

SOMMAIRE

Résumé	
Abstract	
Remerciements	
Liste des abréviations	
Liste des figures	3
Liste des tableaux	5
INTRODUCTION GENERALE	6
CHAPITRE I : ETAT DE L'ART SUR LES MODELES DE COMPACITE DES MELANGES GRANULAIRES	
I.1. Introduction	8
I.2. Définitions	8
I.3. Compacité – Paramètres Pertinents	10
I.3.1. Forme des grains	10
I.3.2. Effet du mode de mise en place -Indice de serrage	11
I.3.3. Taille des grains	11
I.4. Méthodes de formulation des bétons	11
I.4.1. Introduction	11
I.4.2. Méthodes de formulation traditionnelles	12
I.4.3. Méthodes de formulation nouvelles	14
I.4.4. Méthodes de formulation numériques	15
I.5. Modèles de compacité	16
I.5.1. Le modèle d'empilement virtuel	16
I.5.1.1. Mélange binaire	16
I.5.2. Le modèle de suspension solide	23
I.5.2.1. Nouvelle définition des interactions granulaires	24
I.5.3. Le modèle d'empilement compressible	29
I.6. Comparaison entre les compacités des mélanges granulaires	33
I.7. Comparaison entre les compacités mesurées au laboratoire	34
I.8. Conclusion	35
CHAPITRE II : MESURE DE LA COMPACITE ET PROGRAMME EXPERIMENTAL	
II.1. Introduction	36
II.2. Modes opératoires envisagés pour l'essai de compacité	36
II.2.1. Simple versement	36

II.2.2. Piquage.....	36
II.2.3. Chocs sous compression de 1kPa et 10kPa	37
II.2.4. Vibration sous compression de 1kPa et 10kPa.....	38
II.2.5. Essai de compacité des fractions granulaires à la table à secousses.....	39
II.3. Appareillage utilisé et mode opératoire	39
II.3.1. Appareillage.....	39
II.3.1. 1. Composantes du banc d'essai [Méthode d'essai n° 61 LCPC].....	40
II.3.2. Mode Opératoire [Méthode d'essai n° 61 LCPC].....	41
II.3.2.1. Expression des résultats.....	44
II.4. Présentation de la carrière.....	45
II.4.1. Présentation du site.....	45
II.4.1.1. Situation géographique.....	45
II.4.1.2. Géomorphologie du gisement.....	46
II.4.1.3. Nature du gisement.....	46
II.5. Présentation et interprétation des essais d'identification.....	46
II.5.1. Prélèvement d'échantillon.....	46
II.5.2. Essais sur granulats.....	47
II.5.2.1. Propriétés dimensionnelles	47
II.5.2.2. Propriétés physiques.....	48
II.5.2.3. Propriétés mécaniques.....	49
II.6. Programme expérimental	50
II.7. Résultats des essais	51
II.7.1. Mesure de la compacité des fractions usuelles.....	51
II.7.2. Mesure de la compacité des mélanges binaires.....	53
II.7.3. Mesure de la compacité des mélanges Ternaires.....	55
II.7.4. Mesure de la compacité des mélanges quaternaires.....	58
II.8. CONCLUSION.....	60
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	62
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	64
ANNEXE 1 : Protocole d'essai à remplir après chaque essai à la table à secousses.....	67
ANNEXE 2 : Exploitation de la carrière de Djebel Abiod à Sidi Abdelli (Wilaya de Tlemcen).....	68

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Notions de compacité et de porosité [de LAR, 2004].....	9
Figure I.2. Indices de serrages correspondants aux grains roulés et concassés.....	10
Figure I.3. Compacités expérimentales des classes élémentaires en fonction de la taille des grains [de LAR, 2004].....	10
Figure I.4. Indices de serrages pour les différents modes de mise en place des grains [de LAR, 2004].....	11
Figure I.5. Les gros grains (a) ensuite les petits (b) bloquent le système [SED et col., 1999].....	17
Figure I.6. Les deux classes ont le même diamètre [SED et col., 1999].....	18
Figure I.7. Effet d'interaction entre classes granulaires [SED et col., 1999].....	20
Figure I.8. Allure de la compacité virtuelle pour un mélange binaire de deux classes unimodales [SED et col., 1999].....	21
Figure I.9. Mélanges binaires des granulats roulés. Compacité en fonction de la proportion de grains fins. Les points marquent les valeurs expérimentales ; les courbes correspondent aux valeurs du modèle.....	27
Figure I.10. Mélanges binaires de granulats concassés. Compacité en fonction de la proportion de petits grains. Points expérimentaux et lissages fournis par le modèle de suspension solide.....	28
Figure I.11. Variation de K en fonction de la compacité.....	30
Figure I.12. Comparaison entre prévision et mesures pour les mélanges ternaires [de LAR, 2000].....	33

Figure I.13. Valeurs moyennes de compacité pour tous les matériaux selon les différents modes opératoires, en distinguant les agrégats tendres des agrégats durs [CAS, 2007].....	34
Figure II.1. Table à chocs utilisée dans les essais (Hauteur de chute - 1cm au niveau de la came) [de LAR, 2003].....	37
Figure II.2. Dispositif de mesure de la compacité [El BAR, 2005].....	38
Figure II.3. Table à choc Faculté de Technologie de Tlemcen.....	40
Figure II.4. Table à choc LCPC, Paris.....	40
Figure II.5. Schéma de la table à secousse [Méthode d'essai n° 61 LCPC].....	41
Figure II.6. Différentes phases du mode opératoire.....	43
Figure II.7. Partie supérieure de la table à secousses.....	44
Figure II.8. Plan de situation du gisement de Djebel Abiod [BOU, 2010].....	45
Figure II.9. Vue Générale de la station de Sidi Abdelli.....	46
Figure II.10. Courbes granulométriques des granulats de Djebel Abiod.....	48
Figure II.11. Approche pour la réalisation du programme expérimental.....	50
Figure II.12. Variation de la compacité des Mélanges Binaires.....	54
Figure II.13. Affinage de la compacité du mélange binaire (sable 0/4+ gravier 16/25) au voisinage de l'optimum (40% de sable).....	55
Figure II.14. Variation de compacité des mélanges ternaires préliminaires.....	56
Figure II.15. Variation de la compacité des mélanges ternaires.....	57
Figure II.16. Variation de compacité des mélanges quaternaires.....	59

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1. Résumé des valeurs de K (indice de serrage) pour différents procédés de remplissage [de LAR, 2000].....	31
Tableau I.2. Compacités mesurées (grains roulés et concassés) et prévisions du modèle.....	32
Tableau I.3. Comparaison entre les compacités des mélanges granulaires [CAS, 2007].....	33
Tableau II.1. Caractéristiques physiques des granulats 4/8, 8/16 et 16/25.....	49
Tableau II.2. Caractéristiques physiques du sable utilisé.....	49
Tableau II.3. Mesure de la compacité sur la fraction 0/4.....	51
Tableau II.4. Mesure de la compacité sur la fraction 4/8.....	52
Tableau II.5. Mesure de la compacité sur la fraction 8/16.....	52
Tableau II.6. Mesure de la compacité sur la fraction 16/25.....	53
Tableau II.7. Tableau comparatif entre les trois méthodes de mesure de la compacité.....	53
Tableau II.8. Valeurs de compacité des mélanges binaires.....	54
Tableau II.9. Compacité du mélange binaire (0/4+16/25) au voisinage de l'optimum.....	55
Tableau II.10. Compacité des mélanges ternaires préliminaires.....	56
Tableau II.11. Compacités des mélanges ternaires retenus.....	57
Tableau II.12. Mélanges quaternaires étudiés.....	58
Tableau II.13. Comparaison entre les mélanges granulaires de notre béton de référence et de la formulation à compacité maximale.....	60

LISTE DES ABREVIATIONS

n : nombre de classes granulaires du mélange,

d_i : diamètre moyen de la classe i ,

β_i : compacité propre virtuelle de la classe i ; c'est la compacité virtuelle de la classe i prise individuellement,

y_i : proportion volumique de la classe i dans le mélange,

ϕ^*_i : teneur volumique maximale du mélange en classe i étant donnée la présence des autres classes,

ϕ_i : teneur volumique du mélange en classe i ,

γ_i : compacité virtuelle du mélange si la classe i est présumée dominante

γ : compacité virtuelle du mélange,

C : compacité expérimentale du mélange,

K_i : indice de compaction partiel dû à la classe i ,

K : indice de compaction pour le mélange.

ρ : masse volumique réelle au sens de la norme NF EN 1097-6 (g/cm^3),

ρ_a : masse volumique apparente du matériau, calculée selon l'expression suivante :

$$\rho_a = M / V,$$

INTRODUCTION GENERALE

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 du mélange 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. [NGO, 2007]

Les méthodes de formulation des enrobés et des bétons reposent toutes sur des exigences exprimées en terme de compacité optimale du mélange granulaire dont ils sont constitués, atteinte le cas échéant après avoir subi un chemin de sollicitations normalisé. Si les méthodes de détermination de l'aptitude au compactage et/ou de la compacité d'un mélange sont maintenant bien maîtrisées, tel est par exemple le cas pour les enrobés hydrocarbonés à chaud dont l'aptitude au compactage est déterminée expérimentalement à l'aide d'une presse à cisaillement giratoire, en revanche la correction à apporter aux caractéristiques du squelette granulaire de ces mélanges pour atteindre la compacité optimale repose généralement sur le savoir-faire empirique du formateur [CAM, 2003]. En effet, dans notre région, l'empirisme reste le maître mot dans la formulation des bétons utilisés dans les secteurs du bâtiment et des travaux publics. Combien même, la formulation initiale est effectuée au laboratoire selon les standards usuels, celle-ci reste sans correction aucune, dans la majorité des grands chantiers, dans le cas où, pour des raisons diverses, il y a changement au niveau de la provenance des agrégats et/ou des liants utilisés. Pour les petits chantiers, c'est l'empirisme qui guide toujours la formulation des bétons fabriqués.

Les travaux menés par de Larrard [de LAR, 1999] dans le cadre de la formulation des bétons ont permis de faire reculer l'empirisme, puisqu'il existe désormais un modèle qui détermine les proportions des différentes fractions granulaires conduisant à l'optimum de la compacité du mélange. Toutefois, ce modèle repose lui-même sur la connaissance de la compacité maximale de chacune des fractions granulaires serrées utilisées, qui dépend elle-même des caractéristiques dimensionnelles des particules.

Le travail expérimental effectué au laboratoire central des ponts et chaussées en France est colossal et a concerné de nombreux 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 proposés d'aborder dont l'objectif principal est d'optimiser la compacité du squelette granulaire des bétons locaux en utilisant au mieux les ressources de la région de Tlemcen, en matière d'agrégats afin d'obtenir les mélanges offrant les meilleures résistances mécaniques.

Le programme expérimental préconisé s'est inspiré de celui réalisé récemment (moins d'une décennie) par le LCPC en France et a nécessité la réalisation au laboratoire d'un banc d'essai simple qui permet la mesure de la compacité des matériaux granulaires sous des conditions qui s'apparentent à celles utilisées in situ sur des bétons ordinaires (BO), vibrés lors de leur mise en œuvre. Ce programme a concerné uniquement les granulats concassés, commercialisés par l'entreprise nationale des granulats (ENG), considérée comme le plus grand fournisseur en matière d'agrégats dans la région. Sachant que la législation actuelle en matière d'utilisation du tout venant (granulats roulés) dans le BTP est stricte et le ministre de l'habitat veille, depuis quelques années, à l'interdiction de l'utilisation de cette ressource noble par les entreprises de construction, dans un souci de développement durable.

Le mémoire est structuré en parties distinctes :

Dans la première partie, nous avons commencé par les définitions ayant trait à la thématique. Ensuite, nous avons mis en revue un état de l'art relatif à la majorité des méthodes de formulations : traditionnelle et nouvelles. Nous nous sommes focalisé en dernier, sur les résultats des travaux effectués au LCPC (Paris) pour en déduire l'approche à retenir dans le cadre de notre travail expérimental.

Quant au deuxième chapitre, Nous avons, répertorié les méthodes utilisées au laboratoire pour la mesure à sec de la compacité des agrégats et détailler ensuite le mode opératoire utilisé par de Larrard et ses collaborateurs dans leur approche expérimentale. Enfin, nous avons expliqué le mode de fonctionnement du banc d'essai que nous avons fabriqué et qui a été inspiré de celui réalisé par le LCPC.

Nous avons commencé par l'identification des caractéristiques physiques et mécaniques des agrégats utilisés (analyse granulométrique, propreté, forme, dureté, usure, etc.) pour ensuite mesurer la compacité de chacun de ces granulats seuls : sable 0/4 et graviers 4/8, 8/16 et 16/25. Nous avons par la suite, procédé à l'aide d'une approche méthodologique, à l'optimisation de la compacité des mélanges binaires en considérant toutes les combinaisons possibles, suivie de celles des mélanges ternaires et en dernier des mélanges quaternaires (utilisés pour la fabrication des BO). Ce programme a nécessité la confection de plus de 350 éprouvettes.

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

CHAPITRE I. ETAT DE L'ART SUR LES MODELES DE COMPACITE DES MELANGES GRANULAIRES

I.1. INTRODUCTION

La prévision de la compacité (ou de la porosité) d'un mélange granulaire est un problème qui se pose dans de nombreux domaines scientifiques et technologiques. En particulier, en génie civil, la recherche de la compacité maximale du squelette granulaire dans un béton a occupé plusieurs générations d'ingénieurs. En effet, l'utilisation de ce squelette optimal permet, pour une maniabilité donnée, d'optimiser la plupart des propriétés du béton durci ou, de façon corollaire, d'optimiser la maniabilité pour une teneur en eau donnée.

Devant la complexité du problème, due au nombre et à la diversité de la nature des constituants utilisés, l'ingénieur se contente d'approcher l'optimum à l'aide de courbes maîtresses [CAQ, 1937] et/ou par des essais technologiques itératifs [BAR et col., 1969], souvent assez lourds.

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.

I.2. DEFINITIONS

Le volume occupé par un matériau granulaire dépend en grande partie de l'arrangement des grains. Ces derniers se mettent en contact les uns avec les autres tout en laissant un espace inoccupé qui constitue les pores entre les grains. Le volume total est donc la somme de deux volumes :

- le volume occupé par les grains,
- le volume des pores.

Le matériau est d'autant plus compact que le volume des pores est réduit. La fraction du volume occupée par les grains par rapport au volume total s'appelle compacité.

- 1- La compacité (ou taux de remplissage) est le taux d'occupation réel de l'espace. Elle est le rapport entre le volume des grains et le volume total qui contient ces grains. Elle est donc définie par :

$$C = \frac{V_s}{V_T} \quad (I.1)$$

En cristallographie, la compacité maximale est égale à 0,74. Elle est obtenue pour un réseau hexagonal compact ou cubique face centrée. Pour un matériau granulaire, il n'y a pas d'ordre à longue portée ; la limite expérimentale (ou celle obtenue par simulation) de la compacité dans un tel matériau est $C = 0,64$. Si l'on s'intéresse à de petites billes, cette limite peut être atteinte en pratique si elles sont versées au travers de grilles croisées. Si l'on verse les billes par l'intermédiaire d'un trou source, la compacité sera de l'ordre de $C = 0,62$ [BAU, 2007].

2- La porosité est le rapport entre le volume des vides et le volume total qui contient les grains. Elle est donc définie par :

$$P = \frac{V_v}{V_T} \quad (I.2)$$

La figure I.1 montre respectivement la proportion du volume solide/volume total (compacité), la proportion du volume des vides/volume total (porosité) ainsi que la relation entre ces deux propriétés.

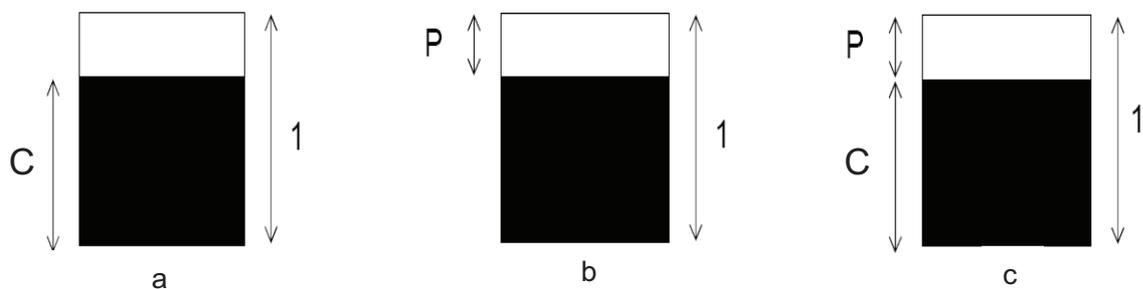


Figure I.1. Notions de compacité et de porosité [de Larrard, 2004].

Lorsque le volume d'une certaine quantité d'un matériau granulaire augmente, c'est principalement la porosité qui augmente. Le volume propre de chaque grain peut également changer sous l'action des forces qui agissent sur un matériau granulaire, mais, ces variations sont souvent très faibles devant les variations du volume des pores.

I.3. COMPACTITE - PARAMETRES PERTINENTS :

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

1.3.1. Forme des grains

Si on a des mélanges de grains de taille similaire alors, la compacité dépend de la forme et de la rugosité de ces grains. La figure I.2 montre que pour les grains roulés, l'indice de serrage est compris entre 0,6 et 0,64 ; en revanche, il est plus faible pour les grains concassés et varie entre 0,53 et 0,58.

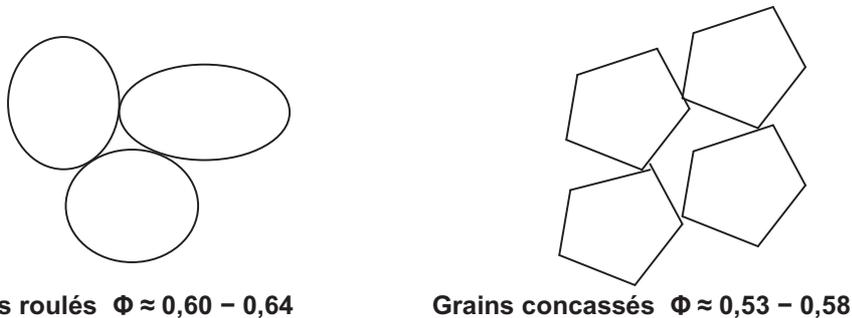


Figure I.2. Indices de serrages correspondant aux grains roulés et concassés [de Larrard ; 2000]

De Larrard [de Larrard ; 2000] montre sur la figure I.3, qu'à taille égale, les grains arrondis sont plus compacts que les grains concassés. En outre, il ne semble pas qu'une loi générale gouverne les relations entre la taille et la compacité des granulats.

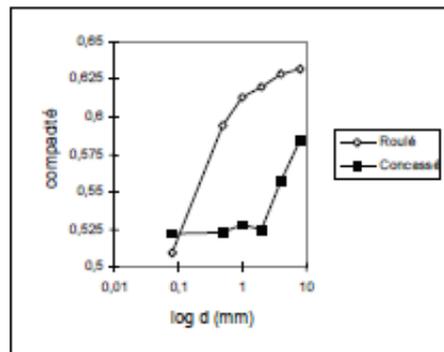


Figure I.3. Compacités expérimentales des classes élémentaires en fonction de la taille des grains [de Larrard ; 2000].

I.3.2. Effet du mode de mise en place - Indice de serrage

La compacité dépend directement du mode de mise en place c'est-à-dire de la façon dont est réalisé l'empilement. La figure I.4 montre que pour un simple versement, l'indice de serrage est égal à 0,56, s'il s'agit d'une vibration il vaut 0,58, pour un piquage il est de 0,57 et enfin pour une vibration et une compression simultanément il est de 0,63.

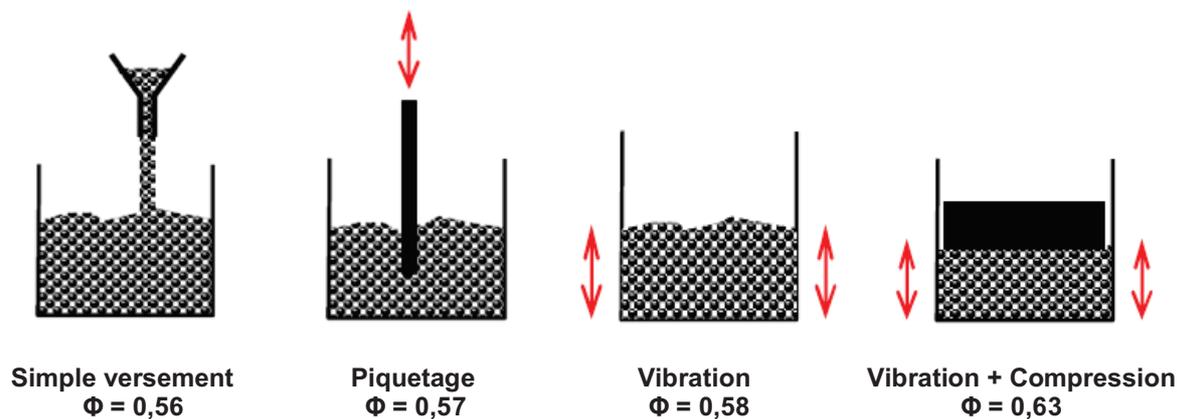


Figure I.4. Indices de serrages pour les différents modes de mise en place des grains
[de Larrard ; 2004]

I.3.3. Taille des grains

La figure I.3 montre aussi que pour les deux familles, les compacités augmentent avec la grosseur des grains. Ce comportement peut s'expliquer par des différences de forme selon la taille. Mais ; c'est surtout la vibration qui est en cause car, malgré nos efforts, elle a été probablement plus efficace pour les gros grains que pour les petits grains. En effet, ces derniers présentent un plus grand nombre de points de contacts dans le volume unité, ce qui pénalise l'efficacité de la vibration.

I.4. METHODES DE FORMULATION DES BETONS

I.4.1. Introduction

Plusieurs méthodes ont été développées durant ces dernières années. Même s'il reste beaucoup d'empirisme, toutes 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.

Le béton est un mélange de constituants de base dont on dissocie :

- **le squelette (solide)**. Cette phase constituée de granulats, généralement inertes, occupe la majorité du volume. Elle participe aux propriétés générales du matériau à l'état frais et durci ;

- **la partie liante du béton (solide).** Elle assure la fonction liante grâce à laquelle le béton passe d'un état initial de fluide moulable à un état final de solide mécaniquement résistant. Elle se compose de ciment, d'eau et éventuellement d'additions minérales (filler calcaire, filler siliceux, laitier de haut fourneau, fumée de silice, cendres volantes, méta kaolin...) [CAS, 2007].

- **la partie liquide.** Elle englobe l'eau et l'adjuvant. L'eau entre dans la réaction chimique avec le liant pour former les hydrates, mais c'est toujours largement excédentaire par rapport aux besoins de l'hydratation du ciment afin d'assurer une certaine rhéologie à l'état frais. Ces excédents introduisent une porosité résiduelle dans le matériau qui dégrade l'ensemble des propriétés (durabilité, résistance...). Les adjuvants améliorent les caractéristiques du matériau à l'état frais ou à l'état durci.

1.4.2. Méthodes de formulation traditionnelles

Historiquement, les principes régissant les concepts de formulation commencent à se rationaliser à la fin du XIX^{ème} siècle.

En 1892, Féret [FER, 1892] auquel on attribue les premières recherches, 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.

$$f_c = K_{Féret} + \left(\frac{1}{1+(e+v)/c} \right) \quad (1.3)$$

Au travers de l'équation 1.3, Féret relie une résistance en compression aux proportions volumiques et notamment en utilisant le rapport volumique E/C.

En 1907, Fuller et Thompson [FUL, 1907] basent aussi leur méthode sur une compacité maximale mais sur 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 1.4). En revanche, la forme des grains n'intervient pas dans la méthode.

$$P_{Fuller\ Thompson} = 100 * \sqrt[5]{d/D} \quad (1.4)$$

En 1918, Abrams [ABR, 1923] définit empiriquement une méthode dans laquelle le dosage en ciment et la dimension maximale des granulats sont les paramètres prépondérants (équation

1.5) et fait intervenir au travers du coefficient k_{Abrams} ($k_{Féret}$ amélioré) la nature et la forme des granulats.

$$f_c = k_{Abrams} \left(\frac{1}{7,5(1,5E/C)} \right) \quad (1.5)$$

En 1925, Bolomey [BOL, 1925] propose une courbe granulométrique continue de référence incluant le ciment (équation 1-6).

$$P_{Bolomey} = A_{Bolomey} + (100 - A_{Bolomey}) \times \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (1.6)$$

La différence avec l'équation de Fuller et Thompson, intervient au travers de $A_{Bolomey}$ qui dépend de la forme des granulats ainsi que de la consistance du béton. La résistance en compression par Bolomey établie selon l'équation 1-7, est une variante de la loi de Féret.

$$f_c = K_{Bolomey} \left(\frac{C}{E+V} - 0,5 \right) \quad (1.7)$$

En 1937, Caquot [CAQ, 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 1.8). 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.

$$V = V_0 \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (1.8)$$

En 1942 et en 1952, Faury [FAU, 1944] et Joisel [JOI, 1952] s'inspirent des travaux de Caquot et y apportent des modifications. Le premier prolonge l'étendue granulaire jusqu'à $6,5\mu\text{m}$, en y incorporant le ciment, et prend aussi en compte l'effet de paroi.

Joisel donne une droite de référence (avec une échelle complexe) prenant en compte le ciment, l'eau, les vides, la taille des grains et la compacité des classes granulaires.

En 1970, Dreux et Gorisse [DRE, 1995] mettent en œuvre une méthode, basée sur l'optimum granulaire encore couramment utilisée pour des bétons ordinaires. C'est une approche empirique selon 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 I.9) : 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.

$$f_{C28} = G_{Dreux} \times \sigma_{C28} \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad (I.9)$$

En 1976, Baron et Lesage [BAR, 1976] proposent une technique d'optimisation du squelette granulaire selon le principe liant un temps d'écoulement minimum déterminé au maniabilimètre LCL (selon [Norme 18-452]) avec une quantité optimale de granulat pour des proportions de ciment et d'eau fixées.

Enfin, nous pouvons dire que, la variation des nombreux paramètres liés à la géométrie 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.

I.4.3. Méthodes de formulation nouvelles

En 1996, Baron et Ollivier développent une méthode de formulation dérivée de celle de Dreux-Gorisse avec des modifications pour une adaptation aux bétons actuels. Cette méthode 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.

En parallèle à des méthodes basées sur des critères de performances mécaniques ou de consistance à l'état frais, de nouveaux paramètres sont visés.

La durabilité du matériau dans son environnement de service est un critère essentiel. En 2004, l'AFGC [AFGC, 2004] propose une méthodologie pour la mise en œuvre d'une démarche performantielle, globale et prédictive de la durabilité des structures en béton, basée sur la notion d'indicateur de durabilité. Cette approche combine des mesures en laboratoire et des codes de calcul (modèle). En marge de ces méthodes réelles de formulation, des approches d'optimisation sont utilisées. En 2004, l'approche dite du Mortier de Béton Equivalent (MBE) voit le jour [CAL, 2004]. Le principe de la méthode repose sur le fait qu'il existe une corrélation simple reliant les propriétés rhéologiques d'un béton à celle du mortier qui le compose [SCH,

2000]. La méthode MBE demande à identifier la composition granulométrique des sables et des granulats, à calculer la surface de chaque tranche granulaire, et à conserver les fractions fines (en général le sable initial) de manière à reconstituer un mortier équivalent qui aura la même surface granulaire totale que celle du béton initial. Cette méthode permet de pouvoir tester efficacement à l'état frais certains couples de constituants (ciment / adjuvant).

Les Plans D'Expériences (PDE) sont bien adaptés à la recherche-développement chaque fois qu'intervient un grand nombre de paramètres [AIT, 1994, LOU, 1996]. Bien utilisés, ils permettent de réduire fortement le nombre d'essais tout en parvenant à un résultat encore mieux assuré. Leur application au béton peut s'imposer à la formulation lorsque l'on veut concilier au mieux de nombreuses exigences.

Les éléments indispensables à cette démarche sont :

- la planification des essais et la qualité de l'expérience,
- la maîtrise de l'outil mathématique (régressions linéaires multiples),
- l'apport des statistiques pour la validation globale des modèles et la détermination des effets significatifs.

1.4.4. Méthodes de formulation numériques

Des méthodes de formulation novatrices utilisant des modèles numériques émergent : René LCPC, BétonLab et BétonLab Pro2, etc.

Les premières théories traitant d'une compacité maximale des mélanges granulaires [FER, 1892, CAQ, 1937] ne prennent pas en compte explicitement les interactions des grains entre eux et de leurs tailles. De Larrard (2000) au travers du Modèle d'Empilement Compressible (MEC) fait intervenir des notions nouvelles comme le serrage, l'effet de paroi et l'effet de desserrement.

Historiquement, le MEC est le résultat de plusieurs années de recherche au LCPC. Il s'agit de l'évolution du Modèle de Suspension Solide (MSS) lui-même dérivé du Modèle Linéaire de Compacité (MLC). Le MLC [STO, 1986] décrit des surfaces d'iso compacité ; mais, l'existence de limites de performance dans les zones de mélange optimum, apparaissent lors de la validation expérimentale. Le MSS [de LAR, 1994a & b] est un modèle lié à la notion de viscosité d'un mélange sec et il n'est pas validé par des séries expérimentales de vérification. Finalement, le MEC est développé avec les équations revues du MSS. La notion d'indice de serrage remplace celle de viscosité. La dépendance entre la compacité et l'énergie de serrage fournie au système est introduite.

Le logiciel BétonLab Pro2 est basé sur le MEC. Son intérêt réside dans sa configuration entrée/sortie. En effet, les paramètres d'entrée sont des caractéristiques qualifiant les constituants de base (ciments, granulats, adjuvants...) qui peuvent être soit mesurées en laboratoire, soit obtenues auprès des fournisseurs ou dans la littérature. Par ailleurs, le logiciel

utilise des modèles analytiques relativement sophistiqués sur une interface de type tableur pour présenter les résultats. En aval, les valeurs de sortie sont associées à certaines caractéristiques du béton.

I.5. MODELES DE COMPACITE

On rappelle ici que la compacité réelle d'un granulat, c'est-à-dire son volume solide dans le volume unité, dépend directement du mode de mise en place des grains. Ainsi, pour un échantillon sec d'étendue granulaire donnée, l'expérience montre que sa compacité augmente lorsqu'on le pique avec une tige, le vibre, puis le comprime. Pour qu'il atteigne sa compacité maximale ou compacité virtuelle γ , il faudrait, en théorie, arranger ses grains un à un, de façon déterminée.

La prévision de la compacité d'un mélange granulaire est un problème capital pour le béton. Plusieurs modèles permettent aujourd'hui la prévision de la compacité d'un mélange granulaire [GOL et col., 1997, DEW, 1999, de LAR, 2000].

I.5.1. LE MODELE D'EMPILEMENT VIRTUEL

Ce modèle est une version raffinée du modèle de compacité linéaire développé au LCPC et décrit par Stovall et col. (1986) et de Larrard (1988). Il permet, notamment, de prendre en compte le mélange de grains de même taille mais de formes différentes. Il est utilisé pour prédire les compacités virtuelles.

I.5.1.1. Mélange binaire

Considérons, dans un premier temps, un mélange de deux classes granulaires de diamètres respectifs d_1 et d_2 .

Par définition, ϕ_1 et ϕ_2 sont les volumes partiels de chaque classe dans un volume unité et, y_1 et y_2 les proportions volumiques soit :

$$y_1 = \frac{\phi_1}{\phi_1 + \phi_2} \quad \text{et} \quad y_2 = \frac{\phi_2}{\phi_1 + \phi_2} \quad (I.10)$$

La compacité de l'empilement est donnée par:

$$\gamma = \phi_1 + \phi_2 \quad (I.11)$$

- Mélange sans interaction

Le mélange sera dit sans interaction si $d_1 \gg d_2$. Ceci signifie que l'empilement des deux classes n'est pas perturbé par la présence de l'autre classe.

Il faut maintenant distinguer deux cas :

- le cas des gros dominants (figure I.5 a) : les grains de la classe 1 bloquent le volume, l'espace restant est comblé par les petits grains de taille d_2 .

Dans ce cas on écrit que :

$$\phi_1^* = \beta_1 \quad (I.12)$$

$$\gamma = \beta_1 + \phi_2 = \beta_1 + y_2 \gamma \quad (I.13)$$

$$\gamma = \gamma_1 = \frac{\beta_1}{1 - y_2} \quad (I.14)$$

- le cas des petits dominants (fig. I.5 b) : il y a quelques gros grains dans le mélange et les petits grains bloquent le système.

Dans ce cas on écrit que :

$$\phi_2^* = \beta_2 (1 - \phi_1) \quad (I.15)$$

$$\gamma = \phi_1 + \beta_2 (1 - \phi_1) = y_1 \gamma + \beta_2 (1 - y_1 \gamma) \quad (I.16)$$

$$\gamma = \gamma_2 = \frac{\beta_2}{1 - y_1 (1 - \beta_2)} \quad (I.17)$$

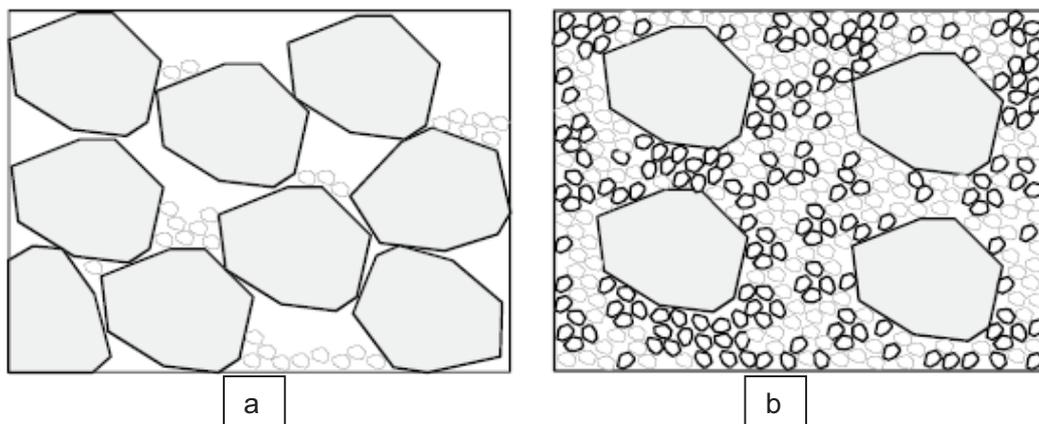


Figure I.5. Les gros grains (a) ensuite les petits (b) bloquent le système [Sedran et col., 1999]

Comme par définition on a :

$$\phi_1 \leq \beta_1 \text{ et } \phi_2 \leq \beta_2(1 - \phi_1) \text{ on a donc } \gamma \leq \gamma_1 \text{ et } \gamma \leq \gamma_2 \quad (I.18)$$

De plus on a forcément une égalité car sinon il existe $\varepsilon > 0$ tel que $\phi_1 = \beta_1(1 - \varepsilon)$ et $\phi_2 = \beta_2(1 - \varepsilon - \phi_1)$ ce qui signifie que le mélange peut être contenu dans un volume $(1 - \varepsilon)$. Ceci est contraire à l'hypothèse que le mélange constitue un empilement dans le volume unité.

en conclusion on a donc :

$$\gamma = \inf_i (\gamma_i) \quad (I.19)$$

- Mélange avec interaction totale

Considérons maintenant le cas où $d_1 = d_2$. Imaginons que le volume unité est rempli d'un côté par la classe 1 et l'autre partie par la classe 2 (figure I.6).

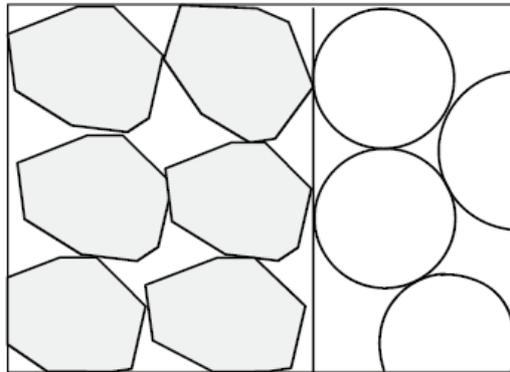


Figure I.6. Les deux classes ont le même diamètre [Sedran et col., 1999]

On écrit alors que :

$$\frac{\phi_1}{\beta_1} + \frac{\phi_2}{\beta_2} = 1 \quad (I.20)$$

$$\gamma = \left(1 - \phi_2 \frac{\beta_1}{\beta_2}\right) + \phi_2 = \left(\beta_1 - y_2 \gamma \frac{\beta_1}{\beta_2}\right) + y_2 \gamma \quad (I.21)$$

$$\gamma = \gamma_1 = \frac{\beta_1}{1 - y_2 \left(1 - \frac{\beta_1}{\beta_2}\right)} \quad (1.22)$$

De façon symétrique, on peut écrire :

$$\gamma = \gamma_2 = \frac{\beta_2}{1 - y_1 \left(1 - \frac{\beta_2}{\beta_1}\right)} \quad (1.23)$$

Comme $y_1 + y_2 = 1$, on voit que dans ce cas $\gamma = \gamma_1 = \gamma_2$

- Cas général

Considérons maintenant que $d_1 \geq d_2$ mais que d_2 ne soit pas très petit par rapport à d_1 . Il nous faut alors prendre en compte deux types d'interaction qu'exercent les classes l'une sur l'autre.

Si un grain de la classe 2 est inséré dans un empilement de gros grains (qui sont alors dominants), il provoque localement un desserrement de ce dernier puisqu'il n'est plus assez petit pour s'immiscer dans l'espace laissé disponible (fig. 1.7a). C'est ce que l'on appelle l'effet de desserrement de la classe 2 sur la classe 1. Tout se passe alors comme si la compacité propre de la classe 1 était diminuée par la présence de la classe 2. Si les grains de la classe 2 sont suffisamment éloignés les uns des autres, on fait alors l'hypothèse que cet effet est une fonction linéaire de ϕ_2 et on écrit alors que :

$$\phi_1^* = \beta_1 (1 - \lambda_{2 \rightarrow 1} \phi_2) \quad (1.24)$$

Donc la compacité du mélange s'écrit ainsi :

$$\lambda = \beta_1 (1 - \lambda_{2 \rightarrow 1} \phi_2) + \phi_2 = \beta_1 (1 - \lambda_{2 \rightarrow 1} y_2 \gamma) + y_2 \gamma \quad (1.25)$$

$$\gamma = \gamma_1 \frac{\beta_1}{1 - y_2 (1 - \beta_1 \lambda_{2 \rightarrow 1})} \quad (1.26)$$

Où $\lambda_{2 \rightarrow 1}$ est une constante dépendant des propriétés des grains 1 et 2.

Pour avoir un modèle cohérent avec les deux cas extrêmes précédents. On écrit plutôt :

$$\gamma = \gamma_1 \frac{\beta_1}{1 - y_2 \left(1 - a_{1,2} \frac{\beta_1}{\beta_2} \right)} \quad (1.27)$$

Où $a_{1,2}$ est la fonction de desserrement des grains 1 par les grains 2 et ne dépend que de d_1 et d_2 . On a $a_{1,2} = 0$ quand $d_1 \gg d_2$ (pas d'interaction) et $a_{1,2} = 1$ quand $d_1 = d_2$ (interaction totale).

De la même façon, si un grain de la classe 1 est inséré dans un empilement de petits grains (qui sont alors dominants), il provoque une augmentation de la porosité au voisinage de sa surface (fig. I.7b). Ceci est appelé effet de paroi de la classe 1 sur la classe 2. Tout se passe, alors, comme si les grains de la classe 2 conservaient leur compacité propre en présence des grains de la classe 1 mais disposait d'un volume réduit pour s'empiler. Ici encore nous supposons que la réduction est une fonction linéaire de ϕ_1 si les grains 1 sont suffisamment éloignés les uns des autres.

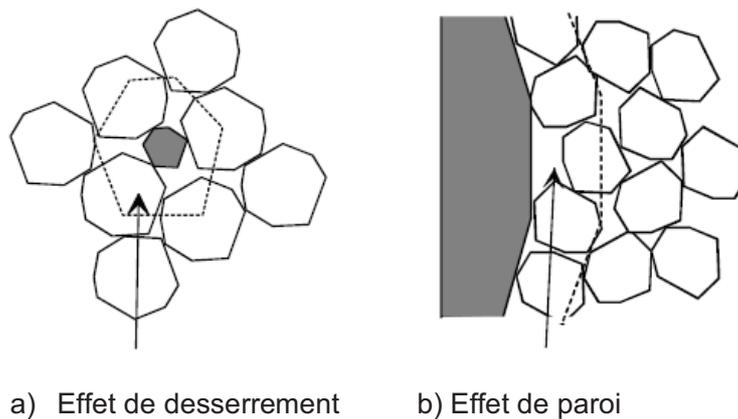


Figure I.7. Effet d'interaction entre classes granulaires [Sedran et col. ; 1999]

On écrit alors :

$$\phi_2^* = \beta_2 (1 - \phi_1 - \lambda_{1 \rightarrow 2} \phi_1) \quad (1.28)$$

donc que la compacité du mélange s'écrit ainsi :

$$\gamma = \phi_1 + \beta_2 (1 - \phi_1 - \lambda_{1 \rightarrow 2} \phi_1) = y_1 \gamma + \beta_2 (1 - y_1 \gamma - \lambda_{1 \rightarrow 2} y_1 \gamma) \quad (1.29)$$

$$\gamma = \gamma_2 = \frac{\beta_2}{1 - y_1 \left(1 - \beta_2 (1 + \lambda_{1 \rightarrow 2}) \right)} \tag{I.30}$$

Comme précédemment, pour avoir un modèle cohérent avec les deux cas extrêmes précédents, on écrit plutôt :

$$\gamma = \gamma_2 = \frac{\beta_2}{1 - y_1 \left(1 - \beta_2 + b_{2,1} \beta_2 \left(1 - \frac{1}{\beta_1} \right) \right)} \tag{I.31}$$

Où $b_{2,1}$ est la fonction d'effet de paroi exercée par les grains 1 sur les grains 2 et ne dépend que de d_1 et d_2 . On a $b_{2,1}=0$ quand $d_1 \gg d_2$ (pas d'interaction) et $b_{2,1}=1$ quand $d_1=d_2$ (interaction totale). De la même façon que pour les mélanges sans interaction on montre que:

$$\gamma = \inf_i (\gamma_i) \tag{I.32}$$

La figure I.8 résume l'allure de la compacité dans les trois cas présentés.

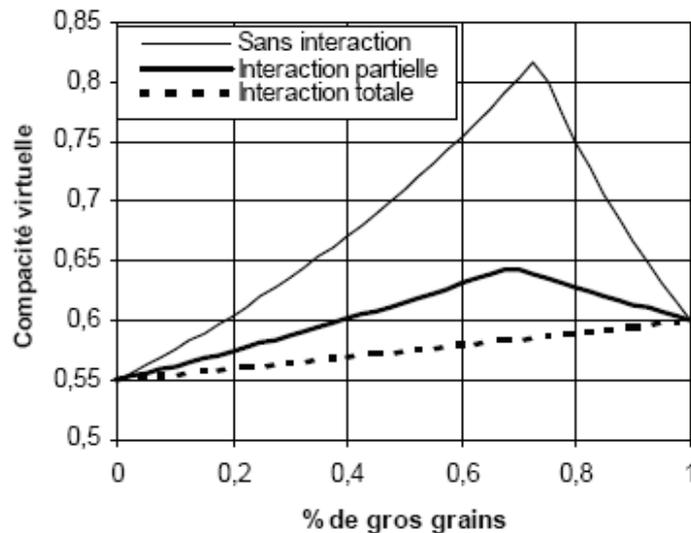


Figure I.8. Allure de la compacité virtuelle pour un mélange binaire de deux classes unimodales [Sedran et col., 1999]

1.5.1.2. Cas général d'un mélange polydispersé

Considérons maintenant le cas général avec interactions pour un mélange de n classes granulaires telles que $d_1 \geq d_2 \geq \dots \geq d_i \geq d_{i+1} \geq \dots \geq d_n$.

Considérons que la classe i soit la classe dominante. Cette classe, subit l'effet de paroi des classes plus grossières donc le volume disponible pour cette classe est :

$$1 - \sum_{j=1}^{i-1} (\phi_j + \lambda_{j \rightarrow i} \phi_j) \quad (1.32)$$

Notons que l'on néglige ici les interactions secondaires pour ne considérer que les interactions entre la classe dominante et les autres classes. Dans ce volume, la teneur volumique en grains fin de classe k est :

$$\frac{\phi_k}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} (\phi_j + \lambda_{j \rightarrow i} \phi_j)} \quad (1.34)$$

Ces classes exercent alors sur la classe i , un effet de desserrement qui, en négligeant les interactions secondaires, se traduit par une baisse de sa compacité virtuelle apparente qui devient :

$$\beta_i \left(1 - \frac{\sum_{j=i+1}^n \lambda_{j \rightarrow i} \phi_j}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} (\phi_j + \lambda_{j \rightarrow i} \phi_j)} \right) \quad (1.35)$$

On en déduit donc que :

$$\phi_i^* = \beta_i \left(1 - \frac{\sum_{j=i+1}^n \lambda_{j \rightarrow i} \phi_j}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} (\phi_j + \lambda_{j \rightarrow i} \phi_j)} \right) \left(1 - \sum_{j=1}^{i-1} (\phi_j + \lambda_{j \rightarrow i} \phi_j) \right) \quad (1.36)$$

$$\phi_i^* = \beta_i - \beta_i \sum_{j=1}^{i-1} \phi_j (1 + \lambda_{j \rightarrow i}) - \beta_i \sum_{j=i+1}^n \phi_j \lambda_{j \rightarrow i}$$

La compacité du mélange s'écrit alors :

$$\gamma = \sum_{j=1}^{i-1} \phi_j + \phi_i^* + \sum_{j=i+1}^n \phi_j \quad (1.37)$$

$$\gamma = \beta_i + \gamma \sum_{j=1}^{i-1} y_j (1 - \beta_i (1 + \lambda_{j \rightarrow i})) + \gamma \sum_{j=i+1}^n y_j (1 - \beta_i \lambda_{j \rightarrow i})$$

$$\gamma = \gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} y_j (1 - \beta_i (1 + \lambda_{j \rightarrow i})) - \sum_{j=i+1}^n y_j (1 - \beta_i \lambda_{j \rightarrow i})} \quad (1.38)$$

En reprenant la notation précédente on obtient :

$$\gamma = \gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} y_j \left(1 - \beta_i + b_{i,j} \beta_i \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right) - \sum_{j=i+1}^n y_j \left(1 - a_{i,j} \frac{\beta_i}{\beta_j} \right)} \quad (1.39)$$

Comme dans le cas binaire on démontre aisément que :

$$\gamma = \inf(\gamma_i) \quad (1.40)$$

Ce formalisme ne s'applique, par définition, qu'aux compacités virtuelles et ne peut pas être utilisé directement pour la prédiction des compacités expérimentales. Par exemple, on voit sur la figure 1.8 que les courbes théoriques de compacité présentent un optimum pointu alors que les courbes expérimentales ont, en ce point, une tangente horizontale.

Le modèle doit donc être complété et les fonctions $a_{i,j}$ et $b_{i,j}$ déterminées.

1.5.2. LE MODELE DE SUSPENSION SOLIDE [Sedran et col., 1994)

On revient d'abord aux fondements physiques de la notion de compacité. Dans les modèles précédents, cette grandeur est implicitement supposée intrinsèque aux mélanges granulaires considérés. Or, dans la pratique, la compacité est le résultat d'une expérience relative à un matériau donné, selon un certain mode opératoire. Ainsi, un empilement de sphères homométriques peut atteindre une compacité de 74% s'il est réalisé grain par grain selon un arrangement hexagonal compact. Pourtant, le volume solide d'un mélange aléatoire des mêmes sphères, avec des moyens de mise en place énergiques (vibration et compression), ne dépasse guère 64%. Il faut donc admettre que toutes les valeurs comprises entre ces deux bornes sont théoriquement possibles à atteindre, et que, par conséquent, le mélange à 64% n'est pas absolument indéformable. En d'autres termes, sa viscosité est grande, mais finie. Les deux idées directrices de ce nouveau modèle sont donc les suivantes :

On admet que, pour tout mélange granulaire, il existe une compacité virtuelle γ , valeur géométriquement maximale, mais qu'on ne peut atteindre par des procédures de malaxage «en aveugle» (mélange aléatoire).

Une mesure de compacité C correspond à la réalisation d'une suspension de viscosité grande, mais finie, égale à une valeur de référence η_r^* (d'où le terme de suspension solide).

Un empilement unimodal de taille d_i admet donc une compacité propre virtuelle β_i , et une compacité propre réelle α_i telle que :

$$\eta_r^* = \exp \left(\frac{2,5}{\frac{1}{\alpha_i} - \frac{1}{\beta_i}} \right) \quad (I.41)$$

Plus le mélange sera serré, plus la viscosité relative de référence, grandeur caractérisant l'intensité du serrage, sera élevée. 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 :

$$\eta_r^* = \exp \left(\sum_{i=1}^n \frac{2,5 y_i}{\frac{1}{C} - \frac{1}{\gamma_i}} \right) \quad (I.42)$$

Où γ_i , est la compacité virtuelle du mélange atteinte lorsque la classe i , de compacité propre virtuelle β_i , est dominante. Remarquons au passage que cette équation admet une seule racine pour toute valeur de η_r^* supérieure ou égale à 1. C'est en effet le produit de n fonctions monotones croissantes, variant de 1 (pour $C = 0$) à l'infini (pour $C = \gamma_i$).

On voit déjà que le deuxième défaut du modèle linéaire de compacité (surestimation de la compacité dans les zones optimales) va se trouver, au moins en partie, corrigé. En effet, dans la formulation initiale, la classe dominante «faisait la loi», d'où un changement brutal de l'évolution de la compacité lorsqu'on changeait de classe dominante. Ici, au contraire, chaque classe de grain participera simultanément à l'évolution de la compacité, son influence étant pondérée par son caractère plus ou moins dominant, c'est-à-dire par la différence $1/C - 1/\gamma_i$.

I.5.2.1. Nouvelle définition des interactions granulaires

Il reste encore à corriger le premier défaut identifié, à savoir la difficulté à traiter les mélanges de grains de même taille, mais de compacités propres différentes. Soit donc deux classes de grains, de compacités propres virtuelles β_1 et β_2 , avec $d_1 = d_2$; mais $\beta_1 \neq \beta_2$.

Dans un tel cas, il est légitime de supposer qu'il n'existe aucune «synergie de compactage» entre les deux populations : tout se passe comme si elles occupaient séparément deux parties du récipient de volumes respectifs Φ_1/β_1 et Φ_2/β_2 . La compacité moyenne en fonction d'un des deux titres volumiques s'écrit alors :

$$\gamma = \frac{\beta_1}{1 - y_2(1 - \beta_1/\beta_2)} = \frac{\beta_2}{1 - y_1(1 - \beta_2/\beta_1)} \quad (1.43)$$

Revenant à la première étape de construction du modèle linéaire de compacité, on se souvient que pour $d_1 \gg d_2$ (mélange sans interactions), on a lorsque les gros grains dominant :

$$\gamma = \frac{\beta_1}{1 - y_2} \quad (1.44)$$

et lorsque les petits grains sont dominants :

$$\gamma = \frac{\beta_2}{1 - (1 - \beta_2)y_1} \quad (1.45)$$

On établit alors sans peine une formulation générale intégrant les trois cas précédents, en écrivant :

$$\gamma = \inf \gamma_1, \gamma_2 \quad (1.46)$$

avec :

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{1 - (1 - a_{12} \beta_1/\beta_2)y_2} \quad (1.47)$$

et :

$$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{1 - [1 - \beta_2 + b_{21}\beta_2(1 - 1/\beta_1)]y_1} \quad (1.48)$$

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} . En généralisant à l'ordre n , on obtient, pour l'expression de la compacité virtuelle d'un empilement multimodal :

$$\gamma = \inf (\gamma_i) \quad (1.49)$$

$$1 \leq i \leq n, \quad \gamma_i \neq 0$$

Avec :

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} [1 - \beta_i + b_{ji}\beta_i(1 - 1/\beta_j)] y_j - \sum_{j=i+1}^n [1 - a_{ji}\beta_i/\beta_j] y_j} \quad (1.50)$$

Le modèle de suspension solide est donc constitué de l'équation (1.50) pour le calcul des termes γ_i et de l'équation (1.41) pour le calcul de la compacité réelle. 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.

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 figures I.9 et I.10.

Sur les figures I.9 et I.10, nous constatons que si le rapport des tailles est bien le paramètre principal contrôlant l'affinité de remplissage de deux classes, des disparités importantes apparaissent pour les couples de même étendue. Pour chaque mélange, 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.

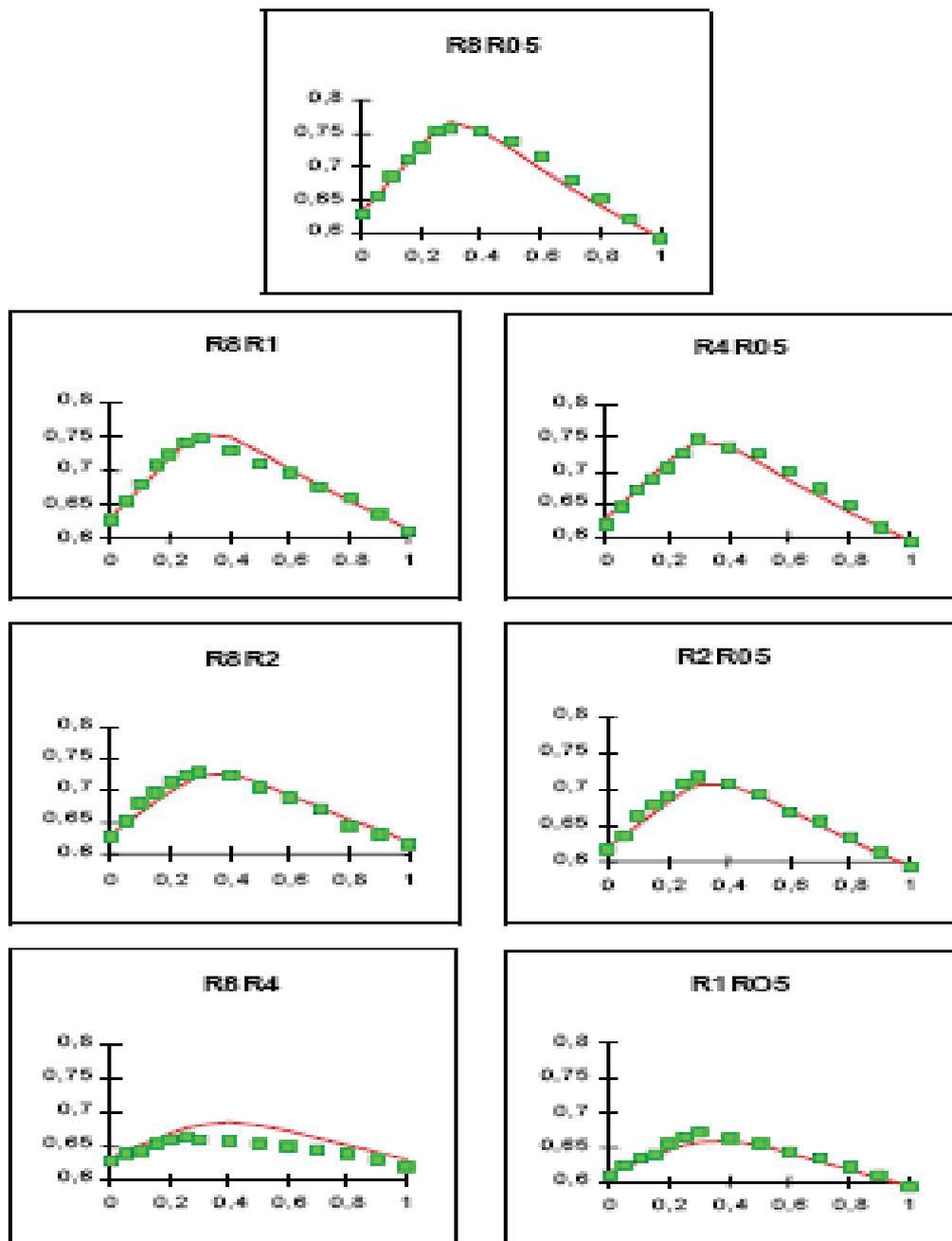


Figure I.9. Mélanges binaires des granulats roulés. Compacité en fonction de la proportion de grains fins. Les points marquent les valeurs expérimentales; les courbes correspondent aux valeurs du modèle.

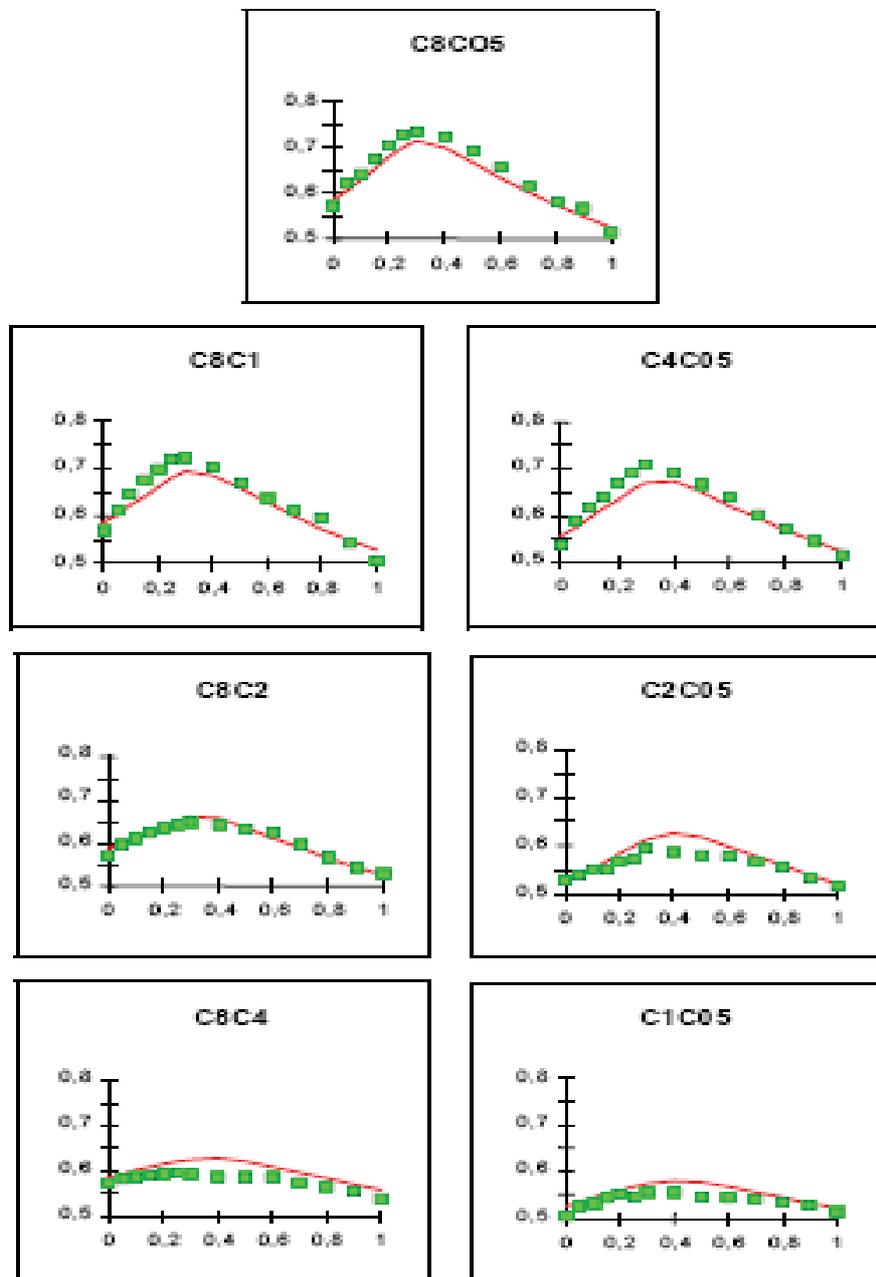


Figure I.10. Mélanges binaires de granulats concassés. Compacité en fonction de la proportion de petits grains. Points expérimentaux et lissages fournis par le modèle de suspension solide.

I.5.3. LE MODELE D'EMPILEMENT COMPRESSIBLE

Récemment, un nouveau modèle plus complet de compacité granulaire, le modèle d'empilement compressible (MEC) [NGO, 2007], a été développé au sein du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Ce modèle permet de prendre en compte l'aptitude à se compacter de chaque granulat, les interactions granulaires (effet de paroi et de desserrement), l'effet de paroi et l'effet de l'énergie de mise en œuvre.

On distingue, dans le cadre du MEC, les notions de compacité virtuelle et compacité expérimentale qui sont respectivement la compacité optimale qu'on peut atteindre en effectuant un empilement optimal grain par grain, et la compacité réelle du mélange dans lequel l'arrangement granulaire est naturellement désordonné. La compacité virtuelle γ d'un mélange polydispersé est donné par :

$$\gamma = \underset{i}{MIN}(\gamma_i)$$

$$\text{avec } \gamma_i = \frac{\beta}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} [1 - \beta_i + b_{i,j} \beta_i (1 - 1/\beta_j)] y_j - \sum_{j=i+1}^n [1 - a_{i,j} \beta_i / \beta_j] y_j} \quad (I.51)$$

La réalisation du mélange, dans la pratique, est loin de l'état virtuel. La compacité réelle est, par conséquent, inférieure à la compacité virtuelle et dépend de l'énergie de serrage. Cette dernière est introduite dans le MEC par l'intermédiaire du concept de l'indice de serrage K. La compacité réelle C d'un mélange de granulats (figure I.11) est reliée à K par l'expression :

$$K = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\frac{y_i}{\beta_i}}{\frac{1}{C} - \frac{1}{\gamma_i}} \right) \quad (I.52)$$

Où :

C : compacité expérimentale du mélange,

K : indice de serrage pour le mélange.

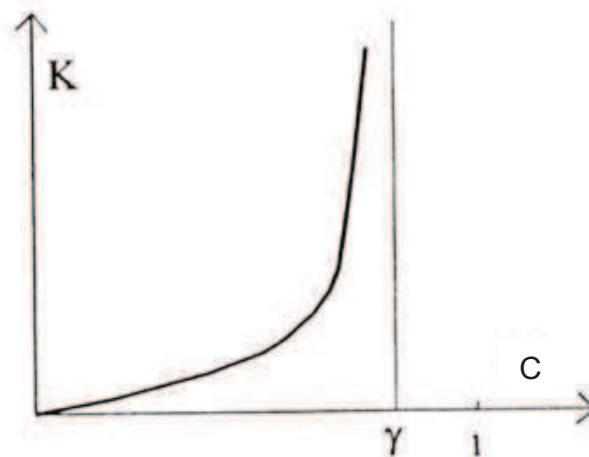


Figure I.11. Variation de K en fonction de la compacité.

La compacité réelle (C) est alors définie implicitement par cette relation dans laquelle les " γ_i " sont les paramètres de contrôle de l'expérience, les " β_i " sont les caractéristiques des classes de grains et les " α_i " sont donnés par l'équation (I.51).

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 (figure I.11), ce qui montre qu'il existe bien, pour toute valeur positive de K, une valeur unique de C qui satisfasse l'équation (I.51).

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

$$K = \frac{1}{\frac{\beta_i}{\alpha_i} - 1} \quad (I.53)$$

Ce modèle a été validé successivement sur des mélanges binaires et ternaires, sur six fractions discontinues de granulats, sur 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. Comparons maintenant les différentes valeurs K obtenues dans les procédures de calibration Tableau I.1.

Tableau I.1. Résumé des valeurs de K (indice de serrage) pour différents procédés de remplissage [de Larrard ; 2000]

Procédé de Remplissage	Remplissage à sec				Remplissage en présence d'eau
	Déversement[Cintré 1988]	Piquage avec une tige [Kanta Rao et Krishnamoorthy]	Vibration[Joi sel 1952]	Vibration + pression 10 kPa [de Larrard et al 1994b]	Pate lisse[paragraphe 2.1.2]
K	4,1	4,5	4,75	9	6,7

En prenant pour K une valeur égale à 9, de Larrard (2000) retrouve de façon satisfaisante les résultats expérimentaux de compacité, avec une erreur, en valeur absolue de 0,77% pour les grains roulés et de 1,71% pour les grains concassés (figure I.9 et fig. I.10). Par comparaison, la moyenne des écarts-types, décrivant la répétabilité des mesures, est respectivement de 0,0026 et de 0,0078 pour les granulats roulés et concassés.

Des mélanges ternaires ont été testés dans le même programme d'étalonnage [de Larrard et col., 1994b]. Après avoir arbitrairement sélectionné les classes <0,5, 1 et 8, les combinaisons les plus compactes ont été recherchées par essais expérimentaux successifs (tableau I.2 et figure I.12). Ces mesures ont ensuite été simulées avec le Modèle d'Empilement Compressible, en prenant la valeur 9 pour K.

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 (proportions respectives de chaque fraction, des plus fins au 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.

Avec les granulats concassés, on retrouve 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 (la valeur de l'optimum théorique est de 0,7854). L'optimum théorique est obtenu pour les proportions 0,29/0,15/0,56, et la compacité expérimentale correspondante, calculée par interpolation linéaire, est de 0,7826. L'erreur est ici égale à 0,0167 points.

Tableau I.2. Compacités mesurées (grains roulés et concassés) et prévisions du modèle.

%R<05	%R1	%R8	C _{théo}	C _{exp}
25	0	75	0,762	0,752
30	0	70	0,775	0,753
22	10	68	0,787	0,772
27	10	63	0,788	0,777
32	10	58	0,779	0,764
37	10	53	0,764	0,756
42	10	48	0,748	0,738
12	20	68	0,781	0,767
17	20	63	0,795	0,775
22	20	58	0,795	0,779
27	20	53	0,785	0,782
32	20	48	0,771	0,774
37	20	43	0,755	0,76
42	20	38	0,739	0,746
17	25	58	0,794	0,791
22	25	53	0,79	0,795
27	25	48	0,779	0,785
12	30	58	0,784	0,781
17	30	53	0,786	0,783
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

%C<05	%C1	%C8	C _{théo}	C _{exp}
22	10	68	0,755	0,775
27	10	63	0,778	0,776
32	10	58	0,786	0,797
37	10	53	0,781	0,79
42	10	48	0,77	0,787
12	20	68	0,734	0,734
17	20	63	0,761	0,744
22	20	58	0,779	0,752
27	20	53	0,785	0,777
32	20	48	0,782	0,788
37	20	43	0,772	0,786
42	20	38	0,76	0,781
17	30	53	0,753	0,77
22	30	48	0,762	0,769
27	30	43	0,765	0,775
32	30	38	0,762	0,778
37	30	33	0,755	0,769
42	30	28	0,745	0,765
32	15	53	0,786	0,799

Notons que les interpolations linéaires sont en dessous de la réalité (résultats pessimistes), à cause de l'allure concave de la courbe de compacité. De plus, cette série de mesures, souffre du fait que la granularité réelle des granulats fins (R<05 et C<05), d'étendue granulaire supérieure à celle des gros, n'a malheureusement pas été mesurée.

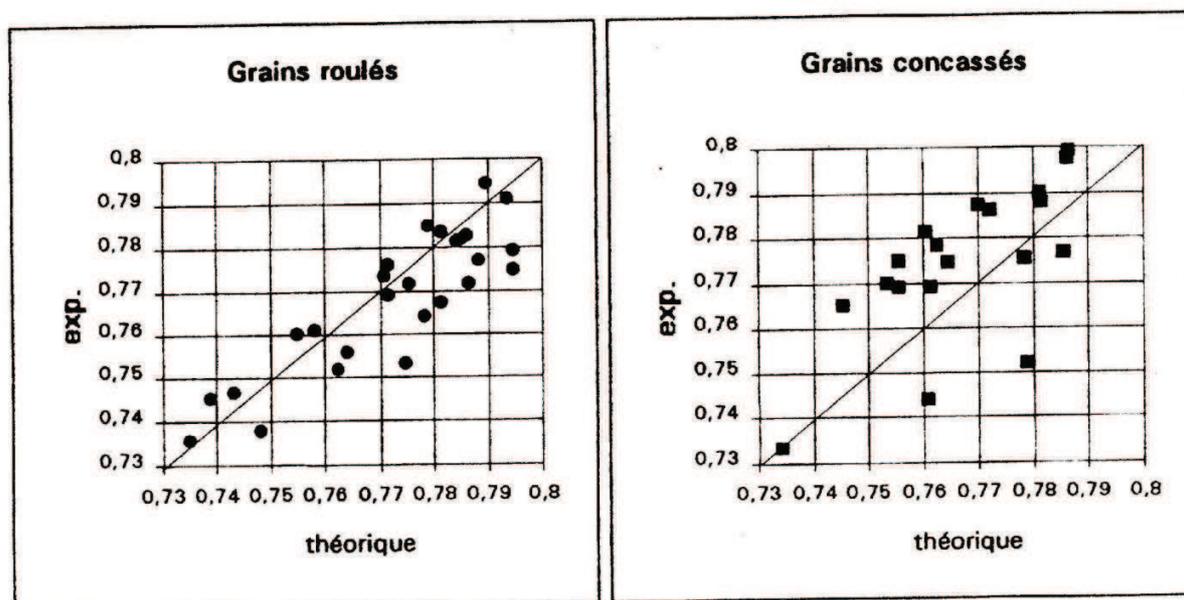


Fig. I.12. Comparaison entre prévision et mesures pour les mélanges ternaires [de Larrard ; 2000]

I.6. COMPARAISON ENTRE LES COMPACITES DES MELANGES GRANULAIRES

Le Modèle d'Empilement Compressible est validé par comparaison entre prévisions théoriques et résultats expérimentaux, pour diverses données originales ou tirées de la littérature. A partir des différentes formulations, il est possible de reconstituer les fractions obtenues et de mesurer leur compacité expérimentale (C) par l'essai de vibro-compactage. [CAS, 2007]

De plus, avec le Modèle d'Empilement Compressible et les résultats de compacité expérimentale, il est aussi possible de déterminer la compacité résiduelle du mélange (β) à partir du logiciel BétonLabPro2. Le tableau I.3 présente les résultats de ces compacités expérimentales et résiduelles.

Tableau I.3. Comparaison entre les compacités des mélanges granulaires [CAS, 2007].

Compacités expérimentale (K = 9) et résiduelle des différentes méthodes					
		Témoin	Plan d'expérience	Dreux	Baron Ollivier
B1	expérimentale	0,771	0,784	0,712	0,746
	résiduelle	0,622	0,649	0,591	0,595
B2	expérimentale	0,769	0,774	0,735	0,772
	résiduelle	0,615	0,631	0,614	0,612

Si l'on regarde l'optimum de compacité selon la méthode de formulation, expérimentalement, l'approche par le plan d'expérience semble la plus avantageuse que ce soit pour B1 ou B2. La valeur de la compacité résiduelle obtenue théoriquement avec le MEC est également maximale avec cette méthode. En revanche, les compacités obtenues avec la méthode de Dreux sont les plus faibles expérimentalement et théoriquement.

I.7. COMPARAISON ENTRE LES COMPACITES MESUREES AU LABORATOIRE

Sur la figure I.13, nous présentons quelques résultats de la littérature concernant les mesures au laboratoire de compacité effectuées sur plusieurs types de granulats (tendres, durs, roulés et concassés) selon des modes opératoires différents [CAS 2007].

Si nous comparons les compacités du concassé tendre aux deux autres agrégats durs, nous observons qu'il se caractérise par de très faibles valeurs de compacité après versement, et par un supplément notable de compacité lorsqu'on passe de la vibration sous 1 kPa à la vibration sous 10 kPa (figure I.13). Ce dernier phénomène peut s'expliquer par une attrition relativement importante, qui rendrait le mode opératoire «vibration sous 10 kPa» impropre à ce type de matériaux.

Si l'on compare les valeurs obtenues par les deux modes opératoires sous 10 kPa, en excluant les concassés tendres les résultats de ces deux essais ne sont pas significativement différents.

Le mode opératoire préconisé alors pour mesurer au laboratoire des compacités qui s'apparentent à celles des mélanges confectionnés in situ, sera l'essai à secousses à 10kPa qui assure à la fois offre la plus grande compacité au mélange granulaire et évite l'usure des granulats pendant l'essai, particulièrement pour les agrégats de nature tendre.

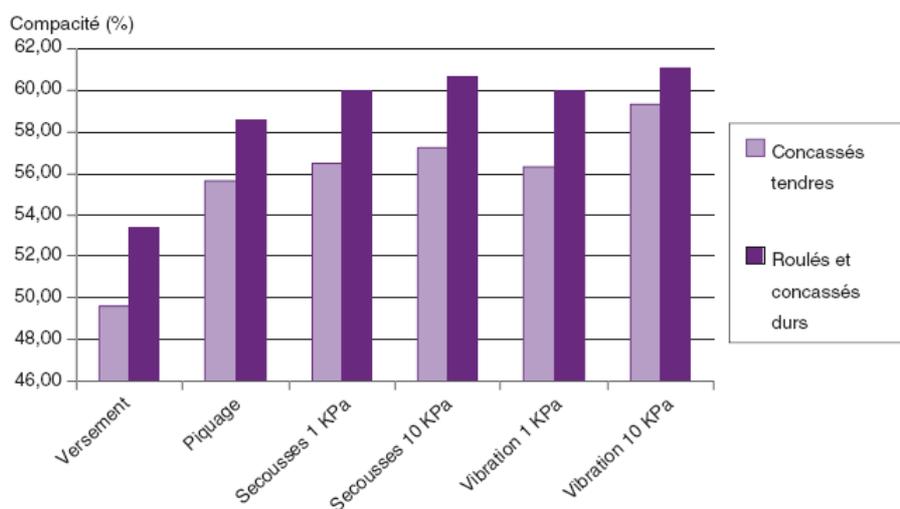


Figure I.13. Valeurs moyennes de compacité selon différents modes opératoires, en distinguant les agrégats tendres des agrégats durs [CAS, 2007]

I.8. CONCLUSION

On dissocie deux modes pour la détermination de la compacité expérimentale selon les matériaux considérés :

- la compacité des granulats qui concerne les sables et les gravillons avec $D_{\max} > 80\mu\text{m}$,
- la compacité des poudres pour les ciments et les additions minérales ($D_{\max} < 80\mu\text{m}$) avec ou sans adjuvant.

Pour les granulats, la compacité réelle peut être mesurée en utilisant différents procédés (déversement, piquage, vibro-compactage), 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 par vibro-compactage afin d'assurer aux mélanges granulaires à sec, un serrage maximum (indice de serrage égal à 9).

Le choix que nous préconisons par rapport au mode opératoire qui permet la mesure des compacités réelles de nos mélanges granulaires à sec sera celui qui offre un grand indice de serrage et une attrition quasiment nulle de nos granulats.

CHAPITRE II. MESURE DE LA COMPACTITE ET PROGRAMME EXPERIMENTAL

II.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous présentons un état de l'art sur les différents bancs d'essais utilisés pour la mesure de la compacité des granulats destinés à la fabrication du béton mis en place dans les ouvrages de génie civil. Nous allons de l'essai le plus simple (versement gravitaire) en passant par le mode opératoire combinant choc après chute et compression jusqu'à l'essai de compacité des fractions granulaires à la table à secousses que nous détaillons par la suite. Toutefois, en plus de la caractérisation des granulats, nous présentons notre programme expérimental ainsi que les résultats obtenus.

II.2. MODES OPERATOIRES ENVISAGES POUR L'ESSAI DE COMPACTITE

II.2.1. Simple versement

Cette méthode, décrite dans la norme NF EN 1097-3, 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, et en mesurant la masse M du récipient après arasement. M_0 étant la masse du récipient à vide, et ρ la masse volumique réelle de l'échantillon alors, la compacité s'écrit :

$$c = \frac{M - M_0}{\rho V} \quad (II.1)$$

Dans cette méthode, le cylindre 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.

II.2.2. Piquage

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.

Pour cet essai, les cylindres utilisés sont identiques à ceux du précédent mode opératoire. 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.

II.2.3. Secousses sous compression de 1kPa et 10kPa [de LAR, 2003]

Pour ce mode opératoire, un échantillon de 7 kg de gravillons est placé dans un cylindre de hauteur et de diamètre respectivement de 400 et 159 mm. Pour le sable, la masse de l'échantillon est de 1 kg, et les dimensions du récipient de 300 et 95 mm.

Le matériau est versé en trois couches successives, chaque ajout étant suivi d'une série de vingt secousses appliquées au moule. Ensuite, des pistons en aluminium (pour la compression de 1 kPa) ou en acier (pour la compression de 10 kPa), de hauteur appropriée, sont placés sur l'échantillon, et une série de quarante secousses est encore appliquée.

Ces séries de chocs sont créées par une table carrée, solidaire du fond du moule, articulée sur un de ses côtés, qui pivote et retombe sous l'effet d'une came (figure II.1).

Dans ce mode opératoire, la masse du matériau est imposée et le volume est mesuré à l'aide d'un pied à coulisse, à partir de la mesure de la distance entre le bord du moule et le haut du piston. L'échantillon de matériau est d'abord caractérisé sous une compression de 1 kPa, puis, le cylindre ayant été vidé, l'essai est répété avec la compression de 10 kPa.

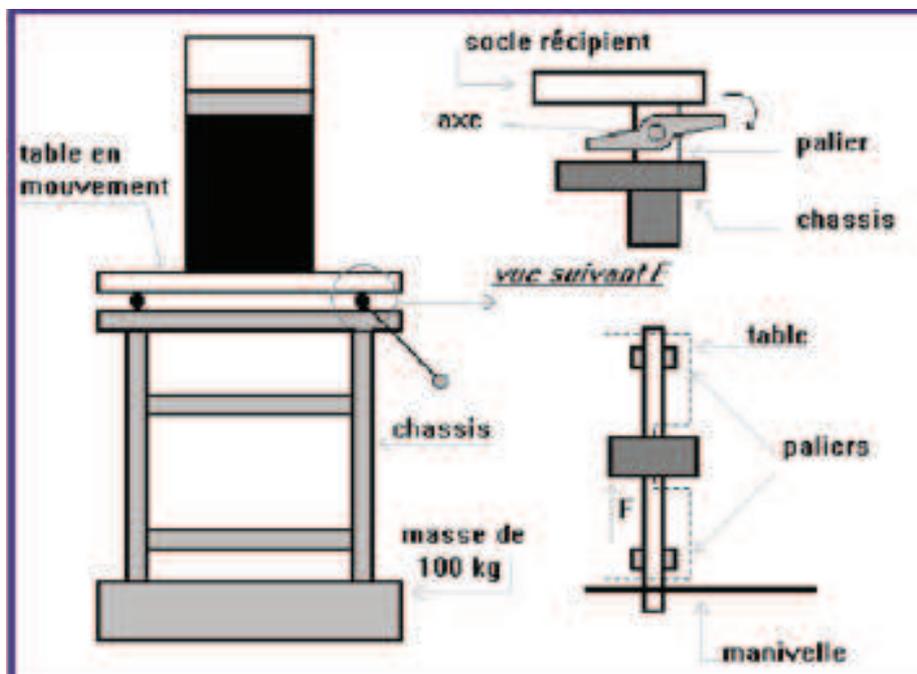


Figure II.1. Table à chocs utilisée dans les essais (Hauteur de chute = 1cm au niveau de la came) [de LAR, 2003]

II.2.4. Vibration sous compression de 1kPa et 10kPa

Les tailles des échantillons, des moules et des pistons sont les mêmes que pour la méthode précédente (voir chapitre II.2.3).

La vibration, d'une amplitude de 0,2 mm et d'une fréquence de 50 Hz, est appliquée à l'aide de la table vibrante fournie avec l'angulomètre à gravillons (modèle AG 20, norme NF P 18-563).

Le remplissage de chacune des trois couches est suivi d'une vibration pendant 20 secondes. Ensuite, le piston est placé dans le moule rempli de matériau, et une vibration est appliquée pendant 90 secondes. La mesure du volume final de l'échantillon est effectuée par la même méthode que précédemment. Là aussi, un échantillon de matériau est successivement caractérisé sous une compression de 1 kPa, puis de 10 kPa (figure II.2).

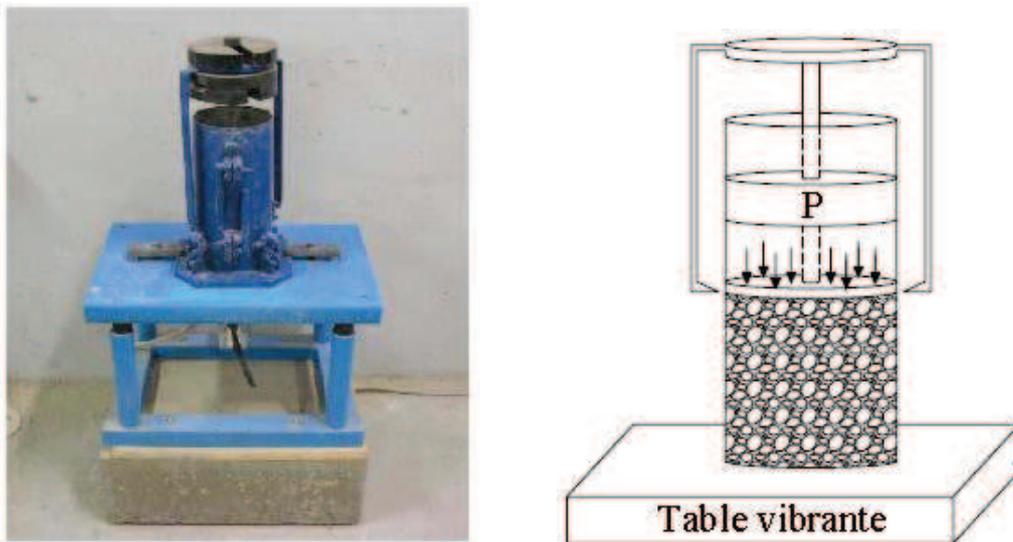


Figure II.2. Dispositif de mesure de la compacité [El Barrak, 2005].

La compacité se calcule par la formule suivante :

$$C = \frac{4 \cdot M_s}{\pi \cdot \Phi^2 \cdot H \cdot \rho_s} \quad (\text{II.2})$$

Où :

M_s : Masse de la matière solide,

Φ : Diamètre du moule,

H : Hauteur de l'échantillon après compactage,

ρ_s : Masse volumique réelle du granulat utilisé.

II.2.5. Essai de compacité des fractions granulaires à la table à secousses

Les travaux de recherche effectués par François de Larrard et son équipe au laboratoire central des ponts et chaussées, [de LAR, 2003], avaient pour but de développer un nouveau mode opératoire de mesure de compacité des fractions granulaires.

Le matériel devait être simple, peu coûteux, si possible sans alimentation électrique, 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.

En juillet 2004, ce mode est apparu avec les mêmes principes que le mode précédent [de LAR, 2003], avec un changement dans les dimensions de l'éprouvette utilisée, que nous allons présenter en détail dans ce qui suit.

II.3. APPAREILLAGE UTILISE ET MODE OPERATOIRE

Dans le cadre de notre étude expérimentale, nous avons procédé au montage d'un banc d'essai local conforme à la méthode n° : 61 LCPC [LED, 2004].

II.3.1. Appareillage

Le banc d'essai utilisé pour notre travail est une table à secousses (figure II.3), localisée au laboratoire de structures de la faculté de Technologie de l'université de Tlemcen. Elle est réalisée conformément à la méthode n° 61 du laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) France (figure II.4) avec l'aide et le soutien financier de l'entreprise SEROR – Tlemcen. Ce choix est le résultat d'une démarche qui voudrait mesurer la compacité à sec des mélanges granulaires avec un serrage maximal tout en évitant l'attrition des agrégats.

Nous allons dans ce qui suit, donner un descriptif concernant la méthode utilisée en détaillant toutes les étapes à suivre pour l'exécution des essais de mesure de la compacité.

Avec la table à secousses, nous avons besoin du matériel suivant 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 $\pm 0,1$ mm.



Figure II.3. Table à choc Faculté de Technologie de Tlemcen

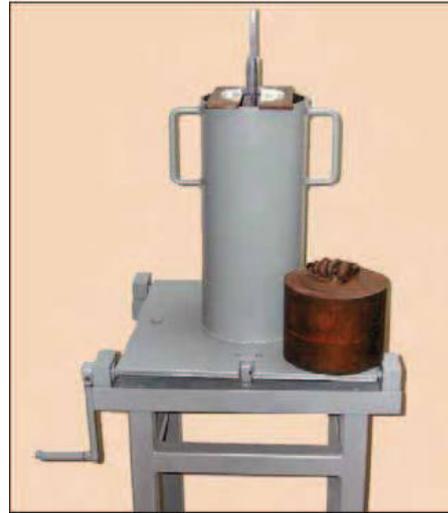


Figure II.4. Table à choc LCPC, Paris

II.3.1.1. Composantes du banc d'essai [Méthode d'essai n° 61 LCPC]

- 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 côtés par l'intermédiaire d'une charnière et, d'autre part, un arbre à came entraîné en rotation par une manivelle (figure II.5). La came est en acier dur. Sa forme doit permettre une chute libre de la table sur une hauteur de $1 \pm 0,05$ 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. 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.

- Moule

Le moule est constitué d'un cylindre en acier creux d'une profondeur de 600 ± 10 mm et d'un diamètre intérieur de 160 ± 2 mm. Afin que la paroi du cylindre puisse être considérée comme indéformable, son épaisseur est d'au moins 4 mm.

Pour le moule, nous avons fait le choix de le solidariser à la table. À défaut, Il peut éventuellement être équipé d'un socle et d'un système d'attache permettant de le solidariser à la table.

- Piston

Le diamètre intérieur du moule est moins de 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 (le cas échéant, la masse de cette poignée doit être intégrée dans le calcul de la pression).

- Cales

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

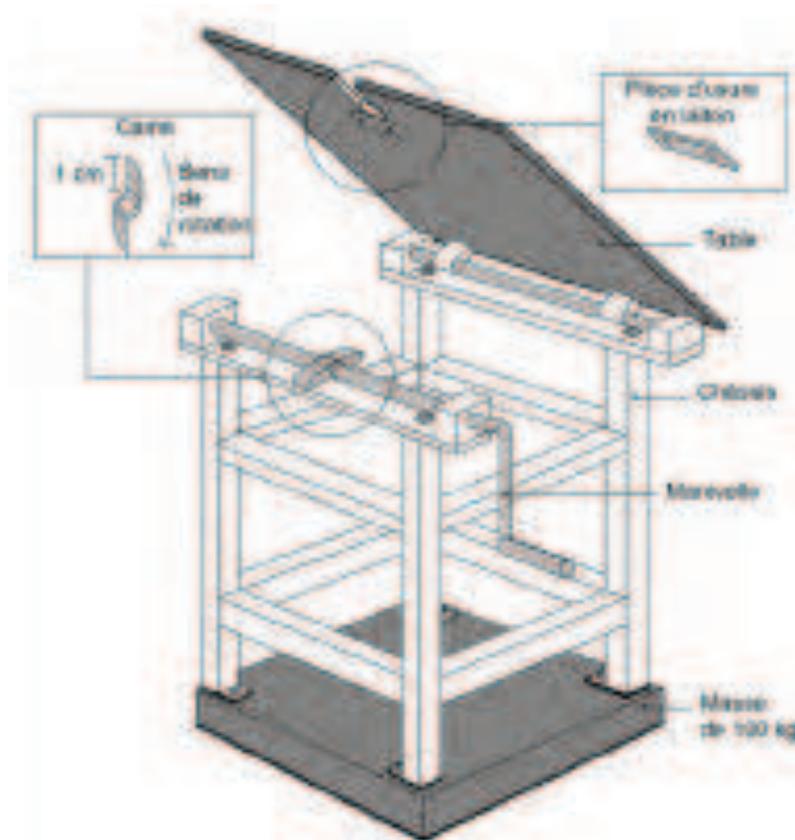


Figure II.5. Schéma de la table à secousse, [Méthode d'essai n° 61 LCPC].

II.3.2. Mode Opérateur [Méthode d'essai n° 61 LCPC], [LED, 2004]

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 les fines. En effet, les résultats obtenus par François de Larrard [de LAR, 2000], ont montré, qu'il était inutile de séparer les coupures commerciales de sable 0/D en sous-classe d'étendue granulaire limitée. Il suffit de laver les sables pour les débarrasser de leurs fines, puis de caractériser le matériau lavé d'une part, et les fines d'autre part (si leur pourcentage dans le mélange à formuler est significatif),
- sécher le matériau à l'étuve à 110 ± 5 °C, jusqu'à masse constante (figure II.6.a),
- 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,
- Etalement et brassage des échantillons en vue d'une homogénéisation du malaxage, qui dans notre cas s'est fait manuellement en étalant successivement le mélange horizontalement et verticalement à l'aide d'une pelle (voir figure II.6.b)

Nous vérifions par la suite, la profondeur à vide du moule. Ce dernier est nettoyé soigneusement à l'air comprimé et 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 retirés par la suite et l'on calcule 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 (voir figure II.6.d). Nous versons une première fraction dans le moule et pour éviter la perte de la masse de l'échantillon lors de sa mise en place à l'intérieur du cylindre, nous utilisons un cône inversé (figure II.6.e), ensuite nous appliquons 20 secousses (le rythme des secousses est d'environ 2 par seconde) (voir figure II.6.f). 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 et nous appliquons par la suite, 40 nouvelles secousses supplémentaires pour terminer les 100 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 II.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). Le moule est après vidangé et nettoyé en vue de réaliser de nouveau la même procédure pour la deuxième éprouvette (figure II.6.h).



a) Prélèvement des granulats pour séchage

b) Etalement des granulats avant le malaxage



c) Malaxage et homogénéisation répétée



d) Découpage des granulats et pesées



e) Mise en place de l'échantillon dans le cylindre



f) Application des secousses



g) Confinement de l'échantillon



h) Enlèvement, Vidange et Nettoyage du moule

Figure II.6. Différentes phases du mode opératoire.

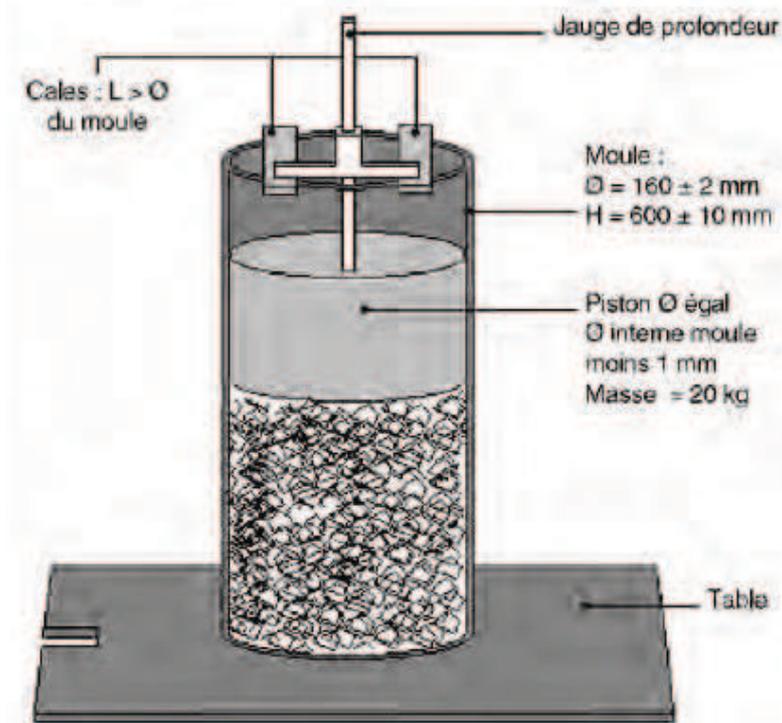


Figure II.7. Partie supérieure de la table à secousses.

II.3.2.1. Expression des résultats

- 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 :

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

Avec :

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

A la fin de l'essai un formulaire doit être renseigné par l'opérateur (voir Annexe 1), regroupant les informations suivantes :

- Dimensions de l'éprouvette,
- Hauteurs du matériau après essai,
- Calcul de la compacité,
- Résultat de l'essai.

- Calcul de la compacité

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

$$C = \rho_a / \rho_{rd} \quad (II.4)$$

Avec :

ρ_{rd} = masse volumique réelle au sens de la norme NF EN 1097-6 (g/cm^3),
 et ρ_a = masse volumique apparente du matériau, calculée selon l'expression
 suivante : $\rho_a = M / V$,

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 moyennes des deux essais.

L'essai que nous avons retenu concerne un important programme expérimental que nous allons présenter dans ce qui suit.

II.4. PRESENTATION DE LA CARRIERE

II.4.1. Présentation du site

II.4.1.1. Situation géographique

La carrière Djebel Abiod se situe à 28 Km au nord est de la ville de Tlemcen, sur la route nationale N° 53 et à 4 Km au sud de la localité de Sidi Abdelli (figure II.8), dont les coordonnées Lambert sont : X=149450 ; Y=199500.

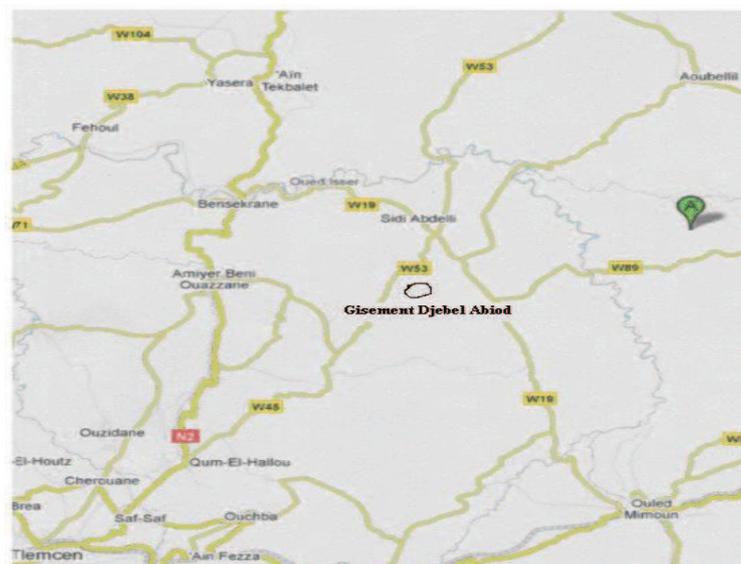


Figure II.8. Plan de situation du gisement de Djebel Abiod [BOU, 2010]

II.4.1.2. Géomorphologie du gisement

En ce qui concerne la géomorphologie, la région présente des plaines vallonnées et des massifs montagneux. Les cotes altimétriques de la surface de ces indices varient de 560 à 700 m. Les cours d'eaux permanents de la région sont ceux des Oueds de Tafna de Chouly et d'Isser.

Le climat de la région est proche du climat continental. Sa proximité de la mer (40 Km environ) l'adoucit sensiblement ; cependant les variations de la température vont de 40° c en été à 0°c en hiver (avec chute de neige).



Figure II.9. Vue Générale de la station de Sidi Abdelli

II.4.1.3. Nature du gisement

Les roches carbonatées du gisement appartiennent 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.

II.5. PRESENTATION ET INTERPRETATION DES ESSAIS D'IDENTIFICATION

II.5.1. Prélèvement d'échantillon (échantillonnage) : EN 932-1

Echantillonner un granulat consiste à sélectionner une fraction de masse réduite qui représente de façon aussi fidèle que possible le matériau; c'est à ce titre que nous nous sommes souciés pour le prélèvement de tous nos échantillons de suivre les recommandations de la norme EN 932-1.

II.5.2. Essais sur granulats

Pour pouvoir construire des ouvrages fiables, selon les normes et de haute efficacité technico-économique, il faut déterminer les caractéristiques intrinsèques des granulats; puisqu'ils constituent la plus grande partie du béton et influent fortement sur ces caractéristiques, à savoir les propriétés dimensionnelles, physico-chimiques et mécaniques.

II.5.2.1. Propriétés dimensionnelles

- Analyse granulométrique : NA 2607/E

La granularité d'un granulat est la propriété qui varie le plus, compte tenu des techniques industrielles de concassage et de criblage. L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme NA 453.

Pour le sable, le matériau préalablement échantillonné est séché dans une étuve à $110 \pm 5^\circ\text{C}$. Après dessiccation complète, on procède à l'élimination de fines par lavage continu, afin de séparer les éléments de dimension inférieure à 0,063 mm du reste de l'échantillon. Cette manipulation est réalisée après une période de trempage de 24 heures afin de favoriser la séparation de l'ensemble des grains. Le lavage se poursuit jusqu'à ce que l'eau passant au travers du tamis 0,063 mm soit claire. L'échantillon ainsi préparé est alors séché à $110 \pm 5^\circ\text{C}$. Après refroidissement, on pèse l'échantillon dont le poids dépend des dimensions de plus gros éléments qu'il contient $200 D < \text{masse} < 600 D$.

Les résultats de l'analyse granulométrique des différentes classes granulaires sont présentés sur la figure II.10.

Les résultats montrent que le sable utilisé est légèrement grossier puisqu'il présente un module de finesse de 2,75. Il se situe dans le fuseau recommandé des sables à béton par le haut. Nous n'avons procédé à aucune correction granulométrique, le sable a été utilisé en tant que tel.

- Formes des granulats : coefficient d'aplatissement : NA 256/E

Le tableau II.1 récapitule les coefficients de forme des différents graviers. Des spécifications exigées par la norme NF P18-541, précisent que le coefficient d'aplatissement doit être $\leq 30\%$. Les trois classes granulaires étudiées (issus de la carrière de Djebel Abiod, Sidi Abdelli) présentent toutes des formes favorables.

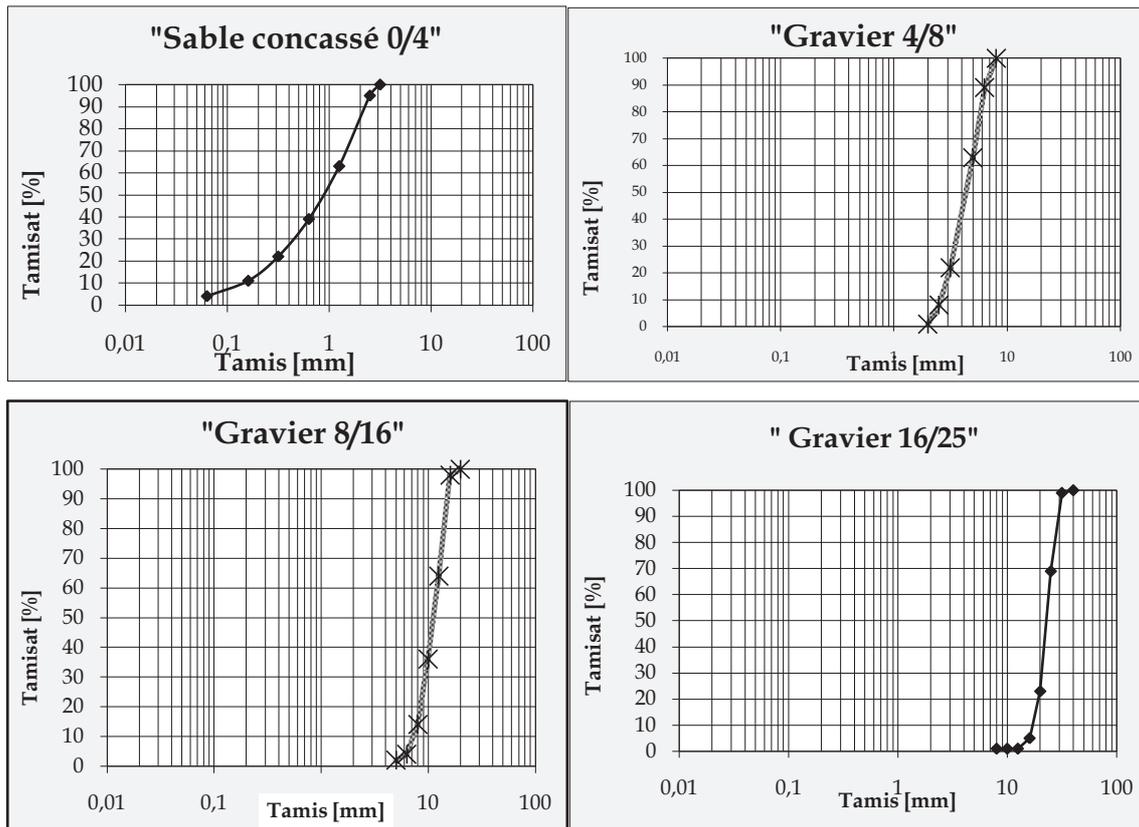


Figure II.10. Courbes granulométriques des granulats de Djebel Abiod.

II.5.2.2. Propriétés physiques

- Masses volumiques : NA 255/E

Ces essais ont pour but la détermination de la masse d'une fraction granulaire lors de l'élaboration d'une composition de bétons, nous distinguons deux masses volumiques. Les résultats des masses volumiques sont consignés sur les tableaux II.1 et II.2.

Les masses volumiques réelles des granulats varient entre 2500 et 2600 kg/m³. Ce qui correspond à des granulats courant d'origine calcaire comme l'indique leur formation géologiques. Leurs masses volumiques apparentes avoisinent 1300 kg/m³.

- Propreté des graviers : NA 463/E

Les résultats concernant la propreté des granulats sont résumés dans le tableau II.1. Les spécifications exigées par la norme NF P 18-541 montrent que le pourcentage des impuretés pour des gravillons concassés passant à 0,5 mm ne doit pas dépasser les 3%. En effet, les trois classes II de graviers respectent les exigences de la norme en matière de propreté.

- Essai d'équivalent de sable : NA 455/E

Les résultats de l'équivalent de sable sont résumés sur le tableau II.2. La norme prescrit que le pourcentage de propreté des sables par la méthode du piston, doit être compris entre 65

et 80. Au vu du pourcentage des impuretés qu'il contient, le sable convient selon les exigences de la norme pour la confection de bétons.

II.5.2.3. Propriétés mécaniques

La résistance aux chocs et à l'usure est caractérisée par deux essais : Los Angeles et Micro Deval. Les caractéristiques mécaniques des granulats sont consignées dans le tableau II.1. La norme P 18-541 préconise pour les granulats courants un coefficient Los Angeles $\leq 30\%$ et un coefficient Micro Deval $\leq 20\%$. Les granulats de la carrière Djebel Abiod résistent donc bien à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottement.

Tableau II.1. Caractéristiques physiques des granulats 4/8, 8/16 et 16/25

Caractéristiques	NORMES	4/8	8/16	16/25
Coef. d'aplatissement (%)	NA 256/90	6	7	6
Essai de propreté (%)	NA 463/E	0.89	0.65	0.48
Essai Los Angeles	NA 458/90	23	25	26
Essai Micro Deval	NA 457/90	11	13	-
Granulométrie Refus à D (%), Passant à (d %).	NA 2607/E	25 01	7 01	0 03
Masse volumique absolue (kg/m ³)	NA 255/E	2520	2530	2540
Masse volumique apparente (kg/m ³)	NA 255/E	1320	1310	1320
Compacité (%)		52.4	51.8	52

Tableau II.2. Caractéristiques physiques du sable utilisé.

Caractéristiques	NORMES	0/4
Equivalent de Sable (%)	NA 455/E	68
Teneur en fines (%)		12
Module de finesse		2.75
Masse volumique absolue (kg/m ³)	NA 255/E	2550
Masse volumique apparente (kg/m ³)	NA 255/E	1500
Compacité (%)		58.8

II.6. PROGRAMME EXPERIMENTAL

Le présent travail a fait l'objet d'une part d'une identification des caractéristiques physiques et mécaniques des granulats de la carrière de Djebel Abiod et d'autre part la collecte des mesures de compacité de plusieurs mélanges réalisés à partir de ces granulats, à la recherche de la compacité maximale du squelette granulaire. Ce programme expérimental dont l'approche méthodologique est consignée sur la figure II.11 et qui a nécessité la confection d'environ 380 essais, est défini comme suit :

- Détermination des caractéristiques intrinsèques du matériau choisi (analyse granulométrique, propreté, Forme, Dureté, etc.),
- Mesure de la compacité des fractions usuelles, sable (0-4) et Gravier (4/8, 8/16 et 16-25),
- Mesure de la compacité des mélanges binaires. Pour ce faire, 36 combinaisons de mélanges ont été préconisées ; ce qui a donné un nombre d'essais de 144 éprouvettes.
- Mesure de la compacité des mélanges ternaires. Douze mélanges ont été retenus après quelques essais préliminaires (24) en vue de cerner les mélanges qui offrent les plus grandes compacités ; donc 168 éprouvettes ont été testées.
- Mesure de la compacité des mélanges quaternaires. Quatre mélanges ternaires ont été considérées parmi ceux qui offraient les plus grandes compacités et nous avons retenu 4 pourcentages de mélange ; ce qui a conduit à 16 combinaisons (64 essais).

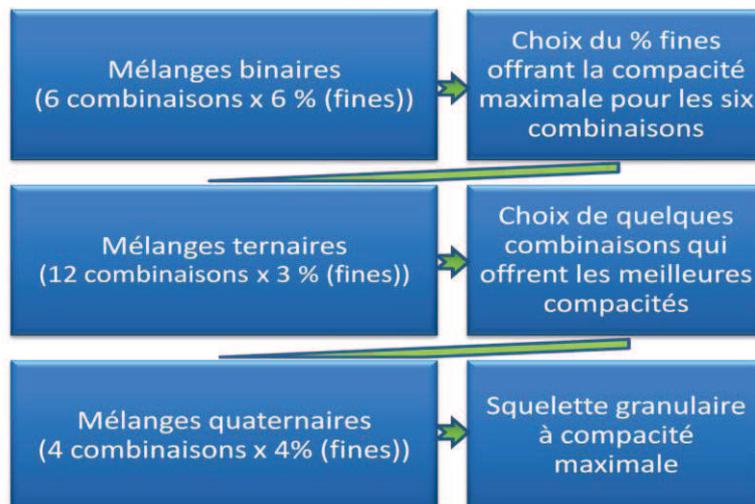


Figure II.11. Approche pour la réalisation du programme expérimental.

II.7. RESULTATS DES ESSAIS

II.7.1. Mesure de la compacité des fractions usuelles

Le banc d'essai étant de fabrication locale, nous devons dans un souci de fidélité des résultats commencé par faire des essais de répétabilité et de reproductibilité. A cet effet, une dizaine d'essais ont été réalisés pour chaque constituant (agrégat) au lieu des quatre essais recommandés. Les valeurs des écart-types moyens relatifs à la mesure de la compacité des fractions 0/4, 4/8, 8/16 et 16/25 sont respectivement de 0.298%, 0.429%, 0.317% et 0.560% (voir tableaux II.3, II.4, II.5 et II.6). Ces résultats montrent bien que le banc d'essais présente une bonne reproductibilité.

Il est clair que la fraction la plus fine donne la compacité la plus grande sachant qu'il s'agit de granulats issus d'opération de concassage. Il faut noter que la porosité est relativement importante pour les fractions granulaires dont la granulométrie est serrée (agrégat seul).

Tableau II.3. Mesure de la compacité sur la fraction 0/4

TABLEAU RECAPUTILATIF DES ESSAIS PRELIMINAIRES SUR LA FRACTION 0/4 [D _≥ 63 micron]									
Date	Hv(cm)	Hc(cm)	H(cm)	M(g)	V(cm ³)	Mv app (g/cm ³)	Mv abs rél (cm ³)	Compacité	Ecart type
18/03/2010	47,4	26,4	21,0	7000	4220,16	1,659	2,55	0,650	0,298%
18/03/2010	47,4	26,5	20,9	7000	4200,06	1,667	2,55	0,654	
21/03/2010	47,4	26,5	20,9	7000	4200,06	1,667	2,55	0,654	
21/03/2010	47,4	26,5	20,9	7000	4200,06	1,667	2,55	0,654	
22/03/2010	47,4	26,6	20,8	7000	4179,97	1,675	2,55	0,657	
23/03/2010	47,4	26,6	20,8	7000	4179,97	1,675	2,55	0,657	
23/03/2010	47,4	26,6	20,8	7000	4179,97	1,675	2,55	0,657	
25/03/2010	47,4	26,6	20,8	7000	4179,97	1,675	2,55	0,657	
25/03/2010	47,4	26,7	20,7	7000	4159,87	1,683	2,55	0,660	
25/03/2010	47,4	26,7	20,7	7000	4159,87	1,683	2,55	0,660	
					Moyenne	1,67	Moyenne	0,656	

Tableau II.4. Mesure de la compacité sur la fraction 4/8

TABLEAU RECAPUTILATIF DES ESSAIS PRELIMINAIRES SUR LA FRACTION 4/8									
Date	Hv(cm)	Hc(cm)	H(cm)	M(g)	V(cm3)	Mv app (g/cm3)	Mv abs réel (cm3)	Compacité	Ecart type
13/03/2010	47,4	23,7	23,70	7000	4762,75	1,47	2,52	0,583	0,429%
14/03/2010	47,4	23,9	23,50	7000	4722,56	1,48	2,52	0,588	
14/03/2010	47,4	23,8	23,60	7000	4742,66	1,48	2,52	0,586	
15/03/2010	47,4	24,0	23,40	7000	4702,46	1,49	2,52	0,591	
16/03/2010	47,4	24,3	23,15	7000	4652,22	1,50	2,52	0,597	
16/03/2010	47,4	24,2	23,20	7000	4662,27	1,50	2,52	0,596	
17/03/2010	47,4	24,0	23,40	7000	4702,46	1,49	2,52	0,591	
17/03/2010	47,4	23,9	23,50	7000	4722,56	1,48	2,52	0,588	
18/03/2010	47,4	24,1	23,30	7000	4682,37	1,49	2,52	0,593	
18/03/2010	47,4	24,0	23,40	7000	4702,46	1,49	2,52	0,591	
					Moyenne	1,488	Moyenne	0,590	

Tableau II.5. Mesure de la compacité sur la fraction 8/16

TABLEAU RECAPUTILATIF DES ESSAIS PRELIMINAIRES SUR LA FRACTION 8/16									
Date	Hv(cm)	Hc(cm)	H(cm)	M(g)	V(cm3)	Mv app (g/cm3)	Mv abs réel (cm3)	Compacité	Ecart type
16/03/2010	47,4	23,6	23,8	7000	4782,85	1,464	2,53	0,578	0,317%
16/03/2010	47,4	23,6	23,8	7000	4782,85	1,464	2,53	0,578	
18/03/2010	47,4	23,5	23,9	7000	4802,94	1,457	2,53	0,576	
18/03/2010	47,4	23,4	24,0	7000	4823,04	1,451	2,53	0,574	
21/03/2010	47,4	23,3	24,1	7000	4843,14	1,445	2,53	0,571	
21/03/2010	47,4	23,5	23,9	7000	4802,94	1,457	2,53	0,576	
21/03/2010	47,4	23,7	23,7	7000	4762,75	1,470	2,53	0,581	
22/03/2010	47,4	23,4	24,0	7000	4823,04	1,451	2,53	0,574	
22/03/2010	47,4	23,3	24,1	7000	4843,14	1,445	2,53	0,571	
23/03/2010	47,4	23,5	23,9	7000	4802,94	1,457	2,53	0,576	
					Moyenne	1,456	Moyenne	0,576	

Tableau II.6. Mesure de la compacité sur la fraction 16/25

TABLEAU RECAPUTILATIF DES ESSAIS PRELIMINAIRES SUR LA FRACTION 16/25 GRANULATS ENG SIDI EL ABDELLI									
Date	Hv(cm)	Hc(cm)	H(cm)	M(g)	V(cm3)	Mv app (g/cm3)	Mv abs rél (cm3)	Compacité	Ecart type
18/03/2010	47,40	24,20	23,20	7000	4662,27	1,501	2,54	0,591	0,560%
18/03/2010	47,40	23,50	23,90	7000	4802,94	1,457	2,54	0,574	
18/03/2010	47,40	23,60	23,80	7000	4782,85	1,464	2,54	0,576	
21/03/2010	47,40	23,50	23,90	7000	4802,94	1,457	2,54	0,574	
21/03/2010	47,40	23,70	23,70	7000	4762,75	1,470	2,54	0,579	
21/03/2010	47,40	23,70	23,70	7000	4762,75	1,470	2,54	0,579	
22/03/2010	47,40	23,40	24,00	7000	4823,04	1,451	2,54	0,571	
22/03/2010	47,40	23,60	23,80	7000	4782,85	1,464	2,54	0,576	
23/03/2010	47,40	23,50	23,90	7000	4802,94	1,457	2,54	0,574	
25/03/2010	47,40	23,80	23,60	7000	4742,66	1,476	2,54	0,581	
					Moyenne	1,47	Moyenne	0,577	

Aussi, nous avons mesuré la compacité de chacun des agrégats en utilisant plusieurs méthodes : méthode de versement simple, méthode de la tige et la méthode de la table à secousses (Tableau II.7). 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 II.7. Tableau comparatif entre les trois méthodes de mesure de la compacité

Granulats	Mv _{abs} (kg/m ³)	Versement		Piquage		Secousses 10 kPa	
		Mv _{app} (kg/m ³)	Compacité (%)	Mv _{app} (kg/m ³)	Compacité (%)	Mv _{app} (kg/m ³)	Compacité (%)
Sable 0/4 d > 63μ	2550	1500	58,8	1530	60	1670	65,6
Gravillon 4/8	2520	1320	52,4	1350	53,6	1488	59,1
Gravier 8/16	2530	1310	51,8	1340	53	1456	57,6
Gravier 16/25	2540	1320	52	1360	53,5	1470	57,7

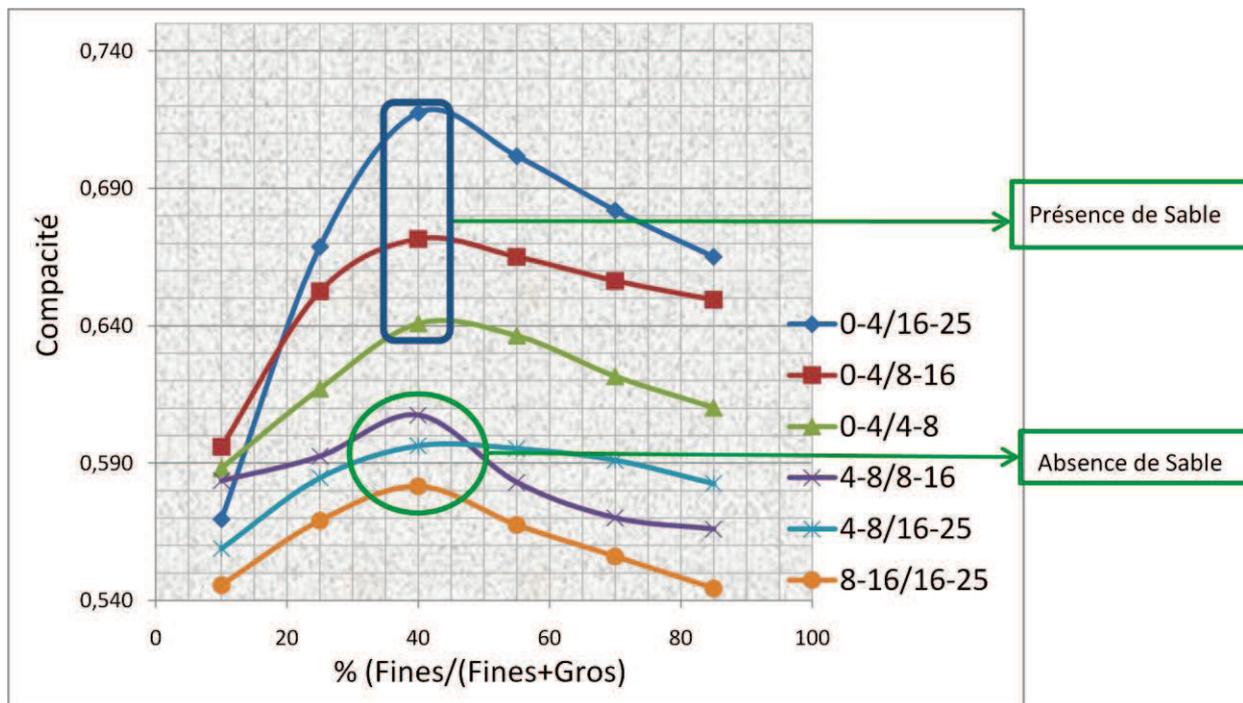
II.7.2. Mesure de la compacité des mélanges binaires

Dans cette partie, tous les mélanges possibles utilisant les quatre constituants ont été effectués (Tableau II.8). Ces mélanges ont été réalisés avec l'introduction de l'élément fin à 10, 25, 40, 55, 70 et 85 %.

Tableau II.8. Valeurs de compacité des mélanges binaires

(%) Fins & Gros	$C_{0-4/4-8}$	$C_{0-4/8-16}$	$C_{0-4/16-25}$	$C_{4-8/8-16}$	$C_{4-8/16-25}$	$C_{8-16/16-25}$	G/S
10 - 90	0,588	0,596	0,570	0,584	0,559	0,546	9
25 - 75	0,617	0,653	0,669	0,592	0,585	0,569	3
40 - 60	0,641	0,672	0,718	0,608	0,596	0,582	1.5
55 - 45	0,636	0,665	0,702	0,583	0,595	0,568	0.82
70 - 30	0,622	0,656	0,682	0,570	0,591	0,556	0.43
85 - 15	0,610	0,649	0,665	0,566	0,583	0,544	0.18

La figure II.12, présente les résultats de mesure de la compacité des six mélanges. Les courbes obtenues se présentent sous forme d'une cloche avec un optimum.

**Figure II.12.** Variation de la compacité des mélanges binaires.

Ces résultats montrent bien que pour chaque mélange, 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.

C'est le mélange de sable (40%) et de gravier 16/25 (60%) qui a atteint la compacité maximale (72%). Aussi, la compacité maximale des six mélanges binaires se situe au droit du taux d'introduction de 40% de l'agrégat de classe faible. Nous sommes dans ce cas, dans

la configuration des mélanges avec interaction où il n'y a pas blocage du système du fait de la prédominance d'un agrégat par rapport à un autre [de LAR, 2000].

Aussi, le sable confère au mélange une meilleure compacité relativement aux mélanges où il est absent. Pour trois mélanges où le sable est introduit à différents pourcentages [10 à 85], nous avons balayé une large gamme de rapports G/S qui varient de 0.18 à 9 (voir tableau II.8) ; c'est le rapport G/S = 1.5 qui offre la meilleure compacité pour les trois mélanges binaires précités.

Comme les résultats de la bibliographie [SED, 1994] montrent que l'optimum se situe à 30%, nous avons –dans le souci de confirmer d'avantage nos résultats expérimentaux- considéré quatre autres points au voisinage de l'optimum obtenu par le mélange binaire (0/4+16/25) (Tableau II.9) ce qui nous a permis de conclure, d'après la figure II.13, que la compacité optimale se situe bien au droit des 40% d'éléments fins.

Tableau II.9. Compacité du mélange binaire (0/4+16/25) au voisinage de l'optimum.

Eléments Fins (%)	38	38,5	39	40	42
Compacité	0,715	0,716	0,717	0,718	0,715

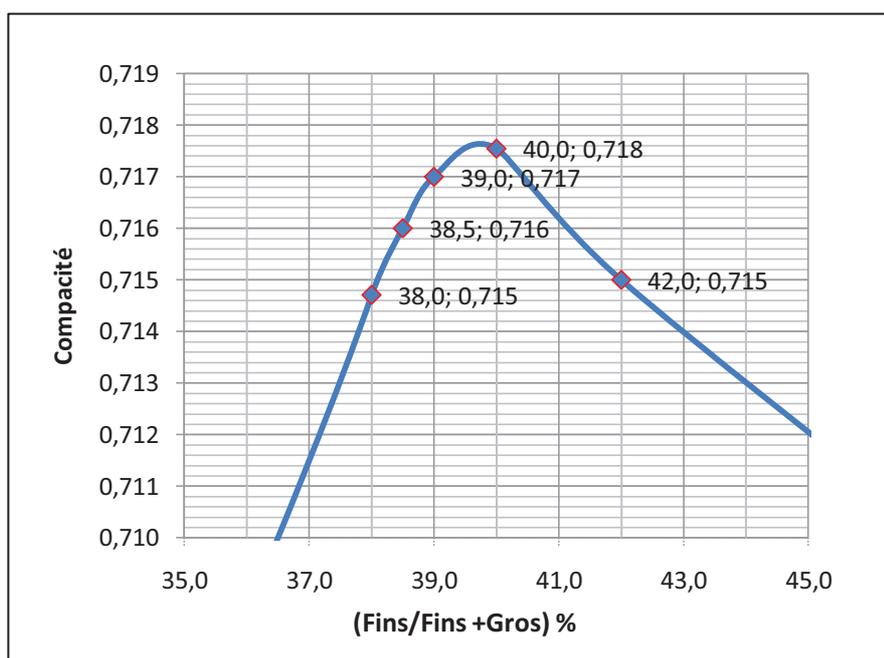


Figure II.13. Affinage de la compacité des mélanges binaires (sable 0/4+ gravier 16/25) au voisinage de l'optimum (40% de sable).

II.7.3. Mesure de la compacité des mélanges Ternaires

Sur la base des résultats précédents, nous avons préconisé de garder les optimums des mélanges binaires (40 - 60%) comme base de travail et nous avons balayé tous les

pourcentages (10, 25, 40, 55, 70 et 85) en ajoutant la troisième fraction pour localiser l'optimum (voir tableau II.10).

Tableau II.10. Compacités des Mélanges ternaires préliminaires

Fines (%)	Sable 0/4 (%)	Gravillon 4/8 (%)	Gravier 8/16 (%)	Compacité (%)
10	36,4	54,5	9,1	65
25	32	48	20	64,5
40	28,6	42,8	28,6	63,6
55	25,8	38,7	35,5	62,5
70	23,5	35,3	41,2	61,5
85	21,6	32,4	46	61

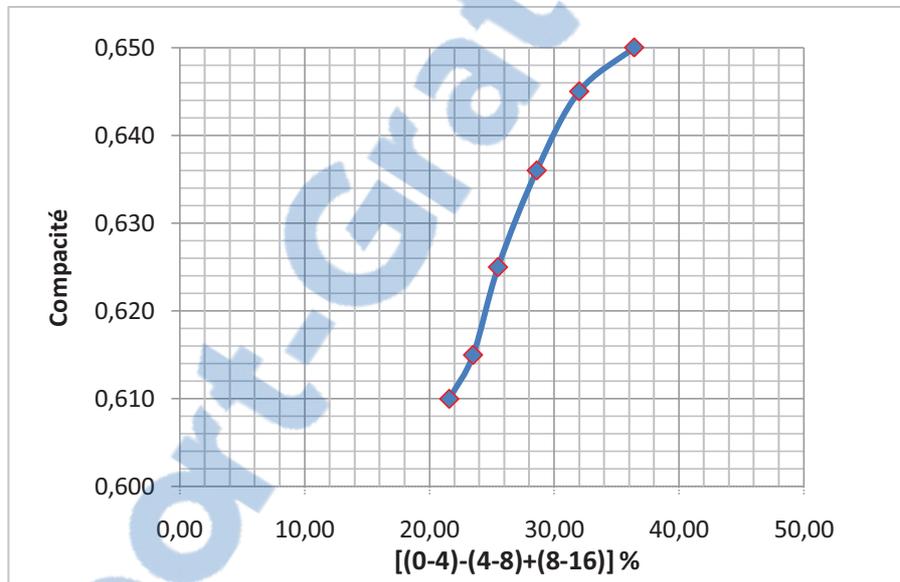


Figure II.14. Variation de la compacité des mélanges ternaires préliminaires.

Les résultats trouvés (figure II. 14) nous ont permis d'identifier l'intervalle de variation des plus grandes compacités, ce qui nous a permis de ne garder que deux ajouts parmi les six adoptés dans les mélanges binaires et d'en rajouter un troisième : 5, 10 et 25%. Pour ce faire, nous avons effectué 144 essais correspondants à douze mélanges (voir Tableau II.11).

Tableau II.11. Compacités des mélanges ternaires retenus.

		$C_{(0-4/4-8)+16-25}$	$C_{(0-4/4-8)+8-16}$	$C_{(0-4/8-16)+4-8}$	$C_{(0-4/8-16)+16-25}$	$C_{(0-4/16-25)+4-8}$	$C_{(0-4/16-25)+8-16}$
% Mélanges ternaires	% Fines	1	2	3	4	5	6
(38,09+57,14)+4,76	38,09	0,657	0,641	0,637	0,657	0,691	0,685
(36,36+54,54)+9,09	36,36	0,665	0,651	0,664	0,666	0,699	0,706
(32+48)+20	32,00	0,656	0,644	0,646	0,647	0,672	0,674

		$C_{(4-8/8-16)+0-4}$	$C_{(4-8/8-16)+16-25}$	$C_{(4-8/16-25)+8-16}$	$C_{(4-8/16-25)+0-4}$	$C_{(8-16/16-25)+0-4}$	$C_{(8-16/16-25)+4-8}$
% Mélanges ternaires	% Fines	7	8	9	10	11	12
(38,09+57,14)+4,76	38,09	0,589	0,587	0,583	0,603	0,583	0,582
(36,36+54,54)+9,09	36,36	0,629	0,602	0,594	0,634	0,635	0,603
(32+48)+20	32,00	0,605	0,594	0,587	0,613	0,604	0,585

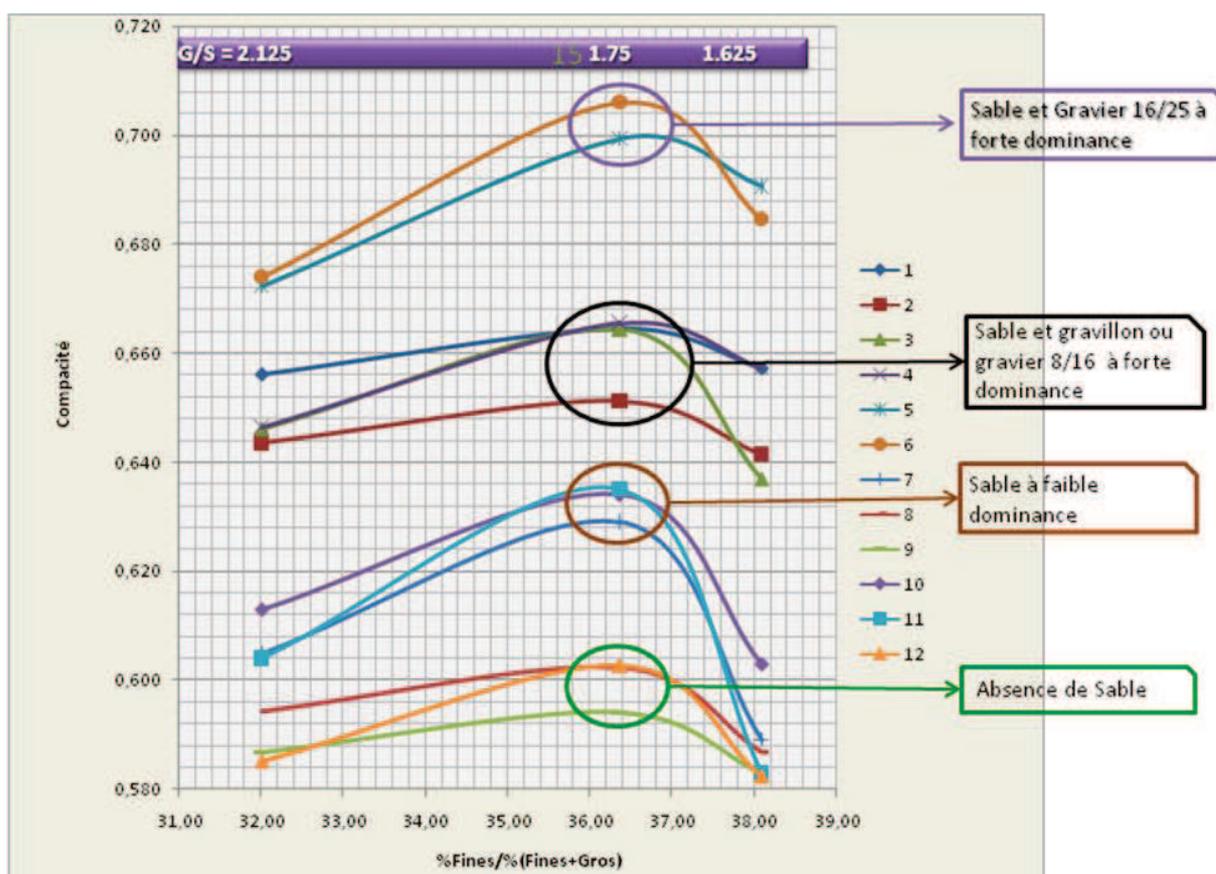


Figure II.15. Variation de la compacité des mélanges ternaires.

D'après la figure II.15, nous distinguons quatre catégories de mélanges :

- La première catégorie qui concerne les mélanges 5 et 6, dont le gravier 16/25 prédomine avec le sable a donné les compacités les plus élevées, ($\geq 70\%$). C'est le mélange n° 6 dont la composition est de 36% de sable + 9% de gravier 8/16 + 55% de gravier 16/25 qui a présenté la compacité maximale (70.5%).

- La deuxième catégorie, où le gravillon et gravier 8/16 est à forte prédominance en présence de sable et qui correspondent aux mélanges 1, 2, 3, 4 montrent des compacités qui se rapprochent plus de la troisième catégorie que de la première (65 à 67%).
- La troisième catégorie, dont la fraction fine est présente avec un pourcentage relativement faible par rapport à la présence dans le mélange de deux graviers. Les mélanges concernés sont le 7, 10, et 11 et qui ont montré des compacités relativement supérieures aux compacités de la dernière catégorie, se situant entre 63 et 64%.
- La quatrième catégorie dont la partie fine est complètement absente (mélanges composés par les graviers uniquement) ayant présenté les compacités les plus faibles ($\leq 60\%$) correspondent aux mélanges 8, 9 et 12.

De plus, pour les neuf mélanges où le sable était présent ; nous montrons que l'optimum des compacités se situe au droit de 36,5% de sable correspondant à G/S = 1.75.

II.7.4. Mesure de la compacité des mélanges quaternaires

La même démarche a été arrêtée pour les mélanges quaternaires ; c'est-à-dire choisir les mélanges ternaires 5 et 6 ayant présenté la compacité optimale pour deux fractions de sable 36 et 38%, auxquels nous ajoutons la quatrième fraction à un pourcentage variant de : 3, 6, 9 et 15%) (voir tableau II.12). Quatre mélanges ont donc été étudiés avec 64 essais au total.

Tableau II.12. Mélanges quaternaires étudiés

Mélange 1 : (0/4 + 16/25 + 8/16) + 4/8		
Sable 0/4 (%)	4 ^{ème} fraction (%)	Compacité (%)
36.98	3	73.8
35.93	6	79.2
34.9	9	76.4
33.12	15	67.1

Mélange 2 : (0/4 + 16/25 + 4/8) + 8/16		
Sable 0/4 (%)	4 ^{ème} fraction (%)	Compacité (%)
35.3	3	70.9
34.3	6	72.0
33.36	9	71.5
31.62	15	65.7

Mélange 3 : (0/4 + 16/25 + 8/16) + 4/8		
Sable 0/4 (%)	4 ^{ème} fraction (%)	Compacité (%)
35.3	3	67.3
34.3	6	70.7
33.36	9	69.4
31.62	15	65.7

Mélange 4 : (0/4 + 16/25 + 4/8) + 8/16		
Sable 0/4 (%)	4 ^{ème} fraction (%)	Compacité (%)
35.3	3	70.6
34.3	6	74.4
33.36	9	72.0
31.62	15	65.7

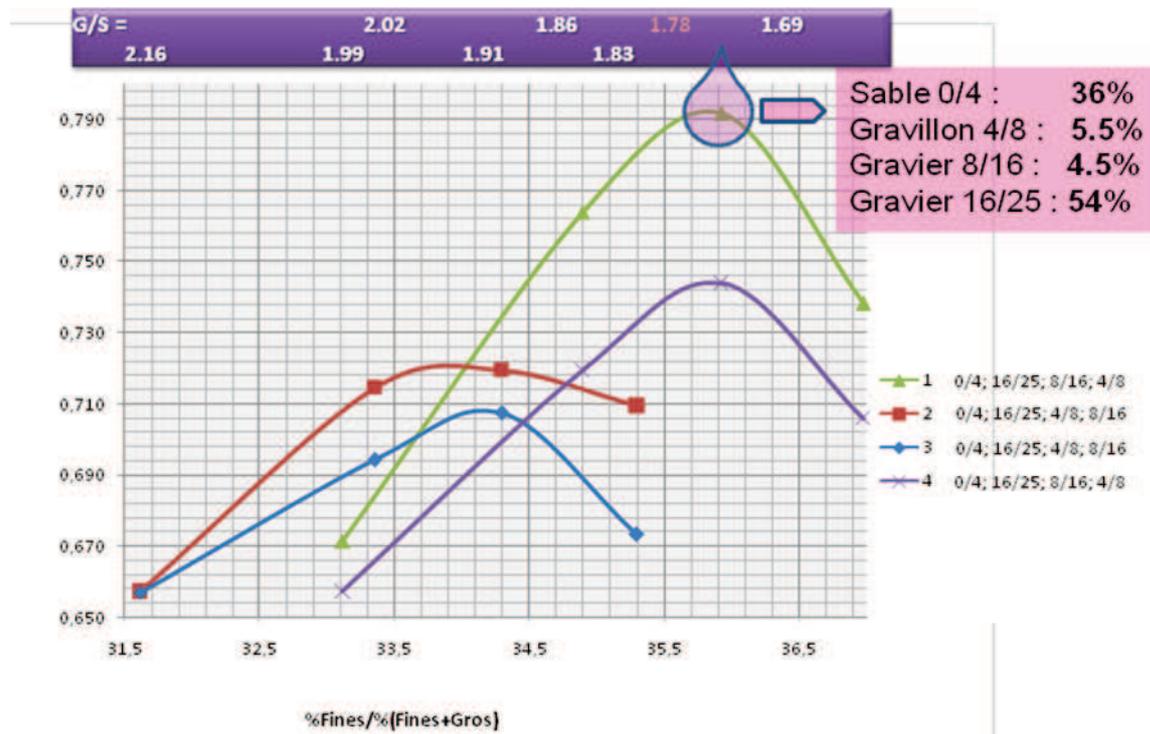


Figure II.16. Variation de la compacité des mélanges quaternaires.

La figure II.16 montre que la compacité optimale obtenue pour les mélanges retenus, correspond à un pourcentage de 6% de la quatrième fraction ajoutée au mélange ternaire. La compacité maximale (79,2 %) est obtenue pour un rapport G/S égal à 1,78. C'est donc, les mélanges quaternaires qui ont offerts, après optimisation des mélanges ternaires, des compacités considérées comme élevées (env. 0,8). Ces résultats sont proches de celles obtenues par Dr. Boukli Hacene dans le cadre de ces travaux de thèse de doctorat sur les mêmes granulats [BOU, 2010].

Le squelette granulaire composé des quatre classes usuelles est optimisé alors pour la formulation suivante :

- 36% Sable,
- 5,5 % de gravillon 4/8,
- 4,5 % de gravier 8/16,
- 54 % de gravier 16/25.

Nous avons consigné dans le tableau II.13, les formulations du béton de référence issu de la méthode de Dreux-Gorisse et que nous utilisons pour l'ensemble des études sur les bétons ordinaires [BOU, 2010] et celle correspondant à la compacité maximale du mélange quaternaire optimisé lors de notre étude. La différence notable se situe au niveau des deux plus grandes fractions où pour le béton de référence, la répartition entre les graviers 16/25 et

8/16 est presque équivalente ; en revanche pour les résultats de nos travaux c'est le gravier 16/25 qui représente le granulat dominant. Ceci va engendrer moins de desserrement et d'effet de paroi dans cette classe qui n'aura une véritable interaction qu'avec la fraction des éléments les moins dominants, le sable.

Tableau II. 13. Comparaison entre les mélanges granulaires de notre béton de référence et de la formulation à compacité maximale.

Constituants	Composition du Béton de référence [BOU, 2010] (C = 0,812)	Composition optimisée (C = 0.792)
Gravier 16/25 (%)	30,2	54
Gravier 8/16 (%)	24.4	4,5
Gravier 4/8 (%)	8.1	5,5
Sable 0/4 (%)	37.3	36

II.8. CONCLUSION

L'optimisation d'un squelette granulaire nécessite la connaissance de la compacité. Celle-ci est déterminée expérimentalement à l'aide de deux modes de serrage déversement ou vibro-compactage. Il faut remarquer que selon le mode de mise en place, deux indices de serrage interviennent. Pour le déversement, l'indice de serrage est estimé à 4,1 [CIN, 1988] alors que pour un vibro-compactage, cet indice prend la valeur de 9 [de LAR, 2000].

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.

En plus de la caractérisation des granulats, nous avons présenté notre programme expérimental basé sur une étude effectuée au niveau de notre laboratoire de structures de la Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen, et ceci après avoir procédé au montage d'un banc d'essai conforme à la méthode n° 61 LCPC. Ce dernier, nous a permis de mesurer la compacité sous des conditions de serrage qui sont considérés comme étant les plus favorables par rapport au serrage des agrégats sans provoquer leur attrition.

L'approche préconisée avec l'utilisation des agrégats de l'ENG Sidi Abdelli, nous a permis d'optimiser la compacité du mélange granulaire tel qu'il est pratiqué in situ avec le composite formé des quatre classes usuelles utilisées dans la formulation des bétons.

Le rapport G/S a une incidence sur la compacité des mélanges granulaires. La compacité maximale est obtenue pour $G/S = 1,78$; ce qui est en légère discordance avec les résultats des travaux de Boukli Hacene [BOU, 2010].

Cette étude est préalable à une autre en cours qui s'inspire de celle de de Larrard ayant mis en place la théorie de l'empilement virtuel.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La formulation des bétons nécessite une compacité optimisée du squelette granulaire, puisque les granulats représentent dans le mélange 70% du volume. En effet, de nombreuses méthodes de formulation (Féret, Bolomey, Faury, Dreux, etc.) se sont focalisées sur la recherche d'une courbe optimale du mélange qui correspond à l'arrangement des grains offrant la compacité maximale du squelette.

Les récents travaux de de Larrad et ses collaborateurs au laboratoire central des ponts et chaussées en France ont permis de développer un modèle qui permet de déterminer théoriquement la compacité des mélanges granulaires. La vérification des résultats obtenus s'est effectuée grâce à un programme expérimental utilisant la table à secousses dont l'énergie de serrage est relativement élevée (vibro-compactage 10 kPa). Ce banc d'essai permet d'effectuer des mesures de compacités réelles de mélanges d'agrégats de nature diverses. Le modèle a donc été validé et a fait l'objet d'un logiciel de calcul (labPro) qui nécessite comme données d'entrée, les compacités maximales des classes granulaires serrées.

Nous avons suivis la même approche et avons commencé par fabriquer une table à secousses (inspirée du modèle du LCPC) qui sert à la mesure de la compacité réelle des agrégats seuls et 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.

Les granulats étudiés proviennent de la carrière de l'ENG dont le gisement est situé à Djebel Abiod à Sidi el Abdelli (Wilaya de Tlemcen). Les caractéristiques de ces derniers, présentent toutes les qualités requises des granulats concassés utilisés pour la fabrication des bétons ordinaires.

Le programme expérimental nous a permis la confection de plus de 380 éprouvettes relatives aux granulats seuls et à différentes combinaisons de mélanges binaires, ternaires et quaternaires. Les enseignements les plus significatifs du programme sont :

- La compacité maximale des trois graviers se situe autour de 58% ; en revanche celle du sable est de l'ordre de 65%,
- Pour l'ensemble des mélanges binaires étudiés, la compacité maximale est atteinte pour l'introduction de 40% des éléments les plus fins. Aussi, la compacité est plus élevée quand dans le mélange, il y a présence de sable. De plus, la compacité maximale de 72% a été atteinte, après vérification, pour le mélange : sable (40%) et gravier 16/25 (60%). Ce dernier est un mélange sans interactions obtenu pour un G/S = 1.5.

- Des essais préliminaires sur les mélanges ternaires, nous ont permis d'identifier la gamme des valeurs de dosages des éléments fins en vue d'obtenir les meilleures compacités. Les mélanges ternaires retenus ont montré les compacités maximales au droit de 36% d'introduction des éléments fins. La compacité maximale équivalent à 70.5% a été atteinte pour le mélange ternaire : sable (36.5%) + gravier 16/25 (54.5%) + gravier 8/16 (9%) pour $G/S = 1.74$.
- Le mélange granulaire utilisant les quatre classes usuelles, offre une compacité maximale avoisinant 80% ($G/S = 1.78$) pour la composition : 36% de sable + 54% gravier 16/25 + 4.5% gravier 8/16 + 5.5% de gravier 4/8.

Les résultats expérimentaux nous ont permis d'identifier le mélange ayant offert la compacité maximale, avoisinant 0.8 pour une composition de béton ordinaire. Cette composition montre que parmi les quatre granulats étudiés, ce sont les agrégats extrêmes qui prédominent dans le mélange. Cette formule doit présenter le moins d'interactions (desserrement et effet de paroi) entre les différentes classes granulaires.

Les résultats de ce travail expérimental ouvrent de nouvelles perspectives :

- Etude de toutes les classes granulaires serrées recommandées par les études du LCPC en vue de comparer les compacités réelles et théoriques utilisant le modèle de suspension solide,
- Modélisation des compacités de bétons destinés à diverses utilisations.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[ABR, 1923] 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.

[ACK, 1993] Acker P. (1993), Creep tests of concrete: why and how?, cité par Bažant Z.P., Carol I. (Eds), Creep and Shrinkage of Concrete. Proceedings of the 5th International RILEM Symposium, Barcelone, E. & FN SPON, London, pp. 3-14.

[AFGC, 2004] Association Française de Génie Civil AFREM (2004), Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages, Document scientifique et technique, Bagneux, France.

[AÏT, 1994] Aïtcin J.C. et Rougemon P. (1994), Optimization of the composition of high performance concrete, Cement and Concrete Research, Agg (16), pp. 115-124.

[BAU, 2007] Bauchy (2007), Rapport de projet expérimental : étude et contrôle du chaos dans un système mécanique, ENS Cachan, France, p. 38.

[BAR, 1976] 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.

[BOL, 1925] Bolomey J.C. (1925), Durcissement des mortiers et bétons, Paris : Rouge et Cie.

[BOU, 2010] 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.

[CAM, 2003] Camenen J.F. (2003), Approche théorique et expérimentale des lois reliant la compacité d'un empilement granulaire sans liant aux caractéristiques dimensionnelles des particules qui le constituent, Thèse de Doctorat, LCPC, France,

[CAQ, 1937] Caquot (1937), Le rôle des matériaux inertes dans le béton, Mémoires de la Société des Ingénieur Civils de France, pp. 562-582, Juillet-Août.

[CAS, 2007] 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, 297 p.

[CIN, 1988] Cintre (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.

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

[de LAR, 2000] de Larrard F. (2000), Structures granulaires et formulation des bétons, Etudes et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris, France, 414 p.

[de LAR, 2003] de Larrard F. (2003), nouvel essai de mesure de compacité des fractions granulaires à la table à chocs, bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 246-247, Sep., Oct., Nov. et Dec., Ref. 4492, pp.101-115, Paris, France.

[de LAR, 2004] de Larrard F. (2004), BétonlabFree3, Leçons, Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris, France.

[DRE, 1995] Dreux G. et festa J. (1995), Nouveau guide du béton et ses constituants, Editions Eyrolles, Paris, France, 409 p.

[EIB, 2005] El Barrak M. (2005), Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçant à l'état frais, Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, Juillet, 229 p.

[ENG, 2008] Entreprise Nationale des Granulats (2008), Estimation et réactualisation des réserves en granulats, calcaires pour chaux et calcaires dolomitiques au 06/2007, Rapport d'expertise du gisement de Djebel Abiod – Sidi Abdelli, Wilaya de Tlemcen.

[FAU, 1944] 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^{ième} édition, Dunod, Paris, France.

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

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

[JOI, 1952] Joisel A. (1952), Composition des bétons hydrauliques, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, 5^{ième} année, N° 58, Série : Béton, béton armé, Octobre, France.

[LED, 2004] 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, 13 p.

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

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

[SCH, 2000] Schwartzenruber A. et Catherine C. (2000), La méthode du Mortier de Béton: Un nouvel outil d'aide à la formulation de bétons adjuvantés, Materials and Structures, Volume 33, N° 8, pp. 475-482.

[SED, 1994] Sedran T. et de Larrard 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.

[SED, 1999] 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.

[STO, 1986] Stovall T., de Larrard F., Buil M. (1994), Linear packing density of grain mixture; Powder technology, Volume 48, N° 1, Septembre.

ANNEXE 1, Protocole d'essai à remplir après chaque essai à la table à secousses.

ESSAI DE COMPACITÉ	
Selon MODE OPÉRATEUR LPC n°	
N° affaire :	Date :
N° échantillon :	Opérateur :
Désignation échantillon (nature, d/D) :	
Masse volumique réelle (selon NF EN 1097-6) : ρ_M (g/cm ³) =	
Masse de l'éprouvette A (g) :	Masse de l'éprouvette B (g) :
Dimensions du cylindre	
Diamètre (cm) : $\varnothing =$	
Surface du cylindre (cm ²) : $S = \pi \varnothing^2 / 4$	
Profondeur à vide :	
Mesure 1 : Hv1 =	} Moyenne : Hv (cm) =
Mesure 2 : Hv2 =	
Hauteurs de matériau après essai	
ÉPROUVETTE A	ÉPROUVETTE B
Mesure 1 : HC1 =	Mesure 1 : HC1 =
Mesure 2 : HC2 =	Mesure 2 : HC2 =
Moyenne : HC _A (cm) =	Moyenne : HC _B (cm) =
$h_{\text{moyenne}} = Hv - (HC_A + HC_B) / 2 =$ cm	
Calcul de la compacité	
ÉPROUVETTE A	ÉPROUVETTE B
Volume (vm ³) :	Volume (cm ³) :
$V_A = S \times (Hv - HC_A) =$	$V_B = S \times (Hv - HC_B) =$
Masse volumique apparente =	Masse volumique apparente =
$\rho_a = M \text{ (en g)} / V_A \text{ (en cm}^3) =$	$\rho_a = M \text{ (en g)} / V_B \text{ (en cm}^3) =$
Compacité :	Compacité :
$C_A = \rho_a / \rho_M =$	$C_B = \rho_a / \rho_M =$
Résultat de l'essai : $C = (C_A + C_B) / 2 =$:	
(0,xxx)	
Observations	Signature

ANNEXE 2, Exploitation de la carrière de Djebel Abiod à Sidi Abdelli (Wilaya de Tlemcen).

Exploitation de la carrière

Cette région possède une grande expérience dans l'exploitation des granulats. Elle a été exploitée par une société Algéro-Brésilienne RABELLO puis par l'Entreprise Nationale des granulats (E.N.G). Le site a été choisi pour les raisons suivantes :

- On remarque que l'indice le plus potentiel apte à la réalisation de la phase préliminaire est celui de la carrière actuelle de Sidi Abdelli.
- L'infrastructure de l'indice est relativement favorable car une route asphaltée côtoie l'indice.
- Sa mise en exploitation ne sera pas très coûteuse.

Méthode d'exploitation

L'exploitation du gisement s'effectue en toute évidence à ciel ouvert et ceci en fonction du coefficient de découverte.

- Les accès sont réalisés en fonction du relief du site à exploiter et de la disposition de la station de concassage avec une minimisation de la distance de front de taille qui est composé d'une série de gradins.
- L'extraction se fait dans un sens choisi en fonction de la puissance du gisement de façon à faciliter le chargement et le transport.

Mode d'extraction et matériels utilisés

L'extraction de la roche utile se fait par abattage à l'explosif comme l'utilisation des nitrates. Les travaux de forage sont réalisés de façon à satisfaire le rendement à atteindre. Le diamètre des trous de forage varie de 80m à 100m et la profondeur de 6m à 10m, la maille varie en fonction du diamètre de forage et de la hauteur des gradins qui se situe entre 10m et 12 m. Les foreuses sont utilisées pour le forage de la roche et des dumpers pour son acheminement vers le concassage primaire (voir figure). Le réglage des concasseurs et broyeurs est fait régulièrement et des ajustements sur les mailles du crible sont à prévoir.



Figure. Front de la carrière Djebel Abiod à Sidi Abdelli.

Capacité de production [ENG, 2008]

Capacité par jour = 3200 T/j,

Capacité par année = 800.000 T/année.

Production tout venant = 478.000 T/année.

P. Marchands = 423.657 T/année, P. Vendue = 382.969 T/année.

P. Stockée = 40.688 T/année.

Stock T.V. = Néant au 31/12/05,

Stock produit Marchand = 40.688 T/année.