

CHAPITRE 3

CARACTERISATION DU SQUELETTE GRANULAIRE

3.1. Introduction

La caractérisation rhéologique des bétons passe généralement par la compréhension des phénomènes physiques et chimiques qui existent entre ses constituants. La détermination de la surface granulaire ou de la compacité d'un mélange granulaire est basée, entre autres, sur la connaissance de la forme des grains qui le constituent. Cette dernière est le plus souvent assimilée à des diamètres de sphères, dont la taille est définie comme étant une moyenne entre deux ouvertures de tamis.

Dans ce chapitre, nous procéderons à une caractérisation des différents squelettes granulaires destinés à la confection de nos BAP. Cette caractérisation se résumera dans le calcul du diamètre moyen, de la compacité maximale et de la surface développée par les granulats selon différents rapports G/S allant de 0,8 à 1,1 étant donné que c'est l'intervalle recommandé dans la littérature et dans l'étude sur l'optimisation de la formulation des BAP utilisant des granulats de notre région [TAL, 09].

3.2. Matériaux

3.2.1. Sable

Le sable utilisé, provient de la carrière de Sidi Abdelli, propriété de l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG). Ses caractéristiques physiques sont représentées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Caractéristiques physiques du sable [BOU, 10].

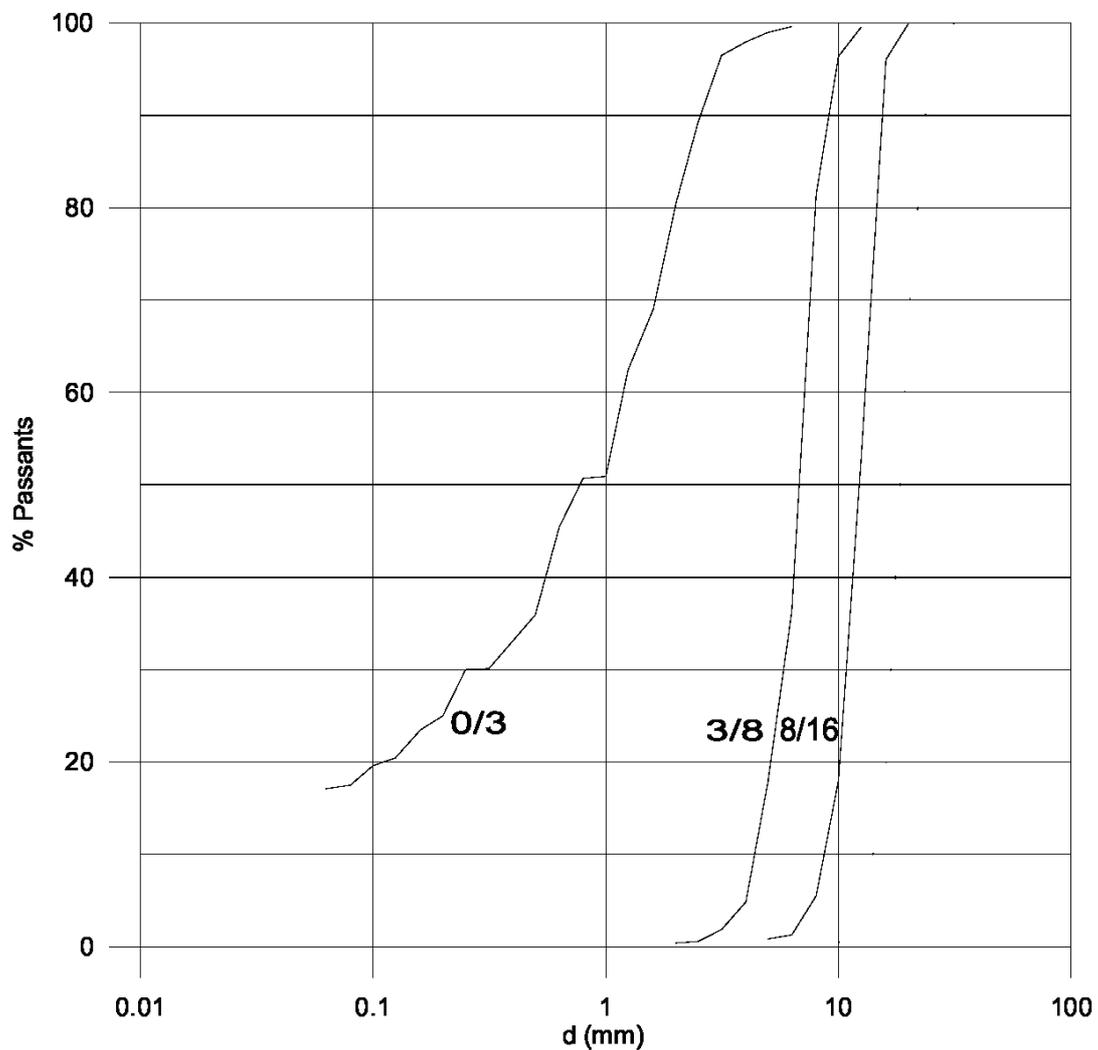
Désignation	M_V absolue (g/cm ³)	M_V appar (g/cm ³)	Equivalent de sable (%) (NA 455)	Teneur en fines (%) (NA 5128)	Module de finesse
Sable	2,500	1,426	63,2	17	2,95

3.2.2. Gravier

Ce sont des granulats concassés en provenance de la carrière de Sidi Abdelli, propriété de l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG). Ces granulats sont disponibles sous forme de classes granulaires 3/8 et 8/16. Les caractéristiques physiques des gravillons sont représentées dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Caractéristiques physiques des graviers [BOU, 10]

Désignation	Gravier (3/8)	Gravier (8/16)
$M_{V \text{ absolue}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	2,587	2,587
$M_{V \text{ appar}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	1,355	1,423
Coefficient d'aplatissement (%)	19	8
Propreté (%) (PS)	1,92	1,3
Los Angeles (%)	27	31
Micro – Deval (%)	15	11

**Figure 3.1** : Courbes granulométriques des granulats ENG carrière de Sidi Abdelli [BOU, 10]

3.3. Calculs du diamètre moyen du mélange granulaire

Ayant la distribution granulaire en masse et donc en volume des squelettes granulaires des bétons et le diamètre moyen D_{mi} de chaque classe granulaire i , on peut facilement remonter au diamètre moyen de tous les granulats D_M :

$$D_M = \frac{\sum(m_i \cdot D_i)}{\sum m_i} \quad [3.1]$$

Où m_i est le pourcentage en masse des granulats dans la classe i .

Notre squelette granulaire est composé de sable et de graviers de différents rapports G/S. Ainsi la taille des granulats est comprise entre 0,08 et 16 mm. Nous prendrons 1 Kg d'échantillon avec un rapport de (40-60)% entre le gravillon 3/8 et le gravillon 8/16 [GHO, 11]. Le passant au tamis de 80 microns forme un ensemble de particules de dimensions comparables à celles du ciment et du filler calcaire et sont considérées comme faisant partie de la pâte.

Nous divisons notre mélange granulaire en tranches successives et nous calculerons par la suite la masse de chaque tranche. La particule moyenne de chaque tranche granulaire est définie comme étant la particule considérée sphérique par hypothèse présentant un diamètre (d_i) défini par la moyenne entre le tamis supérieur [TM_i] et le tamis inférieur [Tm_i].

Les tableaux 3.3, 3.4, 3.5 et 3.6 regroupent les valeurs des diamètres moyens pour les différents rapports G/S.

Tableau 3.3 : Valeurs du diamètre moyen pour G/S = 0,8.

Symboles	Valeurs G/S = 0,8													
	0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5
T_{min}	0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5
T_{max}	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16
m_i (Kg)	0	0,031	0,026	0,085	0,087	0,135	0,0912	0,057	0,079	0,0504	0,0658	0,0648	0,0974	0,1236
D_{mi} (mm)	0,04	0,12	0,2375	0,4725	0,94	1,875	2,825	3,575	4,5	5,65	7,15	9	11,25	14,25
$m_i \cdot D_{mi}$	0	0,0037	0,0061	0,0401	0,0817	0,2531	0,2576	0,2037	0,3555	0,2847	0,4704	0,5832	1,0957	1,7613
$\sum (m_i \cdot D_{mi})$	5,3973575													
$\sum m_i$	0,9932													
D_M (mm)	5,434310814													

Tableau 3.4 : Valeurs du diamètre moyen pour G/S = 0,9.

Symboles	Valeurs G/S = 0,9													
T_{min}	0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5
T_{max}	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16
m_i (Kg)	0	0,031	0,024	0,068	0,083	0,148	0,08	0,044	0,085	0,035	0,093	0,056	0,113	0,134
Dm_i (mm)	0,04	0,12	0,2375	0,4725	0,94	1,875	2,825	3,575	4,5	5,65	7,15	9	11,25	14,25
m_i.Dm_i	0	0,00372	0,0057	0,03213	0,07802	0,2775	0,226	0,1573	0,3825	0,19775	0,66495	0,504	1,27125	1,9095
Σ (m_i .Dm_i)	5,71032													
Σ m_i	0,994													
D_M (mm)	5,744788732													

Tableau 3.5 : Valeurs du diamètre moyen pour G/S = 1.

Symboles	Valeurs G/S = 1													
T_{min}	0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5
T_{max}	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16
m_i (Kg)	0	0,031	0,026	0,075	0,067	0,125	0,07	0,047	0,084	0,036	0,1	0,042	0,11	0,168
Dm_i (mm)	0,04	0,12	0,2375	0,4725	0,94	1,875	2,825	3,575	4,5	5,65	7,15	9	11,25	14,25
m_i.Dm_i	0	0,00372	0,00618	0,03544	0,06298	0,2344	0,1978	0,16803	0,378	0,2034	0,715	0,378	1,2375	2,394
Σ(m_i .Dm_i)	6,0143625													
Σ m_i	0,981													
D_M (mm)	6,130848624													

Tableau 3.6 : Valeurs du diamètre moyen pour G/S = 1,1.

Symboles	Valeurs G/S = 1,1													
	0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5
T_{min}	0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5
T_{max}	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16
m_i (Kg)	0	0,02	0,0158	0,0618	0,093	0,1436	0,065	0,033	0,069	0,038	0,1	0,05	0,105	0,197
Dm_i (mm)	0,04	0,12	0,2375	0,4725	0,94	1,875	2,825	3,575	4,5	5,65	7,15	9	11,25	14,25
$m_i \cdot Dm_i$	0	0,0024	0,00375	0,0292	0,08742	0,2693	0,1836	0,11798	0,3105	0,2147	0,715	0,45	1,18125	2,80725
$\Sigma(m_i \cdot Dm_i)$	6,372323													
Σm_i	0,9912													
D_M (mm)	6,428897296													

3.4. Compacité

L'analyse de l'interaction pâte-granulats dans les bétons confectionnés, nécessite le calcul de la compacité maximale du squelette granulaire. Le calcul de la compacité maximale du squelette passe par la mesure de la compacité expérimentale d'échantillons représentatifs des différentes fractions du squelette granulaire, ainsi que du squelette lui-même.

Nous utilisons un cylindre de diamètre $\Phi = 16$ cm, et de 60 cm de hauteur (figure 3.2). Le cylindre est équipé d'un piston interne de diamètre extérieur égal au diamètre intérieur du moule moins 1mm de façon à assurer son libre coulissement à l'intérieur du moule d'une masse qui est calculée en fonction du diamètre intérieur du moule et de la densité du métal pour permettre d'appliquer une pression de 10 kPa sur le matériau. L'ensemble est solidarisé à une table à secousses.

**Figure 3.2** : Dispositif de mesure de la compacité expérimentale.

La méthode utilisée pour déterminer la compacité maximale des squelettes granulaires secs utilisés dans les bétons confectionnés est celle basée sur le modèle d'empilement compressible développé par de Larrard [LAR, 00], qui vise à calculer la valeur de la compacité maximale d'un squelette granulaire donné.

La compacité est le rapport du volume solide d'un mélange granulaire sur son volume apparent (V_A). Le volume apparent est la somme du volume des solides (V_s) et du volume des vides (V_{Vides}):

$$compacité = \frac{V_s}{V_A} = \frac{V_s}{V_s + V_{Vides}} \quad [3.2]$$

Toutefois, la compacité d'un squelette dépend du mode de mise en place, du récipient (cylindre, sphère, cube) et du procédé de compactage (piquetage, vibration avec ou sans pression). La compacité maximale (ou virtuelle selon [LAR, 00]) est la compacité que l'on peut obtenir avec un mélange granulaire donné, tout en plaçant les particules une par une. Par exemple, si l'on prend un mélange de sphères de même taille, la compacité mesurée avec les différents modes de mise en place peut changer entre 0,60 et 0,64. Or, la compacité maximale de ce même mélange avec une mise en place grain par grain est égale à 0,74 (compacité de l'arrangement cubique faces centrées des sphères).

3.4.1. Méthode d'empilement granulaire

Le Modèle d'Empilement Compressible (MEC), est la troisième génération de modèles développés au LCPC, visant à prévoir la compacité d'un mélange à plusieurs classes, à partir de la connaissance des compacités des tranches monodimensionnelles, de la distribution granulaire du système et de l'énergie fournie pendant la mise en place. Il s'appuie sur les notions de compacité virtuelle et d'indice de serrage.

3.4.1.1. Compacité virtuelle d'un empilement

Pour une population de grains donnée, on sait que la compacité, rapport du volume solide au volume total, dépend du mode de mise en place du mélange. On appelle conventionnellement compacité virtuelle, la valeur maximale qu'il est possible d'atteindre en plaçant les grains un à un dans le mélange, tout en respectant leur intégrité. Les mélanges industriels, mis en place aléatoirement et avec une énergie finie, conduisent toujours à des compacités réelles plus faibles.

On appelle par convention classe monodimensionnelle, un ensemble homogène de grains dont la grosseur est comprise entre deux tamis successifs de la série normalisée (série de Renard). Pour calculer la compacité virtuelle d'un mélange à n classes monodimensionnelles (mais non nécessairement sphériques), on commence par distinguer la *classe dominante*, qui forme une phase continue dans le mélange et qui en assure le serrage (figure 3.3). Cette classe i étant caractérisée par la compacité qu'elle atteint lorsqu'elle est empilée isolément (β_i), on calcule la compacité d'ensemble en exprimant que les grains i occupent "en masse" tout l'espace laissé disponible par les classes plus grossières, et que leur porosité est partiellement comblée par les classes les plus fines. On doit au passage tenir compte de

deux types d'interaction granulaire : l'effet de paroi exercé par les gros grains, et l'effet de desserrement (ou d'interférence) exercé par les grains plus fins. Une hypothèse forte du modèle est de considérer ces interactions comme additives, ce qui revient à supposer la non-intersection des zones de l'empilement des grains i perturbées par les classes étrangères [LAR00].

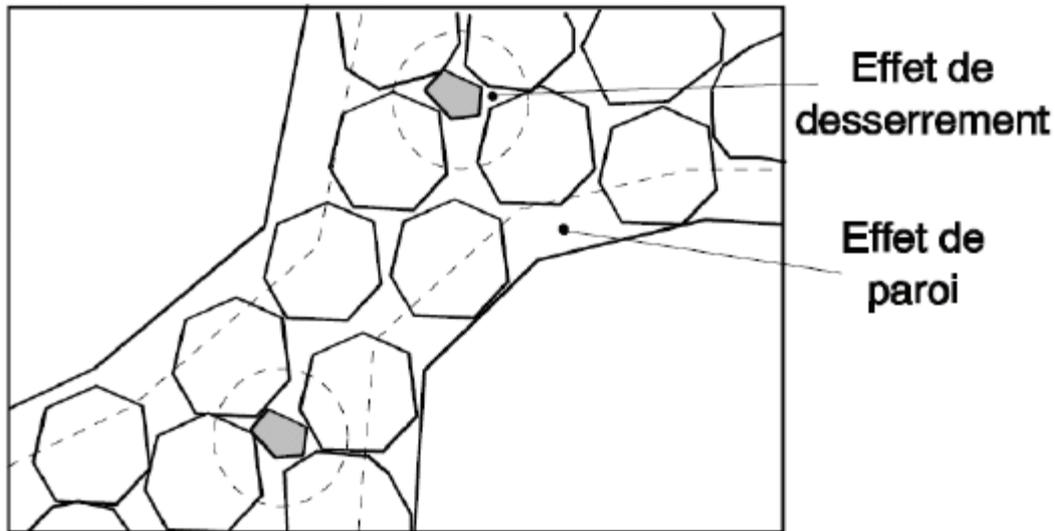


Figure 3.3 : Classe dominante dans un mélange ternaire (ici, la classe de taille intermédiaire) [LAR00].

3.4.1.2. Compacité réelle: notion d'indice de serrage

Les considérations précédentes permettent, pour une combinaison donnée de n classes granulaires, de calculer n expressions de la compacité virtuelle, chacune correspondant au cas où la classe i serait dominante. La "vraie compacité virtuelle" est la plus faible de ces n valeurs. Pour calculer la compacité réelle, on se dote d'un paramètre supplémentaire, appelé indice de serrage, symbolisé par la lettre K . Avec cet indice, on cherche à quantifier dans quelle mesure on s'approche de l'empilement virtuel. L'indice K apparaît alors comme une caractéristique du mode de mise en place du mélange. On le définit comme la somme d'indices partiels K_i de chaque classe granulaire i . Les K_i dépendent du rapport entre le volume effectif de la classe i dans le mélange, appelé Φ_i , et la valeur maximale Φ_i^* que pourrait prendre cette grandeur si le mélange était bloqué par un excès de grains i , toutes les autres classes demeurant à volume constant. On a ainsi :

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{\Phi_i}{\Phi_i^*}}{1 - \frac{\Phi_i}{\Phi_i^*}} \quad [3.3]$$

Lorsque la concentration solide $\phi = \sum_{i=1}^n \phi_i$ croît de zéro jusqu'à la compacité virtuelle, on voit que l'indice de serrage croît d'une valeur nulle vers l'infini. Le fait de fixer la valeur de K , pour une population de grains donnée, fournit alors une équation implicite à une seule solution : la compacité réelle prévue par le modèle.

3.4.1.3. Précision du modèle

Pour être utilisable, le modèle nécessite d'abord une calibration générale, visant à quantifier d'une part les interactions granulaires (effets de paroi et de desserrement) et d'autre part les indices de serrage (paramètre K) correspondant à divers types de mise en œuvre. Une fois cette calibration effectuée- ce qui a été fait à partir d'un ensemble de mesures sur mélanges binaires - le modèle doit être alimenté par les compacités des tranches monodimensionnelles. Il peut alors prédire la compacité à partir de la connaissance des proportions granulaires d'une combinaison de grains et de l'indice de serrage correspondant à sa mise en œuvre. D'une façon générale, le modèle conduit à des précisions meilleures que le pourcent de compacité (en valeur absolue).

Du fait de ses bonnes capacités prédictives, le modèle permet la recherche numérique de mélanges de compacité maximale. Il conduit au passage à remettre en cause la notion de courbe granulaire de référence : la répartition granulaire idéale obtenue sur une certaine étendue dépend de la forme des grains considérés. Ce qui explique la diversité des courbes proposées dans la littérature technique. Le modèle d'empilement compressible, quant à lui, prévoit des distributions différentes suivant les compacités des différents étages de la granularité; d'une façon générale, à taille fixée, plus une classe est compacte, plus elle est représentée dans le mélange idéal [LAR00].

3.4.2. Calculs des compacités expérimentales

3.4.2.1. Compacité du sable 0/3

La compacité des sables est mesurée sur un échantillon de 3 Kg. On est amené en général à séparer le sable en trois classes distinctes 0-315 μ m, 3.15 μ m-1.25 mm et 1.25mm-d_{max} où d_{max} est le diamètre maximal des grains de sable. La compacité expérimentale des trois classes du sable est présentée par la formule suivante :

$$C_S = \frac{3}{\rho_S \times V} \quad [3.4]$$

Où ρ_S est la masse volumique du sable en Kg/m³ et V est le volume final de l'échantillon en m³.

Les valeurs de la compacité expérimentale du sable sont présentées dans le Tableau 3.7.

Tableau 3.7 : Compacité expérimentale du sable.

Matériau	ρ_s (kg/m ³)	d_{\min} (mm)	d_{\max} (mm)	C_{\exp}
S1	2500	0	0,315	0,7108
S2	2500	0,315	1,25	0,6386
S3	2500	1,25	3	0,603

3.4.2.2. Compacité du gravillon 3/8, 8/16

La mesure de la compacité expérimentale des gravillons s'effectue comme pour les sables, mais sur un échantillon de 7,5 Kg. La compacité expérimentale des gravillons est présentée par la formule suivante :

$$C_G = \frac{7,5}{\rho_G \times V} \quad [3.5]$$

Où ρ_G est la masse volumique du gravillon en Kg/m³ et V est le volume final de l'échantillon en m³.

Les valeurs de la compacité expérimentale des gravillons sont présentées dans le tableau 3.8.

Tableau 3.8 : Compacité expérimentale du gravier [GHO, 11].

Matériau	ρ_s (kg/m ³)	d_{\min} (mm)	d_{\max} (mm)	C_{\exp}
G 3/8	2587	3	8	0,586
G 8/16	2587	8	16	0,573

3.4.3. Utilisation du logiciel René LCPC pour le calcul de la compacité

A fin de pouvoir utiliser de façon pratique le modèle de l'empilement compressible, il est apparu nécessaire d'utiliser le logiciel René LCPC. Le logiciel est basé sur les travaux de René Féret concernant l'optimisation granulaire des bétons.

Le logiciel a fait l'objet d'une validation dans le domaine du calcul de la compacité des mélanges granulaires secs, son schéma de fonctionnement est résumé sur la figure 3.4.

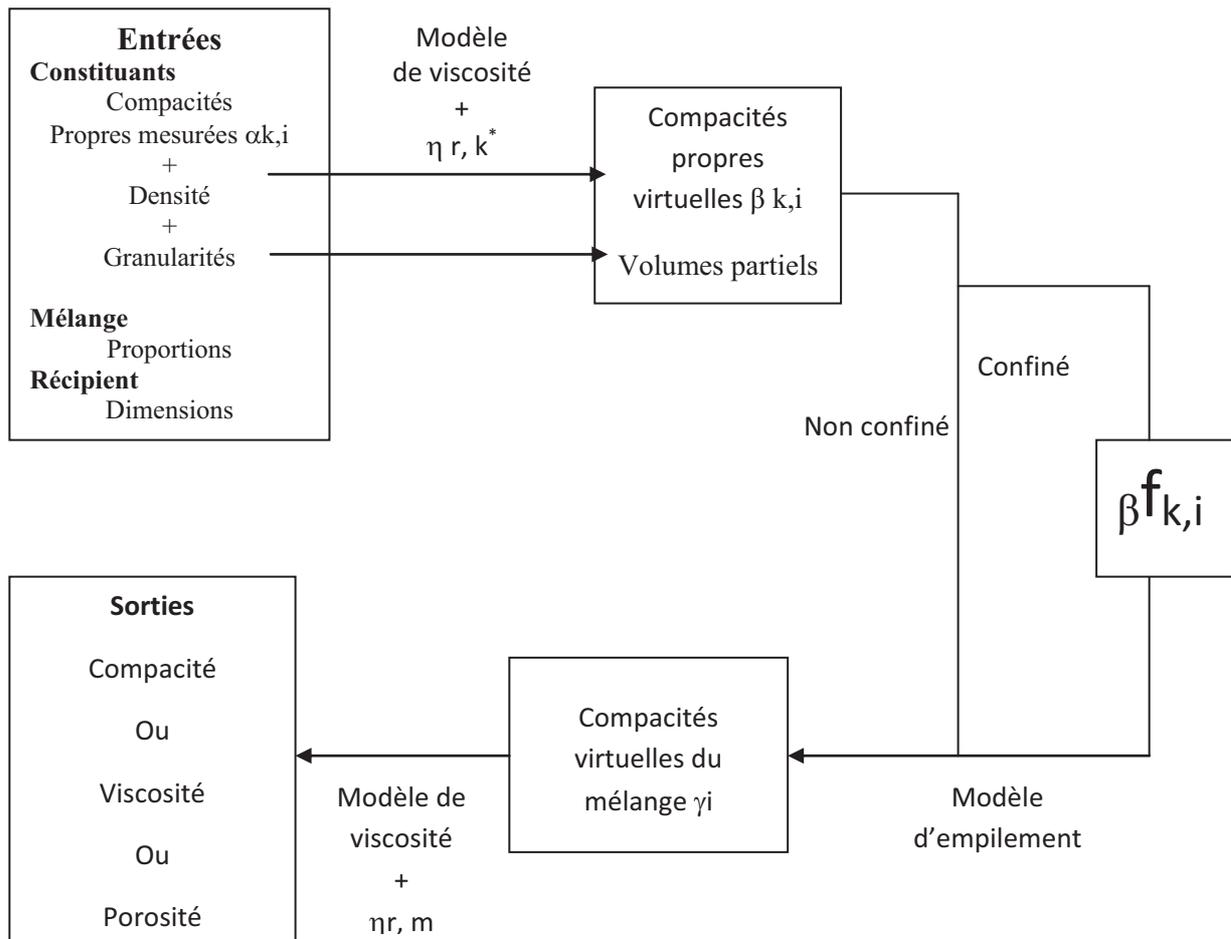


Figure 3.4 : Schéma de fonctionnement de René-LCPC.

La courbe suivante (figure 3.5) présente la compacité de notre mélange granulaire (Sable 0/3 – Gravillons 3/8 et 8/16) calculée par le logiciel RENE-LCPC :

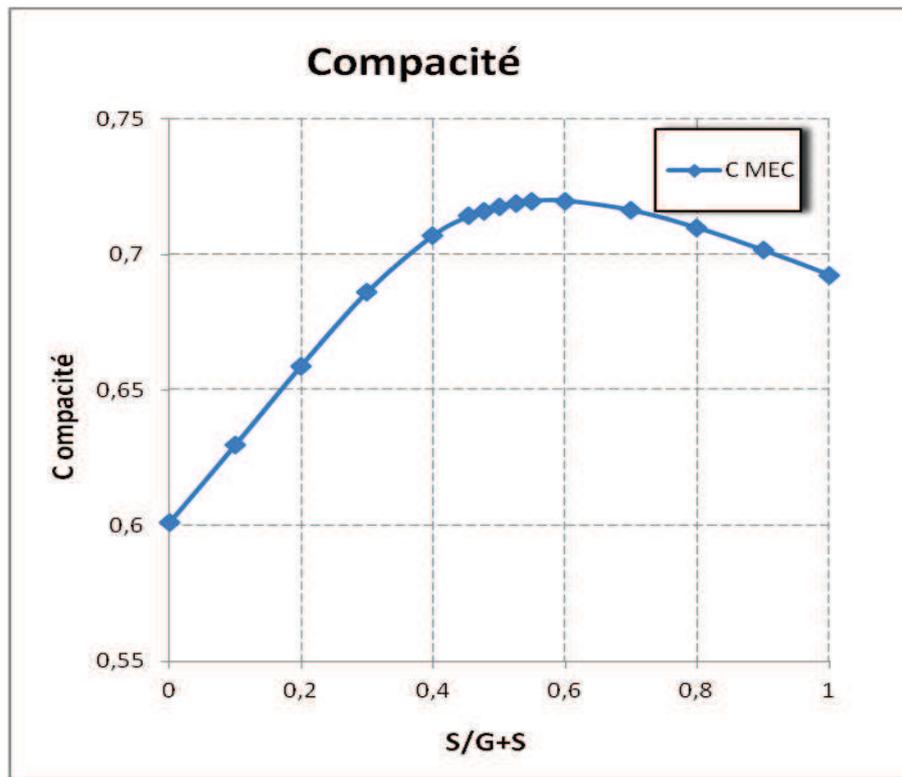


Figure 3.5 : Courbe représentant la compacité calculée par le logiciel RENE-LCPC.

D'après les résultats obtenus, on constate que la compacité augmente au fur et à mesure qu'on augmente le pourcentage des petits granulats. Elle atteint l'optimum entre 50%-60% des petits granulats. En effet, l'ajout des petites particules fait augmenter la compacité ; plus on augmente le pourcentage des petites particules plus les vides entre les grosses particules sont remplis conduisant à un matériau de plus en plus compact.

On remarque aussi que les compacités calculées par la méthode d'empilement compressible sont supérieures à celles mesurées expérimentalement.

A partir de ces résultats, et pour un volume donné de granulats, nous pouvons déduire le volume occupé par les vides dans les mélanges compacts des granulats.

3.5. Surface granulaire

Notre objectif est de déterminer la surface totale des granulats, accessible à la pâte de ciment dans les bétons confectionnés.

La surface totale d'un mélange granulaire est la somme des surfaces de toutes les particules qui le constituent. Pour la calculer, nous déterminons la surface totale des granulats de chaque classe granulaire. Chaque classe est représentée par un ensemble de granulats identiques en forme, en taille et en densité. Les hypothèses suivantes ont été prises en considération :

- Les particules constituant les granulats sont des sphères parfaites,
- Malgré leur porosité, ces sphères sont considérées indéformables dans l'eau.
- A l'intérieur de chaque tranche granulaire, la densité de la particule moyenne est considérée indépendante de sa taille et reste égale à celle du granulat considéré.

Le calcul de cette surface développée est organisé chronologiquement comme suit :

❖ *Calcul de la granulométrie du mélange des gravillons du béton*

Si on considère par exemple deux gravillons G_1 et G_2 , qui présentent les caractéristiques suivantes :

Tableau 3.9 : Caractéristiques des gravillons du béton

Caractéristiques des gravillons du béton			
gravillon	dosage dans le béton	masse volumique	refus au tamis ti
G_1	g_1	μ_1	R_{i1}
G_2	g_2	μ_2	R_{i2}

Il est possible de déterminer la granulométrie du mélange des gravillons en calculant le refus à chacun des tamis couvrant l'ensemble des gravillons à recomposer. Le passant à chacun de ces tamis est déterminé par la formule :

$$r_i = (g_1 \cdot r_{i1} + g_2 \cdot r_{i2}) / (g_1 + g_2) \quad [3.6]$$

De même la masse volumique du mélange est déterminée par la relation :

$$\mu_g = (g_1 \cdot \mu_1 + g_2 \cdot \mu_2) / (g_1 + g_2) \quad [3.7]$$

❖ *Définition des tranches granulaires successives dans ce mélange*

Chaque tranche granulaire est limitée par un tamis supérieur $[TM_i]$ et par un tamis inférieur $[Tm_i]$. Les refus correspondant à ces tamis sont respectivement RM_i et Rm_i (*exprimé en %*).

Les tamis à considérer sont les suivants :

16 / 12,5 / 10 / 8 / 6,3 / 5 / 4 / 3,15 / 2,5 / 1,25 / 0,63 / 0,315 / 0,16 / 0,08 / <0,08 mm

❖ *Calcul de la masse de chaque tranche granulaire*

La masse M_i de chaque tranche granulaire est définie par la relation :

$$M_i = (Rm_i - RM_i) \times (g_1 + g_2) / 100 \quad [3.8]$$

❖ *Calcul du diamètre de la particule moyenne dans chaque tranche*

La particule moyenne de chaque tranche granulaire est définie comme étant la particule considérée sphérique par hypothèse présentant un diamètre (d_i) défini par la relation :

$$d_i = (TM_i + Tm_i) / 2 \quad [3.9]$$

❖ *Calcul du volume de la particule moyenne dans chaque tranche*

Le volume de chaque type de particule moyenne est donné par la relation

$$v_i = (\pi \cdot d_i^3) / 6 \quad [3.10]$$

Les valeurs des volumes pour chaque type de particules moyennes seront données pour chaque tranche granulaire.

❖ *Calcul de la surface développée de la particule moyenne dans chaque tranche*

La surface développée pour chaque type de particule moyenne est donnée par la relation

$$s_i = \pi \cdot d_i^2 \quad [3.11]$$

❖ *Calcul du volume massique de la matrice du gravillon du mélange*

Le volume massique de la matrice du gravillon du mélange est déterminé à partir de la masse volumique du mélange.

$$\omega = 1 / \mu_g \quad [3.12]$$

❖ *Calcul du volume total de l'ensemble des particules dans chaque tranche granulaire*

Le volume total de l'ensemble des particules contenues dans une tranche granulaire est le produit de la masse de la tranche granulaire par le volume massique de la matrice du gravillon :

$$V_i = \omega \cdot M_i \quad [3.13]$$

❖ *Calcul du nombre de particules moyennes dans chaque tranche granulaire*

Le nombre de particules moyennes est alors obtenu par le rapport du volume total de l'ensemble des particules de la tranche granulaire au volume unitaire de la particule moyenne :

$$N_i = V_i / v_i \quad [3.14]$$

- ❖ *Calcul de la surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche granulaire*

La surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche granulaire est alors représentée par le produit de la surface développée de la particule moyenne par le nombre de particules moyennes :

$$S_i = N_i \cdot S_i \quad [3.15]$$

- ❖ *Somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche granulaire du mélange de gravillons*

La somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche granulaire du mélange de gravillon représente la surface développée de l'ensemble des gravillons :

$$S_G = \sum_i S_i \quad [3.16]$$

Les tableaux 3.10, 3.11, 3.12 et 3.13 regroupent les valeurs de surfaces développées pour les différents rapports G/S :

Tableau 3.10 : Surfaces développées pour G/S= 0,8.

Opérations	Symboles	Valeurs														
		0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	
tranches granulaires	T_{min}	0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	
	T_{max}	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	
masse de la tranche par Kg d'échantillon	Mui (kg)	0	0,031	0,026	0,085	0,087	0,135	0,0912	0,057	0,079	0,0504	0,0658	0,0648	0,0974	0,1236	
volume de la particule moyenne	Vi (10^{-9} m ³)	3,4E-13	9,1E-12	7,0E-11	5,5E-10	4,4E-09	3,5E-08	1,2E-07	2,4E-07	4,8E-07	9,4E-07	1,9E-06	3,8E-06	7,5E-06	1,5E-05	
surface développée de la particule moyenne	Si (10^{-6} m ²)	5,0E-09	4,5E-08	1,8E-07	7,0E-07	2,8E-06	1,1E-05	2,5E-05	4,0E-05	6,4E-05	1,0E-04	1,6E-04	2,5E-04	4,0E-04	6,4E-04	
volume massique de la matrice du granulat	μi (10^{-3} m ³ /kg)	0,00392														
volume total des particules moyennes	Vi (10^{-3} m ³)	0,0E+0	1,2E-04	1,0E-04	3,3E-04	3,4E-04	5,3E-04	3,6E-04	2,2E-04	3,1E-04	2,0E-04	2,6E-04	2,5E-04	3,8E-04	4,8E-04	
nombre de particules moyennes	Ni	0,0	13427624,3	1453923,0	603623,2	78400	15339,1	3029,7	934,9	649,2	209,3	134,8	66,5	51,2	32,0	
surface développée par les particules moyennes	Si (m ²)	0,000	0,607	0,257	0,423	0,218	0,169	0,076	0,038	0,041	0,021	0,022	0,017	0,020	0,020	
surface développée par 1 Kg d'échantillon	Sg (m ²)	1,930326521														

Tableau 3.12 : Surfaces développées pour G/S=1.

Opérations	Symboles	Valeurs															
		0	0,08	0,16	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16
tranches granulaires	T_{min}	0	0,08	0,16	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16
	T_{max}	0,08	0,16	0,315	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	16
masse de la tranche par Kg d'échantillon	Mui (kg)	0	0,031	0,026	0,026	0,075	0,067	0,125	0,07	0,047	0,084	0,036	0,1	0,042	0,11	0,168	0,168
volume de la particule moyenne	Vi (10^{-9} m ³)	3,4E-13	9,1E-12	7,0E-11	7,0E-11	5,5E-10	4,4E-09	3,5E-08	1,2E-07	2,4E-07	4,8E-07	9,4E-07	1,9E-06	3,8E-06	7,5E-06	1,5E-05	1,5E-05
surface développée de la particule moyenne	Si (10^{-6} m ²)	5,0E-09	4,5E-08	1,8E-07	1,8E-07	7,0E-07	2,8E-06	1,1E-05	2,5E-05	4,0E-05	6,4E-05	1,0E-04	1,6E-04	2,5E-04	4,0E-04	6,4E-04	6,4E-04
volume massique de la matrice du granulat	μi (10^{-3} m ³ /kg)	0,00392															
volume total des particules moyennes	Vi (10^{-3} m ³)	0,0E+00	1,2E-04	1,0E-04	1,0E-04	2,9E-04	2,6E-04	4,9E-04	2,7E-04	1,8E-04	3,3E-04	1,4E-04	3,9E-04	1,6E-04	4,3E-04	6,6E-04	6,6E-04
nombre de particules moyennes	Ni	0,0	1342762 4,3	145392 3,0	145392 3,0	532608 7	60377, 0	14202, 9	2325,4	770,9	690,3	149,5	204,8	43,1	57,8	43,5	43,5
surface développée par les particules moyennes	Si (m ²)	0,000	0,607	0,257	0,257	0,374	0,168	0,157	0,058	0,031	0,044	0,015	0,033	0,011	0,023	0,028	0,028
surface développée par 1 Kg d'échantillon	S_G (m ²)	1,805572649															

Tableau 3.13 : Surfaces développées pour G/S= 1,1.

Opérations	Symboles	Valeurs																			
		T _{min}	T _{max}	M _{ui} (kg)	V _i (10 ⁻⁹ m ³)	S _i (10 ⁻⁶ m ²)	volume massique de la matrice du granulat	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	
tranches granulaires		0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16					
masse de la tranche par Kg d'échantillon		0	0,02	0,0158	0,0618	0,093	0,1436	0,065	0,033	0,069	0,038	0,1	0,05	0,105	0,197						
volume de la particule moyenne		3,4E-13	9,1E-12	7,0E-11	5,5E-10	4,4E-09	3,5E-08	1,2E-07	2,4E-07	4,8E-07	9,4E-07	1,9E-06	3,8E-06	7,5E-06	1,5E-05						
surface développée de la particule moyenne		5,0E-09	4,5E-08	1,8E-07	7,0E-07	2,8E-06	1,1E-05	2,5E-05	4,0E-05	6,4E-05	1,0E-04	1,6E-04	2,5E-04	4,0E-04	6,4E-04						
volume massique de la matrice du granulat		0,00392																			
volume total des particules moyennes		0,0E+0 0	7,8E-05	6,2E-05	2,4E-04	3,6E-04	5,6E-04	2,5E-04	1,3E-04	2,7E-04	1,5E-04	3,9E-04	2,0E-04	4,1E-04	7,7E-04						
nombre de particules moyennes		0,0	8662983, 4	883537,8	438869,6	83806,9	16316,3	2159,3	541,3	567,0	157,8	204,8	51,3	55,2	51,0						
surface développée par les particules moyennes		0,000	0,392	0,156	0,308	0,233	0,180	0,054	0,022	0,036	0,016	0,033	0,013	0,022	0,033						
surface développée par 1 Kg d'échantillon		1,497125552																			

Nous présentons dans le tableau 3.14 les valeurs des surfaces granulaires de l'ensemble des bétons confectionnés, pour 1 Kg d'échantillon. Les valeurs des surfaces granulaires sont calculées en prenant en compte le diamètre moyen arithmétique D_{mi} .

Tableau 3.14 : Surfaces granulaires des bétons confectionnés.

G/S	Surface des granulats en mètre carré par Kg d'échantillon
0,8	1,930326521
0,9	1,822617798
1	1,805572649
1,1	1,497125552

3.6. Conclusion

Pour effectuer une caractérisation des squelettes granulaires, nous avons calculé le diamètre moyen du mélange granulaire, nous avons utilisé la méthode développée pour calculer la compacité maximale des squelettes granulaires par l'intermédiaire du modèle d'empilement compressible et enfin nous avons calculé la surface de notre mélange granulaire.

Les données obtenues dans ce chapitre seront utiles afin d'étudier l'interaction entre les granulats et la pâte de ciment obtenue dans le chapitre précédent.