

## **CHAPITRE 4**

# **FORMULATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS**

## 4.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions l'interaction entre les granulats et la suspension de pâte de ciment dans le béton afin d'expliquer le rôle joué par la pâte de ciment dans le béton autoplaçant.

La théorie de la pâte en excès consiste à déterminer la distance moyenne (occupée par de la pâte) entre deux granulats dans le béton. Ceci revient à déterminer l'épaisseur moyenne de pâte couvrant les granulats du squelette composant le béton.

Nous allons confectionner des bétons autoplaçants constitués d'un squelette granulaire entouré par une épaisseur de pâte de ciment pour obtenir un écoulement autoplaçant. La méthode de confection de ces bétons se résume par le passage de l'échelle de la pâte de ciment autoplaçante à celui du béton.

L'épaisseur de pâte couvrant la surface des granulats déterminée par la théorie de la pâte en excès, permet de remonter à la détermination des proportions de la pâte et du squelette granulaire. Nous nous basons sur cette théorie pour déterminer l'épaisseur moyenne de pâte cimentaire, nécessaire pour confectionner les bétons autoplaçants.

## 4.2. Confection des bétons autoplaçants

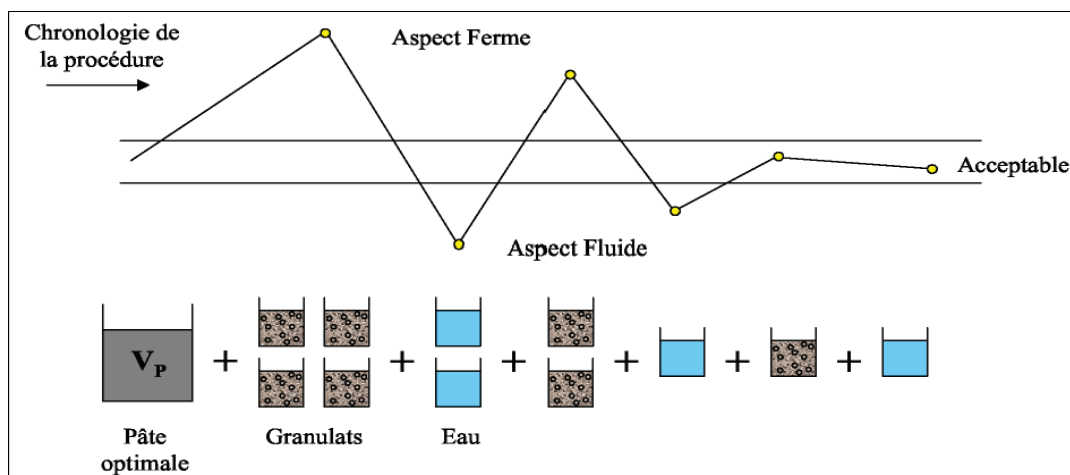
### 4.2.1. Méthode adoptée pour la formulation des BAP

Nous allons confectionner des BAP à partir de la pâte autoplaçante obtenue dans le chapitre 2, ce passage de l'échelle de la pâte à celui du béton se fera par paliers successifs d'ajout de granulats et d'eau.

Un volume unité  $V$  de béton autoplaçant est obtenu en ajoutant au volume absolu de la pâte de ciment autoplaçante  $V_p$ , un volume  $V_A$  composé de graviers de rapport  $G/S$  donné et d'eau, ajouter à cela un volume des vides  $V_V$  dans le béton estimé à 2,5 %. Ainsi pour un volume unité  $V$  de béton, nous avons :

$$V = V_p + V_A + V_V \quad [4.1]$$

La figure 4.1 illustre le principe de la démarche de confection des BAP



**Figure 4.1 :** Illustration de la démarche de confection des BAP.

En adoptant un dosage en ciment de 350 Kg par mètre cube (béton d'ouvrage de classe 35 à 40 MPa) et à partir de la formulation de la pâte optimale, on déterminera le volume des constituants de la pâte pour un mètre cube de béton. Le volume d'eau et de graviers ajoutés est déduit de la relation [4.1]. Nous tenons à spécifier que par rapport au béton ordinaire, la fraction granulaire 16/25 est absente dans la composition de nos BAP.

**Tableau 4.1** : Volume des constituants de la pate pour 350 Kg/m<sup>3</sup> de ciment.

Constituant	Ciment	Filler	Plastifiant	Eau
Volume pour 350 Kg/m <sup>3</sup> de ciment (m <sup>3</sup> )	0,114	0,053	0,0025	0,226

**Tableau 4.2** : composition d'un mètre cube de béton.

$V_P$	0,396
$V_V$	0,025
$V_A$	0,579
Somme (m <sup>3</sup> )	1

Nous préparons une quantité de 30 l de pâte de ciment avec la même procédure décrite dans le chapitre 2, le premier ajout de graviers est égale a 0,80  $V_A$  suivi d'une minute de malaxage, le reste des séquences d'ajout d'eau et de graviers est suivie par 30 secondes de malaxage.

Les détails des étapes de la procédure de confection d'un BAP de rapport G/S =1 sont présentés dans le tableau 4.3.

**Tableau 4.3** : Procédure de l'élaboration d'un BAP G/S =1.

Etape	Granulats ajoutés cumulés	Eau ajoutée cumulée	Aspect visuel	Volume total ajouté
1	0,8 $V_A$	0 $V_A$	Fluide (figure 4.2a)	0,8 $V_A$
2	0,9 $V_A$	0 $V_A$	Acceptable	0,9 $V_A$
3	0,95 $V_A$	0 $V_A$	Plastique (figure 4.2b)	0,95 $V_A$
4	0,95 $V_A$	0,02 $V_A$	Acceptable	0,97 $V_A$
5	0,98 $V_A$	0,02 $V_A$	Acceptable	$V_A$



**Figure 4.2a** : Aspect apparent d'un béton fluide.



**Figure 4.2b** : Aspect apparent d'un béton plastique.

#### 4.2.2. Composition des BAP

Le tableau 4.4 regroupe les compositions des bétons autoplaçants exprimées en kilogramme par mètre cube de béton. Dans ce contexte, le seul facteur qui varie c'est le gravier et le sable.

**Tableau 4.4** : Compositions finales des bétons confectionnés (Kg/m<sup>3</sup>).

G/S	0,8		0,9		1		1,1	
Volume total ajouté	Volume des granulats ajoutés	Volume d'eau ajoutée	Volume des granulats ajoutés	Volume d'eau ajoutée	Volume des granulats ajoutés	Volume d'eau ajoutée	Volume des granulats ajoutés	Volume d'eau ajoutée
	$0,98 V_A$	$0,02 V_A$	$0,98 V_A$	$0,02 V_A$	$0,98 V_A$	$0,02 V_A$	$0,98 V_A$	$0,02 V_A$
Gravier 3/8	259,92		273,61		288,82		302,55	
Gravier 8/16	389,88		410,41		433,22		453,82	
Sable 0/3	794,2		759,98		722		687,63	
Ciment	350		350		350		350	
Filler calcaire	144,16		144,16		144,16		144,16	
Eau	237,58		237,58		237,58		237,58	
SP	2,8		2,8		2,8		2,8	

Pour valider la composition obtenue, le béton doit être confectionné de manière classique, c'est à dire en malaxant tous les constituants en même temps avec leurs dosages respectifs.

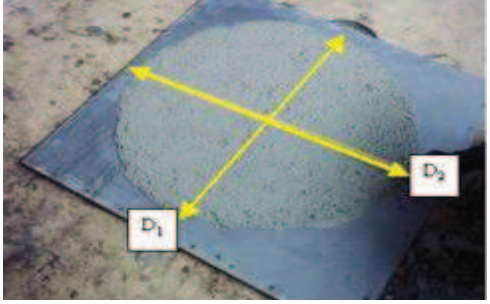


La procédure à suivre par rapport à l'introduction des constituants dans le malaxeur selon la norme NF P18-404 est la suivante :


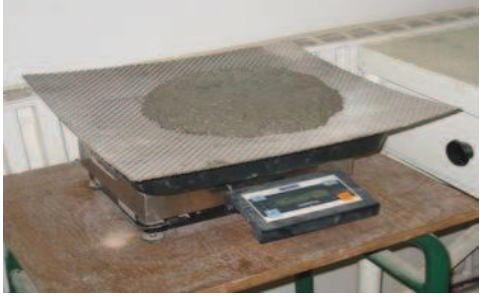
- Gravier
- Ciment
- Filler
- Sable
- Malaxage à sec pendant 2 min.
- Eau + Plastifiant.
- Malaxage pendant 3 min.

Le temps total de malaxage est de 5 min.

#### 4.2.3. Résultats des essais d'ouvrabilité

**Tableau 4.5 :** Ouvrabilité des bétons confectionnés.

Essais	Grandeur spécifique	Série Des Bétons Autoplaçants (G/S)				Photos
		0,8	0,9	1	1,1	
Etallement	$D_{moy}$ (cm)	75	74	74	73	
J-Ring	$D_{moy}$ (cm)	72	70	69	69	
V-funnel	TvF (s)	8,21	11,3	12,07	11,22	

Boite en L	H2/H1	0,88	0,83	0,90	0,81	
Stabilité	P (%)	11,12	9,31	11,88	8,73	

Les résultats obtenus concernant tous les bétons que nous avons confectionné sont satisfaisants et répondent aux recommandations de l'AFGC. Ils présentent une bonne réponse vis-à-vis de l'écoulement continu au V-funnel, un bon étalement au cône d'Abrams et une excellente stabilité vis-à-vis du risque de ségrégation.

#### 4.2.4. Résistance à 28 jours

**Tableau 4.6** : Résistances à 28 jours des bétons confectionnés.

G/S	0,8	0,9	1	1,1
Rc28J (MPa)	32,67	33,9	34,70	34,76

La résistance à la compression semble être influencée par le rapport G/S.

Les résultats présentés dans le tableau 4.6 montrent que l'augmentation du rapport G/S engendre un accroissement de la résistance mécanique. Ces résultats rejoignent ceux de Yammine [YAM, 07].

En parallèle, cette différence est peu significatif dans la fourchette étudiée étant donnée qu'une différence de 2 MPa a été enregistrée entre un BAP de G/S = 0,8 et un autre avec un G/S = 1,1. Ce résultat peut être expliqué par le fait que la résistance à la compression semble être contrôlée par la résistance de la pâte et la résistance de l'interface pâte-granulat.

#### 4.2.5. Bilan

Nous avons constitué un béton autoplaçant à partir d'une pâte de ciment autoplaçante obtenue dans le chapitre 2. Néanmoins, un ajout d'une quantité d'eau a été nécessaire. En effet les granulats sec retiennent l'eau et modifient les propriétés autoplaçante de la pâte. Dans le paragraphe qui va suivre, nous essaierons d'interpréter cet ajout.

### 4.3. Eau retenue par les granulats

Les bétons autoplaçants confectionnés ont nécessité un ajout d'eau au cours de la procédure de reconstitution. Une quantité d'eau supplémentaire s'est avérée indispensable car le squelette granulaire utilisé est sec et mobilise une quantité d'eau par absorption et adsorption [BAR, 05].

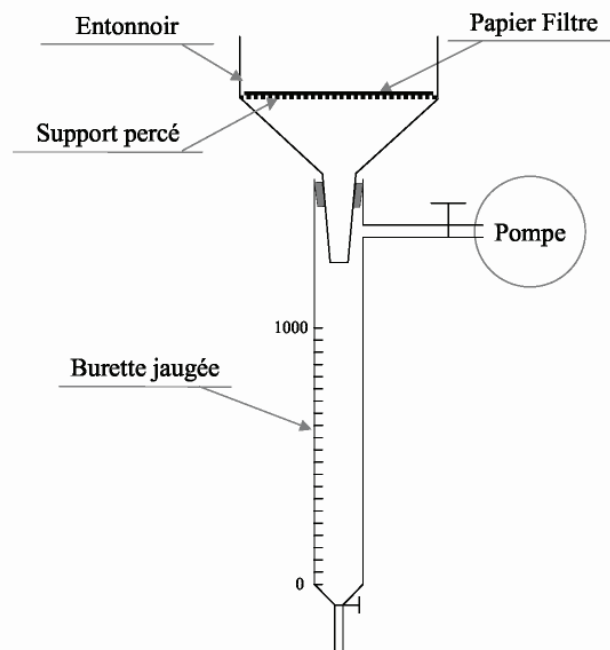
Ce qui nous ramène à dire que l'association entre une pâte de ciment aux critères autoplaçants et un squelette humide peut conduire à l'élaboration d'un béton autoplaçant [BAR, 05].

El Barrak [BAR, 05] considère que l'eau retenue par le squelette granulaire correspond à la quantité d'eau nécessaire pour occuper les pores et mouiller les parois des granulats contenus dans le béton. Le squelette qui en résulte est appelé squelette humide. Il est important d'évaluer cette quantité dans la mesure où elle peut expliquer l'eau ajoutée dans la procédure de confection des bétons autoplaçants et dans la mesure où elle entre dans le calcul de la quantité de l'eau totale.

#### 4.3.1. Dispositif de mesure de l'eau retenue

Pour mesurer la quantité d'eau retenue par un échantillon de granulats, le dispositif d'essai [BAR, 77] permet de filtrer l'eau sous pression à travers des granulats préalablement immergés dans l'eau.

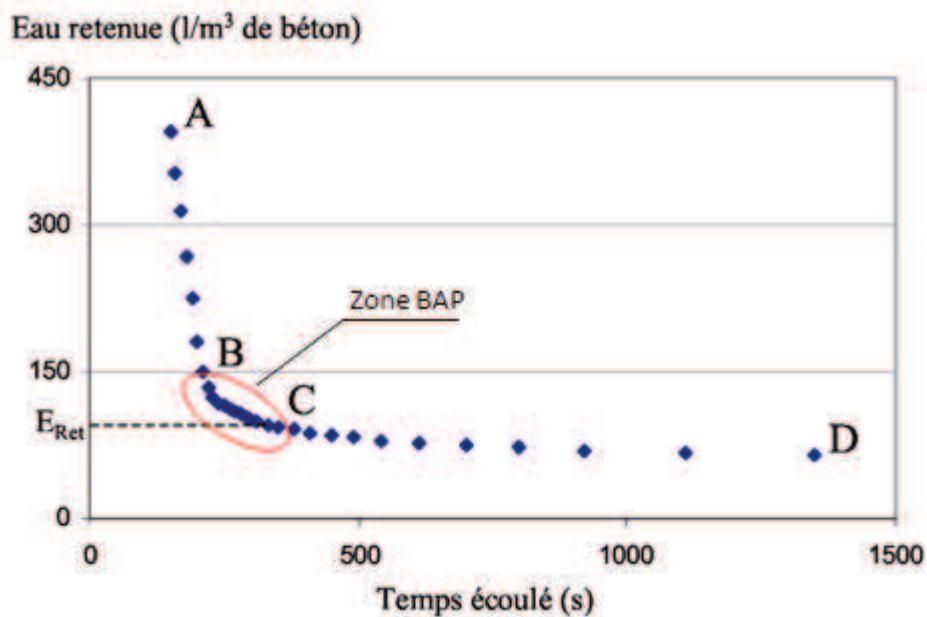
Ce dispositif (figure 4.3) est constitué d'un entonnoir à support percé, de 24 cm de diamètre et de 3,3 litres de volume, et d'une burette jaugée graduée de 1 litre de volume. L'ensemble est associé à une pompe destinée à mettre la burette en dépression. Un papier filtre vient couvrir le support percé de l'entonnoir pour maintenir les granulats dans la partie supérieure et laisser passer l'eau dans la burette.



**Figure 4.3 :** Dispositif de mesure de l'eau retenue par les granulats.

Les échantillons granulaires testés doivent être représentatifs des squelettes étudiés. Avant la mesure, ces échantillons sont malaxés à sec de manière à homogénéiser l'ensemble des différentes fractions. Le principe de l'essai consiste d'abord à prélever l'échantillon granulaire immergé dans l'eau pendant 30 minutes, et le poser sur le papier filtre dans l'entonnoir. Le volume d'eau où baigne l'échantillon est connu. Ensuite, une dépression est créée dans la burette et le volume d'eau filtré est enregistré en fonction du temps.

En enregistrant la quantité d'eau filtrée dans la burette, on peut facilement calculer la quantité d'eau retenue par les granulats à chaque instant de l'essai. Au début de l'expérience, le débit d'eau filtré à travers les granulats est élevé (dû à la filtration de l'eau en excès), mais il diminue rapidement avec le temps. La figure 4.4 représente un exemple d'un essai de filtration. La courbe représente la quantité d'eau retenue par les granulats en fonction du temps. La première partie de la courbe (AB) traduit le passage de l'eau en excès contenue dans les granulats ; elle est linéaire. La deuxième partie (BC), non linéaire, correspond à la destruction des ménisques de capillarité entre les particules [BAR, 77]. La dernière partie (CD) est généralement asymptotique, et correspond vraisemblablement à la filtration d'eau contenue dans les pores des granulats, sous différence de pression. En effet, si on poursuit la manipulation de filtration au delà de D (temps infini), la dépression dans la burette continue à « arracher » l'eau de l'échantillon de granulats et on entre dans un domaine qui n'a plus aucun lien avec les conditions de malaxage.



**Figure 4.4** : Exemple de courbe de filtration d'un squelette granulaire [BAR, 05].

El Barrak [BAR, 05] considère que la quantité d'eau retenue ou mobilisée par un squelette granulaire donné correspond au point C, limite haute de la dernière partie (CD) [BAR, 77].



### 4.3.2. Hypothèse

Le même auteur [BAR, 05] a montré d'après les essais menés au laboratoire que le volume d'eau mesuré des squelettes granulaires (point C sur la figure 4.4) est inférieur de 30 à 40 l / m<sup>3</sup> à la quantité d'eau ajoutée à l'ensemble granulats + pâte pour constituer le béton ; l'existence de ce supplément d'eau ne peut que rendre le béton confectionné plus fluide.

Par ailleurs, il a remarqué que le volume d'eau ajoutée pour constituer les bétons correspond, au point B de la courbe de filtration d'eau ; point où commence la destruction des ménisques de capillarité entre les particules (figure 4.4). Ce supplément d'eau a pour effet d'augmenter le volume de la pâte afin d'améliorer l'écoulement.

Ainsi, nous pouvons définir pour chaque rapport G/S étudié, une zone sur la courbe de filtration d'eau retenue par les granulats, cette zone est limitée dans sa partie supérieure par la quantité d'eau totale ajoutée dans la procédure de confection de béton et limitée dans sa partie inférieure par la valeur d'eau retenue réelle des granulats.

Vu qu'on ne dispose pas au sein de notre laboratoire du dispositif de mesure de cette eau retenue et vu que l'eau totale que nous avons ajouté lors de la constitution de nos BAP est de  $0,02 V_A$ , nous tiendrons compte de cette dernière pour les calculs à venir.

### 4.4. Epaisseur de la pâte en excès

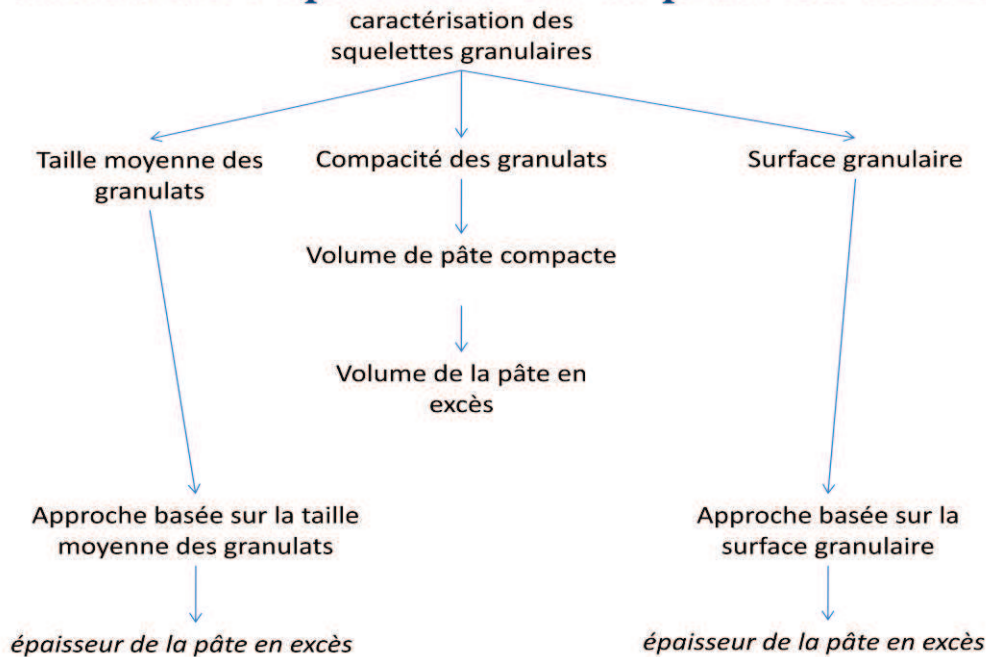
L'épaisseur de la pâte en excès peut être déterminée selon les deux principaux travaux sur la théorie d'optimisation de la pâte, ceux d'OH et col. [OH, 99] et ceux de Bui [BUI, 99,02] cités dans le chapitre 1. Néanmoins, il existe une différence entre ces deux approches. La première se base sur le calcul de la surface granulaire (chapitre 1 §1.6.4.2). Cependant la seconde méthode (chapitre 1 §1.6.4.4) utilise la taille (diamètre) moyenne des particules pour estimer l'épaisseur de la pâte [MID, 01].

En effet, L'épaisseur moyenne de pâte en excès selon la méthode par surface granulaire ne correspond pas à l'épaisseur moyenne de l'enrobage autour des grains, mais représente plutôt un paramètre de proportionnalité entre le volume de pâte et la surface granulaire ouverte à ce volume.

Pour déterminer l'épaisseur de la pâte en excès des bétons confectionnés, nous allons utiliser ces deux approches. Toutefois, nous présentons sur l'organigramme de la figure 4.5 l'ensemble des étapes principales utilisées pour calculer l'épaisseur de la pâte en excès.

Quelle que soit la nature du calcul, le point de départ est identique : la taille des granulats. Celle ci est généralement assimilée au diamètre des granulats considérés comme des particules de forme sphériques.

## Calcul de l'épaisseur de la pâte en excès



**Figure 4.5 :** Organigramme de calcul de l'épaisseur de la pâte en excès.

Dans la branche centrale de la figure 4.5, nous présentons les étapes de détermination du volume de la pâte en excès. Ayant le volume total de pâte dans les bétons confectionnés, le volume de pâte en excès peut être calculé en déterminant le volume de la pâte compacte (contenue dans les vides entre les granulats) à partir de l'équation 1.5 (chapitre 1 §1.6.4.2). Le volume de pâte compacte  $V_{PC}$  est déterminé en calculant la compacité maximale  $\gamma$  du squelette granulaire sec, puisqu'il est égal au volume des vides dans les granulats compactés :

$$V_{PC} = V_{Vides} = V_{Granulats} \cdot (1 - \gamma) \quad [4.2]$$

La compacité maximale du squelette granulaire est déterminée dans le chapitre 3.

### 4.4.1. Calcul à partir de la surface granulaire

Dans la branche de droite figure le dénominateur de l'équation de calcul de l'épaisseur de la pâte en excès de la première approche (équation 1.4, chapitre 1 §1.6.4.2), la surface granulaire, qui est la surface de l'ensemble des granulats du squelette granulaire. Pour calculer la surface granulaire, nous additionnons les surfaces de tous les granulats du béton. Assimilés à des particules sphériques, les granulats ont une surface proportionnelle à leur diamètre moyen.

#### 4.4.2. Calcul à partir de la taille moyenne des granulats

La branche de gauche concerne le calcul de la taille moyenne (diamètre moyen) des granulats du béton calculé dans le chapitre 3.

L'épaisseur de pâte en excès est obtenue à partir de l'équation 1.13 (chapitre 1 §1.6.4.4).

#### 4.5. Détermination de l'épaisseur de la pâte en excès

Le volume total de pâte dans un béton est calculé en prenant en compte la fraction inférieure à 0,08 mm de granulats, considérée comme faisant partie de la suspension entourant les granulats supérieurs à 0,08 mm. Les valeurs de l'épaisseur moyenne de la pâte en excès sont présentées dans le tableau 4.7. Le calcul de l'épaisseur de la pâte en excès est fait en adoptant les deux approches.

**Tableau 4.7** : Epaisseur de la pâte en excès des bétons calculé par les deux approches.

G/S	Epaisseur de la pate en excès (mm)	
	Approche [OH, 99]	Approche [BUI, 99,02]
0,8	0,0682390	0,3373294
0,9	0,0717324	0,3562989
1	0,0784378	0,3765187
1,1	0,0796987	0,3965220

Les épaisseurs des bétons autoplaçants formulés sont supérieures aux épaisseurs moyennes de la pâte en excès des différentes formulations de Bui et al [BUI, 99,02] (entre 150 et 300 microns) qui utilisent l'approche par la taille moyenne des granulats, cela peut être expliqué par les valeurs élevées des diamètres moyens de nos différents squelettes granulaires.

Les résultats des épaisseurs moyennes de la pâte en excès obtenus par Oh et al [OH, 99] varient entre 100 et 450 microns. Ce qui ne fait pas l'objet de comparaison avec les valeurs trouvés, on peut expliquer cela par les valeurs élevées des surfaces granulaires développées par nos différents mélanges de squelettes granulaires dû à une présence de quantité importante de fines ce qui a conduit à de faibles valeurs des épaisseurs de pâte en excès.

##### 4.5.1. Bilan

L'épaisseur moyenne de la pâte en excès est un paramètre influent sur l'écoulement des bétons autoplaçants. En effet, il est nécessaire d'avoir une épaisseur de pâte moyenne autour des granulats, suffisante pour les écarter afin de réduire les frictions intergranulaires.

Cependant, pour un même volume de pâte en excès, et le même volume de granulats, l'épaisseur moyenne de la pâte en excès augmente avec le diamètre moyen du squelette granulaire (équation 1.13, chapitre 1 §1.6.4.4). La valeur absolue d'épaisseur moyenne de

pâte en excès n'est pas un paramètre indépendant, mais dépendant de la distribution granulométrique des squelettes.

Ainsi, le Laboratoire Matériaux et Durabilité des Construction de Toulouse en France (LMDC) lors de la thèse de M.EL Barrak [BAR, 05] a développé la méthode «Excès de pâte» en définissant une approche qui soit indépendante de la distribution granulaire d'un béton, et qui permet de générer un paramètre utilisable (et comparable) quelle que soit la distribution granulaire du béton.

Nous déterminerons ce paramètre qui correspondra aux matériaux que nous avons utilisés pour la confection de notre béton autoplaçant.

#### 4.6. Détermination du facteur représentatif du comportement autoplaçant

##### 4.6.1. Approche

Comme nous l'avons déjà vu dans le paragraphe précédent, l'épaisseur de la pâte en excès dépend principalement de la taille moyenne de la distribution granulaire d'un squelette donné. Pour un même volume de pâte en excès, l'épaisseur moyenne de la pâte en excès augmente avec le diamètre moyen du squelette associé. Nous supposons tout d'abord que l'épaisseur de la pâte en excès n'est pas identique pour des tailles différentes de granulats. En effet, nous pensons que plus le granulat est grand, plus l'épaisseur de pâte couvrant sa superficie est importante, par effet de masse (ou de taille pour un granulat de même densité). Plus le diamètre d'un granulat est grand, plus épaisse est la pâte en excès couvrant sa superficie.

Nous allons donc supposer que l'épaisseur de la pâte en excès est proportionnelle à la taille du granulat (illustration à la figure 4.6). Nous définissons ainsi un facteur d'homothétie entre les diamètres des granulats bruts et enrobés de pâte.

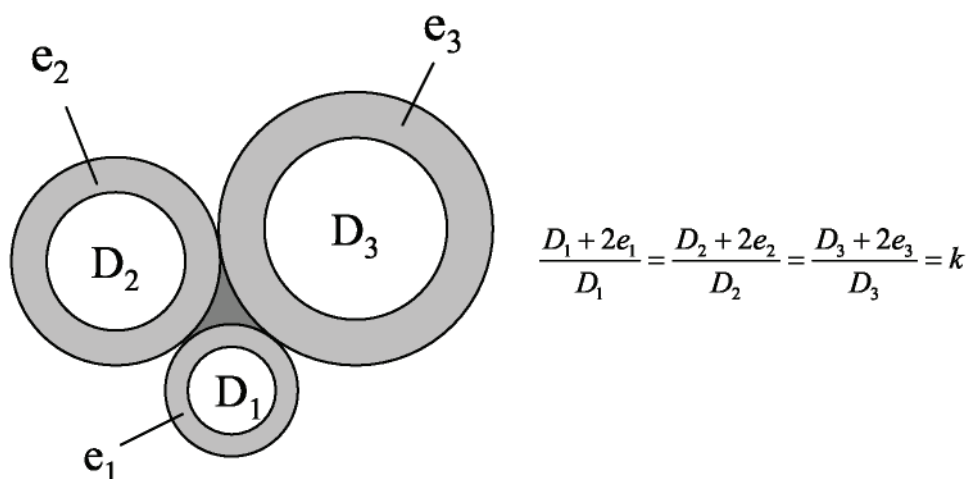


Figure 4.6 : Epaisseur de la pâte en excès proportionnelle à la taille du diamètre.

En pratique pour une classe  $i$  de granulats de taille  $D_i$ , l'épaisseur de la pâte en excès est  $e_i$  :

$$k = \frac{D_i + 2e_i}{D_i} \quad [4.3]$$

Par conséquent le paramètre  $k$  est identique pour toutes les classes (de  $i = 1$  à  $n$ ) d'un squelette granulaire. Le volume de la pâte en excès  $V_{PE}$  total peut alors s'écrire pour  $n$  classes :

$$V_{PE} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\pi \cdot (D_i + 2e_i)^3}{6} - \frac{\pi \cdot D_i^3}{6} \right) \cdot N_i \quad [4.4]$$

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

Ceci peut nous amener à trouver le paramètre  $k$  en développant la relation 4.4 :

$$k = \sqrt[3]{1 + \frac{6 \cdot V_{PE}}{\pi \cdot \sum_{i=1}^n N_i \cdot D_i^3}} = \sqrt[3]{1 + \frac{V_{PE}}{V_{G>80}}} \quad [4.5]$$

$V_{G>80}$  est le volume des granulats de taille supérieure à 80 microns, qui est entouré par la suspension constituée de pâte de ciment et des fines de taille inférieure à 80 microns des granulats.

Lorsqu'on obtient la valeur de  $k$ , nous pouvons déterminer pour chaque granulat de taille  $D_i$  l'épaisseur de pâte en excès correspondante  $e_i$  :

$$e_i = \frac{(k-1)}{2} \cdot D_i \quad [4.6]$$

#### 4.6.2. Calcul du paramètre $k$

Les résultats du paramètre  $k$  correspondant aux BAP confectionnés sont présentés dans le tableau 4.8.

**Tableau 4.8** : Valeurs du paramètre  $k$  des bétons autoplaçants confectionnés.

G/S	Valeurs du facteur $k$
0,8	1,1241
0,9	1,1240
1	1,1238
1,1	1,1233

Bui et al [BUI, 99, 02] fournissent une liste de 70 bétons autoplaçants avec un paramètre  $k$  variant entre 1,038 et 1,140 ; cependant, les bétons autoplaçants satisfaisants possèdent un paramètre  $k$  qui varie entre 1,061 et 1,132 ce qui classe les résultats des bétons confectionnés de notre étude dans le même domaine d'intervalle des bétons autoplaçants réalisés par Bui et al.

#### 4.7. Contribution à la formulation des bétons autoplaçants

Connaissant le paramètre  $k$  nécessaire pour définir un béton autoplaçant, nous sommes capables, compte tenu de la granulométrie du squelette granulaire, de remonter à la valeur de l'épaisseur de la pâte en excès, et donc au volume de la pâte en excès. Le volume de la pâte dans une unité de volume de béton est déduit, ainsi que le volume total du squelette granulaire.

Nous savons que la somme des volumes de la pâte de ciment  $V_p$ , du squelette granulaire  $V_G$  et du volume de vides  $V_V$  forment un béton autoplaçant à un volume unité ( $V_V$  est pris approximativement égal à 2,5% dans notre cas) :

$$V_P + V_G + V_{ER} + V_V = 1 \quad [4.7]$$

Par ailleurs, l'ensemble des granulats peut être décomposé en deux parties selon la taille des granulats. Une première partie est constituée des fines de taille inférieure à 80 microns, et qui sont du même ordre de grandeur que les constituants solides de la pâte de ciment (ciment et filler). La seconde partie est ainsi constituée des granulats de taille supérieure à 80 microns, que nous notons  $V_{G>80}$ . Ainsi le volume total des granulats  $V_G$  est écrit :

$$V_G = V_{\text{fines}} + V_{G>80} \quad [4.8]$$

Nous avons supposé que l'eau absorbée par l'ensemble des granulats (de volume  $V_{EA}$ ) n'est pas prise en compte par la pâte en excès.

$$V_P + V_{ER} - V_{EA} + V_{EA} + V_{\text{fine}} = V_{PE} + V_{PC} \quad [4.9]$$

Où  $V_{PE}$  et  $V_{PC}$  sont respectivement le volume de la pâte en excès, et le volume de la pâte compacte contenue dans les vides laissés par le squelette granulaire compacté. Ce dernier est constitué des granulats de taille supérieure à 80 microns.

$$V_{PC} = (1 - c) \cdot V_{G>80} \quad [4.10]$$

Où  $c$  est la compacité maximale (virtuelle) du squelette  $V_{G>80}$

Ainsi, l'équation 4.7 peut être réécrite :

$$V_P + V_{G>80} + V_{\text{fine}} - V_{EA} + V_{EA} + V_{ER} + V_V = 1 \quad [4.11]$$

Et l'utilisation de l'équation 4.9 nous conduit à :

$$V_{PE} + V_{\text{fine}} + V_{G>80} + V_{EA} + V_V = 1 \quad [4.12]$$

Pour une granulométrie donnée, le volume des granulats de taille supérieure à 80 microns  $V_{G>80}$  est une fraction du volume total des granulats  $V_G$  (pour un rapport G/S donné) :

$$V_{G>80} = a \cdot V_G \Leftrightarrow V_G = \frac{V_{G>80}}{a} \quad [4.13]$$

Où le facteur  $a$  est inférieur ou égal à 1.

De même, le volume de l'eau absorbée  $V_{EA}$  est proportionnel au volume total des granulats par l'intermédiaire d'un coefficient d'absorption volumique  $b$ , et on peut écrire :

$$V_{EA} = b \cdot V_G = \frac{b}{a} \cdot V_{G>80} \quad [4.14]$$

Le développement de la relation 4.12, nous donnera :

$$V_{PE} = 1 - V_V - V_{G>80} \cdot \left(2 - c + \frac{b}{a}\right) \quad [4.15]$$

En utilisant l'équation de l'expression de  $k$  (équation 4.5), nous remplaçons  $V_{PE}$  de l'équation 4.15 par sa valeur.

$$V_{G>80} = \frac{1 - V_V}{k^3 + 1 - c + \frac{b}{a}} \quad [4.16]$$

Le volume total des granulats (fines comprises) est exprimé donc par la relation 4.17 :

$$V_G = \frac{1 - V_V}{a(k^3 + 1 - c) + b} \quad [4.17]$$

Sachant que le volume  $V_V$  est pris approximativement égal à 2,5% du volume total unité (en principe, de 1 à 3% pour le béton autoplaçant), et que les paramètres  $a$  (fraction de granulats de taille supérieure à 80 microns),  $b$  (proportion d'eau absorbée par un volume de granulats) et  $c$  (la compacité maximale virtuelle) peuvent être déterminés ou mesurés expérimentalement, le volume total du squelette granulaire sec peut être calculé en choisissant une valeur de  $k$  correspondant au G/S choisi.

#### 4.8. Exemple d'application pour validation

Nous considérons un squelette granulaire de rapport G/S = 1,2. Le volume de vides est fixé à 2,5 %.

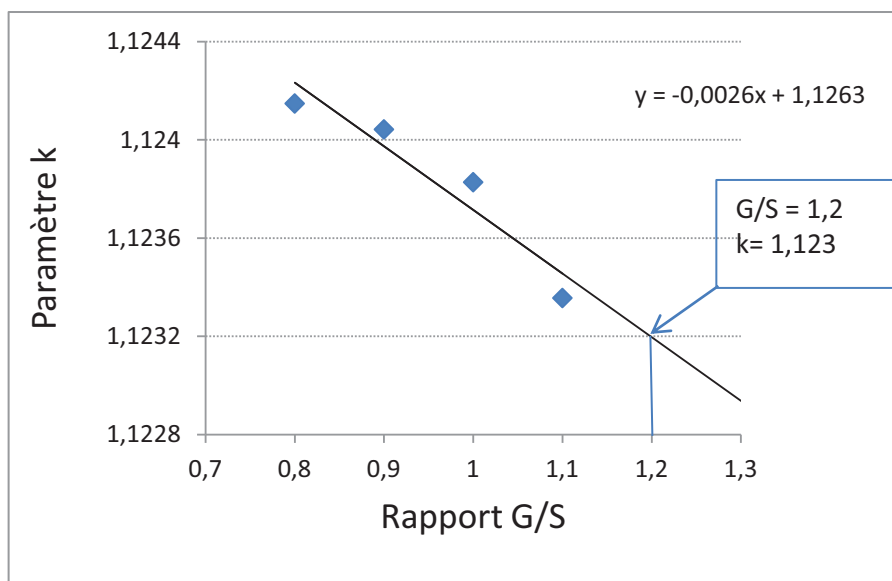


Figure 4.7 : Evolution du paramètre  $k$  en fonction du rapport G/S.

Nous évaluons d'abord le paramètre  $k$  à partir de son évolution en fonction de  $G/S$  (figure 4.7). Nous aurons un  $k = 1,1232$  par extrapolation.

Pour une distribution granulaire de  $G/S = 1,2$  le coefficient  $a$  est égal à  $0,961$  (proportion volumique granulaire de taille supérieure à  $80$  microns) et le coefficient  $b$  est égal à  $3,23\%$  (valeur transformée du coefficient d'absorption massique).

La compacité maximale du squelette calculée à partir du modèle d'empilement compressible est égal à  $c = 0,7178$ .

Compte tenu de l'incertitude ( $\pm 5$  litres) avec laquelle les mesures des granulats ont été effectuées, le volume granulaire total (sable et graviers) calculé est alors :  $V_g = 586 \pm 5$  litres /  $m^3$  de béton.

La formulation peut ainsi être établie, pour  $25$  litres /  $m^3$  de vides, en adoptant la composition de la pâte de ciment déjà utilisée dans la confection des bétons autoplaçants testés (tableau 4.9).

**Tableau 4.9** : Composition du béton obtenu.

Matériau	Volume ( $l/m^3$ )	Masse ( $Kg/m^3$ )
Sable (0/3)	591	683,61
Gravier (3/8)		328,19
Gravier (8/16)		492,29
Ciment	107,18	329,15
Filler calcaire	50,07	136,19
Superplastifiant	2,36	2,64
E apport	224,39	224,39
Total	975	2196,46

Le béton sera confectionné en suivant les mêmes étapes que pour les autres bétons. Les résultats d'ouvrabilités sont regroupés dans le tableau 4.10.

**Tableau 4.10** : Ouvrabilité du béton obtenu.

Etallement (Cône d'Abrams)	Dmoy (cm)	71,5
J-Ring	Dmoy (cm)	67
V-funnel	TvF (s)	10,41
Boîte en L	H2/H1	81
Stabilité au tamis GTM	P (%)	10,65
Air occlus %	1,1	
Rc28J (MPa)	34,89	



#### 4.9. Conclusion

Nous avons obtenue des BAP à partir d'une pâte autoplaçante associée aux graviers plus une quantité d'eau définie dans une zone sur la courbe de filtration d'eau retenue par les granulats.

Avec la théorie de la pâte en excès, nous avons déterminé l'épaisseur moyenne de la pâte en excès qui est le paramètre influent sur l'écoulement des bétons autoplaçants selon les deux approches qu'on trouve dans la littérature, celle basée sur le diamètre moyen et l'autre approche qui se base sur le calcul de la surface granulaire ; Nous avons remarqué pour cette dernière que les valeurs de l'épaisseur de pâte en excès sont dépendants de la distribution granulométrique du squelette granulaire.

Afin de minimiser l'influence de la distribution granulaire, nous avons fais intervenir un paramètre d'homothétie  $\ll k \gg$  qui peut être comparable pour des bétons de différentes granulométries et qu'on a validé grâce à la base de données trouvée dans la littérature.

Ce paramètre nous a permis de déterminer le volume granulaire et d'en déduire par la suite le volume de pâte autoplaçante nécessaire pour obtenir un béton autoplaçant dès lors que l'on a déterminé la quantité d'eau retenue par les granulats et cela dans une gamme de propriétés du squelette granulaire correspondant au cas de notre étude.