

CHAPITRE V

CARATERISATION DES GRANULATS

CHAPITRE V- CARACTERISATION DES GRANULATS

1. INTRODUCTION

Le travail précédent a permis de fournir une formule de pâte aux caractéristiques autoplaçante. L'étape suivante est d'associer un squelette granulaire à cette pâte afin de former un béton ayant les mêmes caractéristiques à l'état frais. Le squelette étant formé de sable et graviers qu'il faut caractériser, ceci revient à s'informer sur leurs formes (influence directe sur la rhéologie), sur leurs capacités à absorber l'eau (puisque le rapport E/L a été déterminé et fixé pour la pâte, il serait plus convenable de compenser la quantité qui pourrait être absorbée par le mélange de sable et gravier) ainsi que la détermination de certains autres paramètres.

Ce chapitre présente les caractéristiques morphologiques des granulats utilisés, la procédure et les résultats relatifs à l'absorption de l'eau par les granulats pour des combinaisons de fractions de sable (0/3 mm), gravier (3/8 mm) et gravier (8/15 mm), ces fractions étant définies par les différents rapports gravier/sable (G/S). Nous présentons aussi les compacités expérimentales puis maximales comme nouveaux paramètres.

2. CARACTERISATION DES GRANULATS

En plus de leurs caractérisations physiques, les granulats se définissent aussi par leurs capacités d'empilement. En effet, lorsqu'un mélange sable-gravier est établi avec un rapport gravier/sable (G/S) fixé entre 0.8 et 1.2, le mélange aura une granulométrie étalée de 0 à 15 mm (0/3 pour le sable et 3/8 – 8/15 pour les graviers), contenant des éléments concassés, ce mélange aurait une capacité d'absorption d'une certaine quantité d'eau provenant de la pâte (*appelée eau retenue par les granulats*), cette quantité d'eau est puisée de celle déjà fixée dans la formulation de la pâte autoplaçante. Il y aussi nécessité de quantification des vides susceptibles d'être occupés par la pâte. Ceci passe par la détermination des compacités maximales et expérimentale

2. 1. Eau retenue par les granulats

Le mélange sable-graviers constitue des granulats pouvant absorber une certaine quantité d'eau, celle-ci est puisée de celle entrant dans la composition de la pâte, ce qui pourrait être nuisible pour la formulation du béton. Pour cela, il est important de connaître à l'avance la quantité d'eau que les granulats pourraient absorber. Le dispositif d'essai utilisé

permet de filtrer l'eau des granulats mis sous pression, ces granulats étant préalablement immergés dans l'eau. Le dispositif est constitué d'un entonnoir avec support percé dans lequel seront disposés les granulats, d'une pompe servant à exercer une pression d'extraction et d'une burette jaugée et graduée pour la mesure du volume de l'eau extraite. Un papier filtre est déposé sur le support supérieur percé de l'entonnoir afin d'empêcher la dispersion des éléments fins des granulats. L'essai est renouvelé trois fois pour chaque rapport gravier/sable (G/S) préalablement fixé, la même opération est effectuée pour différents (G/S), les résultats donnés constituent la moyenne des trois essais.

Les mesures de la quantité d'eau retenue par un échantillon de granulats (mélange de sable et graviers de rapport G/S fixé) seront effectuées par l'intermédiaire du dispositif donné par la figure 5.1 ci-dessous.

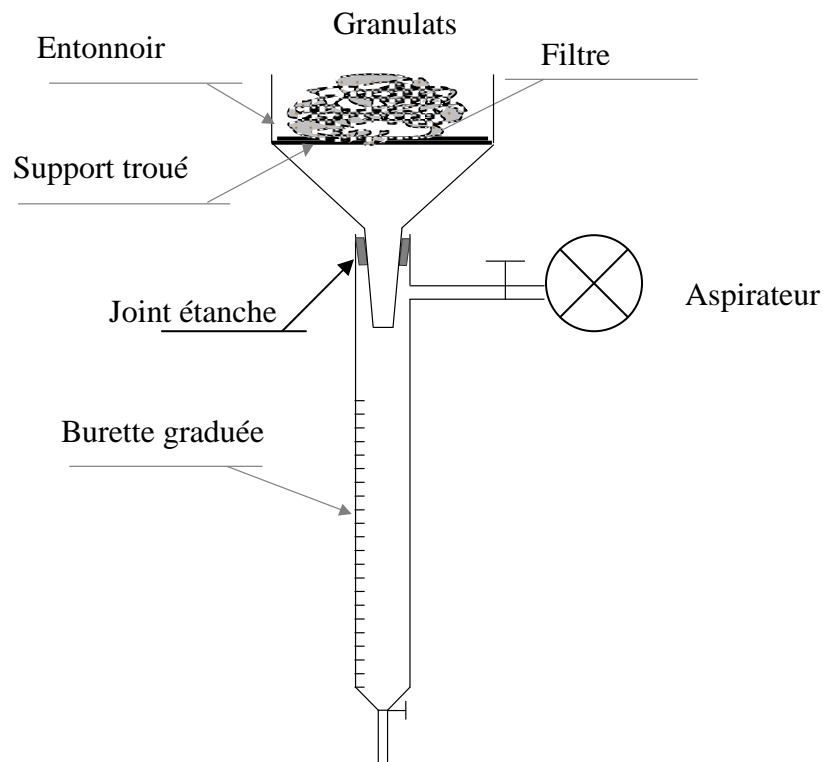


Figure 5.1 : Dispositif de mesure de l'eau retenue par les granulats

Le choix des dimensions des constituants est laissé à l'expérimentateur. Notre dispositif est constitué d'un entonnoir de 30 cm de diamètre auquel nous avons associé une plaque circulaire trouée de même diamètre, sur laquelle on pose un papier filtre pour empêcher la perte des granulats lors de l'écoulement de l'eau. La burette graduée doit avoir

une capacité suffisante pour contenir une partie de l'eau dans laquelle les granulats étaient préalablement immergés.

Les granulats de rapport G/S donné, doivent être représentatifs de l'ensemble des grains à injecter pour confectionner notre béton autoplaçant. Cela veut dire qu'il faut malaxer les graviers et le sable à sec afin d'homogénéiser le squelette solide.

La quantité d'eau dans laquelle sont posés les granulats est de volume connu. On prend le soin de prélever les granulats et de les poser à l'intérieur de l'entonnoir sans perte d'eau ni de grains au cours de l'opération. En mesurant la quantité d'eau qui remplit la burette en fonction du temps, on peut connaître à chaque instant la quantité de l'eau retenue par les granulats par un simple calcul de déduction. Le rôle de l'aspirateur est d'exercer une dépression facilitant l'arrachement de l'eau de surface aux granulats. Il est évident qu'au début du processus, la burette se remplit plus vite par l'eau qui s'écoule sous l'effet de la gravité. Cet écoulement devient de plus en plus lent au cours du temps lorsque l'eau commence à manquer entre les interstices du squelette solide. La fonction de variation temps – eau retenue par les granulats serait décroissante.

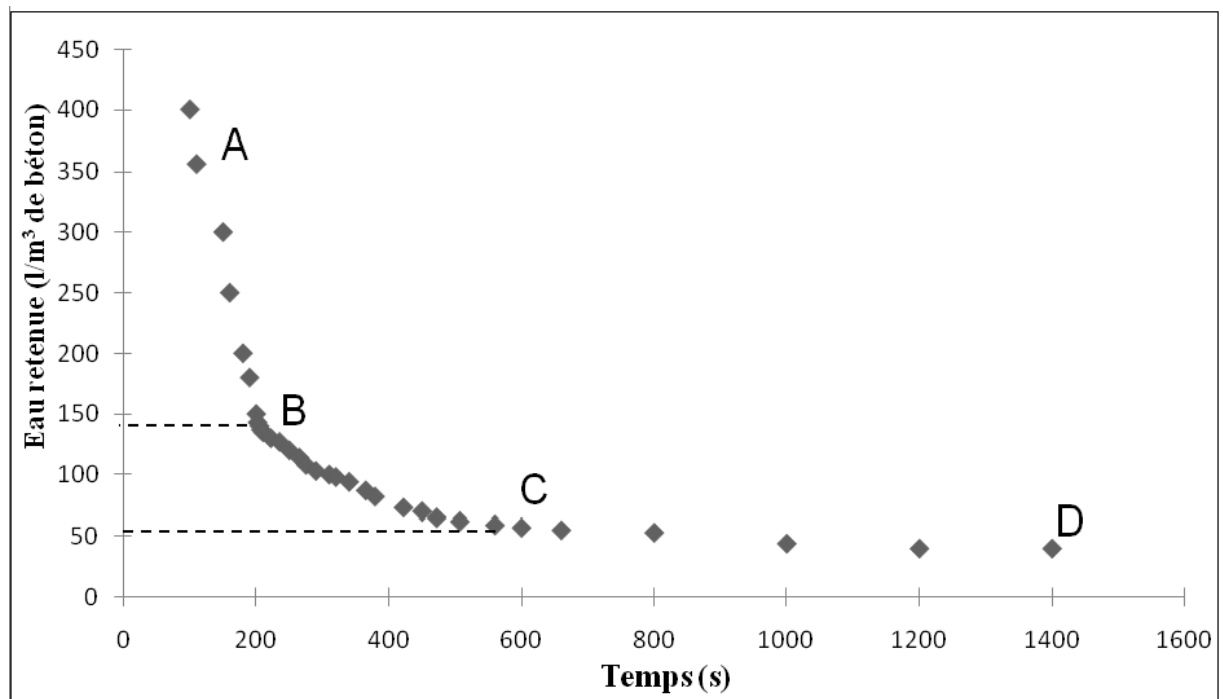


Figure 5.2 : Exemple de courbe de filtration

La figure 5.2 illustre un exemple de représentation des résultats des mesures de l'eau retenue (en l/m³ de béton) en fonction du temps (en secondes). En se référant à la courbe, la

partie (AB) représente la collecte de l'eau en excès des granulats, cette eau est la plus rapidement récupérée, l'allure est pratiquement linéaire. La deuxième partie (BC) curviligne représente la quantité d'eau issue de la destruction du ménisque capillaire qui était présent entre les particules granulaires. Quant à la dernière partie (CD), elle est asymptotique et correspondrait à la quantité d'eau arrachée par dépression des pores des granulats : c'est l'eau de filtration. Pour un temps indéfiniment lent (au-delà du point D), l'eau qui pourrait être récupérée viendrait de l'eau de constitution qui ne présente pas de lien avec le but de l'opération.

La quantité d'eau retenue par les granulats correspond au point supérieur de partie (CD) de la courbe : c'est le point (C) qui représente le point d'inflexion de cette courbe.

Pour différents rapports ($G/S = 0.8$, $G/S = 1$ et $G/S = 1.2$) choisis dans le cadre de l'étude, nous effectués des essais en vue de mesurer les quantités d'eau retenue pour chaque mélange ; le tableau V.1 donne les résultats de ces essais. Les colonnes (X) correspondent aux volumes de l'eau retenue en l/m^3 de béton et les colonnes (Y) aux temps (en s) définissant les instants auxquels les mesures ont été prises.

Tableau 5.1 : valeurs de l'eau retenue pour différents G/S

G/S = 0.8		G/S = 1		G/S = 1.2	
X	Y	X	Y	X	Y
600	0	600	0	600	0
510	96	500	102	500	118
440	108	420	165	423	173
372	125	385	177	387	196
285	140	322	192	336	220
262	165	300	221	302	260
220	182	285	229	290	268
210	191	278	235	282	274
203	200	272	242	285	286
198	215	265	250	290	298
194	226	260	259	267	326
182	232	255	268	262	312
180	247	250	275	250	360
173	262	238	300	250	385
180	273	230	316	231	402
175	281	220	338	220	422
Eau retenue	296	210	372	223	445
143	318	203	417	208	480
147		197	433	200	502
170	329	180	488	191	535
132	338	172	515	185	557
142	353	162	546	205	573
136	366	Eau retenue	630	180	612
125	398	150	682	174	678
122	439	145	740	157	780
119	474	128	910	Eau retenue	859
115	502	130	1020	155	975
112	539	107	1060	122	1015
110	556	103	1185	137	1265
103	612	112	1510	124	1470
100	730	108	1715	124	1695
97	895	100	1985	118	1965
92	1150	95	2200	105	2200
91	1390	96	2205	106	2203
92	1500	96	2206	106	2203

La (figure 5.3), (figure 5.4) et (figure 5.5) représentent les différentes courbes de filtration obtenues et correspondant aux mélanges de rapports G/S (0.8), (1) et (1.2) respectivement.

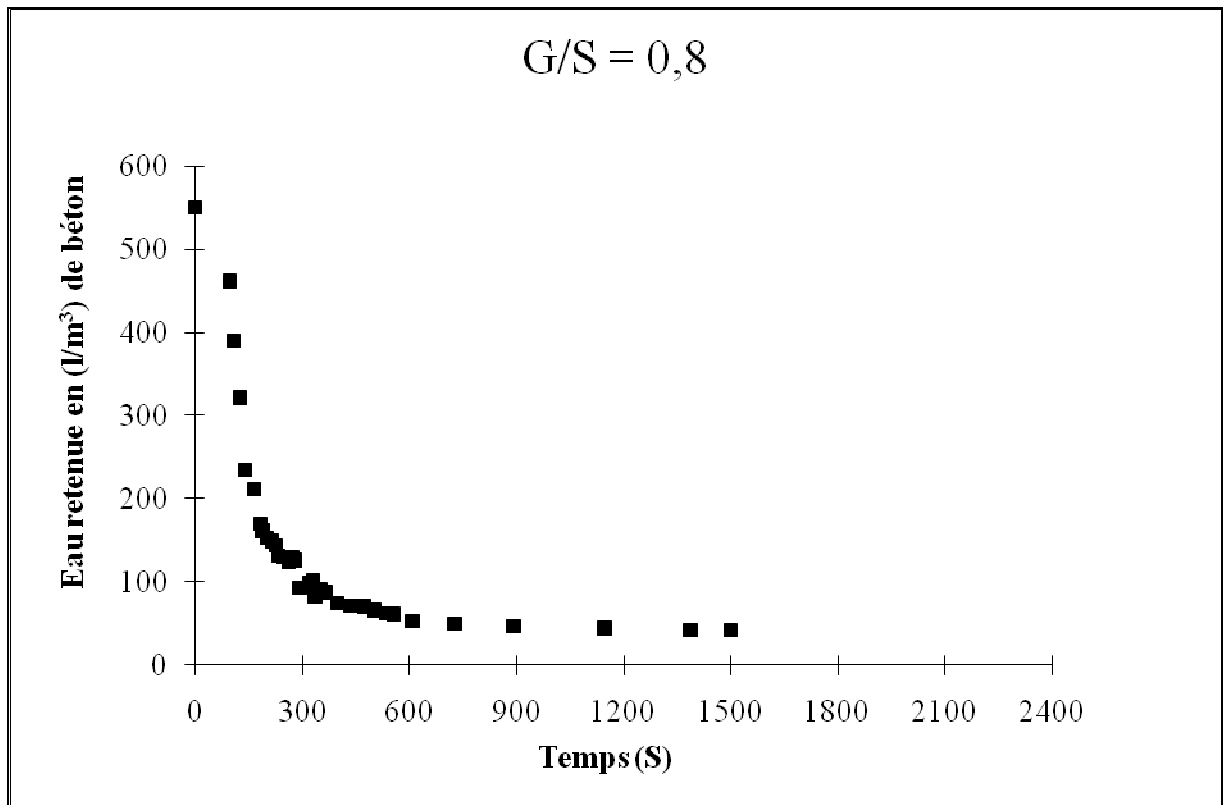


Figure 5.3 : courbe de filtration du mélange sable-gravier avec $G/S = 0.8$.

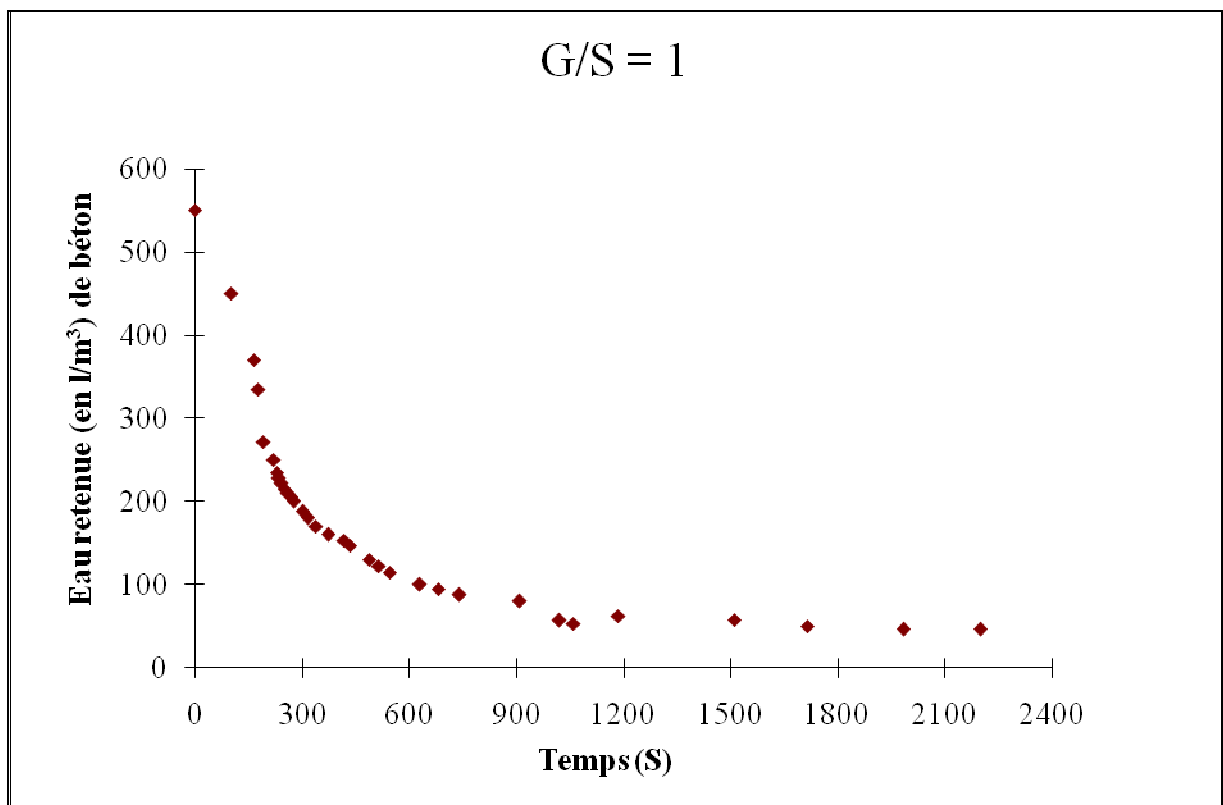


Figure 5. 4 : courbe de filtration du mélange sable-gravier avec $G/S = 1$

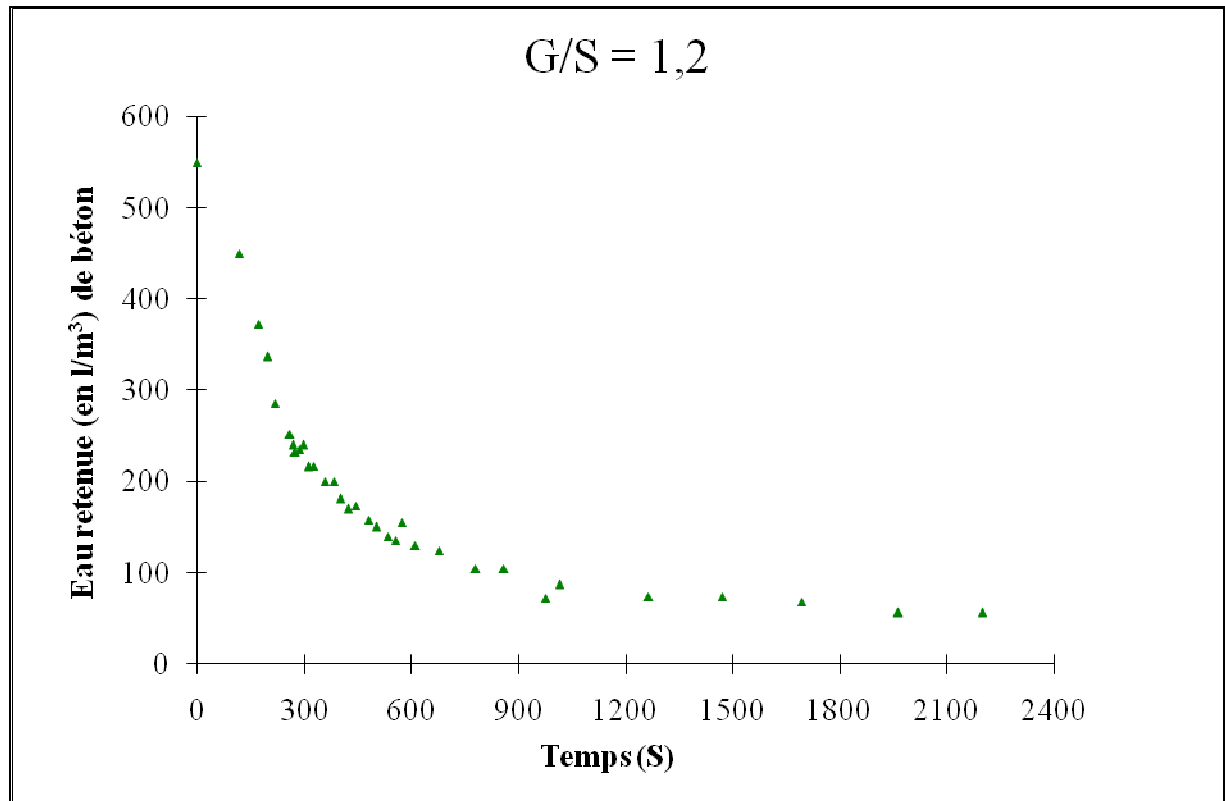


Figure 5. 5 : courbe de filtration du mélange sable-gravier avec G/S = 1.2

Visiblement, les mélanges de rapport (G/S) le plus faible présentent des pentes décroissantes plus accentuées et la quantité d'eau retenue la plus importantes (cf. tableau 5.1)

2. 2. Détermination du diamètre moyen (D_{mi}) et représentatif (D_{Ri})

Une classe (i) correspond à un ensemble de granulats retenus entre deux ouvertures consécutives de tamis Φ_{i-1} et Φ_i et sa taille moyenne correspond à D_{mi} , correspondant à une moyenne arithmétique des deux ouvertures. Ce diamètre est défini par [Mouret 2005] :

$$D_{mi} = \frac{\Phi_{i-1} + \Phi_i}{2} \quad (5. 1)$$

La courbe granulométrique peut alors être divisée en un nombre fini de classes granulaires de taille moyenne D_{mi} . Chaque classe de ces décompositions, sera définie par son diamètre représentatif D_{Ri} , et dont le calcul est basé sur la conservation du volume des particules et de leur nombre.

La compacité des granulats avec lesquels les bétons seront confectionnés est directement influencée par la forme des grains, ceux-ci sont souvent assimilés à des éléments de formes sphériques, dont les dimensions sont définies par rapport à ceux de deux diamètres

consécutifs, par le diamètre moyen (D_{mi}) pour chaque classe granulaire. Par ailleurs, chaque classe granulaire pourrait être définie par un diamètre représentatif (D_{Ri}), caractérisant la composition de la classe granulaire. Il ne s'agit plus de calculer la moyenne arithmétique des diamètres des grains, mais de définir un diamètre spécifiant la dimension majoritaire de la classe granulaire.

La méthodologie consiste d'abord à définir les moments statiques d'une distribution à partir de la fonction de répartition et de la fonction de densité en volume. Le diamètre (D_{Ri}) peut alors être déduit en approchant la fonction réelle entre deux tamis successifs par interpolation linéaire.

Le diamètre représentatif (D_{Ri}) est défini par la relation ci-après :

$$D_{Ri} = \left(\frac{S_i - S_{i-1}}{\int_{\hat{c}_i} \frac{1}{u^3} \cdot \left(\frac{dS(u)}{du} \right) \cdot du} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.2)$$

Où (S) est la fonction de densité des particules et (u) le diamètre représentatif de ces particules.

La littérature [El-Barrak 2005] fournit une équation finale pour la détermination du diamètre représentatif (D_{Ri}), en prenant comme fonction de densité $S(\Phi) = \Phi$ et $(d\Phi/d\Phi)=1$:

$$D_{Ri} = \left(\frac{S_i - S_{i-1}}{\int_{\hat{c}_i} \frac{1}{u^3} \cdot \left(\frac{dS(u)}{du} \right) \cdot du} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{\Phi_i - \Phi_{i-1}}{\int_{\hat{c}_i} \frac{1}{u^3} \cdot du} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{\Phi_i - \Phi_{i-1}}{\frac{1}{2\Phi_{i-1}^2} - \frac{1}{2\Phi_i^2}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.3)$$

Le tableau 5.2 présente les passants cumulés des différentes classes granulaires en fonction des rapports (G/S) :

Tableau 5. 2 : Passants cumulés en fonction de G/S

Ouverture tamis (mm)	G/S = 0.8	G/S = 1	G/S = 1.2
0.08	00.00	00.00	00.00
0.16	09.17	08.04	06.79
0.315	17.25	16.12	15.01
0.63	27.03	25.30	24.87
1,25	38.42	34.97	33.28
2.5	60.77	57.76	56.13
3.15	67.23	64.55	62.97
4	72.87	69.13	66.44
5	82.90	78.67	82.33
6.3	88.03	86.60	84.86
8	93.65	91.28	89.97
10	95.05	94.16	92.25
12.5	98.08	96.99	95.03
14	99.78	99.10	98.81
16	100.00	100.00	100.00

La détermination des passants cumulés pour les différents rapports (G/S) est une étape intermédiaire qui servira pour les calculs des diamètres moyens arithmétique et des diamètres représentatifs. En effet, les valeurs « en gras » du tableau précédent ont été choisies pour définir les tranches granulaires.

Le tableau 5. 3 donne les valeurs des diamètres moyens et diamètres représentatifs des différentes tranches granulaires adoptées :

Tableau 5. 3 : Diamètres moyens et diamètres représentatifs

N° Tranche	Tranche granulaire	D_{Ri} (mm)	D_{mi}(mm)
1	12,5 - 16	14,106	14,25
2	6,3 - 12,5	8,75	9,4
3	3,15 - 6,3	4,368	4,725
4	1,25 - 3,15	1,917	2,2
5	0,315 - 1,25	0,583	0,7825
6	0,08 - 0,315	0,148	0,1975

Les calculs avec la méthodologie adoptée ont montré que les valeurs des diamètres moyens (D_{mi}) restent toujours inférieures aux diamètres représentatifs (D_{Ri}) de la même classe granulaire.

2. 3. Compacité des fractions granulaires

La compacité d'un ensemble de grains dans un contenant rigide est la somme des volumes enveloppes des grains (en gris, figure 5.6), rapportée au volume total du contenant (gris et blanc).

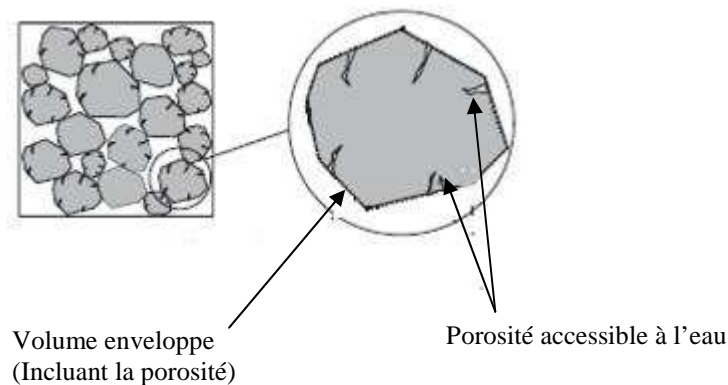


Figure 5.6 : Schéma illustrant la notion de compacité

2. 3 –a. Compacité expérimentale

La compacité expérimentale d'une tranche granulaire peut être déterminée à partir des compacités des tranches granulaires qui le composent. Ainsi, pour le cas de nos mélanges granulaires formés de sable et de gravier, l'étendu granulaire s'étale de (0 à 16 mm), on a opté pour les tranches (0.08 – 1.25 mm), (2.5 – 4 mm), (5 – 10 mm) et (12.5 – 16 mm). Le modèle d'empilement compressible permet de calculer les compacités expérimentales (C_i) de chacune des classes granulaires ou de ses tranches.

Les résultats des compacités expérimentales (cf. Chapitre II, § B1. 2) obtenus pour différents rapports G/S sont donnés par le tableau 5. 4. Le choix des tranches granulaires est fait en supposant que les grains sont "mono-dispersés" (cf. § 2.3-b).

Tableau 5. 4 : Valeurs des compacités expérimentales

Tranche granulaire	G/S	Compacité élémentaire	Compacité du mélange
0.08 – 1.25 mm	0.8	0.735	0.729
2.5 – 4 mm	0.8	0.732	
5 – 10 mm	0.8	0.727	
5 – 10 mm	0.8	0.726	
Tranche granulaire	G/S	Compacité élémentaire	Compacité du mélange
0.08 – 1.25 mm	1	0.737	0.731
2.5 – 4 mm	1	0.733	
5 – 10 mm	1	0.725	
12.5 – 16 mm	1	0.728	
Tranche granulaire	G/S	Compacité élémentaire	Compacité du mélange
0.08 – 1.25 mm	1.2	0.728	0.726
2.5 – 4 mm	1.2	0.723	
5 – 10 mm	1.2	0.719	
12.5 – 16 mm	1.2	0.721	

2. 3 – b. Compacité maximale

Pour la compacité maximale, le principe de formulation proposé par De Larrard [De Larrard 1999] se base sur le fait que la rhéologie du béton dépend de l'arrangement du squelette granulaire. L'optimisation de la compacité du béton permet de réduire la teneur en eau à ouvrabilité constante. Les modèles développés permettent d'étudier des mélanges de grande étendue granulaires et ainsi de prendre en compte la contribution des différents constituants des bétons

Dans un empilement, si tous les grains sont arrangés de manière optimale, la compacité maximale (γ_i) est atteinte (*paramètre également appelé compacité virtuelle*) : c'est la valeur maximale qu'il est possible d'atteindre en mettant les grains un par un dans un mélange, si au contraire, les mélanges sont placés d'une façon aléatoire, la compacité générée serait plus faible. La détermination de la compacité maximale peut être faite sur la base des diamètres

représentatifs ou des diamètres moyens de chaque tranche granulaire. Pour un ensemble de grains. Quelques notions de base s'imposent, elles sont données dans ce qui suit :

- ✓ Une classe monodimensionnelle est un ensemble homogène de grains dont la grosseur est comprise entre deux tamis successifs de la série normalisée (série de Renard).
- ✓ Le calcul de la compacité virtuelles (n) classes monodimensionnelles, il faut distinguer la classe dominante qui forme une phase continue dans le mélange et qui en assure le serrage.
- ✓ Une 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.

Les granulats d'une même classe sont dits "*mono-dispersés*" lorsqu'ils passent à travers un tamis de diamètre (Φ_i) et sont retenus par un tamis de diamètre (Φ_{i+1}), ces diamètres étant successifs de la série de Renard vérifiant ainsi $\Phi_i / \Phi_{i+1} \leq 1.26$.

Lorsque $\Phi_i / \Phi_{i+1} \geq 1.26$, les granulats sont dits "*poly-dispersés*", appartenant à une tranche granulaire qui regroupe au moins deux classes successifs de la série de Renard.

Le modèle d'empilement compressible développé par de Larrard [de Larrard 2000] est retenu pour le calcul des compacités maximales (ou virtuelles) d'un squelette granulaire choisi. Dans ce qui suit, la méthodologie simplifiée utilisée sera présentée.

La compacité étant définie par le rapport entre le volume solide des grains (V_S) et le volume apparent correspondant (V_A) :

$$C = \frac{V_S}{V_A} = \frac{V_S}{V_S + V_{\text{vides}}} \quad (5.4)$$

Cette compacité dépend, en plus de la forme des grains, du récipient utilisé pour l'expérimentation et de la manière de compactage (avec ou sans pression durant la vibration).

- Pour le cas d'un mélange de granulats *mono-dispersés* :

La connaissance de la compacité expérimentale (C_i) d'une classe granulaire (i) permet la détermination de la compacité résiduelle (β_i), en passant d'abord par le calcul de la compacité résiduelle moyenne ($\bar{\beta}_i$) tel que :

$$\bar{\beta}_i = \left(1 + \frac{1}{K}\right) \cdot C_i \quad (5.5)$$

Où (k) est l'indice de serrage qui dépend de la manière de remplissage du récipient (il est égal à 9 dans notre cas, puisque le remplissage se fait par couche et les granulats sont soumis à une vibration sous une pression égale à 10 KPa).

La compacité résiduelle (β_i) est alors calculée selon la formule donnée par l'équation (V.4) suivante :

$$\beta_i = \frac{\bar{\beta}_i}{1 - (1 - K_w) \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{d_i}{\phi}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{d_i}{H}\right)\right]} \quad (5.6)$$

K_w est le coefficient de l'effet de paroi, il est égal à 0.73 pour les granulats concassés [de Larrard 2000].

Pour un mélange composé de (n) classes (i) de granulats de taille (d_i) tel que ($d_1 \geq d_2 \geq d_3 \geq \dots \geq d_n$), en mesurant les compacités résiduelles (β_i) des (n) classes ($i = 1$ à n), et en considérant que la classe (i) est dominante, sa compacité résiduelle (γ_i) est donnée par :

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} y_j \cdot \left(1 - \beta_i + b_{i,j} \beta_i \left(1 - \frac{1}{\beta_j}\right)\right) - \sum_{j=i+1}^n y_j \cdot \left(1 - a_{i,j} \frac{\beta_i}{\beta_j}\right)} \quad (5.7)$$

La compacité maximale recherchée du mélange est $\gamma = \text{Min} (\gamma_i)$

Où :

(y_i) est la proportion volumique en solide de la classe (i) par rapport au volume solide total.

(a_{ij}) est le coefficient de l'effet de desserrement développé par le grain (j) sur l'empilement des grains (i). Cet effet est généralement exercé par les grains fins du mélange.

$$a_{ij} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i}\right)^{1,02}} \quad (5.8)$$

(b_{ij}) est un coefficient illustrant l'effet de paroi exercé par le grain (i) au voisinage du grain (j). Il est généralement exercé par les gros grains.

$$b_{ij} = 1 - \left(1 - \frac{d_i}{d_j}\right)^{1,5} \quad (5.9)$$

La figure (5.7) illustre l'effet de desserrement exercé par les grains fins et l'effet de paroi exercé par les gros grains du mélange granulaire.

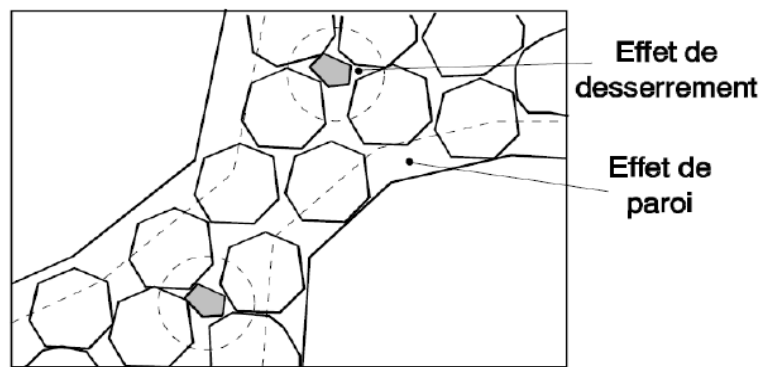


Figure 5.7 : L'effet de desserrement et l'effet de paroi [de Larrard 2000].

➤ Pour un mélange de granulats *poly-dispersés* :

Pour (n) tranches de granulats poly-dispersés, la compacité résiduelle est donnée par la relation ci-après [de Larrard 2000] :

$$\beta_i = \left(1 - [1 - K_w] \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{d_i}{\phi} \right)^2 \cdot \left(1 - \frac{d_i}{H} \right) \right] \right) \cdot \beta \quad (5.10)$$

Où :

(d_i) est le diamètre moyen des grains entre les ouvertures de tamis inférieures et supérieures.

(β) la compacité résiduelle.

La compacité maximale (virtuelle) d'un mélange donné (recherchée dans notre cas), sera déterminée par itération. En effet, connaissant la compacité expérimentale (C_{exp}), l'indice de serrage (k) est déterminé selon l'équation (V.9) :

$$K = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\frac{y_i}{\beta_i}}{\frac{1}{C} - \frac{1}{\gamma_i}} \right) \quad (5.11)$$

L'itération est faite jusqu'à ce que la valeur théorique de (C) (équation V.8) corresponde à la compacité expérimentale (C_{exp}).

Aussi complexe qu'elle soit, la méthode a été appliquée pour la détermination de la compacité maximale (virtuelle), en considérant notre mélange comme granulats poly-dispersés. Les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau 5.5 suivant.

Tableau 5.5 : Compacités expérimentales et maximales

G/S	Compacité Expérimentale (C_i)	Compacité maximale (γ_i)	
		Avec D_{Ri}	Avec D_{mi}
0.8	0.729	0.782	0.801
0.9	0.729	0.798	0.805
1	0.731	0.801	0.807
1.1	0.734	0.808	0.811
1.2	0.726	0.804	0.815

3. BILAN

L'approche de caractérisation du squelette granulaire basée sur le modèle d'empilement compressible a été utilisée. Cette approche a permis la détermination du diamètre arithmétique moyen (D_{mi}) et du diamètre représentatif (D_{Ri}) d'un ensemble granulaire en fonction du nombre des grains et de leur volume total correspondant.

La méthode a aussi été utilisée pour les mesures des compacités expérimentales, puis pour la détermination des compacités maximales (ou virtuelles).

Nous avons remarqué que les résultats obtenus par l'intermédiaire des diamètres arithmétiques (D_{mi}) (méthode classique) présentaient des valeurs de compacités toujours plus faibles que celles déterminées en fonction des diamètres représentatifs (D_{Ri}).

Les résultats obtenus dans ce chapitre serviront comme donnée pour la réalisation des bétons dans le chapitre VI suivant.