

Etude et analyse de la formulation des bétons auto-plaçants par la méthode de la pâte en excès

Mustapha Khadir GUELLIL,^a Fouad GHOMARI,^a Sidi Mohammed El Amine BOUKLI HACENE,^a Omar TALEB,^a

^a Laboratoire Eau et Ouvrages dans leur environnement BP230, Université de Tlemcen, 13000, Algérie

Résumé

La formulation des Bétons auto plaçants utilise plusieurs méthodes dont la pâte en excès. Le concept de cette méthode est associé à une caractérisation du squelette granulaire en calculant son diamètre moyen et sa compacité. Tout en adoptant la méthode d'empilement compressible, nous avons dans un premier temps déterminé et validé un paramètre d'homothétie entre le granulats brut et le granulats enrobé. Cette démarche nous a permis de valider la méthode de formulation en dehors du domaine expérimental étudié. Dans cette étude, nous avons aussi optimisé le squelette granulaire et déterminer par la suite le volume optimal de pâte nécessaire pour écarter d'un côté les granulats, et de permettre d'un autre côté un bon écoulement du mélange. Les pâtes aux propriétés auto plaçantes ont été constituées à partir d'un plan de mélange basé sur un modèle polynomial. Partant de cette pâte et d'ajouts séquencés d'eau ou de granulats définis seulement par un rapport massique gravillon / sable variant de 0,8 à 1,1, il a été possible, de confectionner des bétons auto plaçants, répondant à tous les critères de l'AFGC.

Mots clés : Pâte en excès, plan de mélange, empilement compressible, paramètre d'homothétie, modèles

Abstract

The formulation of self-compacting concretes uses several methods including excess paste method. The concept of this method is associated with a characterization of the granular skeleton by calculating the average diameter and packing density. While adopting the method of compressible packing, we have first identified and validated a homothety parameter between the crude and coated aggregate. This approach has allowed us to validate the method of formulation outside the studied experimental domain. In this study, we have also optimized the granular skeleton and subsequently determine the optimal volume of paste necessary to separate aggregates on one side, and allow a good flow of the mixture in the other side. Self-compacting pastes were made from a mixture design based on a polynomial model. From this paste and gradually additions of water or aggregates for a mass ratio of gravel / sand varying from 0.8 to 1.1, it was possible to make self-compacting concrete, meeting all criteria recommended by the AFGC.

Keywords : excess paste, mixture design, compressible packing, homothety parameter ,model.

1. Introduction

Réaliser un béton autoplaçant (BAP) est une opération complexe qui nécessite de trouver une bonne combinaison de matériaux compatibles, et le dosage convenable de chacun de ces constituants afin d'obtenir une formulation répondant aux propriétés des BAP. De nos jours, il n'existe pas encore de méthode de formulation généralisée permettant de choisir précisément les proportions des constituants en fonction des propriétés souhaitées du BAP. Les méthodes actuelles sont toutes relativement

complexes et essentiellement basées sur les résultats empiriques.

Le comportement rhéologique d'un BAP est régi par celui de la pâte qui le compose [1]. Par conséquent, la pâte est privilégiée par rapport aux gravillons dans les BAP. Dans ce contexte, et pour mieux comprendre l'aptitude à l'écoulement des BAP, nous proposons d'étudier le rôle de cette pâte de ciment par la méthode de formulation de la pâte en excès. Pour ce faire, nous travaillons à deux échelles : celle de la pâte de ciment dans un premier temps, ensuite celle du béton. A l'échelle de la pâte, un plan de mélange a été établi, basé sur un modèle polynomial de prévision des réponses d'écoulement, en fonction des proportions volumiques

des 4 constituants (ciment, filler calcaire, plastifiant et eau). Le modèle développé a permis de déterminer une formulation de pâte répondant aux exigences fixées [2]. Ensuite, nous avons associé à cette pâte optimale, qualifiée d'autoplaçante, un squelette granulaire afin de confectionner un BAP. La quantification de l'épaisseur de la pâte enrobant les granulats, nous conduit à une approche contribuant à formuler un BAP.

2. Concept de la théorie de la pâte en excès

La « Théorie de la pâte en excès » fut proposée en 1940 par Kennedy [3], elle explique le fait que pour atteindre la maniabilité, il est nécessaire d'avoir non seulement assez de pâte de ciment pour couvrir la surface des agrégats, de manière à minimiser la friction entre eux ; mais aussi un excès en plus pour lui donner une meilleure fluidité.

A partir de ce principe, d'autres travaux ont suivis en adoptant chacun différentes approches pour déterminer cette quantité de pâte de ciment.

OH et col. [4] ont obtenu par l'expérimentation, des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte. Toutefois, les auteurs ne proposent pas de méthode pour doser la pâte par rapport au blocage des granulats.

Dans les travaux de Tangtermsirikul, Pettersson et Bui [5, 6 et 7], deux critères, calés aussi expérimentalement, sont proposés : un volume de pâte minimal vis-à-vis de la fluidité et un volume de pâte minimal relatif au blocage. Les auteurs font l'hypothèse qu'il existe un volume de pâte minimal permettant de remplir chacune de ces deux fonctions. On trouve l'application de cette approche, dans les travaux de Turcry [8], pour le calcul des volumes minimaux de pâtes suivant les deux critères. Il a constaté que le critère de non-blocage est largement prépondérant par rapport à celui de la fluidité pour différentes répartitions entre gravillons 6/10 et 10/14, et quelque soit le rapport $E/(C+F)$ (compris entre 0,3 et 0,4).

Afin de déterminer la proportion minimale de la pâte nécessaire pour fluidifier le béton, d'autres auteurs [9], ont défini le paramètre qui correspond à la différence de diamètres entre celui du granulat couvert par de la pâte ($D_i + 2e_i$) et celui du granulat (D_i), divisée par deux. Les grains sont assimilés à des sphères. L'épaisseur moyenne de pâte en excès dans le béton va dépendre dans ce cas du diamètre moyen (D_M) du squelette granulaire.

Dans nos travaux, on s'est inspiré de l'approche proposée par le laboratoire Matériaux et Durabilité des constructions de Toulouse en France (LMDC). M. El Barrak [10], s'est basé sur la théorie de la « pâte en excès » pour quantifier le volume de pâte nécessaire à l'écoulement autoplaçant. Il avait défini un facteur

d'homothétie entre les diamètres des granulats bruts et enrobés tout en supposant que l'épaisseur de la pâte en excès, est proportionnelle à la taille du granulat, en prenant en compte des paramètres, tels que le diamètre représentatif d'une classe et la compacité maximale de granulats polydispersés. Cette méthode a obtenue des résultats concluants. Nous nous proposons de l'appliquer sur des matériaux de la région de Tlemcen pour aboutir à un béton autoplaçant.

3. Matériaux utilisés

Le ciment utilisé est un CEM II/A 42,5 ($M_{vabs} = 3071 \text{ kg/m}^3$, $S_s = 3598 \text{ cm}^2/\text{g}$). Il provient de la cimenterie de Béni-Saf (Wilaya d'Aïn Temouchent), l'addition est un filler calcaire ($M_{vabs} = 2720 \text{ kg/m}^3$, $S_s = 2900 \text{ cm}^2/\text{g}$), qui provient de la carrière d'El Maleh situé à 12 km de la ville d'Aïn Temouchent. Le plastifiant est un polycarboxylates modifié ($M_{vabs} = 1120 \text{ kg/m}^3$, extrait sec 30%). Trois classes de granulats sont utilisées pour composer le squelette granulaire (Sable 0/3, $M_{vabs} = 2500 \text{ kg/m}^3$; Gravier 3/8, $M_{vabs} = 2587 \text{ kg/m}^3$ et Gravier 8/16, $M_{vabs} = 2587 \text{ kg/m}^3$). Ce sont des granulats concassés provenant de la carrière de Sidi Abdelli (Wilaya de Tlemcen), propriété de l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG). Nous tenons à spécifier que par rapport au béton ordinaire, la fraction granulaire 16/25 est absente dans la composition de nos BAP.

4. Approche adoptée pour la confection des BAP

La confection des BAP se fait à partir d'une pâte auto plaçante [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 auto plaçant est obtenu en ajoutant au volume absolu de la pâte de ciment auto plaçante V_p , un volume V_A , composé de graviers de rapport G/S donné et d'eau, ajouté 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 :

$$V = V_p + V_A + V_v \quad (1)$$

Avec :

V : Volume unitaire du béton (1 m^3).

V_p : Volume absolu de la pâte optimale auto plaçante,

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

V_v : Volume des vides dans le béton, équivaut au volume de l'air occlus (25 l/m^3). La figure 1, illustre le principe de la démarche de confection des BAP.

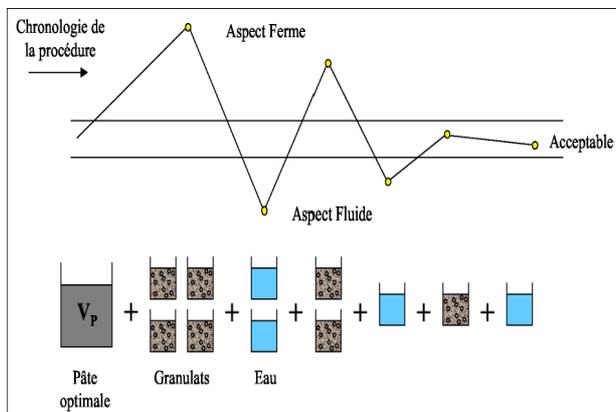


Fig1. Illustration de la démarche de confection des BAP.

Tableau 1

Compositions finales des bétons confectionnés (kg/m³)

G/S	0,8	0,9	1	1,1
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

Tableau 2

Ouvrabilité des bétons confectionnés.

Essais	Grandeur spécifique	Valeurs cibles préconisées	Série des bétons auto plaçants (G/S)			
			0,8	0,9	1	1,1
Etalement	D _{moy} (cm)	550 - 850 mm	75	74	74	73
V-funnel	T _{VF} (s)	9 ≤ t ≤ 25 s	8,21	11,3	12,07	11,22
Boite en L	H ₂ /H ₁	≥ 80 %	0,88	0,83	0,90	0,81
Stabilité	P (%)	0% ≤ P ≤ 15%	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'AFGC¹. Ils présentent une bonne réponse vis-à-vis de l'écoulement continu au V-funnel,

¹ AFGC : Association Française de Génie Civil

En adoptant un dosage courant 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, nous déterminerons 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 (1).

5. Résultats

Pour valider la composition obtenue, nous procédons aux essais d'ouvrabilité qui sont [11]: l'essai d'étalement au cône d'Abrams (mesure du diamètre moyen final d'étalement D_{moy}), essai de l'entonnoir (mesure du temps d'écoulement T_{VF}), essai de la boîte en L (mesure du taux de remplissage H₂/H₁) et l'essai de stabilité au tamis (mesure du pourcentage de laitance P). Des éprouvettes cylindriques (16 cm x 32 cm) sont préparées pour des essais de compression à 28 jours.

Enfin, 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 définitifs selon la norme NF P18-404.

Le tableau 1, regroupe les compositions des bétons auto plaçants exprimées en kilogramme par mètre cube de béton. Dans ce contexte, les seuls facteurs qui varient sont le gravier et le sable.

Dans le tableau 2, nous présentons les propriétés d'ouvrabilité correspondant aux bétons confectionnés.

un bon étalement au cône d'Abrams et une excellente stabilité vis-à-vis du risque de ségrégation.

6. Etude de l'association pâte-squelette granulaire

6.1. Principe

Afin d'appliquer cette théorie, il est nécessaire de définir ses principaux paramètres. La figure 2 montre un échantillon de béton où les granulats sont bien espacés par la pâte de ciment. En imaginant que les granulats de l'échantillon sont compactés au maximum, nous allons extraire la pâte en excès V_{PE} qui couvre les granulats (figure 2). Le volume restant est constitué de granulats compactés et de la quantité de pâte nécessaire pour remplir les vides du squelette.

Ce volume restant, correspond donc au volume apparent des granulats compactés. Il est ainsi composé de deux volumes, le volume solide des granulats V_{Gr} et le volume de la pâte compacte V_{PC} (figure 2).

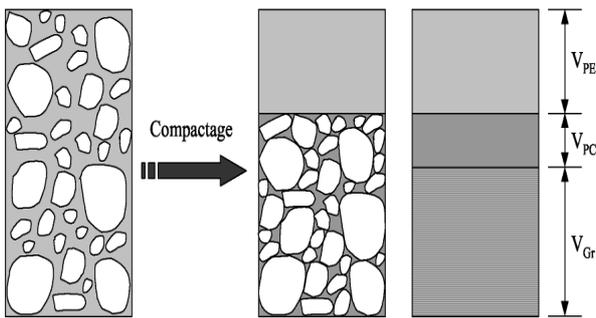


Fig. 2. Théorie de la pâte en excès – composition d'un béton [4].

6.2. Facteur d'homothétie

Nous supposons que l'épaisseur de la pâte en excès est proportionnelle à la taille du granulat (illustration à la figure 3). Nous définissons ainsi un facteur d'homothétie entre les diamètres des granulats bruts et enrobés de pâte.

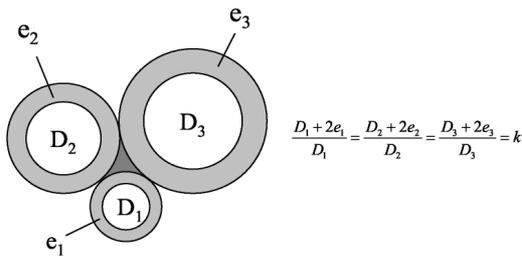


Fig. 3. Epaisseur de la pâte en excès proportionnelle à la taille du diamètre.

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

$$k = \frac{D_i + 2e_i}{D_i} \tag{2}$$

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 :

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

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 :

$$k = \sqrt[3]{1 + \frac{6 \cdot V_{PE}}{\pi \cdot \sum_{i=1}^n N_i \cdot D_i^3}} = \sqrt[3]{1 + \frac{V_{PE}}{V_{G>80}}} \tag{4}$$

$V_{G>80}$ 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.

Le paramètre k est validé à partir de 70 formulations de bétons relevées dans la littérature [9].

7. Contribution à la formulation des BAP

Connaissant le paramètre k nécessaire pour définir un BAP, 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 principe général de cette approche consiste, à utiliser une valeur de k comprise dans l'intervalle défini, pour déterminer dans quelles proportions nous pouvons mélanger la pâte de ciment autoplaçante et un squelette granulaire donné. Cette approche propose de déterminer donc le volume total d'un squelette granulaire donné (défini par un rapport G/S), compte tenu des paramètres d'entrée définis ci-dessous.

1. Une pâte autoplaçante.
2. Un squelette granulaire caractérisé (G/S donné),
 - la compacité maximale γ du squelette granulaire à partir du modèle d'empilement compressible, le coefficient d'absorption volumique « b » du squelette granulaire, l'eau retenue par le squelette,
 - la fraction volumique « a » du squelette qui est supérieure à 80 microns.
3. Un volume de vides estimé.

Nous savons aussi que la somme des volumes de la pâte de ciment V_p , du squelette granulaire V_G , du volume d'eau retenue par ce squelette et du volume de vides V_v forment un béton auto plaçant à un volume unité.

$$V_p + V_G + V_{ER} + V_v = 1 \tag{5}$$

Ainsi le volume total des granulats (fines comprises) est exprimé par la relation suivante [10] :

$$V_G = \frac{1 - V_p}{a \cdot (k^3 + 1 - c) + b} \tag{6}$$

Nous utilisons la méthode décrite pour composer un béton dans le domaine expérimental étudié. La pâte de ciment employée est la pâte autoplaçante définie à partir du plan de mélanges. Nous considérons un squelette granulaire concassé de rapport G/S = 1,2 pour rester dans l'intervalle recommandé dans la littérature et dans l'étude sur l'optimisation de la formulation des BAP utilisant des granulats de notre région [12].

Nous évaluons d'abord le facteur k à partir de son évolution en fonction de G/S (figure 4). Cette évolution nous conduit à considérer la valeur k = 1,123.

Nous calculons ainsi le volume du squelette granulaire (relation 6) et nous obtenons ensuite la composition finale du béton (tableau 3).

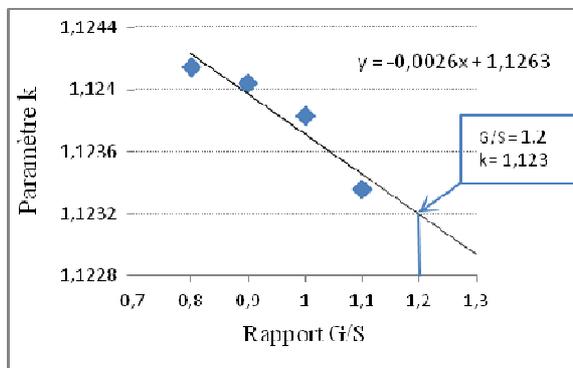


Fig. 4. Evolution du paramètre k en fonction du rapport G/S.

Tableau 3

Composition du béton obtenu.

Matériau	Volume (l/m ³)	Masse (kg/m ³)
Sable (0/3)		683,61
Gravier (3/8)	591	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'ouvrabilité sont regroupés dans le tableau 4.

Tableau 4

Ouvrabilité du béton obtenu.

Etalement (Cône d'Abrams)	D _{moy} (cm)	71,5
J-Ring	D _{moy} (cm)	67
V-funnel	T _{VF} (s)	10,41
Boîte en L	H ₂ /H ₁	81
Stabilité au tamis GTM	P (%)	10,65
Air occlus %		1,1
RC _{28j} (MPa)		34,89

La formulation obtenue est enfin réalisée et satisfait au comportement autoplaçant du point de vue des essais d'ouvrabilité (tableau 4).

8. Conclusion

Partant d'une pâte autoplaçante, nous avons confectionné des BAP en l'associant à des squelettes définis par un rapport massique gravier / sable. La théorie de la pâte en excès a été utilisée pour déterminer l'épaisseur de la pâte enrobant chaque granulats 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.

Nous avons défini un facteur d'homothétie entre les diamètres des granulats bruts et enrobés qui peut être analogue pour des bétons de différentes granulométries mais de même type de granulats (concassés dans notre étude). Validé à partir de nos compositions et par le calcul sur la base de données de la littérature, ce paramètre nous a permis d'aboutir à une méthode de formulation de bétons auto-plaçants.

La méthodologie proposée est intéressante dans le cas où elle permet, à travers le paramètre k calculé, d'être comparable pour des bétons de différentes granulométries. Notons qu'avec la composition obtenue du béton, nous avons eu un gain de 9,71 l/m³ de liant par rapport aux compositions de départ à travers l'optimisation de la quantité de pâte nécessaire à un écoulement autoplaçant.

Remerciements

Nos remerciements vont au projet Tassili 10MDU811 dont le financement a permis la réalisation de ce travail recherche.

9. Références bibliographiques

- [1] Hans W, Reinhardt, Timo Wustholz., "About the influence of the content and composition of the aggregates on the rheological

behaviour of self compacting concrete”, Materials and Structures, Rilem, Juin, pp 1-11, 2005.

[2] Guellil M.K, “ Formulation des bétons autoplaçants par la méthode de la pâte en excès”, Mémoire de magister à l’université de Tlemcen, Algérie, 2012.

[3] Kennedy C.T., "The Design of Concrete Mixes", Proceedings of the American Concrete Institute, 36, pp. 373-400. 1940.

[4] Oh S.G., Noguchi T., Tomosawa F. , "Toward mix design for rheology of self compacting concrete", Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, pp. 361-37, 1999.

[5] Tangtermsirikul S, Van B. K., “Blocking criteria for aggregate phase of self-compacting high performance concrete”. In Proceedings of regional symposium on infrastructure development in civil engineering, décembre SC-4, pp 19-20, 1995.

[6] PETERSSON P., BILLBERG P., VAN B. K., “ A model for self-compacting concret”, Proceedings of International RILEM Conference on Production methods and workability of concrete, Paris, RILEM Publications S.A.R.L, p. 333-344, 1999.

[7] BUI V. K. and MONTGOMERY D., “Mixture porportioning method for selfcompacting high performance concrete with

minimum paste volume”, Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete, , Paris,RILEM Publications, p. 373-384, 1999.

[8] Turcry P., « Retrait et fissuration des bétons autoplaçants – influence de la formulation », thèse de doctorat, Université de Nantes, 2004.

[9] Bui V.K., Akkaya Y., Shah S.P., "Rheological Model for self-consolidating concrete", ACI Materials Journal, 99, 6, pp. 549-559, novembre-décembre, 2002.

[10] El Barrak M., « Contribution à l’étude de l’aptitude à l’écoulement des bétons auto placants à l’état frais », Thèse de doctorat à l’université Toulouse III – Paul Sabatier, France, 2005.

[11] RILEM, "Self-Compacting Concrete. State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 174-SCC", Edited by A. Skarendahl and O. Petersson, RILEM Publications, France, 2001.

[12] Taleb O., “Optimisation de la formulation des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux”, Mémoire de magister à l’université de Tlemcen, Algérie, 2009.