2532

Figure 2.8 Résultats mélange quaternaire.

**Resumé** : l'optimisation granulaire est une étape primordiale dans la formulation du béton. Un squelette granulaire plus compact diminue le volume de vides dans le béton et laisse moins d'espace à occuper par la pâte de ciment, ce qui conduit à une bonne résistance et une diminution du retrait et du fluage, ainsi qu'à une économie.

La compacité d'un milieu granulaire dépend de certaines propriétés telles que la distribution de taille et la forme des particules, la paroi du récipient et du gros ganulat, le desserrement entre particules ainsi que le mode de mise en place.

Ce travail présente une étude comparative de la compacité des mélanges granulaires sur des granulats calcaires concassés provenant de l'ENG, 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. Deux cents quatre essais ont 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, logiciel René lcpc.

**ملخص** : إن تحسين الهيكل الحبيبي يشكل خطوة أساسية في تركيب الخرسانة. الهيكل الحبيبي المرصوص

يساعد على انقاص حجم الفراغات و ترك مجال صغير لعجينة الاسمنت مما يؤدي إلى مقاومة جيدة و انقاص نسبة التقلص و التشويه على المدى الطويل.

إن تراص الهيكل الحبيبي يعتمد على خصائص معينة مثل توزيع الحجم وشكل الجسيمات، جدار الحاوية والقطر الكبير للحصى، الرخاوة بين الحبيبات وطريقة الرص.

هذا العمل يقدم دراسة مقارنة لتراص خليط من الحصى أحضرت من الشركة الوطنية للحصى. قمنا بما في المخبر على النحو الموصى به من قبل طريقة رق LCPC). كما قمنا بما بطريقة نظريه استنادا إلى نموذج الهيكل

المضغوط. قمنا بإنجاز مئتان و اربعة تجارب و النموذج قدم لنا معدل ارتباط مقبول جدا مقارنة بالنتائج التجريبية

**الكلمات الرئيسية** : الحصى، التراص، خليط، خرسانة، طاولة قابلة للهرز، برنامج René lcpc

**Abstract** : compact granular skeleton decreases the volume of voids in the concrete, leaving less space to be occupied by the cement paste, leading to strong resistance and reduced shrinkage and creep, as well an economy.

The compactness of a granular mixture depends on certain properties such as size distribution and particle shape, the container wall and large ganulat, looseness between particles and the method of implementation.

This work presents a comparative study of the compactness of granular mixtures of crushed limestone aggregate from the ENG, optimized experimentally using a test done locally in our laboratory as recommended by the method (LCPC N° 61) and by theoretical, based on the concept of stacking compressible model. Two hundred four trials have been conducted and the model gave us a very acceptable correlation rate compared to experimental results.

**Key words**: aggregates, compactness, mixture, concrete, shaking table, software René lcpc.