

CHAPITRE VI

REALISATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS

CHAPITRE VI- RÉALISATION DES BÉTONS AUTO-PLAÇANTS

1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous définissons la méthodologie que sera appliqué, en passant de l'échelle de la pâte de ciment à l'échelle du béton, par injection de granulats humides à la pâte de caractéristique autoplaçante.

Pour un squelette granulaire choisi que l'on définit par son rapport massique gravier/sable (G/S), une quantité suffisante de pâte optimale autoplaçante est préparée, à laquelle sera ajouté le mélange granulaire ; une partie de cette pâte va enrober les granulats et le reste s'intercale entre ces grains et remplit les vides, provoquant ainsi un écartement des granulats par rapport au squelette granulaire, ce qui induirait une difficulté d'écoulement du béton ainsi formé. Par ailleurs, les grains ont une capacité d'absorption d'eau non négligeable, cette eau est puisée de celle entrant dans la composition de la pâte, il y a lieu donc de la corriger par ajout d'eau afin de compenser ce déficit. Il est difficile de combler l'eau adsorbée mais encore plus difficile de pouvoir calculer théoriquement cette quantité défective, puisque celle-ci aurait déjà provoqué une augmentation des vides capillaires.

Pour les raisons évoquées, la confection d'un béton autoplaçant se fera par ajouts successifs et alternés de granulats secs et d'eau à la pâte de ciment autoplaçante, puis vérifier les propriétés à l'état frais des bétons ainsi réalisés, selon les recommandations de l'AFGC.

2. DEMARCHE EXPERIMENTALE ET FORMULATION

Nous nous donnons l'hypothèse conventionnel de déterminer la formulation de 1 m³ de béton autoplaçant. Pour cela, il est nécessaire de déterminer le volume de la pâte de ciment, le volume des granulats à injecter (à G/S fixé) et celui de l'eau à ajouter. Le volume unitaire du béton finalement obtenu contient un volume des vides estimé à 2.5 % du volume total.

Nous pouvons écrire l'équation de départ suivante :

$$V = V_p + V_A + V_V \quad (6. 1)$$

Avec :

V : volume unitaire du béton (1 m³).

V_p: Volume absolu de la pâte optimale autoplaçante.

V_A: Volume ajouté, cumule du volume absolu des granulats et du volume d'eau.

V_V : Volume des vides dans le béton, équivalent au volume de l'air occlus (2.5 m^3).

Pour pouvoir élaborer un béton autoplaçant en partant d'une pâte autoplaçante de volume (V_p), on ajoute progressivement des volumes alternés de granulats et d'eau durant le malaxage, tout en observant l'aspect du béton qui doit ressembler à celui d'un béton autoplaçant. La procédure s'arrête lorsque la somme des volumes ajoutés aurait atteint le volume (V_A). La figure (6. 1) illustre la démarche suivie.

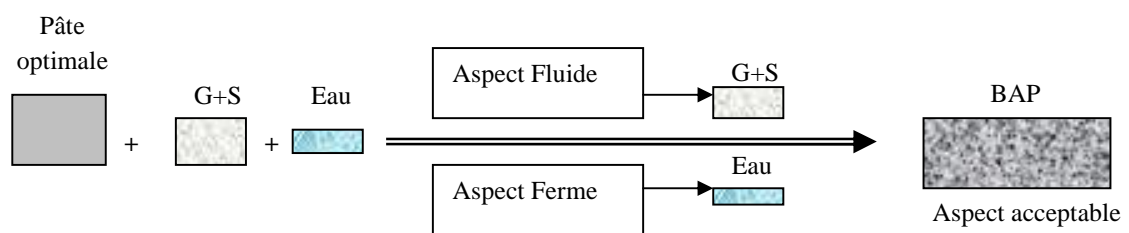


Figure 6. 1 : Schéma illustrant la démarche de formulation d'un BAP.

Lorsque des proportions alternées entre (graviers et sable) et eau sont injectées, les mélanges obtenus pourraient être fermes ou fluides, ce qui nécessite l'ajout d'eau ou de granulats respectivement. Finalement, Les essais d'ouvrabilités sur les bétons à l'état frais ainsi obtenus permettront d'ajuster les proportions de chaque constituant ajouté pour caractériser ces bétons comme autoplaçants conformément aux recommandations de l'Association française de Génie Civil (A.F.G.C).

3. ASSOCIATION PÂTE-GRANULATS

Dans ce qui suit, la procédure à suivre pour l'élaboration d'un béton autoplaçant est expliquée. Pour chaque mélange granulaire à rapport G/S fixé (entre 0.8 et 1.2) :

- Préparation des matériaux (pesage, subdivision des granulats (de G/S fixé) en petites quantités de pesées connues, préparation de l'eau de gâchage en volume connu)
- Confection de la pâte (Formulation trouvée précédemment).
- Ajout alternée de granulats et d'eau (Volume final cumulé étant V_A), observation de l'aspect visuel.
- Essais de caractérisation des BAP dans l'ordre suivant:

Chapitre VI : Réalisation des bétons auto-plaçants

- Essai d'étalement au cône d'Abrams
 - Essai de la boîte en L
 - Essai de stabilité au tamis
 - Mesure des masses volumiques du béton
 - Mesure des résistances mécaniques jusqu'à 28 jours, sur des éprouvettes cubiques.
- Validation de la composition obtenue par malaxage simultané de tous les constituants du béton. Dans ce cas aussi, on refait les mêmes essais de caractérisation des BAP à l'état frais pour vérification.

En considérant un dosage en ciment de 350 Kg/m^3 (Norme algérienne NA 442) dosage convenable pour un béton de classe 35 à 40 MPa, et en se référant au tableau 4. 8 (Cf. Chapitre IV) qui donne les proportions massiques de chaque paramètre contribuant à la composition de la pâte optimale, les proportions volumiques et massiques de chaque paramètre et nécessaires pour préparer 1m^3 de pâte sont les suivantes :

- Ciment : Volume = $V_C = 0.435 \text{ m}^3$ et Masse = $M_C = 1370.25 \text{ Kg}$.
- Filler : Volume = $V_F = 0.106 \text{ m}^3$ et Masse = $M_F = 296.80 \text{ Kg}$.
- Superplastifiant : Volume = $V_{Sp} = 0.016 \text{ m}^3$ et Masse = $M_{Sp} = 17.36 \text{ Kg}$.
- Eau : Volume = $V_E = 0.443 \text{ m}^3$ et Masse = $M_E = 443.00 \text{ Kg}$.

Par ailleurs, un volume $V_{\text{béton}}$ est composé d'un volume $V_{\text{pâte}}$ de pâte, d'un volume (V_{vides}) d'air et d'un volume ($V_{\text{ajouté}}$) de granulats et d'eau à ajouter lors du malaxage :

$$V_{\text{béton}} = V_{\text{pâte}} + V_{\text{vides}} + V_{\text{ajouté}} \quad (6.2)$$

Connaissant le volume d'air $V_{\text{vides}} = 2.5\%$ du volume total du béton, il nous reste à déterminer le volume correspondant à un dosage en ciment de 350 Kg/m^3 .

$$V_{\text{pâte}} = ?$$

Après calcul, le volume de chaque constituant équivalent à 350 Kg de ciment est:

- ✓ $V_C = 0.111 \text{ m}^3$.
- ✓ $V_F = 0.021 \text{ m}^3$.
- ✓ $V_{Sp} = 0.005 \text{ m}^3$.
- ✓ $V_{\text{Eau}} = 0.089 \text{ m}^3$.

La somme de ces volumes équivaut au volume de la pâte de dosage 350 Kg/m³:

c-à-d : $V_{\text{pâte}} = 0.226 \text{ m}^3$

Puisque $V_v = 0.025 \text{ m}^3$ on peut écrire alors:

$$V_{\text{béton}} = 1 \text{ m}^3 = (V_{\text{pâte}} = 0.226) + (V_v = 0.025) + V_{\text{Ajouté}}$$

D'où: $V_A = 0.749 \text{ m}^3$ qui est le volume (de granulats à G/S fixé et d'eau) à ajouter pour confectionner 1m³ de béton.

Le tableau 6.1 récapitule les valeurs théoriques des volumes de V_P et V_A compte tenu de la composition de la pâte optimale, du dosage en ciment dans le béton (350kg/m³ dans cette étude) et du volume des vides fixé à 25 l/m³.

Tableau 6.1 : Composition de 1 m³ de béton

Volume	Valeur
Volume de pâte : V_P	0.226 m ³
Volume des vides : V_v	0.025 m ³
Volume ajouté : V_A	0.749 m ³
Volume béton	1 m ³

En pratique, on se donne de confectionner 30 litres de béton, pour cela, une quantité suffisante de pâte autoplaçante est d'abord préparée avec la même séquence de malaxage que celle décrite au Chapitre II. Pour chaque squelette granulaire, des quantités de granulats sont préparées, représentant 1%, 2%, 5% et 10% du volume V_A . Des quantités d'eau préalablement pesées sont préparées de manière identique. La pâte immédiatement malaxée est versée dans le malaxeur à béton et les ajouts de granulats et d'eau sont effectués jusqu'à atteindre le volume visé de béton. La procédure, depuis le début du malaxage de la pâte jusqu'à l'obtention d'un BAP, s'étend sur 30 minutes.

Le tableau 6. 2 présente les proportions cumulées de V_A en granulats et eau ajoutés pour le squelette granulaire correspondant (G/S = 0.8). Au début par prudence, un volume équivalent à 0.65 V_A de granulats est ajouté à la pâte puis débute immédiatement la procédure de malaxage.

Tableau 6. 2: Procédure expérimentale de l'élaboration d'un BAP ($G/S = 0.8$)

Étape	Volumes granulats ajoutés (cumulés)	Volume cumulé d'eau ajoutée	Aspect visuel	Volume total Ajouté
1	$0.65 V_A$	0	Pulvérulent et hétérogène	$0.65 V_A$
2	$0.65 V_A$	$0.08 V_A$	Très ferme et collant	$0.73 V_A$
3	$0.65 V_A$	$0.10 V_A$	Fluide	$0.75 V_A$
4	$0.70 V_A$	$0.10 V_A$	Plastique	$0.80 V_A$
5	$0.70 V_A$	$0.12 V_A$	Fluide	$0.82 V_A$
6	$0.76 V_A$	$0.12 V_A$	Ferme	$0.88 V_A$
7	$0.76 V_A$	$0.15 V_A$	Fluide	$0.91 V_A$
8	$0.79 V_A$	$0.15 V_A$	Ferme	$0.94 V_A$
9	$0.79 V_A$	$0.17 V_A$	Pâteux	$0.96 V_A$
8	$0.81 V_A$	$0.17 V_A$	Acceptable	$0.98 V_A$
9	$0.81 V_A$	$0.18 V_A$	Satisfaisant	$0.99 V_A$
10	$0.82 V_A$	$0.18 V_A$	Satisfaisant	V_A

De la même façon, nous procédons à la préparation des autres bétons avec $G/S = 1$ (Tableau 6.3) puis avec $G/S = 1.2$ (Tableau 6.4).

Tableau 6. 3: Procédure expérimentale de l'élaboration d'un BAP (G/S = 1)

Étape	Volumes granulats ajoutés (cumulés)	Volume cumulé d'eau ajoutée	Aspect visuel	Volume total Ajouté
1	0.65 V _A	0	Pulvérulent et hétérogène	0.65 V _A
2	0.65 V _A	0.08 V _A	Difficile à malaxer	0.73 V _A
3	0.65 V _A	0.10 V _A	Fluide	0.75 V _A
4	0.70 V _A	0.10 V _A	Consistant	0.80 V _A
5	0.70 V _A	0.13 V _A	Fluide, granulats détachés	0.83 V _A
6	0.74 V _A	0.13 V _A	Ferme	0.87 V _A
7	0.76 V _A	0.16 V _A	Fluide	0.92 V _A
8	0.79 V _A	0.16 V _A	Ferme	0.95 V _A
9	0.79 V _A	0.17 V _A	Fluide, un peu liquide	0.96 V _A
10	0.80 V _A	0.17 V _A	Ouvrabilité acceptable	0.97 V _A
11	0.80 V _A	0.18 V _A	Aspect peu satisfaisant	0.98 V _A
12	0.82 V _A	0.18 V _A	Aspect satisfaisant	V _A

Tableau 6. 4: Procédure expérimentale de l'élaboration d'un BAP (G/S = 1.2)

Étape	Volumes granulats ajoutés (cumulés)	Volume cumulé d'eau ajoutée	Aspect visuel	Volume total Ajouté
1	0.67 V _A	0	Pulvérulent et hétérogène	0.65 V _A
2	0.67 V _A	0.07 V _A	Mélange sec	0.74 V _A
3	0.67 V _A	0.09 V _A	Mélange désagrégé	0.76 V _A
4	0.71 V _A	0.10 V _A	Compact	0.81 V _A
5	0.71 V _A	0.12 V _A	Fluide	0.83 V _A
6	0.74 V _A	0.14 V _A	Ferme	0.88 V _A
7	0.77 V _A	0.15 V _A	Fluide	0.92 V _A
8	0.79 V _A	0.15 V _A	Ferme	0.94 V _A
9	0.79 V _A	0.16 V _A	Fluide, grains flottants	0.95 V _A
10	0.81 V _A	0.16 V _A	Un peu ferme	0.97 V _A
11	0.81 V _A	0.17 V _A	Fluide	0.98 V _A
12	0.83 V _A	0.17 V _A	Aspect satisfaisant	V _A

Chapitre VI : Réalisation des bétons auto-plaçants

Le tableau 6.5 présente en récapitulatif les proportions cumulées de V_A en granulats et eau ajoutés pour chaque squelette granulaire (G/S variant de 0.8 à 1.2).

Tableau 6. 5 : Proportions cumulées des volumes ajoutés

G/S	Volume ajouté de granulats	Volume ajoutée d'eau
0.8	$0.82 V_A$	$0.18 V_A$
0.9	$0.83 V_A$	$0.17 V_A$
1	$0.82 V_A$	$0.18 V_A$
1.1	$0.81 V_A$	$0.19 V_A$
1.2	$0.80 V_A$	$0.20 V_A$

Le Tableau 6.6 présente la composition des différents bétons confectionnés par la procédure d'ajouts simultanés de granulats et d'eau à la pâte optimale auto-plaçante.

Tableau 6.6: Composition des BAP en fonction de G/S

Composition	G/S = 0.8		G/S = 0.9		G/S = 1		G/S = 1.1		G/S = 1.2	
	(Kg)	(Litre)	(Kg)	(Litre)	(Kg)	(Litre)	(Kg)	(Litre)	(Kg)	(Litre)
Ciment	350	111.1	350	111.1	350	111.1	350	111.1	350	111.1
Filler	61.25	21.9	61.25	21.9	61.25	21.9	61.25	21.9	61.25	21.9
Sp	4.6	4.2	4.6	4.2	4.6	4.2	4.6	4.2	4.6	4.2
Eau (pour pâte) ⁽¹⁾	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89
Volume pâte (V _{pâte})		226.2		226.2		226.2		226.2		226.2
Sable	980	369.8	935	352.8	900	339.6	850	320.8	810	305.7
Gravier (3/8)	405	150.6	430	159.9	440	163.6	475	176.6	492	182.9
Gravier (8/15)	380	140.7	412	152.6	460	170.5	460	170.4	480	177.8
Eau ajouté (pour béton) ⁽²⁾	102.7	102.7	102.6	102.6	95.3	96.8	103.2	103.2	101.5	101.5
Volume ajouté (V _{ajouté})	/		/		/	750.9	/		/	751.8
Air (V _{vides})	/	26	/	22	/	21			/	22
Eau totale ⁽¹⁾⁺⁽²⁾	/	188.2	/	188.1	/	180.8		188.7	/	187
Volume total	/	1000	/	1000	/	1000	/	1000.1	/	1000

Les figures suivantes montrent les étapes suivies lors de la confection des bétons.



Figure 6. 2 : Procédure de confection d'un BAP par ajout de granulats secs et malaxage

Une fois la pâte optimale élaborée, on commence par ajouter les granulats, malaxer puis observer, la séquence d'ajout successif de granulats et d'eau débute alors, chaque ajout est enregistré afin de calculer les volumes cumulés ajoutés, la fin de l'opération est conditionnée par l'aspect visuel du béton et de la valeur limite (V_A) de la somme des volumes (granulats et eau).



Figure 6. 3 : Exemple de BAP sec (à gauche) et un peu ferme (à droite), $G/S = 0.8$

L'aspect hétérogène et sec a été remarqué lors de malaxage initial, c.-à-d. lorsqu'on a ajouté le premier volume de granulats (cas de $G/S = 0.8$ ici) à la pâte autoplaçante (étape 1, tableau 6. 6), ce qui a nécessité l'ajout conséquent d'un volume d'eau (étape 2). Après malaxage, nous avons obtenu un béton homogène mais présentant un aspect ferme, le mélange obtenu montrait une surface lisse laissant paraître les granulats, le mélange se remet difficilement en

place après passage de la truelle et ne pouvant pas s'écouler, ce qui a exigé l'ajout d'un autre volume d'eau tout en maintenant le volume de granulats constant (étape 3).



Figure 6. 4 : Exemple de BAP fluide (à gauche) et ségrégé (à droite), G/S = 1

Un béton très fluide a été obtenu au cours de la confection (nous prenons l'exemple du mélange granulaire ayant G/S = 1, figure 6. 4, photo gauche), une ségrégation des granulats a été observés (figure 6. 4, photo de droite), la surface du mélange obtenu est couverte d'un film de laitance plus au moins épais, ce qui a nécessité l'ajout de granulats (étape 5, tableau 6. 3) pour absorber l'eau en excès.



Figure 6. 5 : Après confection, passage aux essais de caractérisation, G/S = 1.2

Une fois que le béton présente un aspect visuel satisfaisant, sa propriété auto-plaçante doit être vérifiée par les essais de caractérisation de l'ouvrabilité des BAP, en commençant par l'essai d'étalement au cône d'Abrams (Figure 6. 5)

4. OUVRABILITÉ DES BÉTONS CONFECTIONNÉS

Une fois le béton confectionné par les séquences d'injection de granulats et d'eau, le volume ajouté ayant atteint son maximum (V_A) pour les différentes classes granulaires. Visuellement, les bétons confectionnés présentaient des aspects satisfaisants, il nous reste à vérifier l'ouvrabilité des différents bétons. Nous procédons par vérifier trois fois le même béton et nous mesurons les résistances à la compression à 28 jours. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 6. 7.

Tableau 6. 7 : Caractéristiques des bétons confectionnés par ajouts simultanés

G/S		0.8	0.9	1	1.1	1.2	Recommandation A.F.G.C
Cône d'Abrams	T ₅₀ (s)	2.1	2.4	1.8	2.4	3.3	Non spécifiée
	D _{moy} (mm)	693	705	712	735	722	600 – 750 mm
Boîte en L	T ₄₀ (s)	1.8	2.7	1.2	1.6	3.2	Non spécifiée
	H ₂ /H ₁	0.89	0.93	0.95	0.91	0.88	≥ 0.8
Stabilité au tamis π%		9.65	13.2	11.02	12.4	8.0	≤ 15%
Air occlus %		2.6	2.2	2.1	1.9	2.8	Non spécifiée
Masse Volumique (Kg/m ³)		2290	2315	2310	2325	2330	Non spécifiée
Résistance : Rc ₂₈ (MPa)		33.2	36.8	38.7	34.5	36.3	Non spécifiée

El-Barrak [El-Barrak 2005] a montré que le choix du dernier ajout (1% d'eau ou 1% de granulat) se traduit par des variations des propriétés d'ouvrabilité qui restent toujours dans les intervalles autoplaçants couramment définis par l'AFGC.

Afin de valider la convenance de la méthode utilisée, les bétons seront confectionnés de manière classique en mélangeant tous les constituants, en partant des quantités massiques de

chaque paramètre de composition, on élabore les bétons par malaxage simultané et puis on revérifie les caractérisations de ces bétons par l'intermédiaire des essais d'ouvrabilité. Le même processus de préparation des matériaux, de malaxage et de procédure expérimentale a été respecté dans le cas des trois bétons. Les résultats obtenus sont montrés dans le tableau 6. 8.

Tableau 6.8 : Caractéristiques des bétons confectionnés de manière classique

G/S		0.8	0.9	1	1.1	1.2	Recommandation A.F.G.C
Cône d'Abrams	T ₅₀ (s)	1.9	2.0	2.6	2.2	2.9	Non spécifiée
	D _{moy} (mm)	658	726	732	720	739	600 – 750 mm
Boite en L	T ₄₀ (s)	2.1	2.2	1.2	3.1	2.5	Non spécifiée
	H ₂ /H ₁	0.91	0.90	0.94	0.93	0.95	≥ 0.8
Stabilité au tamis π%		11.0	12.7	9.6	8.0	10.8	≤ 15%
Air occlus %		2.3	2.5	1.9	2.8	3	Non spécifiée
Masse Volumique (Kg/m ³)		2290	2354	2388	2392	2385	Non spécifiée
Résistance : Rc ₂₈ (MPa)		36.4	37.7	40.2	38.5	34.8	Non spécifiée

Du point de vue ouvrabilité, les bétons confectionnés des deux manières différentes sont autoplaçants puisque les résultats des essais d'ouvrabilité à l'état frais sont conformes aux recommandations préconisées par l'association Française de Génie Civil. Les bétons préparés avec G/S = 0.8 semblent être les moins fluides puisqu'ils présentent les étalements plus petits (669mm et 659 mm), leurs résistances à la compression à 28 jours sont aussi les plus faibles par rapport aux autres bétons, les travaux de (Binu et al., 2008) [Binu 2008] ont montré l'existence d'une corrélation entre les diamètres d'étalement et les résistances mécaniques des bétons autoplaçants.

5. INTERACTION PÂTE-GRANULAT

Dans le paragraphe précédent (§ 4), nous avons montré qu'il est possible d'obtenir un béton de caractéristique autoplaçantes en ajoutant à la pâte optimale autoplaçante des granulats, en ajoutant un supplément d'eau. Cette quantité d'eau augmente le volume de la pâte et améliore l'écoulement du béton. (El-Barrak et al) [El-Barrak 2009] ont confirmé cette hypothèse en remplaçant le volume d'eau supplémentaire par le même volume de pâte autoplaçante, le béton obtenu est aussi autoplaçant. Par ailleurs, nous avons constaté qu'à la même pâte, nous avons ajouté des granulats de différents rapports (G/S) et de volumes différents, les bétons confectionnés étaient autoplaçants, à condition de se limiter à un volume ajouté maximal (V_A). Cela revient à dire qu'en mélangeant une quantité suffisante de pâte optimale autoplaçante à un squelette granulaire humide permet à la confection d'un béton autoplaçant.

Le but de ce paragraphe est d'évaluer cette quantité de pâte nécessaire pour un volume donné de granulats, permettant d'obtenir un béton autoplaçant.

Pour cela, nous utilisons "*la théorie de la pâte en excès*" afin de déterminer les proportions de pâte et de granulats à associer pour former le béton d'écoulement autoplaçant.

A fin de permettre leur écoulement, la pâte s'incruste entre les grains en leur évitant de se frotter les séparant ainsi d'une distance moyenne à déterminer, et chaque grain se trouve ainsi entouré d'une certaine épaisseur suffisante (voire optimale) de pâte favorisant l'écoulement.

Cette épaisseur doit être à la fois minimale pour éviter le frottement entre les grains mais présentant aussi un volume supplémentaire (en excès) suffisant pour favoriser l'écoulement du béton.

5. 1. Théorie de la pâte en excès

Les travaux de recherche de (Bui et al., 2002) [Bui 2002] et (Denis et al., 2002) [Denis 2002] ont montré qu'il y a une relation directe entre les dimensions des grains, leurs natures (concassés ou roulés) et l'épaisseur de la pâte qui les entoure.

Dans le cas général, les granulats sont supposés de formes sphériques et lorsqu'ils sont compactés, ils laissent un vide qui sera rempli par une quantité de pâte de ciment appelée "*pâte compacte*" (Fig. 6.6).

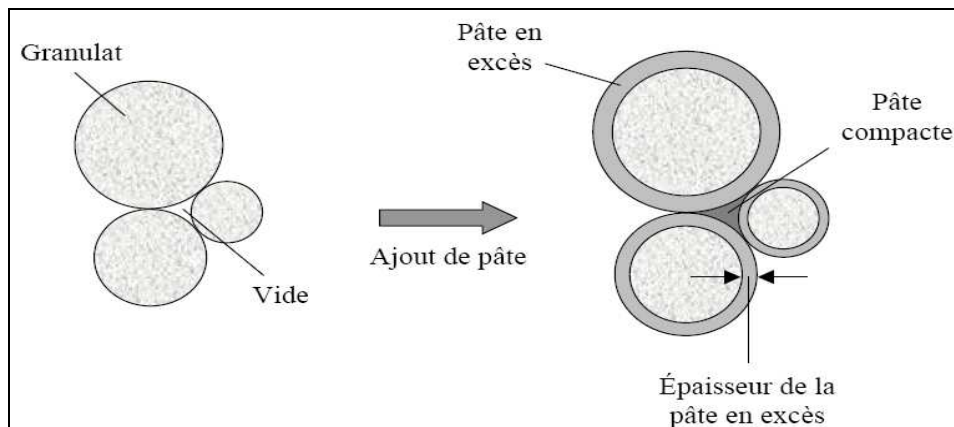


Figure 6.6 : Schématisation de la pâte en excès

L'ouvrabilité du béton serait assurée par l'épaisseur de la pâte en excès et par la quantité de la pâte compacte. En effet, plus il y a de pâte de ciment entre les grains, plus la distance entre les grains augmente et les grains se dispersent. L'augmentation de l'épaisseur de la pâte autour des grains implique moins de frottement et par conséquent, l'ouvrabilité du béton devient meilleure.

La théorie de la pâte en excès permet la détermination de la pâte de ciment en prenant en considération la figure 6. 7. Lorsque un mélange de granulats et pâte de ciment est compacté au maximum, un volume de pâte en excès (V_{PE}) est mis en évidence.

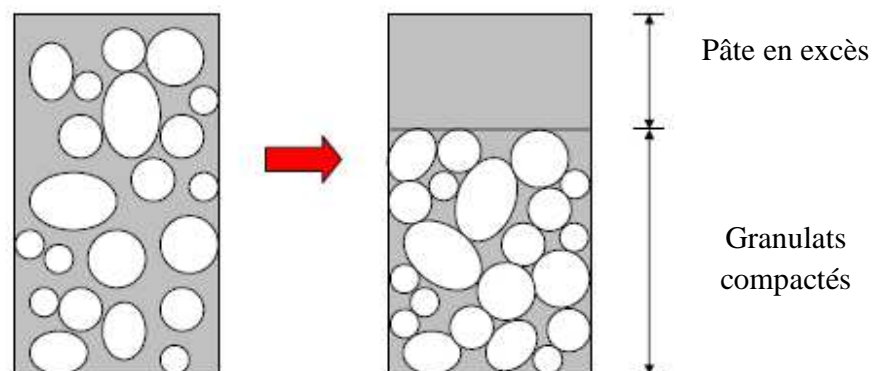


Figure 6. 7 : Mise en évidence de la pâte en excès

L'analyse de la fraction restante en dehors de la pâte en excès (Fig. 6. 8) montre que cette partie est composée d'un volume apparent de granulats (V_G) et d'un volume de pâte compacte (V_{PC}).

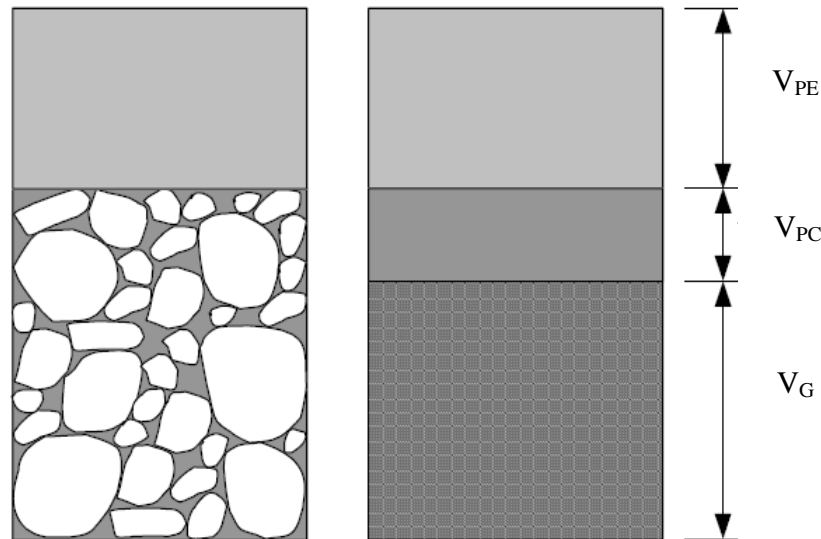


Figure 6. 8 : Composition volumique d'un béton

5.2. L'épaisseur de la pâte en excès

L'épaisseur de la pâte en excès peut être déterminée de deux approches différentes. En supposant que la pâte recouvre la totalité de la surface du grain, un rapport direct entre le diamètre du grain, sa surface et l'épaisseur de la pâte recherchée [Oh 99], le calcul de cette épaisseur est donné par la relation

$$e_{PE} = \frac{V_{PE}}{S_{granulats}} \quad (6.3)$$

Le volume total de la pâte étant composé du volume de la pâte en excès et du volume de la pâte compacte (V_{PC}), le volume de la pâte en excès (V_{PE}) peut être déterminé par déduction de la relation (6. 4) ci-après :

$$V_P = V_{PE} + V_{PC} \quad (6. 4)$$

D'où
$$V_{PE} = V_P - V_{PC} \quad (6. 5)$$

Le volume de la pâte compacte correspond en fait au volume des vides (V_{PC}) présents entre les granulats compactés.

Les travaux de (Oh et al., 1999) [Oh 99] ont expliqué la difficulté de la détermination de la surface granulaire puisqu'elle est fonction de la taille, de la forme et de la distribution granulaire. Pour cela, il serait préférable de raisonner en termes de diamètres moyens arithmétiques.

D'autre part, l'épaisseur peut aussi être déterminée par une approche basée sur "*la taille moyenne des granulats*".

Les travaux de (Bui et al., 2002) [Bui 2002] ont proposé, en assimilant les grains à des sphères, de calculer l'épaisseur de la pâte en excès par la moitié de la différence entre le diamètre du grain enrobé de pâte ($D + 2.e$) et (D).

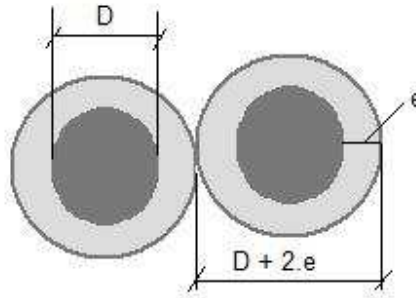


Figure 6. 9: Détermination de la pâte en excès.

Connaissant le diamètre moyen (D_{mi}) d'une classe granulaire (i) donnée et connaissant le pourcentage massique (m_i) des granulats de la classe (i), le diamètre moyen de l'ensemble des granulats (D_M) :

$$D_M = \frac{\sum(m_i \cdot D_{mi})}{\sum m_i} \quad (6.6)$$

Le volume de la pâte en excès est donné par la relation (6. 7).

$$V_{PE} = \frac{\pi}{6} (D_M + 2 \cdot e_M)^3 - \frac{\pi}{6} (D_M)^3 \quad (6.7)$$

L'épaisseur de la pâte en excès est à déterminer à partir de la relation (6. 8) :

$$e_M = \frac{D_M}{2} \cdot \left[\sqrt[3]{1 + \frac{V_{PE}}{V_{granulats}}} - 1 \right] \quad (6.8)$$

Le volume des granulats ($V_{granulats}$) correspond au volume de tout les granulats enrobés de pâte de ciment, cela veut dire qu'il faut exclure la portion des fines (issues des sables et éventuellement des graviers), ce qui nous mène à éliminer du volume des granulats le volume des fines de diamètre inférieur ou égal à $80 \mu m$.

[El-Barrak 2005] a établi un organigramme illustrant les deux principes relatifs à la détermination de l'épaisseur en excès (Fig. 6. 10)

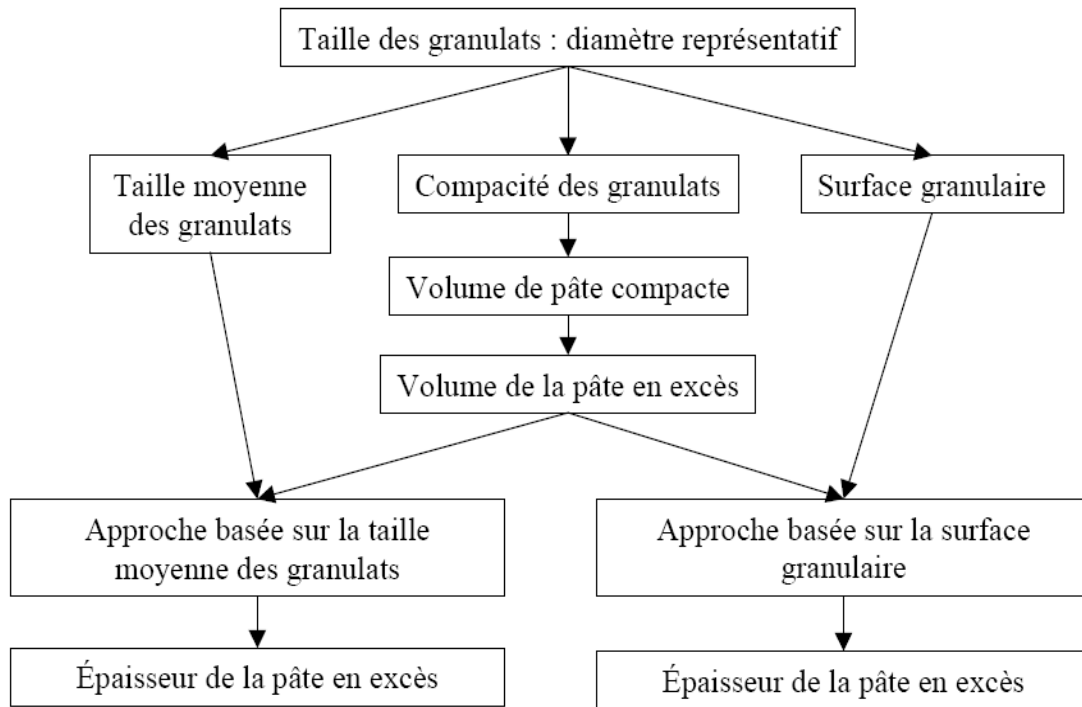


Figure 6. 10 : Organigramme de calcul de l'épaisseur de la pâte en excès

5. 3. Calcul de l'épaisseur de la pâte en excès

Dans la suite de notre travail, nous nous intéressons à la détermination de l'épaisseur de la pâte en excès en se basant sur le principe de la taille moyenne des granulats utilisé dans les travaux de (Bui et al., 2002).

En accordance avec l'organigramme de la figure 6. 10, les points de départ de la détermination du volume de la pâte en excès sont la connaissance des diamètres représentatifs et des compacités maximales des granulats.

En effet, connaissant le volume total de la pâte (V_p), le volume de pâte compacte (V_{PC}) correspondant aux vides présents entre les granulats peut être déterminé par l'équation (6. 9) suivante :

$$V_{PC} = V_{vides} = V_{granulats} \cdot (1 - \gamma) \quad (6. 9)$$

Les valeurs des compacités maximales ont déjà été calculés (Cf. Chapitre V, § 2. 3-b).

La détermination du volume de la pâte en excès prend en considération le volume de la fraction inférieure à 0.08 mm issue du sable et des granulats, cette fraction s'adhère à la pâte de ciment et vient entourer les granulats de diamètres supérieurs. Connaissant les valeurs de (V_{pe}) pour chaque rapport (G/S) (Eq. 6. 7), on peut calculer les valeurs correspondantes des épaisseurs de pâtes en se référant à l'équation 6. 8 ; les valeurs de (D_M) sont calculées en fonction des diamètres représentatifs (D_{RI}) puis en fonction des diamètres arithmétiques moyens (D_{mi}), les valeurs de (D_M) trouvées se trouvent dans l'intervalle [2 – 4 mm]. Le tableau 6.9 présente les valeurs des volumes intermédiaires des différent composants du béton ainsi que les valeurs moyennes des épaisseurs de pâte autour des granulats, les résultats obtenus se basent sur le principe de la taille moyenne des granulats développé par (Bui et al., 2002).

Tableau 6. 9: Épaisseurs moyenne de la pâte en excès

G/S	e_M (μm)	
	Calcul avec D_{RI}	Calcul avec D_{mi}
0.8	161,3	163.2
0.9	165,1	168.4
1	176,2	177.3
1.1	181,1	184.1
1.2	178,6	181,7

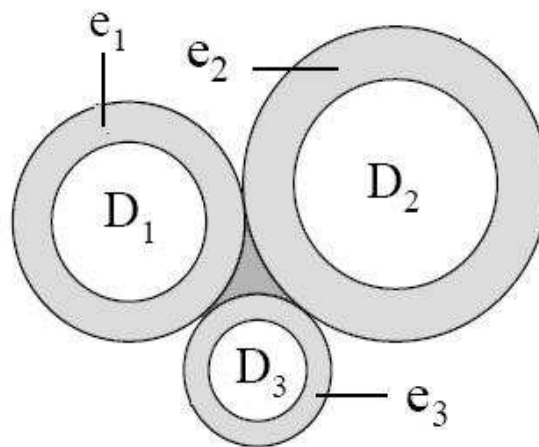
Les valeurs trouvées entre bien dans la marge [150 – 300 μm] préconisée par (Bui et al., 2002) [Bui 2002]. Avec les granulats utilisés dans notre étude, il paraît impossible de d'atteindre les valeurs maximales de 300 μm , les épaisseurs moyennes calculées avec (D_{mi}) sont supérieures à celles calculées avec (D_{RI}), mais celles-ci restent inférieures à 200 μm , cela pourrait être du au fait que nos granulats contiennent plus de fines (inférieures à 80 microns) que ceux de l'étude de (Bui et al., 2002), puisque plus il y a de fines dans les granulats, plus ($V_{granulats}$) est important, ce qui donne une épaisseur plus faible (Eq. 6. 8).

Les bétons autoplaçants élaborés présentent des granulats enrobés d'une épaisseur moyenne de pâte en excès de valeur acceptable, leur permettant un écoulement fluide sans friction. Cette épaisseur est fonction des diamètres des granulats et de leurs distributions granulaires, c'est-à-dire

en maintenant le volume de pâte en excès (V_{PE}) et le volume de granulats ($V_{granulats}$) constants, l'épaisseur de la pâte en excès peut varier en fonction de la variation de la distribution granulaire du squelette solide composant les bétons. Ceci justifie d'établir un paramètre indépendant de la distribution granulaire substituable aux paramètres précédemment définis, représentatif du comportement autoplaçant.

5. 4. Détermination du paramètre d'homothétie

La proportionnalité de l'épaisseur de la pâte en excès avec le diamètre du granulat est illustrée par la figure 6. 11. Il apparait que plus le grain est grand, plus l'épaisseur de la pâte qui le recouvre est importante. Le rapport de proportionnalité entre ces valeurs est représenté par la paramètre "k", appelé *facteur d'homothétie* permettant de ne plus prendre en considération dans les calculs directement la distribution granulaire du squelette.



$$\frac{D_1 + 2e_1}{D_1} = \frac{D_2 + 2e_2}{D_2} = \frac{D_3 + 2e_3}{D_3} = k$$

Figure 6. 11: Proportionnalité entre diamètres des grains et épaisseurs en excès

Pour chaque classe granulaire (i) donnée de diamètre granulaire (D_i), d'épaisseur de la pâte en excès (e_i), le paramètre d'homothétie est alors :

$$k = \frac{D_i + 2e_i}{D_i} \quad (6. 10)$$

Pour (i) variant de (1 à n) granulats, le volume de la pâte en excès est égal à la somme de toutes les épaisseurs (e_i), elle est alors donnée par la relation (6. 11) ci-dessous :

$$V_{PE} = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\pi \cdot (D_i + 2 \cdot e_i)^3}{6} - \frac{\pi \cdot (D_i)^3}{6} \right\} \cdot N_i \quad (6. 11)$$

Où N_i est le nombre de granulats de diamètre D_i de la classe i.

Prenant en considération les équations (6. 10) et (6. 11), le paramètre "k" est donné par l'équation suivante :

$$k = \sqrt[3]{1 + \frac{6 \cdot V_{PE}}{\pi \cdot \sum_{i=1}^n N_i \cdot D_i^3}} \quad (6. 12)$$

En développant l'équation ci-dessus, la relation finale obtenue est alors :

$$k = \sqrt[3]{1 + \frac{V_{PE}}{V_{G>80}}} \quad (6. 13)$$

Connaissant le paramètre k, qui peut désormais être obtenu en fonction du volume de pâte en excès (V_{PE}) et de celui des granulats de dimension supérieure à 80 microns ($V_{G>80}$), on peut alors déterminer la valeur de l'épaisseur en excès (e_i) entourant chaque granulat de diamètre (D_i) par la relation suivante :

$$e_i = D_i \cdot \frac{(k-1)}{2} \quad (6. 14)$$

Utilisant ces différentes équations, le tableau 6. 10 présente les différentes valeurs du facteur d'homothétie en fonction des variations des rapports (G/S).

Tableau 6. 10: Valeurs du facteur d'homothétie

G/S	Valeurs du facteur K
0.8	1,121
0.9	1,113
1	1,111
1.1	1,096
1.2	1,081

(El-Barrak, 2005) a établi dans son travail (sur la base de 70 bétons confectionnés) une plage de variation du paramètre "k" en fonction du diamètre moyen (D_M) dans laquelle les bétons sont auto-plaçants. La figure 6. 12 illustre le positionnement de valeurs trouvées par rapport aux mesures effectuées par (Bui et al., 2002).

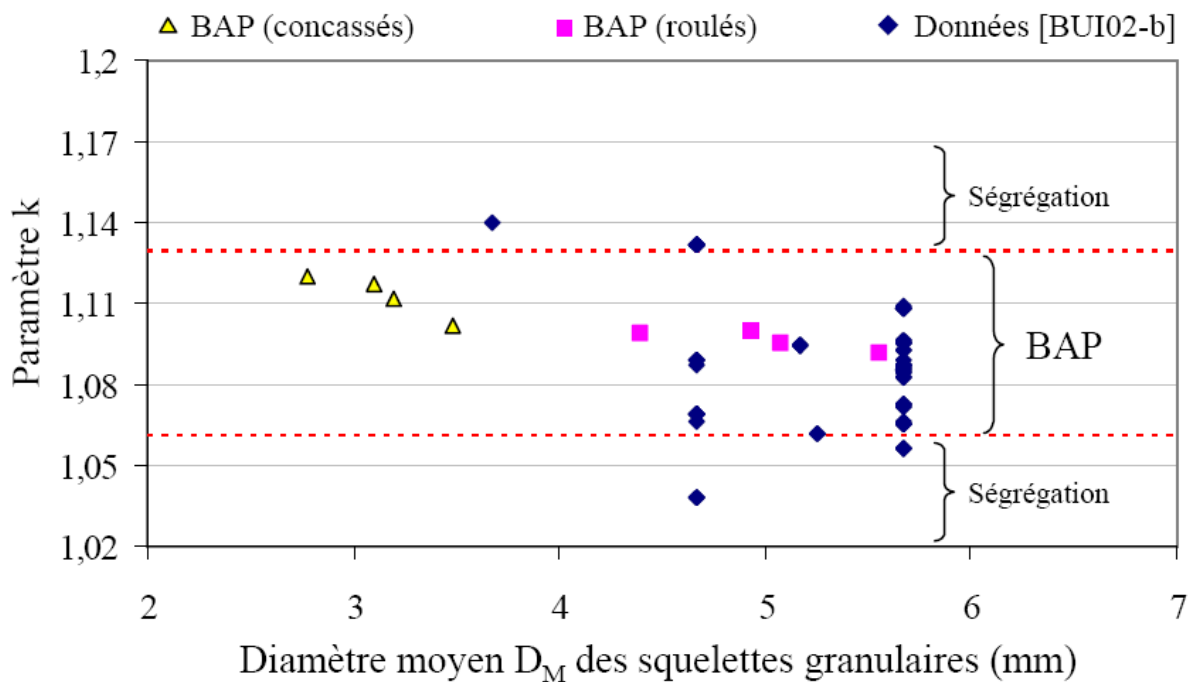


Figure 6. 12: Variation du paramètre "k" en fonction du diamètre moyen (D_M)

Les bétons élaborés dans le cadre de notre étude pour des valeurs de G/S variant de 0.8 à 1.2 (Cf. Tableau 6.7), ont donné des valeurs de "k" qui s'insèrent parfaitement dans le domaine auto-plaçant (Fig. 6. 13), ceci confirme les résultats des essais d'ouvrabilité obtenus.

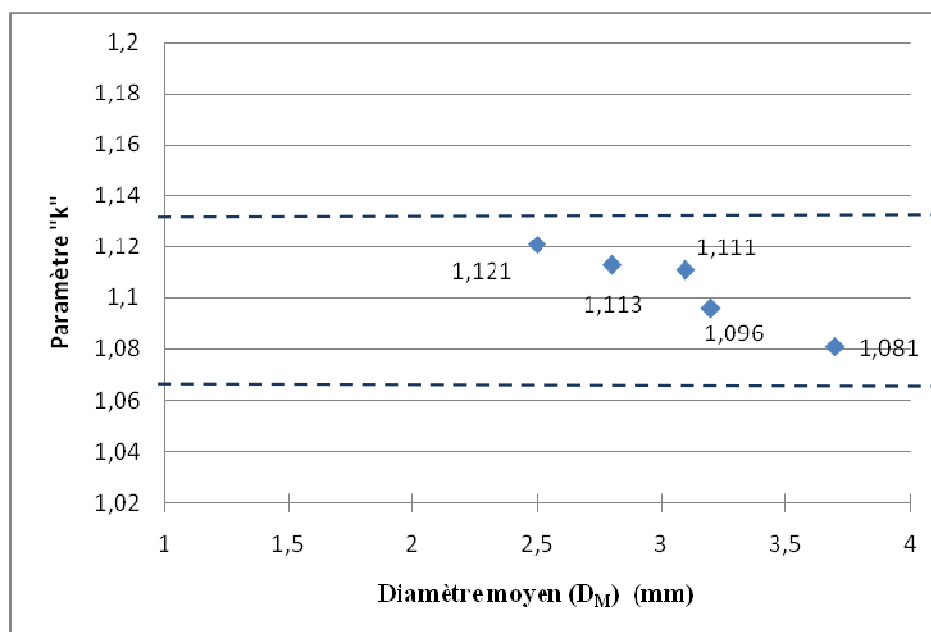


Figure 6. 13: Zone de variation du paramètre "k"

Les valeurs du paramètre d'homothétie ont été calculées en fonction des compacités maximales (modèle compressible) et des diamètres moyens du squelette granulaires déterminés à partir de (D_{RI}). Ces valeurs sont comprises entre 1.081 et 1.121 et s'insèrent parfaitement dans le fuseau des bétons auto-plaçants (en pointillés, Fig. 6. 13).

Le facteur d'homothétie "k" peut donc être utilisé le caractère auto-plaçant des bétons compte tenu de leur squelette granulaire et de la taille de ses granulats, puisque celle-ci est proportionnelle à l'épaisseur de la pâte en excès.

Dans ce qui suit, nous proposons finalement une méthodologie de formulation des bétons auto-plaçants en fonction des paramètres précédemment définis.

5. 5. Méthodologie de formulation des bétons autoplaçants

L'approche utilisée a permis de contribuer à la formulation d'un béton autoplaçant et de vérifier l'hypothèse stipulant sur la possibilité d'obtenir un béton autoplaçant en malaxant une quantité suffisante de pâte autoplaçante à des granulats.

Dans ce qui suit, nous exposons la méthodologie de la formulation des bétons autoplaçants en utilisant les valeurs du facteur d'homothétie "k". En effet, en choisissant un squelette granulaire avec lequel nous souhaitons confectionner le béton autoplaçant, c'est le rapport G/S que nous fixons sur la base duquel le paramètre "k" est déterminé du tableau 6. 10.

Pour le squelette granulaire choisi et G/S fixé, il faut déterminer :

- Les paramètres physiques de chaque classe granulaire : Diamètres arithmétiques moyen (D_{mi}), Diamètre représentatifs (D_{RI}).
- La compacité maximale (γ) du mélange granulaire à partir du modèle d'empilement granulaire compressible.
- Le coefficient d'absorption et la quantité d'eau retenue par le squelette granulaire étudié.

Une fois ces paramètres (expérimentaux) déterminés, on peut calculer l'épaisseur de la pâte en excès correspondante (Eq. 6. 14) et par la suite, on peut connaître le volume de la pâte en excès (V_{PE}) par la relation (6. 13). On peut alors déduire le volume de pâte correspondant à 1 m³ de béton ainsi que le volume des granulats ($V_{granulats}$) et de l'eau retenue par ces granulats (V_{ER}).

Lorsqu'on ajoute les volumes déterminés au volume des vides (V_v) forment 1 m³ de béton, c'est-à-dire :

$$V_{p\grave{a}te} + V_{granulats} + V_{ER} + V_v (2.5 \%) = 1 \quad (6. 15)$$

Avec :

$$V_{granulats} = V_{fines} + V_{G>80} \quad (6. 16)$$

(V_{fines}) étant le volume des fines issues du mélange sable-graviers et ($V_{G>80}$) le volume des granulats de diamètres supérieures à 80 microns. Comme nous avons considéré que l'eau absorbée par l'ensemble des granulats n'est pas prise par la pâte en excès en faisant intervenir le volume de compacte (V_{PC}) contenue dans les vides du squelette compacté, on peut alors écrire :

$$V_{p\grave{a}te} + V_{ER} + V_{fines} - V_{EA} = V_{PE} + V_{PC} \quad (6. 17)$$

Avec :

$$V_{PC} = (1 - \gamma) \cdot V_{G>80} \quad (6. 18)$$

Compte tenu des équations (6. 15) et (6. 16), on peut écrire :

$$V_{\text{pâte}} + V_{G>80} + V_{\text{fines}} - V_{EA} + V_{EA} + V_{ER} + V_V = 1 \quad (6. 19)$$

En utilisant l'équation (6. 17), l'équation ci-dessous devient :

$$V_{PE} + V_{PC} + V_{G>80} + V_{EA} + V_V = 1 \quad (6. 20)$$

Pour la suite, nous exploitons les relations de proportionnalité qui peuvent exister entre certains paramètres utilisés dans l'équation précédente.

Les granulats utilisés (ayant un rapport G/S choisi) sont composés, outre les fines, d'un volume de grains de diamètres supérieurs à 80 micron, représentant une fraction (a %) du volume total ($V_{\text{granulats}}$) :

$$V_{G>80} = a \cdot V_{\text{granulats}} \Rightarrow V_{\text{granulats}} = \frac{V_{G>80}}{a} \quad (6. 21)$$

Aussi, la quantité d'eau absorbée par l'ensemble des granulats (V_{EA}) est reliée au volume des granulats ($V_{\text{granulats}}$) proportionnellement par l'intermédiaire d'un coefficient (que nous appelons "b") et dont la valeur est fonction de celle du coefficient d'absorption déterminée expérimentalement.

$$V_{EA} = b \cdot V_{\text{granulats}} = \frac{b}{a} \cdot V_{G>80} \quad (6. 22)$$

En développant ces équations puis en remplaçant dans l'équation (6. 20), on obtient :

$$V_{PE} = 1 - V_{G>80} \cdot \left(2 - \gamma + \frac{b}{a} \right) \quad (6. 23)$$

Tenant compte de la relation (9. 13) dans laquelle (V_{PE}) est remplacé par son expression de la (6. 23), le volume des granulats peut donc s'écrire :

$$V_{granulats} = \frac{1 - V_v}{a \cdot (k^3 + 1 - \gamma) + b} \quad (6.24)$$

Le volume des vides est pris égal à 2.5% du volume total du béton (2.5 % de 1 m³ dans notre cas), les autres paramètres de l'équation sont des mesures expérimentales. Dans son travail, (El-Barrak, 2005) propose de prendre des valeurs élevées du paramètre (k) pour un squelette granulaire de G/S faible (≤ 1) et des valeurs faibles de (k) pour les squelette dont le rapport G/S est élevé (≥ 1.2) ; les valeurs de (k) doivent être prises dans l'intervalle donné par le tableau 6. ??, mais pour la validation des résultats, on se donne de prendre une valeur de (k) correspondante à un rapport (G/S) n'ayant pas fait l'objet de l'étude expérimentale.

5. 6. Exemple d'application pour validation

Pour les différents mélanges granulaires de rapports G/S variant de 0.8 à 1.2, les valeurs du coefficient "k" ont été précédemment calculées, ses variations en fonction des différents rapports G/S sont illustrées par la figure 6. 14, cette figure permet de déterminer des valeurs de ce coefficient correspondant à des rapports G/S différentes de celles données par le tableau 6. ??.

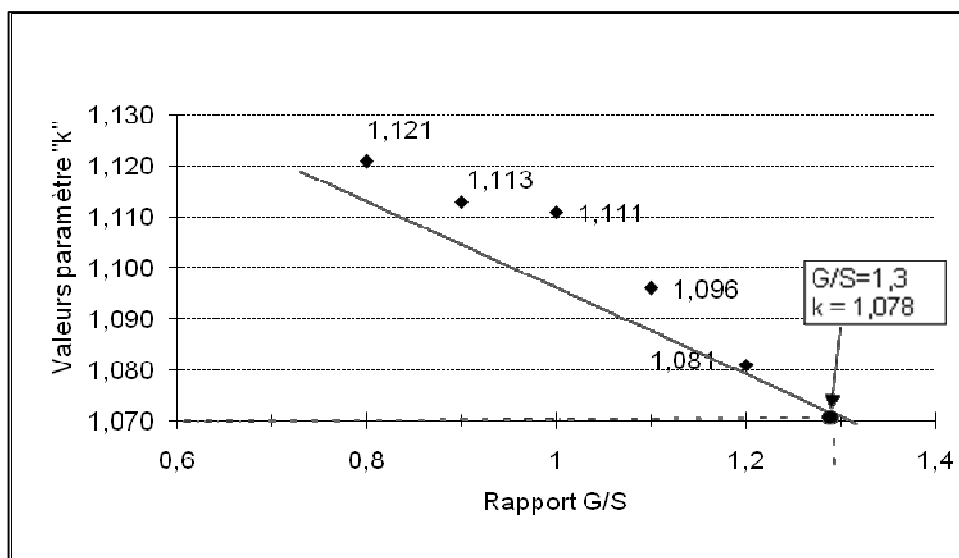


Figure 6. 14: Variation du paramètre "k" en fonction de G/S

Ainsi, on se donne de valider cette approche sur un béton élaboré avec un $G/S = 1.3$ dont la valeur du paramètre "k" correspondante est $k = 1.076$ (Figure 6. 14) ; la suite consiste à déterminer le volume de granulats à associer à un volume (V_p) de pâte autoplaçante.

Pour cela, nous déterminons les valeurs des coefficients (a) et (b), le coefficient (a) représente la proportion des granulats de diamètres supérieurs à 80 microns par rapport au volume granulaire total (Eq. 6. 21). Pour un rapport $G/S = 1,3$ l'analyse granulométrique a permis de donner $a = 0.918$. Le coefficient (b) représente la valeur transformée du coefficient d'absorption massique des granulats, sa valeur est $b = 8.102 \%$.

Compte tenue de l'incertitude (± 5 litres) avec laquelle les mesures des granulats ont été effectuées, le volume granulaire total (sable et graviers) calculé est alors :

$$V_{\text{granulats}} = 687 \pm 5 \text{ litres / m}^3 \text{ de béton.}$$

La proportion de l'eau retenue par les granulats peut être déterminée par l'intermédiaire de la figure 6. 15 représentant une régression linéaire du rapport ($V_{ER}/V_{\text{granulats}}$) en fonction de G/S .

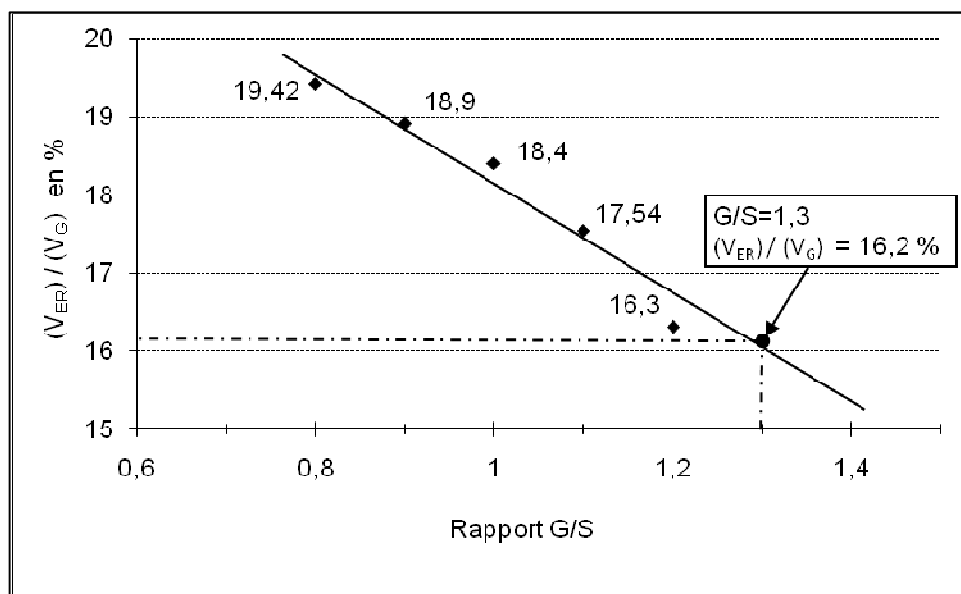


Figure 6. 15: Proportion de l'eau retenue par le squelette granulaire

Une fois les éléments nécessaires déterminés, nous confectionnons le béton avec la même procédure et dans les mêmes conditions que les bétons précédents, puis nous vérifions ses caractéristiques d'ouvrabilité. Dans le tableau 6. 11 est donnée la composition du béton avec un rapport $G/S = 1,3$.

Tableau 6. 11: Composition du béton avec G/S = 1,3

Matériaux	Volume (l/m ³ de béton)	Masse (Kg/ m ³ de béton)
Graviers	Gravier (3/8) : 181.4	488
	Gravier (8/15) : 184.8	499
Sable	296.2	785
Ciment	103.2	325
Filler	17.2	48.25
Superplastifiant	4.2	4.6
Eau	187.9	187.9
Total	975	2337.8

Les résultats des mesures d'ouvrabilité sont regroupés dans le tableau 6. 12, conformément aux recommandations de l'A.F.G.C, le béton confectionné présente bien des caractéristiques autoplaçantes.

Tableau 6. 12 : Caractéristiques du béton avec G/S=1.3

G/S		1.3
Cône d'Abrams	T₅₀ (s)	2.8
	D_{moy} (mm)	696
Boite en L	T₄₀ (s)	1.9
	H2/H1	0.95
Stabilité au tamis π%		12.8
Air occlus %		3
Masse Volumique (Kg/m³)		2380
Résistance : Rc28 (MPa)		42.3

Les résultats obtenus conviennent aux propriétés autoplaçantes, de même, visuellement le béton confectionné ne présente pas de ségrégation ni de blocage lors de l'essai d'étalement et de boîte en "L-box" respectivement.

5. 7. Conclusion

La théorie de la pâte en excès a été utilisée pour déterminer l'épaisseur de la pâte enrobant chaque granulat de diamètre donné constituant le squelette granulaire, puis généralisée pour la détermination de quantité de pâte totale permettant l'écoulement du béton en diminuant les frottements entre les grains de son squelette granulaire ; l'approche a aussi été validée expérimentalement. L'influence de la distribution granulaire a été minimisée par l'utilisation de l'approche basée sur la détermination du diamètre moyen des granulats. Ceci a nécessité de faire intervenir dans les calculs le facteur d'homothétie "k", qui peut être analogue pour des bétons de différentes granulométrie mais de même type de granulats (concassés dans notre étude).

La formulation d'un béton aux caractéristiques autoplaçantes passe donc d'abord par la détermination d'une quantité suffisante de pâte permettant son écoulement sans frictions entre ses granulats et d'équilibrer le mélange par la quantité d'eau retenue par les granulats. Cette méthode basée sur l'optimisation de la pâte de ciment est intéressante au sens où elle se base sur une étude mixte : théorique – expérimentale. Une pâte de ciment autoplaçante auquel on injecte des granulats humides forme un béton autoplaçant dont les caractéristiques à l'état frais satisfont aux recommandations de l'A.F.G.C. autrement dit, les caractéristiques autoplaçantes d'un béton viendraient de ceux de la pâte de ciment qui le compose.