

SOMMAIRE

RESUME

ABSTRACT

LISTE DES TABLEAUXv

LISTE DES FIGURES..... vii

LISTE DES NOTATIONS ET DES ABREVIATIONS x

INTRODUCTION GENERALE.....1

CHAPITRE 1 : CONCEPTS & RHEOLOGIE DES BAP ET MBE

I. Introduction4

II. Méthodes de formulation des BAP.....4

II.1. Formulation par l'expérience5

II.2. La théorie de la pâte en excès.....6

II.3. Méthode de formulation chinoise10

II.3.1. Calcul du dosage des granulats10

II.3.2. Calcul du dosage en ciment et en eau12

II.3.3. Calcul du dosage en additions13

II.3.4. Calcul de la quantité d'eau nécessaire pour le BAP14

II.3.5. Calcul du dosage en superplastifiant (SP).....15

II.3.6. Ajustement de la quantité d'eau de gâchage.....15

II.3.7. Les essais de contrôle des propriétés des BAP15

III. Normalisation du béton autoplaçant16

III.1. La norme NF EN 206-116

III.1.1. Terminologie17

III.1.1.1. Le liant équivalent.....17

III.1.1.2. $E_{eff}/Liant_{équi}$ 19

III.1.2. Classification des bétons.....	19
III.1.2.1. Résistance caractéristique en compression à 28 jours.....	19
III.1.2.2. Classes de consistance	19
III.1.2.3. Classes de chlorures.....	19
III.1.2.4. Dimension des granulats	20
III.1.2.5. Classes d'exposition	20
III.2. La norme NF EN 206-9	22
III.2.1. Classification des BAP	23
III.2.1.1. Classes d'étalement	23
III.2.1.2. Classes d'aptitude à l'écoulement.....	23
III.2.1.3. Classes de résistance à la ségrégation.....	23
III.2.1.4. Essais de caractérisation des BAP.....	24
IV. Etude du comportement rhéologique des BAP	25
IV.1. Différents types de modèles d'écoulement appliqués aux bétons	27
V. Mortier du béton équivalent (MBE)	32
V.1. Principe de la méthode	32
V.2. Corrélation entre le béton et le MBE.....	34
VI. Bilan	37
Références bibliographiques	38

CHAPITRE 2 : PARAMETRES INFLUENTS SUR LES PROPRIETES DES BAP

I. Introduction	43
II. Influence des additions sur les propriétés des BAP.....	43
II.1 Les fillers calcaires	43
II.1.1 L'influence des fillers calcaires sur la rhéologie	44
II.1.2 L'influence des fillers calcaires sur la résistance	47

II.2. Cendres volantes	49
II.2.1. L'influence de la cendre volante sur la rhéologie	49
II.2.2. L'influence de la cendre volante sur la résistance	50
II.3. Fumées de silice	51
II.3.1. L'influence de la fumée de silice sur la rhéologie	51
II.3.2. L'influence de la fumée de silice sur la résistance	52
III. Influence des superplastifiants sur les propriétés des BAP	52
III.1. L'influence des superplastifiants sur la rhéologie	53
III.2. L'influence des superplastifiants sur la résistance	55
IV. Influence du volume de la pâte sur les propriétés des BAP	56
IV.1. Influence du volume de la pâte sur la rhéologie	56
IV.2. Influence du volume de la pâte sur la résistance	57
V. Influence du rapport E/C sur les propriétés des BAP	58
V.1. Influence du rapport E/C sur la rhéologie	58
V.2. Influence du rapport E/C sur la résistance	59
VI. L'influence du PF sur les propriétés des BAP	59
Références bibliographiques	61

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MATERIAUX

I. Le ciment	68
II. Les fillers calcaires	69
III. Les granulats	69
III.1. Le sable	70
III.2. Le gravier	71
III.3. Analyse granulométrique	72
IV. Eau de gâchage	75

V.	Les adjuvants	76
	Références bibliographiques	77

CHAPITRE 4 : PARTIE EXPERIMENTALE

I.	Formulation des BAP par la méthode chinoise	79
I.1.	Détermination du facteur de compacité « PF »	79
I.2.	Détermination du dosage minimal en ciment et du rapport $E_{eff}/L_{équi}$	81
I.3.	Détermination du rapport E/F	82
I.4.	Dosage de saturation	82
I.4.1.	Dosage de saturation pour une pâte de ciment	82
I.4.2.	Dosage de saturation pour une pâte de fillers calcaires	83
I.5.	Dosage en granulats	87
I.6.	Dosage en fillers calcaires	87
I.7.	Dosage en eau	88
II.	Caractérisation des bétons autoplaçants étudiés	90
II.1.	Essais de la norme 206-9	90
II.2.	Les essais rhéologiques	94
II.3.	Résistance des BAP	98
III.	Formulation des MBE	99
III.1.	Les essais rhéologiques des MBE	105
IV.	Corrélation BAP/MBE	107
V.	Etude comparative entre les méthodes de formulation	108
VI.	Bilan	110
	Références bibliographiques	111
	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	112
	ANNEXES	114

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1.Comparaison entre les spécifications de la norme NF EN 206-1 et la norme XP P 18-305.	17
Tableau 1.2. Annexe Nationale NA.5.2.5.2.2 de la norme NF EN 206-1.	18
Tableau 1.3. Classe de consistance.....	19
Tableau 1.4.Classes de chlorures à respecter en fonction de l'utilisation du béton.	20
Tableau 1.5. Les classes d'exposition.	21
Tableau 1.6.Valeurs limites spécifiées pour les classes d'exposition courantes.....	22
Tableau 1.7. Valeurs limites spécifiées pour les classes d'exposition particulières.....	22
Tableau 1.8. Les classes d'étalement.....	23
Tableau 1.9. Les classes d'aptitude à l'écoulement.	23
Tableau 1.10. Les classes de résistance à la ségrégation.	24
Tableau 1.11. Les essais et les valeurs recommandées caractérisant les BAP.....	24
Tableau 1.12. Ordres de grandeur des paramètres rhéologiques pour différents types de matériaux (Banfill, 2003).	29
Tableau 1.13. Effet de la variation des paramètres de composition du béton sur la contrainte de cisaillement.	32
Tableau 3.1. Composition chimique et minéralogique du ciment (%) (Taleb, 2009).....	68
Tableau 3.2. Propriétés physico – mécaniques du ciment (Taleb, 2009).....	68
Tableau 3.3. La masse volumique apparente et absolue du ciment.	69
Tableau 3.4. Propriétés chimiques des fillers calcaires (Taleb, 2009).....	69
Tableau 3.5. Composition chimique de la roche exploitée dans la carrière de Djebel Abiod (Hanini, 2012).....	70
Tableau 3.6. Caractéristiques physiques du sable.....	70
Tableau 3.7. Caractérisation physique du gravier.	72
Tableau 3.8. Analyse granulométrique du sable	73
Tableau 3.9. Analyse granulométrique du gravier 4/8.....	74
Tableau 3.10. Analyse granulométrique du gravier 8/16.....	74
Tableau 3.11. Caractéristiques chimiques de l'eau (Boukli, 2010).....	75

Tableau 3.12. Caractéristiques du superplastifiant « TEK – SUPERFLOW 2000 R »	76
Tableau 3.13. Caractéristiques du superplastifiant « UNICUM PC 6».....	76
Tableau 4.1. Résultats d'étalement des pâtes pures de ciment et de fillers.	82
Tableau 4.2. Formulation des pâtes de ciment selon un plan d'expérience.....	85
Tableau 4.3. Formulation des pâtes de fillers selon un plan d'expérience.	85
Tableau 4.4. Composition du BAP à base du superplastifiant SP1	88
Tableau 4.5. Composition du BAP à base du superplastifiant SP2	89
Tableau 4.6. Composition du BAP à base du superplastifiant SP1 pour les différents rapports F/L.....	89
Tableau 4.7. Composition du BAP à base du superplastifiant SP2 pour les différents rapports F/L.....	90
Tableau 4.8. Les résultats d'essai de stabilité au tamis des BAP à base du superplastifiant SP1	93
Tableau 4.9. Les résultats d'essai de stabilité au tamis des BAP à base du superplastifiant SP2.	94
Tableau 4.10. La surface développée du mélange des graviers.	100
Tableau 4.11. La surface développée du sable.....	101
Tableau 4.12. La surface développée du sable lavé.	102
Tableau 4.13. Composition du MBE à base du superplastifiant (SP1) pour les différents rapports F/L.....	103
Tableau 4.14. Composition du MBE à base du superplastifiant (SP2) pour les différents rapports F/L.....	103
Tableau 4.15. Comparaison de différentes approches de formulations.....	109

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1. Schéma explicatif de la théorie de la pâte en excès (El Barrak et col, 2004).	7
Figure 1.2. Critère de non-blocage et de fluidité (Turcry, 2004).	9
Figure 1.3. Illustration de la démarche de confection des BAP.	10
Figure 1.4. La viscosité plastique.	26
Figure 1.5. Approximation linéaire du modèle de Herschel – Bulkley par le modèle de Bingham.	27
Figure 1.6. Les différents types de modèles d'écoulement.	28
Figure 1.7. Composants du rhéomètre (Soualhi et col, 2012).	30
Figure 1.8. (a) résultats bruts, (b) résultats finaux.	31
Figure 1.9. Principe de formulation des MBE.	33
Figure 1.10. Cône d'Abrams et mini-cône.	34
Figure 1.11. Corrélation entre l'étalement MBE et l'affaissement du béton (Schwartzentruber et col, 2000).	35
Figure 1.12. Exemple de corrélation entre l'étalement du MBE et l'affaissement du béton (Projet National CALIBÉ, 2000).	35
Figure 1.13. Corrélation entre étalement MBE/ étalement BAP (Haifi, 2011).	36
Figure 1.14. Relation entre les diamètres finaux d'étalement- Béton/MBE (Mouret et col, 2011).	37
Figure 2.1. Illustration de l'effet filler	44
Figure 2.2. Evolution des propriétés rhéologiques des BAP en fonction de la surface spécifique des fillers calcaires (Esping, 2008).	45
Figure 2.3. Temps d'écoulement au V-funnel en fonction du pourcentage de fillers calcaires (Taleb, 2009).	46
Figure 2.4. Résistance à la compression à 28 jours en fonction du pourcentage de fillers (Taleb, 2009).	48
Figure 2.5. La résistance à la compression des pâtes de ciment (Felekoglu, 2007).	48
Figure 2.6. L'influence de la cendre volante sur la résistance (Khatib, 2008).	50
Figure 2.7. Dispersion des grains de ciment par répulsion électrostatique	54

Figure 2.8. Influence d'un superplastifiant sur la résistance à jeune âge (Meyer, 1979 cité par Boudchicha, 2007).....	55
Figure 2.9. Relation entre le volume de la pâte et l'étalement d'un BAP (Girish et col, 2010).	56
Figure 2.10. Influence du volume de pâte sur les résistances à la compression du BAP (Bouhamou, 2011).....	57
Figure 2.11. La variation d'étalement en fonction du rapport E/L (Bouhamou et col ,2008).....	58
Figure 2.12. La variation de la résistance à la compression en fonction du rapport E/L (Persson, 2001).....	59
Figure 2.13. Effet du PF sur la résistance du béton. (Su et col, 2003).....	60
Figure 3.1. Étapes pour la détermination du coefficient d'absorption du sable.	71
Figure 3.2. Courbes granulométriques des granulats.	75
Figure 4.1. Mode opératoire pour l'essai de compacité.....	80
Figure 4.2. Évolution des masses volumiques apparentes des granulats avant et après compactage en fonction du rapport S/G+S.....	80
Figure 4.3. Mini-cône	82
Figure 4.4. Variation de l'étalement de la pâte de ciment en fonction du dosage en superplastifiant.....	83
Figure 4.5. Variation de l'étalement de la pâte de fillers en fonction du dosage en superplastifiant.....	83
Figure 4.6. Iso-réponse de l'étalement de la pâte de ciment en fonction du rapport E/C et le dosage en superplastifiant.	86
Figure 4.7. Iso-réponse de l'étalement de la pâte de fillers en fonction du rapport E/F et le dosage en superplastifiant.	86
Figure 4.8. Les essais réalisés pour la caractérisation des BAP à l'état frais.	90
Figure 4.9. Etalement des BAP en fonction du pourcentage de fillers (SP1).	91
Figure 4.10. Etalement des BAP en fonction du pourcentage de fillers (SP2).	91
Figure 4.11. Temps d'écoulement au V-funnel en fonction du pourcentage de fillers calcaires (SP1).	92
Figure 4.12. Temps d'écoulement au V-funnel en fonction du pourcentage de fillers calcaires (SP2).	92

Figure 4.13. L'instabilité du béton (essai J-RING).	94
Figure 4.14. Rhéomètre utilisé pour les essais rhéologiques.....	95
Figure 4.15. Profil de vitesse imposé au cours des essais rhéologiques du béton.	95
Figure 4.16. Comportement rhéologique de BAP de référence.	96
Figure 4.17. L'influence des paramètres de composition sur la viscosité.	96
Figure 4.18. L'influence des paramètres de composition sur le seuil de cisaillement.....	97
Figure 4.19. Essai de compression.....	98
Figure 4.20. Résistance à la compression à 28 jours en fonction du pourcentage de fillers....	99
Figure 4.21. Etalement des MBE en fonction du pourcentage de fillers (SP1)	104
Figure 4.22. Etalement des MBE en fonction du pourcentage de fillers (SP2)	104
Figure 4.23. Manifestation d'instabilité de mortier.	105
Figure 4.24. Profil de vitesse imposé au cours des essais rhéologique du mortier.....	105
Figure 4.25. L'influence des paramètres de composition sur la viscosité du MBE.....	106
Figure 4.26. L'influence des paramètres de composition sur le seuil de cisaillement du MBE.	106
Figure 4.27. Relation entre l'étalement du BAP/MBE.....	107
Figure 4.28. Relation entre seuil de cisaillement du BAP/MBE.	107
Figure 4.29. Relation entre viscosité du BAP/MBE.....	108

LISTE DES NOTATIONS ET DES ABREVIATIONS

$\dot{\gamma}$	Le gradient de vitesse de cisaillement.
ρ_g	La masse volumique des gravillons.
ρ_s	La masse volumique du sable.
Ω	La vitesse de rotation de la pale.
σ'_c	Résistance à la compression.
τ_0	Le seuil de cisaillement.
μ	La viscosité plastique.
A	La quantité d'addition.
C	Dosage en ciment.
C_s	Compacité du sable.
C_g	Compacité du gravier.
D_{moy}	Diamètre moyen des granulats.
d_i	Le diamètre de la particule moyenne dans chaque tranche.
e_{min}	Distance minimale entre les granulats.
G_{CV}	La densité de la cendre volante.
G_{LHF}	La densité du laitier de haut fourneau.
G_c	Densité du ciment.
G_s	Densité du sable.
G_E	Densité d'eau.
G_g	Densité du gravier.
K	Coefficient dépend du type d'addition et varie entre 0 et 2.

$L_{\text{équivalent}}$	Le liant équivalent.
M	Le couple total appliqué sur le béton.
M_{pm}	La quantité totale des matériaux pouzzolanique (CV et LHF).
M_g	La masse des graviers.
M_s	La masse du sable.
M_0	Le couple à l'origine (frottement intrinsèque de l'agitateur).
M_g	Le dosage en gravillon.
M_i	La masse de chaque tranche granulaire.
N_{ga}	Le pourcentage des gros gravillons.
N_i	Le nombre de particules moyennes.
PF	Paking factor (facteur de compacité).
P_{vgm}	Le rapport entre le volume des gros granulats de classe m sur le volume total de granulats.
P_{vsn}	Le rapport entre le volume du sable de classe n sur le volume total de granulats.
R_b	Le rayon de la pale.
R_c	Le rayon du récipient.
SD	La surface développée.
S_i	La surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche granulaire.
s_i	La surface développée pour chaque type de particule moyenne.
SP	La dose du superplastifiant.
V	Le volume final.
V_a	Teneur en air dans le BAP.
V_{PCV}	Le volume de pâte à base de la cendre volante.
V_{PLHF}	Le volume de pâte à base de laitier de haut fourneau.

V_{abm}	Le volume bloqué des granulats de classe m.
V_{abn}	Le volume bloqué des granulats de classe n.
V_i	Le volume total de l'ensemble des particules contenues dans une tranche granulaire.
v_i	Le volume de chaque type de particule moyenne.
V_i	Volume de granulat.
V_{vide}	Volume des vides.
V_{bi}	Volume limite de granulats.
$V_{pâte_{min}}$	Volume minimal de la pâte.

INTRODUCTION GENERALE

L'évolution de la science et spécialement dans le domaine de la chimie, a permis, au cours de ces dernières années, le développement d'une nouvelle génération de bétons. Les performances mécaniques, physiques et esthétiques sont sans cesse développées, s'adaptant ainsi aux exigences de la mise en place et de l'environnement d'exposition.

Les recherches scientifiques concernant les mécanismes de défloculation et l'optimisation du squelette granulaire ont permis d'améliorer la rhéologie des bétons à l'état frais donnant naissance aux bétons autoplaçants (BAP).

La particularité des BAP réside dans le fait qu'ils sont extrêmement fluides et qu'ils ne nécessitent pas de moyen de serrage pour leur mise en place. Se compactant sous le seul effet de la gravité, ils peuvent être coulés dans des zones très ferraillées ou dans des zones d'architecture complexe et difficilement accessibles.

Des avancées certaines sur la formulation et la compréhension du comportement des BAP ont été accomplies, mais la maîtrise n'est pas encore acquise comme en témoigne la diversité des études.

Le BAP est plus sensible aux diverses variations des paramètres du mélange tels que le taux d'absorption des granulats, les adjuvants chimiques incorporés, la teneur des additions minérales. Afin d'assurer un meilleur contrôle de la performance de ces bétons, il est important de connaître et comprendre les effets de ces paramètres sur le comportement rhéologique, la stabilité et les propriétés mécaniques.

La première partie de notre travail est destinée à l'application d'une nouvelle approche de formulation des bétons autoplaçants en s'inspirant de la méthode chinoise et en intégrant la notion des classes d'expositions établies par la norme NF EN 206 -1.

La deuxième partie est consacrée à trouver des réponses sur le choix du superplastifiant et sur l'apport des fillers calcaires par le biais d'essais rhéologiques.

Nous essayerons, par la suite, de savoir s'il est possible de caractériser la fluidité des BAP à partir des mortiers dérivées « MBE » comme c'est le cas des bétons ordinaires.

Le mémoire comporte quatre chapitres. Le premier chapitre fournit une recherche bibliographique sur les approches de formulation et la rhéologie des BAP. Ce chapitre porte aussi sur les connaissances actuelles relatives aux mortiers de béton équivalent (MBE).

Une étude détaillée sur l'influence de certains constituants sur le comportement à l'état frais et durci des mélanges est présentée dans le chapitre deux.

La seconde partie de ce mémoire est réservée au travail expérimental qui se divise en deux chapitres 3 et 4. Le troisième chapitre traite les caractéristiques des matériaux utilisés dans ce projet.

Le dernier chapitre décrit le programme expérimental pour réaliser les objectifs déterminés pour ce mémoire. Ce programme comporte une démarche de formulation ainsi qu'une étude paramétrique afin de comprendre l'influence de deux types de superplastifiants ainsi que de l'influence de leur combinaison avec des fillers calcaires.

Enfin, nous terminerons ce chapitre par une étude comparative entre les approches déjà utilisées dans notre laboratoire « EOLE » et la méthode que nous avons adoptée pour formuler nos bétons autoplaçants.

Ce mémoire sera clôturé par une conclusion générale tout en synthétisant les principaux résultats trouvés et en suggérant de nouvelles perspectives de recherche sur ce nouveau matériau du génie civil.

Chapitre 1

CONCEPTS & RHEOLOGIE DES BAP ET MBE

Dans ce chapitre de bibliographie, on va aborder des connaissances récentes sur le béton autoplaçant (BAP) et sur les mortiers de béton équivalent (MBE) au point de vue de règles de formulation, des propriétés rhéologiques, des propriétés mécaniques. L'accent a donc été mis sur la rhéologie avec ses principes théoriques et l'explication des paramètres mis en jeu tels que la viscosité et le seuil de cisaillement.

SOMMAIRE DU CHAPITRE 1

I. Introduction.....	4
II. Méthodes de formulation des BAP	4
III. Normalisation du béton autoplaçant.....	16
IV. Etude du comportement rhéologique des BAP	25
V. Mortier du béton équivalent (MBE)	32
VI. Bilan	37
Références bibliographiques	38

I. Introduction

Les chercheurs de l'université de TOKYO ont lancé durant les années 80 l'idée du développement d'un béton très fluide qui ne nécessite pas des systèmes de vibration lors de la mise en place afin de diminuer les opérations coûteuses liées à la vibration. Ces bétons sont connus sous la dénomination des bétons autoplaçants (BAP).

Par définition les bétons autoplaçants sont des bétons très fluides, homogènes et stables. Ils se mettent en œuvre sans vibration et permettent de remplir des coffrages complexes où la densité en ferrailage est importante, ce qui constitue un grand avantage dans le domaine du bâtiment.

La formulation d'un BAP est beaucoup plus complexe que celle d'un béton ordinaire car il s'agit de concilier deux propriétés contradictoires : **la fluidité** et **la stabilité**. Beaucoup de recherches ont été faites sur l'optimisation et le développement de formulations de bétons autoplaçants. L'objectif principal de ces recherches est l'amélioration des performances du béton à l'état frais et durci.

II. Méthodes de formulation des BAP

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde (approche japonaise, approche de la pâte en excès, approche du LCPC, etc.) pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton. Ces différentes approches visant à concevoir des bétons autoplaçants ont abouti à des formulations de bétons ayant un volume de pâte plus important que celui des bétons ordinaires pour des résistances mécaniques égales. En effet, la présence de la pâte (mélange du ciment, des adjuvants, de l'eau efficace et des additions minérales) remplit les vides et écarte les granulats, minimisant ainsi les frictions et les frottements pour améliorer l'ouvrabilité et l'écoulement du béton.

Les BAP contiennent donc une quantité moins importante de graviers, et beaucoup plus de fines (particules inférieures à 80 microns). Les additions minérales (filler calcaire, cendre volante, fumée de silice, laitier, etc.) ont gardé leur rôle comme substituant partiel du ciment dans les BAP, leur utilisation non seulement réduit le coût du béton mais également améliore le remplissage de particules et diminue la perméabilité du béton. Par

conséquent, la durabilité du béton est également augmentée (Assié et col, 2007). Des additions organiques comme les superplastifiants sont aussi nécessaires pour les BAP. Elles permettent d'améliorer les propriétés rhéologiques du mélange pour un dosage en eau réduit. Différents matériaux sont de plus utilisés dans la réalisation d'un béton autoplaçant, comme les entraîneurs d'air, les retardateurs ou accélérateurs de prise, et les réducteurs d'eau.

Les équipes de recherche du domaine s'accordent sur le fait qu'il n'existe pas de méthode de formulation universelle car les matériaux employés et leurs qualités diffèrent selon les régions ou les pays.

Cependant, les approches de formulation s'affinent de plus en plus, gagnant aussi du terrain sur l'empirisme.

La formulation du béton autoplaçant reste un sujet d'intérêt pour la majorité des laboratoires de recherches des pays développés.

Le laboratoire EOLE avec son équipe de recherche « Matériau granulaire » n'échappe pas à cette règle. Raison pour laquelle, nous avons jugé utile, dans ce travail de comparer les approches déjà utilisées dans notre laboratoire et mettre en évidence une autre démarche connue sous l'appellation de « la méthode chinoise ».

II.1. Formulation par l'expérience

La méthode de formulation par l'expérience repose sur l'empirisme et le tâtonnement en fixant à priori certains paramètres comme :

- le dosage en ciment.
- le rapport Additions / Liants.
- le rapport E/L.
- le rapport G/S.
- le dosage en superplastifiant.

Le tâtonnement est basé sur certaines plages qui se sont dessinées pour chaque constituant dans les différents travaux de recherche publiés en prenant compte des caractéristiques des matériaux utilisés. Les gammes de valeurs généralement employées sont issues des recommandations provisoires de l'AFGC et présentées ci-dessous (AFGC, 2002) :

- une quantité de pâte élevée (comprise entre 34% et 40% du volume total du béton).
- une quantité de fines élevée (de l'ordre de 500 kg/m^3).
- utilisation d'un superplastifiant (un dosage proche du dosage à saturation).
- un faible volume de gravillons (rapport G/S de l'ordre de 1).
- un diamètre maximal de granulats réduit (inférieur à 20 mm).

Après la conception sur le papier, la formule ne peut être optimisée et vérifiée que par des tests empiriques effectués la plupart du temps directement sur béton pour définir les propriétés des BAP qui peuvent être divisées en trois critères :

- une mobilité en milieu non confiné (décrite par l'essai d'étalement) ;
- une mobilité en milieu confiné (décrite par la boîte en L) ;
- une stabilité (c'est-à-dire une résistance à la ségrégation et au ressuage).

L'analyse des travaux de recherche de Taleb et col. (2010), sur les BAP formulés sur la base de cette approche, a montré que les mélanges étaient toujours constitués d'un dosage en liant très élevé qui avoisinaient souvent 600 kg/m^3 .

Ceci avait pour conséquence d'augmenter significativement le dosage en eau qui était nécessaire pour assurer les caractéristiques rhéologiques des BAP étudiés car la teneur en fines était très importante.

Néanmoins, il est difficile de constater l'influence de cette teneur en eau élevé sur la résistance des bétons car ces derniers étaient sur dosés en ciment.

II.2. La théorie de la pâte en excès

Le béton est considéré ici comme un mélange bi-phasique : phase fluide (pâte) et d'une phase solide (granulats). Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant, non seulement pour couvrir la surface des agrégats, de manière à minimiser la friction entre eux ; mais aussi pour lui assurer une meilleure fluidité.

Le principe de formulation des BAP par la méthode de la pâte en excès est schématisé sur la Figure 1.1.

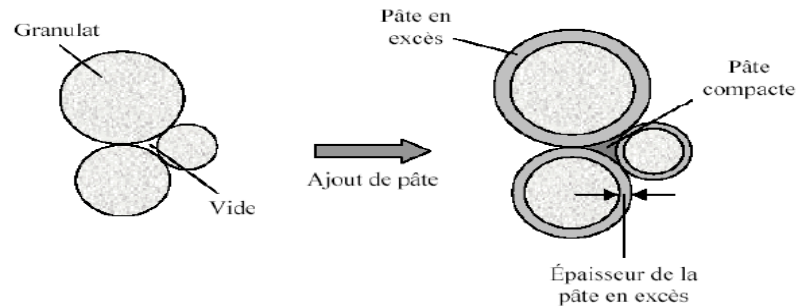


Figure 1.1. Schéma explicatif de la théorie de la pâte en excès (El Barrak et col, 2004).

A partir de ce principe, plusieurs travaux ont été réalisés en adoptant chacun différentes approches pour déterminer cette quantité de pâte de ciment.

Oh et col. (1999) ont obtenu par l'expérience des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granules et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte. Lors de la formulation, il faut d'abord optimiser et caractériser la rhéologie de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton. Les auteurs ne proposent pas de méthode pour doser la pâte (Turcry, 2004).

La notion d'excès de pâte a également été proposée par Chanvillard et col. (cité dans Turcry, 2004) dans une méthode de formulation des bétons de sable.

Tangtermsirikul et col. (1995), Petersson (1999) et Bui et col. (1999) ont proposé une approche similaire du dosage de la pâte, mais cette fois en supposant que le volume de la pâte joue deux rôles dans un BAP: D'abord, il fluidifie le matériau en limitant les contacts entre les granules et ensuite, il écarte suffisamment les gravillons pour éviter la formation de voûtes contre les armatures, responsables de blocages lors de l'écoulement. Les auteurs ont montré qu'il existe un volume minimum de pâte permettant de répondre à deux critères :

- **Critère de fluidité**

Ce critère conduit à définir un volume minimal de la pâte décrit par l'équation (1.1) :

$$V_{\text{pâte min}} = 1 - \frac{1 - V_{\text{vide}}}{\left(\frac{e_{\text{min}}}{D_{\text{moyen}}} + 1 \right)^3} \quad (1.1)$$

Où D_{moy} est le diamètre moyen des granulats (mm), e_{mini} est la distance minimale entre les granulats nécessaire pour fluidifier le béton.

- **Critère de non-blocage**

Il s'agit d'introduire un volume limite de granulats (V_{bi}) de taille d_i , au-delà duquel le béton ne s'écoule plus en milieu confiné.

Le risque de blocage est écrit en fonction du rapport du volume V_i de granulat d_i et de son volume limite V_{bi} .

$$R = \sum_i \frac{V_i}{V_{bi}} \quad (1.2)$$

En posant $R = 1$, on aura l'équation (1.3) qui donne le volume de pâte, pour $1m^3$ de béton, en deçà duquel il y a risque de blocage lors de l'écoulement du béton en milieu confiné.

$$V_{bmin} = 1 - \frac{\rho_g + (\rho_s - \rho_g)N_{ga}}{\sum \frac{P_{vgm} N_{ga} \rho_s}{V_{abm}} + \sum \frac{P_{vs n} (1 - N_{ga}) \rho_g}{V_{abn}}} \quad (1.3)$$

P. Turcry (2004) a appliqué cette approche dans ses travaux, il a utilisé les données publiées par les auteurs, concernant le coefficient e_{mini} et le volume limite de granulats V_{bi} , d'après le résultat des calculs montré dans la Figure 1.2 et pour un rapport $E/(C + F)$ égal à 0,3 il a remarqué que le critère de non-blocage est largement prépondérant par rapport à celui de la fluidité.

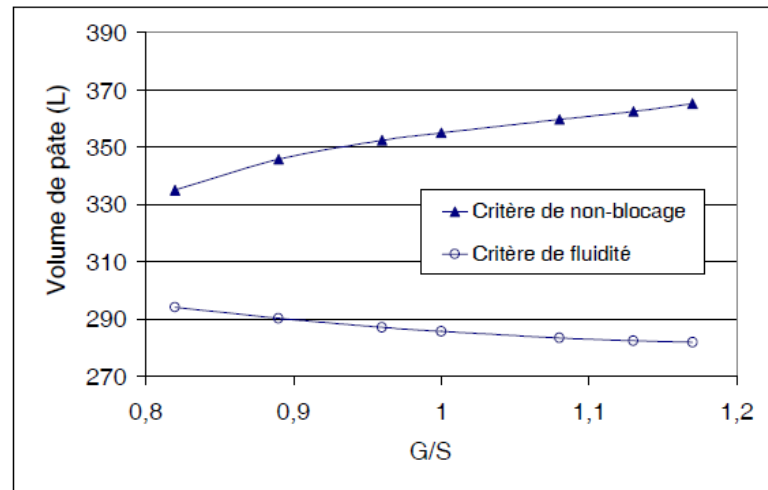


Figure 1.2. Critère de non-blocage et de fluidité (Turcry, 2004).

Cependant, il y a toujours des chercheurs qui n'hésitent pas à remettre en question certaines demandes. Raison pour laquelle, quelques années plus tard, M. El Barrak (2005), en se basant sur la théorie de la pâte en excès a quantifié le volume de pâte nécessaire à l'écoulement autoplçant. Pour mettre en œuvre cette théorie il a supposé que les granulats dans le béton (ou le mortier) sont sphériques, et que la distribution granulométrique dans le béton est uniforme et continue. En couplant cette représentation au modèle d'empilement compressible il a défini un facteur d'homothétie (k) qui relie l'épaisseur de pâte en excès au diamètre du granulat tout en supposant que l'épaisseur de la pâte en excès, est proportionnelle à la taille du granulat.

Afin de confirmer cette méthodologie en utilisant des matériaux locaux, M.K. Guellil (2012) a étudié le rôle de la pâte de ciment déterminée par la méthode de formulation de la pâte en excès. Pour ce faire, il a travaillé sur deux échelles : celle de la pâte dans un premier temps, ensuite sur celle du béton. Ce passage de l'échelle de la pâte à celui du béton se fera par paliers successifs d'ajout de granulats et d'eau.

La Figure 1.3 schématise la démarche pour aboutir à un béton autoplçant.

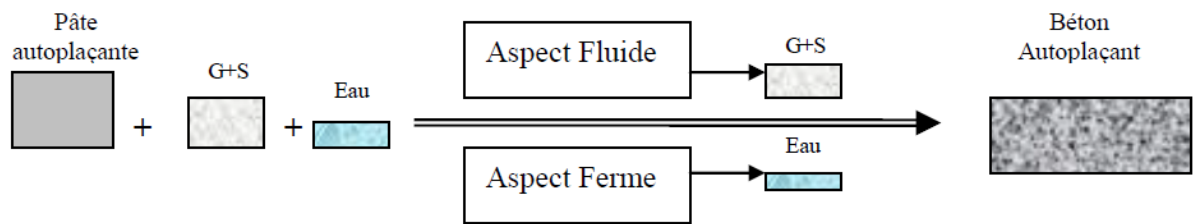


Figure 1.3. Illustration de la démarche de confection des BAP.

Partant d'une pâte autoplaçante, il a montré qu'il est possible d'obtenir des bétons satisfaisant aux critères autoplaçants admis à l'état frais. En l'associant à des squelettes définis par un rapport massique gravier / sable.

Cependant, nous avons constaté que l'ensemble des formulations présentaient le caractère d'être légèrement sous dosés en granulats où la somme des masses des différentes classes granulaires n'atteignaient pas les 1500 kg/m^3 , ce qui avait une incidence directe sur la densité du béton.

II.3. Méthode de formulation chinoise

Su et col. (2001, 2003) ont développé une méthode alternative pour la composition du BAP, dénommée « méthode chinoise ».

La méthode chinoise se base sur la détermination d'un facteur de compacité « PF » du mélange des agrégats (sable et gravier) pour optimiser le squelette granulaire. Les vides entre ces agrégats seront comblés par la pâte.

Le volume de la pâte est optimisé de façon à satisfaire les exigences de résistance et de durabilité. Le dosage en superplastifiant est vérifié expérimentalement à l'échelle du béton pour assurer l'ouvrabilité requise. Néanmoins la détermination du dosage de saturation du superplastifiant sur des coulis est toujours possible.

Selon cette méthode, la formulation du BAP passe par les étapes suivantes :

II.3.1. Calcul du dosage des granulats :

Il s'appuie sur la notion du facteur de compacité PF évalué expérimentalement. Ce facteur représente le rapport entre la masse volumique apparente de l'empilement granulaire compacté par vibration et la masse volumique du squelette à l'état empilé sans compactage.

Les dosages en gravillon M_g (Kg/m^3) et le sable M_s (Kg/m^3) sont donnés respectivement par les deux équations suivantes :

$$M_g = PF \cdot \rho_g \cdot \left(1 - \frac{S}{S + G} \right) \quad (1.4)$$

$$M_s = PF \cdot \rho_s \cdot \left(\frac{S}{S + G} \right) \quad (1.5)$$

Avec

ρ_g : la masse volumique apparente des graviers exprimée en (Kg/m^3).

ρ_s : la masse volumique apparente du sable exprimée en (Kg/m^3).

$\frac{S}{S + G}$: Volume du sable sur le volume totale des granulats.

Une valeur plus élevée du « PF » est signe d'une plus grande quantité de granulats utilisés, ce qui impliquera une diminution de la teneur en liant dans le BAP. Par conséquent, la capacité de passage du béton autoplaçant et sa résistance à la compression seront réduites. D'autre part, une faible valeur de PF aura pour conséquence des risques d'un retrait de séchage important du béton (Su et col, 2001).

Donc, il est important de choisir la valeur optimale du « PF » dans le procédé de formulation du mélange de façon à répondre aux exigences concernant les propriétés du BAP, et au même temps de prendre en considération le côté économique.

La détermination du « PF » pourra être effectuée sur la base d'essai de compacité sur le sable et le gravier séparément. Les résultats sont par la suite traités par le logiciel RENE LCPC (El Hilali, 2009). Cependant il est aussi possible d'effectuer des essais de compacité directement sur des combinaisons de matériaux.

Les compacités des matériaux sont déterminées par la méthode de vibration avec compression.

a. compacité du sable :

La compacité du sable est déterminée sur un échantillon de 3kg dans une éprouvette 16×32cm solidarisé à une table vibrante. Une pression de 10kPa (masse de 20 kg) a été appliquée avec 150Hz pour des vibrations de 1min.

Deux modes de compactage ont été utilisés: avec et sans vibration. Les compacités peuvent être calculées comme l'indique l'équation suivante:

$$C_s = \frac{3}{\rho_s \times V} \quad (1.6)$$

Avec

ρ_s : La masse volumique du sable (kg/m^3).

V : Le volume final (m^3).

b. compacité du gravier :

La compacité du gravier est obtenue de la même manière que celle du sable, mais sur un échantillon de 7,5 kg, elle peut être calculée par l'équation suivante:

$$C_g = \frac{7.5}{\rho_g \times V} \quad (1.7)$$

Avec :

ρ_g : La masse volumique du gravier (kg/m^3).

V : Le volume final (m^3).

II.3.2. Calcul du dosage en ciment et en eau

Le dosage en ciment est calculé en fonction de la résistance à la compression imposée par le cahier de charge. Quant au rapport $\frac{E}{C}$ il est déterminé expérimentalement pour répondre aux exigences de la durabilité.

Selon le *“Guide to Construction of High Flowing Concrete”* (Su et col, 2001), la quantité minimale de ciment à utiliser pour la production de béton normal et le béton à haute durabilités ont respectivement 270 et 290 kg/m^3 .

Le dosage en ciment est déterminé à partir d'une formule empirique faisant intervenir uniquement la résistance souhaitée.

$$C = \frac{\sigma'_c}{0.14} \quad (1.8)$$

Avec

C : Dosage en ciment (kg/m^3).

σ'_c : Résistance à la compression (MPa).

Ou encore :

$$C = \frac{\sigma'_c}{20} \quad (1.9)$$

Dans ce cas σ'_c est considérée en psi (1 bar = 14.51 psi).

De la formule (1.8) on constate que les chercheurs estiment qu'un kilogramme de ciment offre 0.14 MPa. Cette formule reste grotesque puisqu'elle ne prend pas en considération le rapport $\frac{E}{C}$

II.3.3. Calcul du dosage en additions

Le procédé de formulation du mélange proposé par Su et col. (2001) utilise la cendre volante (CV) et le laitier de haut fourneau (LHF) pour améliorer considérablement la maniabilité et la durabilité du béton de façon économique et d'une manière écologique. Les auteurs ont déterminé les rapports (E/CV) et (E/LHF) de telles façons que les fluidités des pâtes de la cendre volante et le laitier de haut fourneau sont identiques à celle de la pâte pure de ciment. Ensuite, ils ont calculé le volume de pâte à base de la cendre volante (V_{PCV}) et celle à base de laitier (V_{PLHF}) selon la formule suivante:

$$V_{PCV} + V_{PLHF} = 1 - \frac{M_g}{1000 \times G_g} - \frac{M_s}{1000 \times G_s} - \frac{C}{1000 \times G_c} - \frac{E_c}{1000 \times G_E} - V_a \quad (1.10)$$

Avec :

G_g : Densité du gravier.

G_s : Densité du sable.

G_c : Densité du ciment.

G_E : Densité d'eau.

V_a : Teneur en air dans le BAP (%).

La masse totale des additions minérales (CV et LHF) peut être calculée en utilisant l'équation (1.11) :

$$V_{PCV} + V_{PLHF} = \left(1 + \frac{E}{CV}\right) \times A\% \times \frac{M_{pm}}{1000 \times G_{CV}} + \left(1 + \frac{E}{LHF}\right) \times B\% \times \frac{M_{pm}}{1000 \times G_{LHF}} \quad (1.11)$$

Avec:

M_{pm} : La quantité totale des matériaux pouzzolanique (CV et LHF) exprimé en kg/m^3

$A\%$ et $B\%$ sont respectivement les pourcentages envisagés de la cendre volante et le laitier de haut fourneau dans le mélange.

G_{CV} et G_{LHF} sont respectivement les densités de la cendre volante et du laitier de haut fourneau.

Les teneurs en cendre volante (M_{CV}) et en laitier de haut fourneau (M_{LHF}) sont définies par les équations (1.12) et (1.13) :

$$M_{CV} = A\% \times M_{pm} \quad (1.12)$$

$$M_{LHF} = B\% \times M_{pm} \quad (1.13)$$

II.3.4. Calcul de la quantité d'eau nécessaire pour le BAP

Connaissant la masse de chaque addition, ainsi que les rapports $\frac{E}{CV}$ et $\frac{E}{LHF}$ déterminés expérimentalement au préalable, il est donc possible de calculer le volume nécessaire pour les cendres volantes et le laitier de haut fourneau.

La teneur en eau de gâchage du BAP étudié est la quantité totale d'eau nécessaire pour le ciment, CV et LHF . Par conséquent elle peut être déterminée de la manière suivante :

$$E = E_C + E_{CV} + E_{LHF} \quad (1.14)$$

II.3.5. Calcul du dosage en superplastifiant (SP)

L'utilisation d'un superplastifiant est nécessaire pour l'amélioration de la fluidité. Cependant le dosage doit être optimal pour éviter tout risque de ségrégation et de ressuage et répondre ainsi aux exigences de conception.

La teneur en eau apportée par le SP peut être considérée comme une partie de l'eau de gâchage. Si la dose du SP utilisée est égale à $n\%$ de la quantité de liants et sa teneur en extrait sec est de $m\%$, le dosage peut être écrit de la manière suivante :

$$SP = n\% (C + M_{CV} + M_{LHF}) \quad (1.15)$$

Et la quantité d'eau apportée par le superplastifiant sera égale :

$$E_{SP} = (1 - m\%) \times SP \quad (1.16)$$

II.3.6. Ajustement de la quantité d'eau de gâchage

La quantité réelle d'eau utilisée pour le mélange doit être ajustée selon la teneur en humidité des agrégats.

II.3.7. Les essais de contrôle des propriétés des BAP

Afin de valider la formulation, des tests de contrôle de qualité des BAP ont été effectués pour s'assurer que les conditions suivantes sont remplies.

- 1- Les résultats des essais d'étalement, L-Box, V-funnel devraient être conformes aux recommandations et normes en vigueur.
- 2- l'homogénéité du mélange doit être satisfaisante.
- 3- Le rapport eau/liants doit satisfaire aux exigences de durabilité et de résistance.
- 4- La teneur en air doit répondre à l'exigence de la conception du mélange.

Si les résultats des tests de contrôle de qualité mentionnés ci-dessus ne parviennent pas à satisfaire les performances requises du béton frais, des ajustements doivent être faits jusqu'à ce que toutes les propriétés de BAP satisfassent toutes les exigences spécifiées.

La méthode proposée par Su et col. (2001) a permis d'obtenir des BAP qui répondent aux exigences demandées pour ce type de béton à l'état frais mais aussi à l'état durci.

Cette méthode est plus facile à réaliser, et se traduit par moins de pâte. Cela permet d'économiser les constituants les plus chers, comme le ciment ; et permettra également

de favoriser la performance technique du béton, vu qu'un volume important en granulats sera avantageux sur le plan de la résistance, la rigidité, la perméabilité, le fluage et le retrait (Brouwers et col, 2005).

Sur la base des résultats obtenus, les auteurs ont tiré les conclusions suivantes :

- 1- les bétons obtenus comportent plus de sable (54 – 60% en volume dans le mortier).
- 2- le paramètre essentiel pour cette étude est le facteur (PF) qui a une incidence directe sur la résistance et la fluidité.
- 3- La quantité de liants utilisés dans le procédé proposé peut être inférieure à celle requise par d'autres procédés de conception de mélange en raison de la teneur accrue en sable. Dans cette étude, la teneur maximale de liants utilisés est de 397 kg / m^3 , qui est inférieure à 500 kg / m^3 en liant tel que suggéré par la méthode de formulation japonaise (Sebaibi et col, 2013).

III. Normalisation du béton autoplaçant

Le béton autoplaçant fait l'objet de règles complémentaires dans la norme NF EN 206-9. Cette norme précise les règles qui s'appliquent au BAP en complément des règles communes aux bétons spécifiées dans la norme NF EN 206-1.

III.1. La norme NF EN 206-1

Au courant de l'année 2004, la norme NF EN 206-1 a été publiée en France afin de remplacer l'ancienne norme expérimentale XP P 18-305, concernant la fabrication des bétons de structure. Cette norme a entraîné des modifications au niveau des critères de résistance, des contrôles à effectuer, des classes d'environnement des bétons, elle s'applique à tous les bétons de structure : bétons fabriqués sur chantier, bétons prêts à l'emploi et bétons pour produits préfabriqués.

Le tableau ci-dessous présente une comparaison des spécifications de l'ancienne norme avec la nouvelle :

Tableau 1.1. Comparaison entre les spécifications de la norme NF EN 206-1 et la norme XP P 18-305.

Norme XP P 18-305	Norme NF EN 206-1
Classe de résistance en compression	Classe de résistance en compression
Classe d'environnement	Classe d'exposition
Type de béton	
Classe de consistance	Classe de consistance
Granularité du béton	Dimension maximale nominale des granulats
Désignation normalisée du ciment et de l'addition	
	Classe de teneur en chlorures

La norme NF EN 206-1 régit les différentes normes applicables à l'exécution des ouvrages en béton, les divers codes de calcul (eurocode 2), les normes des composants tel que le ciment : (NF EN 197-1), les granulats (NF EN 12620), les adjuvants : (NF EN 934-2), les additions : (NF EN 450-1), les normes des essais sur béton frais et durci : (NF EN 12350 et NF EN 12390) et les normes d'exécution (DTU). Elle est donc aujourd'hui incontournable et constitue une étape importante dans l'amélioration de la qualité et la durabilité des bétons.

III.1.1. Terminologie

L'arrivée de la nouvelle norme NF EN 206-1 a introduit deux nouvelles notions au béton :

- le liant équivalent.
- L'eau efficace.

III.1.1.1. Le liant équivalent

Le liant équivalent est définie dans le paragraphe 5.2.5.2 de la norme NF EN 206-1 :

$$L_{\text{équivalent}} = C + K \cdot A \quad (1.17)$$

C : est la quantité de ciment, de type CEM I 42,5 N, CEM I 42.5 R, CEM I 52.5 N, CEM I 52.5 R

A : est la quantité d'addition, et ne doit pas dépasser, ni pour le calcul du Liant équivalent, ni pour le calcul du rapport $E_{\text{eff}}/L_{\text{liant éq}}$, la valeur maximale définie par le

rapport $A/(A+C)$ pour chaque type d'addition et chaque classe d'exposition. Les additions pouvant être prises en compte pour le calcul du liant équivalent sont celles dont l'aptitude générale à l'emploi est établie selon des normes.

K : dépend du type d'addition et varie entre 0 et 2. Cette approche était déjà introduite dans la norme précédente NF P 18-305, et a été reprise de la norme NF EN 206-1 (Tableau 1.2).

Tableau 1.2. Annexe Nationale NA.5.2.5.2.2 de la norme NF EN 206-1.

Dénomination de l'addition	Valeur de coefficient K	Condition supplémentaire à remplir
Addition de type II		
Cendre volante pour le béton	0.60	Si $i_{28} \geq 0.83$ et $i_{90} \geq 0.95$
	0.50	Si $i_{28} \geq 0.83$ et $i_{90} \geq 0.95$
	0.40	Si $i_{28} \geq 0.83$ et $i_{90} \geq 0.95$
Fumée de silice	2.00	Si dans les expositions XA $E/C \leq 0.45$ et $C \geq 295 \text{ kg/m}^3$ Si dans expositions différentes de XA $E/C \leq 0.45$ et $C \geq 280 \text{ kg/m}^3$
	1.00	Dans les autres cas ou sur prescription particulière
Laitiers vitrifiés moulus de haut-fourneau, de classe B	0.90	$h_{3/7}$ $h_{3/28}$
Addition de type I		
Addition calcaires	0.25	$i_{28} \geq 0.71$
Addition siliceuses de classe A	0.25	$i_{28} \geq 0.71$
Toutes additions		
Pour les quantités d'additions dépassant les valeurs indiquées au Tableau NA.F.1 au tableau NA.F.2 et	0.00	
Pour les autres ciments ou les autres additions que celles mentionnées dans NA.5.2.5.2.1		
NOTE i_{28} , i_{90} , $h_{3/28}$ et $h_{3/7}$ sont des indices d'activité ou de pouvoir hydraulique déterminés selon les normes d'essais de l'addition considérée.		

III.1.1.2. $E_{\text{eff}}/\text{Liant}_{\text{équi}}$

Le rapport $E_{\text{eff}}/\text{Liant}_{\text{équi}}$ est en fonction de la classe d'exposition.

III.1.2. Classification des bétons

III.1.2.1. Résistance caractéristique en compression à 28 jours

La résistance caractéristique est définie avec un fractile de 5 % quel que soit le niveau de résistance du béton.

La norme XP P18-305 admettait 10 % de résultats en dessous de la résistance caractéristique spécifiée jusqu'à 30 MPa et 5 % au-dessus de 30 MPa.

La norme NF EN 206-1 impose donc des spécifications plus sévères, gage de plus grande qualité.

III.1.2.2. Classes de consistance

Il existe 5 classes de consistance des bétons (S1 à S5). La mesure de l'affaissement est réalisée à l'aide du cône d'Abrams (Slump test).

Tableau 1.3. Classe de consistance selon la norme NF EN 206-1.

Classe de consistance	S1	S2	S3	S4	S5
Affaissement (mm)	10-40	50-90	100-150	160-210	> 220

Les consistances peuvent également être spécifiées par d'autres essais, temps VEBE, indice de serrage ou diamètre d'étalement.

Il est à noter que les BAP sont classés dans la catégorie S5.

III.1.2.3. Classes de chlorures

Quatre classes de chlorures sont définies dans la norme NF EN 206-1 (0,20 ; 0,40 ; 0,65 et 1,0). Ce rapport correspond à la teneur maximale en ions Cl^- rapportée à la masse de ciment.

Tableau 1.4. Classes de chlorures à respecter en fonction de l'utilisation du béton.

L'utilisation du béton	Classe de chlorures	Teneur maximale en ions chlorure (Cl ⁻) rapportée à la masse de ciment + additions prise en compte
Contenant des armatures de précontrainte en acier	Cl 0,20	0,20%
Contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées	Cl 0,40	0,40%
Contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées et formulées avec des ciments de type CEM III	Cl 0,65	0,65%
Ne contenant ni armatures en acier, ni pièces métalliques noyées	Cl 1,0	1 %

III.1.2.4. Dimension des granulats

Le béton est spécifié selon la dimension maximale des granulats. La classification est fonction de la dimension nominale supérieure du plus gros granulat présent dans le béton, Cette dimension est appelée D_{\max} .

Aïtcin (2001) a précisé que l'utilisation d'un gros granulat ayant un diamètre maximal faible avait pour conséquence d'augmenter la résistance à la compression dans un béton. A titre d'exemple, la production d'un béton de 100 MPa exige généralement l'utilisation d'un gros granulat ayant un diamètre maximal de 10 à 14 mm.

Dans le même ordre d'idée, le même auteur a aussi précisé qu'il est aussi préférable, d'augmenter la grosseur du sable lorsque le dosage en ciment augmente. Un sable ayant un module de finesse entre 2,7 et 3,0 est recommandé dans ce cas.

III.1.2.5. Classes d'exposition

La norme NF EN 206-1 définit plusieurs classes d'exposition suivant le type d'agression que le béton peut avoir à subir dans l'ouvrage.

Tableau 1.5. Les classes d'exposition selon la norme NF EN 206-1.

Classe d'exposition "courantes"	X0	Aucun risque de corrosion, ni d'attaque (gel/dégel, abrasion, attaque chimique)		
	XC	Corrosion induite par carbonatation	XC1	Sec ou humide en permanence.
			XC2	Humide rarement sec
			XC3	Humidité modérée
			XC4	Alternance d'humidité et de séchage
	XF	Attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage	XF1	Faible saturation en eau sans agent de déverglaçage
			XF2	Faible saturation en eau avec agents de déverglaçage
			XF3	Forte saturation en eau sans agent de déverglaçage
			XF4	Forte saturation en eau avec agents de déverglaçage
Classes d'exposition "particulières"	XS	Corrosion induite par des chlorures présents dans l'eau de mer.	XS1	Exposé à l'air véhiculant du sel marin mais pas en contact direct avec l'eau de mer.
			XS2	Immergé en permanence.
			XS3	Zones de marnage, zones soumises à des projections ou à des embruns.
	XD	Corrosion induite par des chlorures ayant une origine autre que marine.	XD1	Humidité modérée
			XD2	Humide, rarement sec
			XD3	Alternance d'humidité et de séchage
	XA	Attaque chimique.	XA1	Environnement à faible agressivité chimique
			XA2	Environnement d'agressivité chimique modérée
			XA3	Environnement à forte agressivité chimique

Pour les classes d'exposition courantes, les valeurs limites spécifiées sont représentées dans le tableau 1.6.

Tableau 1.6. Valeurs limites spécifiées pour les classes d'exposition courantes selon la norme NF EN 206-1.

Classe d'exposition	X0	XC1/XC2	XF1 XC2, XC4, XD1	XF2	XF3	XF4
E_{eff}/Liant équivalent maximal	-	0,65	0,60	0,55	0,55	0,45
Classe de résistance minimale	-	C20/25	C25/30	C25/30	C25/30	C30/37
Teneur minimale en liant équivalent (kg/m³)	150	260	280	300	315	340
Teneur minimale en air (%)	-	-	-	4	4	4
Additions maximales ex : cendres volantes	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,15

Pour les classes d'exposition particulières, les valeurs limites spécifiées sont représentées dans le tableau 1.7.

Tableau 1.7. Valeurs limites spécifiées pour les classes d'exposition particulières.

Classe d'exposition	MARINS		CHLORES		CHIMIQUE		
	XS2/XS1	XS3	XD2	XD3	XA1	XA2	XA3
E_{eff}/Liant équivalent maximal	0,55	0,50	0,55	0,50	0,55	0,50	0,45
Classe de résistance minimale	C30/37	C35/45	C30/37	C35/45	C30/37	C35/45	C40/50
Teneur minimale en liant équivalent (kg/m³)	330	350	330	350	330	350	385
Teneur minimale en air (%)	-	-	-	-	-	-	-
Additions maxi ex : cendres volantes	0,15	0,15	0,15	0,15	0,30	0,15	0,00
Nature de ciment	PM	PM	-	-	-	-	-

III.2. La norme NF EN 206-9

Cette norme complète la norme NF EN 206-1 et donne les règles qui s'appliquent au béton autoplaçant (BAP). Les règles communes ne sont pas reprises dans cette norme.

Outre les exigences définies dans la norme NF EN 206-1, cette norme européenne définit des exigences relatives :

- aux constituants du BAP ;
- aux propriétés du BAP frais et durci et à leur vérification ;
- aux limitations applicables à la composition du BAP ;
- à la spécification du BAP ;
- aux procédures de contrôle de la production en usine ;
- aux critères de conformité.

III.2.1. Classification des BAP

III.2.1.1. Classes d'étalement

La norme NF EN 206-9 définit 3 classes de consistance, l'étalement est mesuré à l'aide du cône d'Abrams (Slump test).

Tableau 1.8. Les classes d'étalement selon la norme NF EN 206-1.

CLASSE	ETALEMENT en mm
SF1	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	760 à 850

III.2.1.2. Classes d'aptitude à l'écoulement

L'aptitude à l'écoulement est associée à la capacité du BAP à s'écouler de manière homogène dans des zones à forts ferrailages.

Il existe 2 classes d'aptitude à l'écoulement. Le taux de remplissage est déterminé par l'essai de L-BOX.

Tableau 1.9. Les classes d'aptitude à l'écoulement selon la norme NF EN 206-1.

CLASSE	TAUX DE REMPLISSAGE
PL1	$\geq 0,80$ avec 2 armatures
PL2	$\geq 0,80$ avec 3 armatures

III.2.1.3. Classes de résistance à la ségrégation

La valeur de stabilité au tamis, qui décrit la résistance à la ségrégation, est fondamentale pour l'homogénéité et la qualité in situ du BAP.

Tableau 1.10. Les classes de résistance à la ségrégation selon la norme NF EN 206-1.

Classe	Pourcentage de laitance
SR 1	≤ 20
SR 2	≤ 15

III.2.1.4. Essais de caractérisation des BAP

Lors de la formulation, la caractérisation du béton autoplaçant est nécessaire. Cela consiste à connaître son comportement à l'état frais à partir de tests mis en place depuis son développement. Les principaux tests réalisés sont empiriques, et ont pour objectif de vérifier les différentes propriétés des BAP.

Dans cette partie nous regrouperons les principaux tests d'ouvrabilité disponibles dans notre laboratoire (EOLE) pour la caractérisation des bétons autoplaçants dans le tableau 1.11 avec leurs valeurs cibles préconisées par l'AFGC :

Tableau 1.11. Les essais et les valeurs recommandées caractérisant les BAP.

Essai	Description de l'essai	Classe	Les valeurs recommandées
Étalement au cône d'Abrams	L'essai classique au cône d'Abrams est utilisé pour mesurer un étalement, dont le diamètre D donne une indication sur la mobilité du béton dans un milieu non confiné.	SF ₁	550 - 650 mm
		SF ₂	660 - 750 mm
		SF ₃	760 - 850 mm
Écoulement au V-funnel	L'essai consiste à mesurer le temps d'écoulement du béton dans un espace limité. Cet essai permet aussi d'évaluer la stabilité du béton lors de l'écoulement.	VF ₁	t ≤ 8 s
		VF ₂	9 ≤ t ≤ 25 s
Boite en L	Lors de l'essai, la partie verticale de la boîte en «L» est remplie de béton puis la porte s'ouvre permettant l'écoulement à travers trois armatures. Le taux de remplissage final H ₂ /H ₁ renseigne sur la mobilité du béton en milieu confiné.	H ₂ /H ₁	≥ 80 %
		T ₂₀	< 1,5 s
		T ₄₀	< 3,5 s
J-Ring	L'essai du J-Ring (Japanese Ring) consiste à associer un anneau d'armatures à l'essai de l'étalement au cône d'Abrams, il permet de caractériser la mobilité du béton en milieu confiné. Cet essai peut remplacer la boîte en L.	SF - SFJring	< 5 cm
stabilité au tamis GTM	Il consiste à déposer 4.8 kg de béton sur un tamis de maille 5 mm. Après deux minutes de tamisage, nous pesons la quantité de mortier (laitance) ayant traversé le tamis. Le pourcentage de laitance P par rapport à la masse initiale donne l'indice de ségrégation.	0% ≤ P ≤ 15%	
		15% ≤ P ≤ 30%	
		P ≥ 30%	

IV. Etude du comportement rhéologique des BAP

La rhéologie est la science des déformations et de l'écoulement de la matière, elle décrit les relations entre les contraintes et les déformations d'un élément de volume, compte tenu, le cas échéant, de leur dérivée par rapport au temps. On dit qu'un élément est en écoulement si le degré de déformation change en fonction du temps (Phan, 2007).

Le comportement rhéologique d'un élément de volume d'un corps est la manière dont ces déformations correspondent aux contraintes imposées sur ce corps. Ce comportement peut être étudié à différents niveaux : le béton, le mortier, la pâte et le fluide (mélange de l'eau et des adjuvants qui contiennent une fraction de molécules).

Le but de l'étude du comportement rhéologique d'un fluide est d'estimer le système de forces nécessaires pour causer une déformation spécifique, ou la prédiction des déformations causées par un système de force spécifiques.

Dans cette partie, on désire rappeler les bases de la science rhéologique. Il s'agit des définitions de bases des paramètres qui interviennent sur le comportement rhéologiques (le seuil de cisaillement τ_0 , la viscosité plastique μ) ou bien des notions fondamentales de rhéologie.

- **Seuil de cisaillement**

Par définition, le seuil de cisaillement est la contrainte de cisaillement minimum à atteindre pour que le matériau s'écoule. Pour une contrainte de cisaillement plus faible, le matériau se comporte comme un solide et ne s'écoule pas.

Le seuil de cisaillement dynamique τ_0 correspond à une valeur théorique qui découle de l'extrapolation de la courbe d'écoulement à un gradient de vitesse de cisaillement nul. Il s'agit alors d'une valeur obtenue après la déstructuration du corps. La méthode de mesure consiste à déstructurer complètement la suspension testée en appliquant un gradient de vitesse, et de déduire la valeur de la contrainte à une valeur nulle du gradient de vitesse, à partir de l'équation du modèle (El Barrak et col, 2004).

- **La viscosité**

La viscosité μ est la résistance à l'écoulement de la matière, elle est définie généralement comme étant le rapport entre la contrainte de cisaillement τ et le gradient de vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ correspondant :

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1.18)$$

Elle correspond à la pente de la droite donnant la variation du taux de cisaillement en fonction de la contrainte de cisaillement (Figure 1.4).

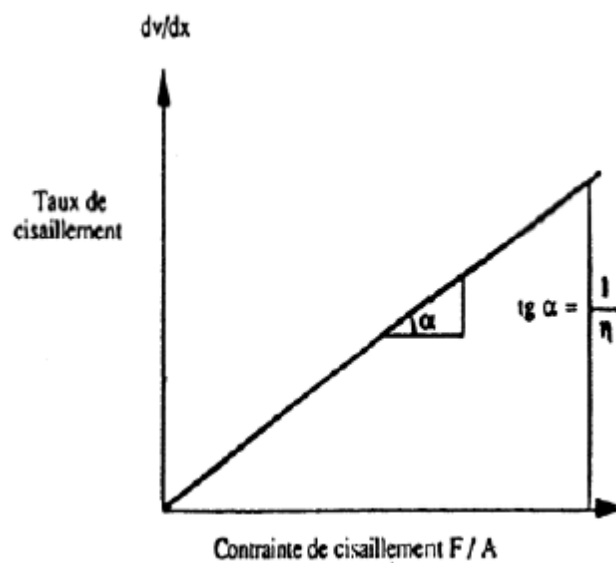


Figure 1.4. La viscosité plastique.

La viscosité plastique dépend de la force intermoléculaire qui empêche le déplacement des particules les unes par rapport aux autres et rend l'écoulement plus difficile (Khayat, 1992 cité par Charbel, 2008).

IV.1. Différents types de modèles d'écoulement appliqués aux bétons

Les bétons ordinaires et les BAP sont caractérisés par les mêmes grandeurs rhéologiques qui sont le seuil de cisaillement et la viscosité, et possèdent pourtant des comportements rhéologiques différents.

On considère que le comportement des bétons à l'état frais s'apparente à celui d'un fluide viscoplastique à seuil et suit le modèle de Bingham (équation 1.19).

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (1.19)$$

Avec

τ_0 : le seuil de cisaillement exprimé en (Pa)

μ : la viscosité plastique exprimé en (Pa.s)

$\dot{\gamma}$: le gradient de vitesse de cisaillement exprimé en (s^{-1})

Cependant, ce modèle ne permet pas toujours de modéliser l'écoulement des BAP (De larrard, 1998, cité par El Hilali, 2009). En effet son utilisation peut conduire à l'obtention de seuils d'écoulements négatifs, pour éviter ce genre de résultat Ferraris et col. (1998) ont proposé le modèle de Bingham modifié basé sur le modèle de Hershel-bulkley (équation 1.20) mais ne contenant que deux caractéristiques rhéologiques indépendantes.

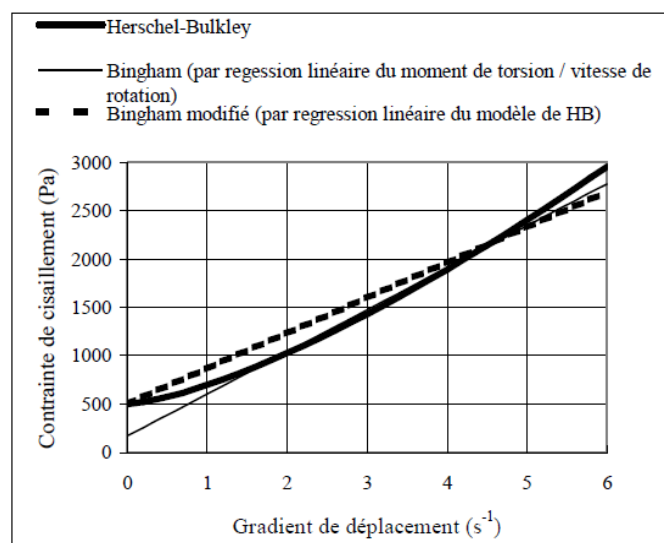


Figure 1.5. Approximation linéaire du modèle de Herschel – Bulkley par le modèle de Bingham.

$$\tau = \tau_0 + K(\dot{\gamma})^n \quad (1.20)$$

Avec

τ_0 : le seuil de cisaillement exprimé en (Pa)

K : le coefficient de viscosité

n : l'indice de viscosité

En variant la constante n et le seuil de cisaillement τ_0 , on peut tenter d'exprimer d'autres modèles de comportement rhéologique par exemple si $n=1$ le fluide a un comportement de Bingham.

On représente schématiquement dans la Figure 1.6, les courbes d'écoulement (évolution du gradient de vitesse en fonction de la contrainte) associées aux lois décrites ci-dessus.

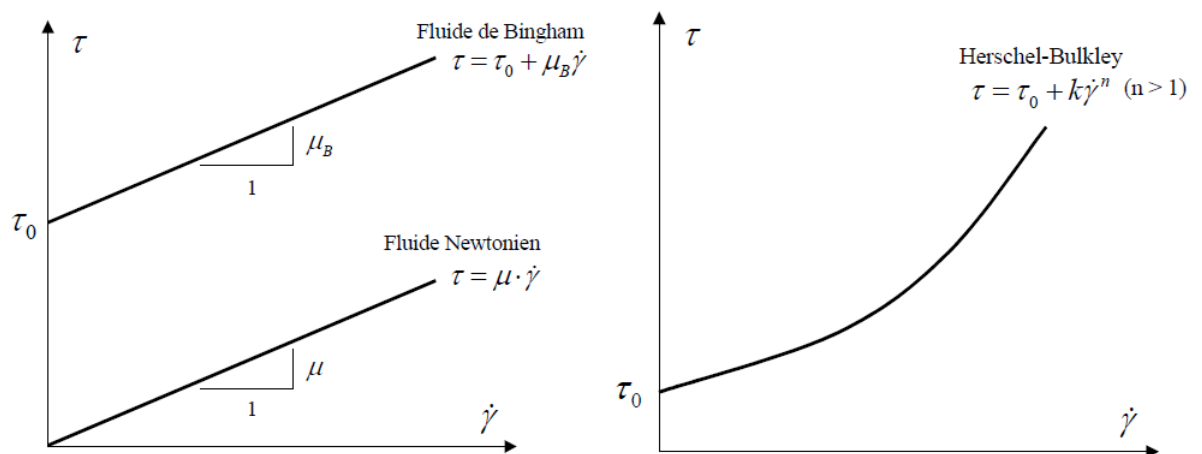


Figure 1.6. Les différents types de modèles d'écoulement.

Sedran (1999) a montré que le modèle de Herschel-Bulkley donne une bonne description du comportement rhéologique des bétons autonivelants en utilisant le rhéomètre BTRhéom. Mais l'utilisation de ce modèle est coûteuse en temps et en techniques d'expérience car elle nécessite l'identification des trois paramètres τ_0 , K et n .

Naadia et col. (2004) ont montré que l'état rhéoépaississant des BAP est associé directement à la pâte (matrice), les granulats ne pouvant qu'amplifier ou atténuer cet état par leur arrangement dans cette matrice, du fait des propriétés du squelette granulaire résultant (compacité, granulométrie).

Dans une autre étude, Toutou et col. (2005) ont montré que la valeur de la viscosité est d'autant plus grande que la concentration volumique solide est grande.

Les paramètres rhéologiques des bétons frais sont mesurés par des rhéomètres tels que le rhéomètre agitateur-malaxeur « Two-point test » (Tattersall et col, 1979), le rhéomètre à cylindres coaxiaux « Cemagref » (Coussot et col, 1995), le rhéomètre plan-plan « BT Rhéom » (Hu et col, 1996).

Les rhéomètres permettent de mesurer des couples ou directement le seuil de cisaillement statique de la suspension. Ils permettent aussi d'établir les courbes d'écoulements ($\tau, \dot{\gamma}$) des bétons testés. A partir de ces courbes d'écoulement on peut calculer les différents types de viscosité et déduire le type de comportement du béton.

Le tableau 1.12 représente des ordres de grandeur des paramètres rhéologiques pour différents types de matériaux (Banfill, 2003).

Tableau 1.12. Ordres de grandeur des paramètres rhéologiques pour différents types de matériaux (Banfill, 2003).

	Pâte	mortier	BAP	BO
Seuil de cisaillement $\tau_0(\text{Pa})$	10-100	80-400	50-200	500-2000
Viscosité plastique $\mu(\text{Pa.s})$	10^{-2} -1	1-3	20-100	50-100

Soualhi et col. ont trouvé un nouveau rhéomètre adapté aux bétons frais (Soualhi et col, 2012) et aux mortiers (Soualhi, 2014). Ce rhéomètre est utilisable aux laboratoires et sur chantier procurant des mesures rhéologiques précises et peu coûteuses.

Le principe de fonctionnement du rhéomètre consiste à mettre en rotation à différentes vitesses décroissantes une pale en forme de croix dans un échantillon cylindrique de béton frais et à mesurer les couples de rotation (M) exercés pour maintenir la rotation, chaque couple correspondant à une vitesse de rotation (Ω) imposée. Ces couples de rotation sont enregistrés par un logiciel de pilotage de l'agitateur.

Le résultat se présente sous la forme d'une fonction linéaire liant le couple et la vitesse de rotation (équation 1.21).

$$M = M_0 + K \cdot \Omega \quad (1.21)$$

Avec

M : le couple total appliqué sur le béton (N.m).

M_0 : le couple à l'origine (frottement intrinsèque de l'agitateur) (N.m).

K : coefficient de proportionnalité.

Ω : la vitesse de rotation de la pale (tours/s).

Le rhéomètre se compose de trois parties principales (Figure 1.7):

- un agitateur à régulation électronique de la vitesse (a) : il est entraîné par un ordinateur en utilisant le logiciel (*Watch & control*).
- un récipient (b) : Le récipient utilisé pour les mortiers est un cylindre de 10cm de diamètre et 13cm de hauteur, et celui utilisé pour les bétons est un cylindre de 30cm de diamètre et de 32,5 cm de hauteur. Afin d'optimiser l'adhérence de l'échantillon sur la paroi extérieure du récipient, des bandes d'acier ont été soudées.
- pale en acier (c) : en forme de croix fixée dans le mandrin de l'agitateur, les dimensions des palettes sont de 10 cm de hauteur et de 5cm de diamètre pour le mortier et de 10,5 cm de diamètre et 12,5 cm de hauteur pour les bétons.



(a)



(b)



(c)

Figure 1.7. Composants du rhéomètre (Soualhi et col, 2012).

L'exploitation des mesures rhéométriques consiste à déterminer l'évolution de la contrainte de cisaillement (τ) en fonction du taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$) à partir des couples ($M_i - \Omega_i$) mesurés (Figure 1.8).

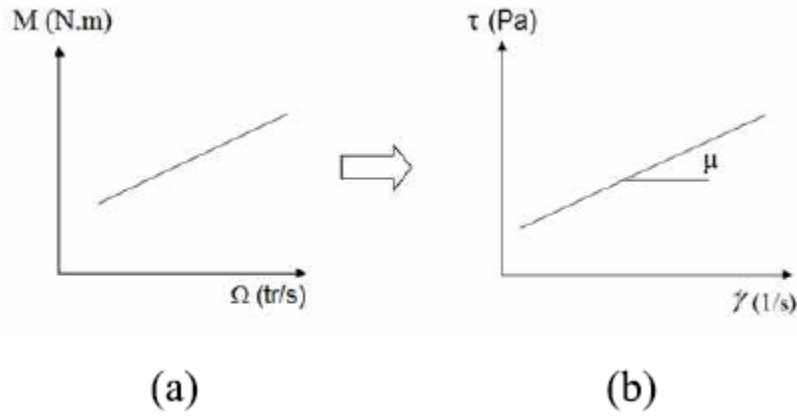


Figure 1.8. (a) résultats bruts, (b) résultats finaux.

La vitesse de cisaillement est déterminée à partir des formulations ci-dessous (Estellé et col, 2009).

$$\dot{\gamma} = 2 \cdot M \frac{d\Omega}{dM} \quad (1.22)$$

$$\dot{\gamma} = 2 \frac{M \frac{d\Omega}{dM}}{\left(1 - \frac{R_b^2}{R_c^2}\right)} - \frac{\Omega - M \frac{d\Omega}{dM}}{\ln\left(\frac{R_b}{R_c}\right)} \quad (1.23)$$

Avec

R_b : désigne le rayon de la pale.

R_c : désigne le rayon du récipient.

Ω et M : représentent respectivement la vitesse de rotation et le couple correspondant.

La contrainte correspondante à la vitesse de rotation Ω_i s'obtient via l'équation suivante :

$$\tau_i = \frac{1}{2} (\tau_{j-1} + \tau_{j+1}) \quad (1.24)$$

Avec :

$$\tau_j(M) = \frac{M_j}{2 \Pi h R_b^2} \quad (1.25)$$

Soualhi et col. (2012) ont testés plusieurs bétons ordinaires en changeant à chaque fois un seul paramètre de composition, soit le rapport E/C soit le volume de pâte, afin d'étudier l'influence des paramètres de composition sur le comportement rhéologique du béton, ils ont montré que:

- les bétons testés suivent le modèle rhéologique de Bingham.
- l'augmentation de la viscosité et le seuil de cisaillement avec la diminution du volume de la pâte et le rapport E/C (Tableau 1.13).

Tableau 1.13. Effet de la variation des paramètres de composition du béton sur la contrainte de cisaillement (Soualhi et col, 2012).

	E/C	$V_{\text{pâte}} \text{ (m}^3\text{)}$	$\tau_0 \text{ (Pa)}$	$\mu \text{ (Pa.s)}$
Bt 1	0,4	0,325	14,85	133,89
Bt 2	0,4	0,289	50,78	339,24
Bt 3	0,4	0,235	72,45	391,43
Bt 4	0,35	0,288	82,78	410,26

Les mêmes auteurs (2013) ont validé que le rhéomètre est fiable pour caractériser les paramètres rhéologiques du mortier. Ils ont également confirmé l'hypothèse selon laquelle le comportement rhéologique du mortier est similaire à celle des fluides de Bingham.

V. Mortier du béton équivalent (MBE)

L'approche du Mortier du Béton Equivalent (MBE) a été développée par Schwartzentruber et col. (2000) au CTG (Guerville, France) pour faciliter la sélection des adjuvants lors de la formulation d'un béton. En utilisant des tests sur mortier au lieu des tests sur béton. En fonction des essais préalables réalisés, l'expérience accumulée au cours des dernières années dans des nombreuses applications industrielles a confirmé la validité de cette méthode. Cependant, l'ensemble de ces exemples concernait des bétons d'ouvrabilité classique.

V.1. Principe de la méthode

Pour limiter la lourdeur des études sur béton, il s'est avéré nécessaire d'utiliser une méthode d'essai rapide et capable de fournir des résultats pouvant être corrélés avec

ceux qui seraient obtenus sur le béton. Le principe de calcul des MBE consiste à remplacer les graviers du béton par du sable dont la surface développée des grains est égale à celle du gravier que l'on a ôté (Figure 1.9).

Ce principe est basé sur deux réflexions permettant de penser que ce sont les surfaces de contact des constituants qui importent, plutôt que leur volume :

- la première découle du fait que l'ouvrabilité d'un béton provient de la façon dont ses constituants arrivent à « glisser » les uns sur les autres pour s'écouler.
- la seconde a pour origine la chimie de la prise, les hydrates se formant plutôt au niveau des interfaces.

Le MBE, pour Mortier de Béton Equivalent, est le nom donné au mortier qui participe à la rhéologie. Il peut être obtenu expérimentalement en tamisant le béton frais au tamis de 5mm. Le calcul complet est fourni en annexe A.

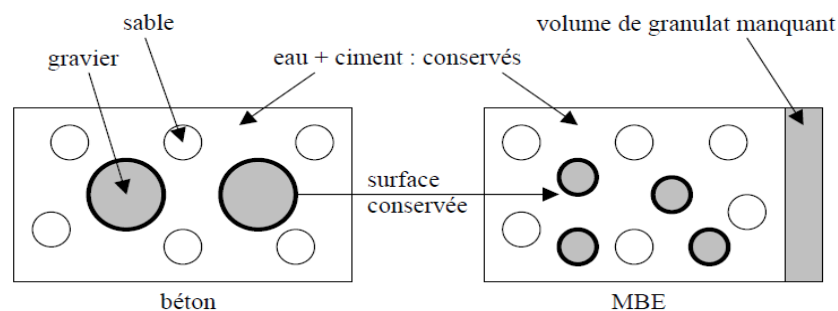


Figure 1.9. Principe de formulation des MBE.

Pour utiliser cette méthode, il est nécessaire de connaître les éléments d'identification des constituants et les bases de composition suivantes :

- La granulométrie de chaque classe de granulats.
- Leurs taux d'absorption d'eau.
- Leurs masses volumiques.
- Leurs teneurs en eau totales.
- La nature et le dosage en ciment (ou en liant équivalent).
- Les caractéristiques des adjuvants.
- La composition granulaire du mélange.
- Le rapport $E_{\text{efficace}}/L_{\text{équivalent}}$.

Les propriétés rhéologiques du MBE sont mesurées à l'aide d'un mini-cône (Figure 1.10) dont les dimensions sont une réduction de celles du cône d'Abrams (rapport d'homothétie de deux). Le mini-cône permet de mesurer l'affaissement ainsi que l'étalement du MBE étudié.

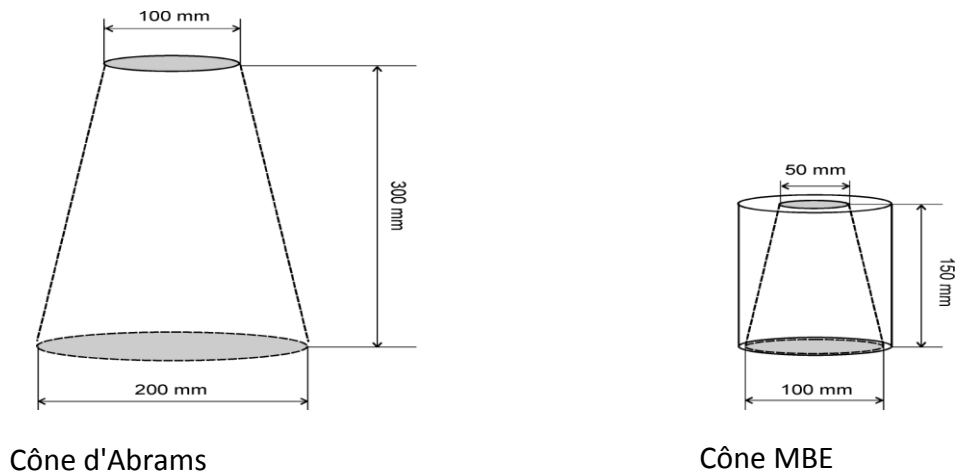


Figure 1.10. Cône d'Abrams et mini-cône.

V.2. Corrélation entre le béton et le MBE

Afin de vérifier s'il y a une corrélation entre les propriétés rhéologiques mesurées sur différents bétons de laboratoires et de chantier et les mesures d'affaissement ou d'étalement sur leur MBE correspondant, Schwartzentruber et col. (2000) ont défini des formulations pour les quelles seule la nature du ciment et le dosage et la nature de l'adjuvant variaient. Cinq compositions de béton dosées à 400 kg/m^3 de ciment CPA-CEM I contenant différents superplastifiants ont été testées. Pour chacune d'elles, des suivis rhéologiques sur MBE et sur béton ont été effectués. L'ensemble des résultats obtenus sont représentés dans la Figure 1.11.

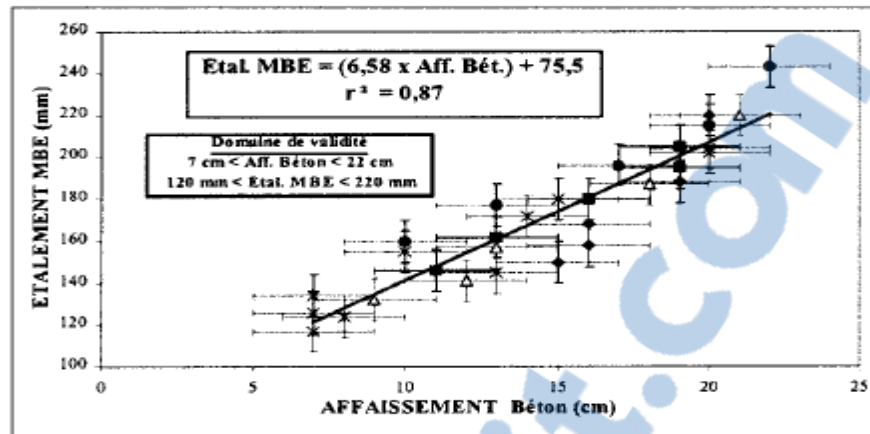


Figure 1.11. Corrélation entre l'étalement MBE et l'affaissement du béton (Schwartzentruber et col, 2000).

La Figure 1.11 montre que la relation entre l'étalement MBE et l'affaissement béton peut être modélisée par une droite avec une corrélation satisfaisante (coefficient de corrélation de 0,87) dans les plages de mesures étudiées.

La corrélation a également été validée par différents groupes de travail tels que ceux du projet national CALIBÉ(2000). Environ trente formulations de B25 à B40 ont été testées en utilisant une vingtaine d'adjuvants (plastifiants, superplastifiants, hauts réducteurs d'eau) et différents types de ciment, ils ont montré qu'une corrélation linéaire pouvait être établie pour toute formule de béton entre l'affaissement mesuré au cône d'Abrams et l'étalement mesuré au mini-cône avec une valeur moyenne du coefficient de corrélation R^2 de 0,912 pour un écart type de 0,078 (Figure 1.12).

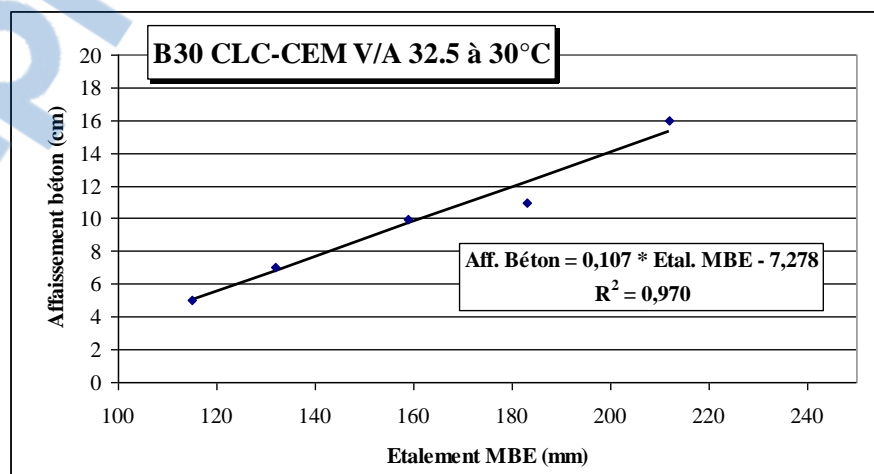


Figure 1.12. Exemple de corrélation entre l'étalement du MBE et l'affaissement du béton (Projet National CALIBÉ, 2000).

Les essais ont montré que l'équation de cette droite variait d'une composition à l'autre, c'est-à-dire qu'une droite n'est valable que pour un béton et son MBE correspondant.

Les résultats obtenus par Haifi (2011) montrent qu'il est possible d'étendre la méthode de MBE au béton autoplaçant, et que la composition particulière des BAP ne change pas le principe de calcul des MBE. La Figure 1.13 montre que le comportement rhéologique des BAP ainsi que leurs MBE est corrélable.

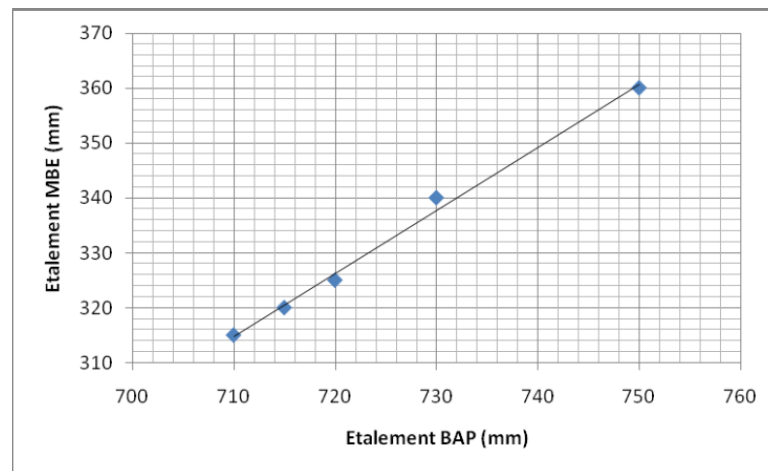


Figure 1.13. Corrélation entre étalement MBE/ étalement BAP (Haifi, 2011).

Haifi (2011) a constaté que le BAP a le même comportement que celui de son mortier correspondant. Les bétons ayant subi une perte d'ouvrabilité dans le temps présentent des mortiers qui ont également perdu de l'ouvrabilité dans le temps, et pour ceux qui ont un fort maintien de rhéologie dans le temps, leurs mortiers ont présenté le même comportement.

Une fois la droite de corrélation est connue, il suffit de faire un simple essai sur MBE, soit en faisant varier le dosage en adjuvant ou bien en faisant des suivis de rhéologie dans le temps.

Par ailleurs certains auteurs n'ont pas trouvé une corrélation entre les propriétés d'écoulement du BAP et son MBE (Figure 1.14). Ils ont expliqué cela par le fait que la présence des gravillons dans la phase liante ne rend pas possible l'homogénéité du milieu pendant son écoulement ce qui provoque la ségrégation des BAP donc il n'est plus possible d'évaluer correctement leur ouvrabilité (Mouret et col, 2011).

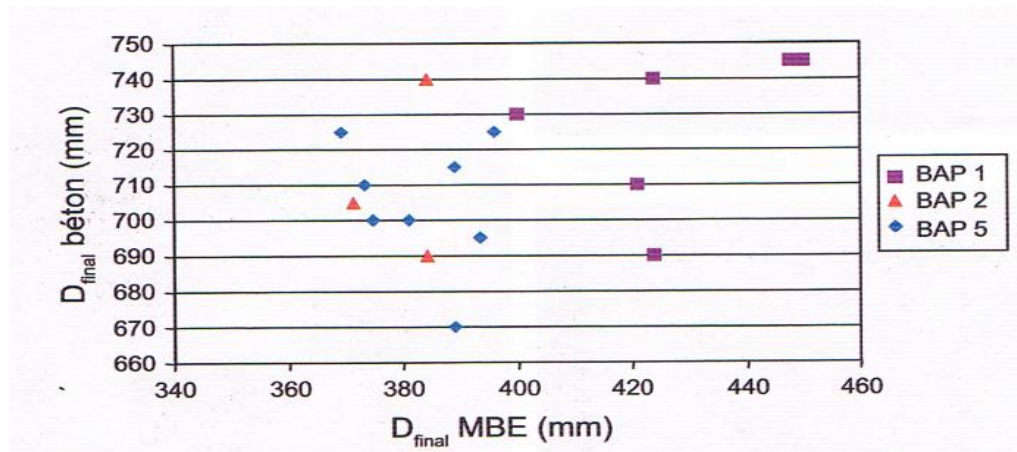


Figure 1.14. Relation entre les diamètres finaux d'étalement- Béton/MBE (Mouret et col, 2011).

VI. Bilan

Les BAP constituent une véritable alternative au béton traditionnel, comme l'ont montré un certain nombre d'exemples. Cependant, leur formulation et le contrôle de leurs propriétés lors de la mise en œuvre nécessitent une attention particulière.

Jusqu'à maintenant, il n'existe pas de méthode générale pour la formulation des BAP. La méthode de formulation par l'expérience repose sur l'empirisme et le tâtonnement en fixant à priori certains paramètres, cette méthode vise à trouver un dosage en liant très élevé qui rend la formulation onéreuse. La théorie de la pâte en excès permet de quantifier le volume de pâte nécessaire à l'écoulement autoplaçant mais elle peut induire à des bétons parfois légèrement sous dosés en granulats.

La méthode chinoise se base sur le facteur de compacité « PF » pour ajuster la teneur relative des granulats et de la pâte. Cette méthode présente l'intérêt d'avoir des bétons autoplaçants plus économiques par rapport aux deux méthodes citées précédemment parce qu'elle permet d'économiser des constituants les plus chers, comme le ciment. Il apparaît donc nécessaire d'exploiter la méthode chinoise pour formuler des BAP avec des matériaux locaux.

Par ailleurs, la lecture bibliographique a fait jaillir des résultats parfois contradictoires sur la corrélation entre les paramètres rhéologiques des BAP et celles de leurs MBE correspondant. Il est donc nécessaire de vérifier ce point en se basant sur des essais plus poussées en utilisant un rhéomètre.

Références bibliographiques

- AFGC., 2002, "Les bétons Autoplaçants : Recommandations provisoires", juillet.
- Aïtcin P.C., 2001 : Le béton à haute performance, Eyrolles, France.
- Assié S., Escadeillas G., Waller V., 2007: "Estimates of self-compacting concrete "potential" durability", Construction and Building Materials, volume 21, Issue 10, page 1909–1917.
- Banfill P.F.G., 2003: The rheology of fresh cements and concretes – a review in Proceedings of 11th International Cement Chemistry Congress, Durban, South Africa. Page 50-62
- Brouwers H.J.H., Radix H.J., 2005: "Self-compacting concrete: the role of the particle size distribution", First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concret - China, 26 - 28 May, Changsha, Hunan, China, Rilem 109 – 118.
- Bui V. K., Montgomery D., 1999: Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume, proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete, Paris, RILEM Publications, page 373-384.
- Charbel A., 2008: "Effet couple de la formulation et du mûrissement sur les caractéristiques du béton autoplaçant à haute performance dans les conditions estivales", mémoire de maîtrise en Génie Civil, Université de Sherbrooke, Canada.
- Coussot P. & Piau J. M., 1995: A large scale field coaxial cylinder rheometer for the study of the rheology of natural coarse suspensions. Journal of rheology, Volume 39, page 105–124.
- El Barrak M., 2005 : "Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais". Thèse de doctorat, l'université Toulouse III – Paul Sabatier, France.
- El Barrak M., Mouret M., Bascoul A., 2004 : "Écoulement des suspensions Ciment-Additifs participant au Béton Autoplaçant (BAP) : Niveaux d'influence des constituants", Rencontres Universitaires de Génie Civil - Ville et Génie Civil, AUGC, Marne la Vallée.

- EL Hilali A., 2009 : "Etude expérimentale de la rhéologie et du Comportement des bétons autoplacants (BAP): Influence des fines calcaires et des fibres végétales". Thèse de doctorat, l'université Cergy Pontoise, France.
- Estellé P., Lanos C., 2009: Vers une réelle rhéométrie adaptée aux bétons frais. *European Journal of environmental and civil engineering*, vol.13, page 457-471.
- Ferraris C.F., De larrard. , 1998: Testing and modeling of fresh concrete technology, NIST, NISTIR 6094, page 61.
- Guellil M.K., 2012 : "Formulation des bétons autoplacants par la méthode de la pâte en excès", Mémoire de magister, université de Tlemcen, Algérie.
- Haifi M.R., 2011 : "Formulation des bétons autoplacants", Mémoire de magister, université de Constantine, Algérie.
- Hu C., De Larrard F., Sedran T, Boulay C., Bosc F., Deflorenne F., 1996: Validation of BTRHEOM: the new rheometer for soft-to-fluid concrete, *Materials and Structures*, Vol. 29, n°10, page 620–631.
- Mouret M., Bascou A., El Barrak M., 2011 : les bétons autoplacants, Eyrolles, France.
- Naadia T., Mouret M., Kharchi F., 2004 : « Effet de la taille des granulats sur le comportement rhéologique des bétons : application aux bétons autoplacants », 1er congrès international sur la technologie et la durabilité du béton, Université des sciences et de la technologie Houari Boumédiène.
- Petersson P., Billberg P., Van B. K., 1999: A model for self-compacting concrete, *Proceedings of International RILEM Conference on Production methods and workability of concrete*, Paris, RILEM Publications S.A.R.L, page 333-344.
- Phan T.H., 2007 : "Rhéologie et Stabilité des pâtes de ciments utilisées dans la formulation des Bétons Fluides". Thèse de doctorat, l'école normale supérieure de CACHAN, France.
- Projet National CALIBE, Groupe de travail traitant des « Anomalies de Comportement Rhéologique des bétons », 2000.
- Schwartzenruber A & Catherine C., 2000: La méthode du mortier de béton équivalent (MBE) – Un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvantés, *Materials and structures/ Matériaux et construction*, vol.33, page 475-482.

- Sebaibi N., Benzerzour M., Sebaibi Y., Abriak N., 2013 : Composition of self-compacting concrete (SCC) using the compressible packing model, the Chinese method and the European standard, *Construction and Building Materials*, volume 43, page 382 –388.
- Sedran T., 1999 : Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants. Thèse de doctorat, l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.
- Soualhi H., Kadri E.H., Ngo T-T, Bouvet A., Gussigh F., 2012 : Utilisation d'un nouveau rhéomètre pour déterminer les paramètres rhéologiques du béton, XXX^{èmes} rencontres de l'AUGC-IBPSA, Chambéry, France, page 930-940.
- Soualhi H., Kadri E.H., Ngo T-T., Bouvet A., Cussigh F., Kenai S., 2014: A Vane Rheometer for Fresh Mortar: Development and Validation in applied rheology
- Su N., Hsu K.C., Chai H.W., 2001: A simple mix design method for self-compacting concrete, *Cement and Concrete Research*, vol. 31, n° 12, page 1799-1807.
- Su N., Miao B., 2003: A new method for mix design of medium strength concrete with low cement content, *Cement and Concrete Composites*, vol.25, page 215-222.
- Taleb O., Ghomari F., Boukli Hacène S.M., 2010 : Influence des paramètres de composition sur les caractéristiques des BAP, 28^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil, La bourbole, France.
- Tangtermsirikul S., Van B.K., 1995: Blocking criteria for aggregate phase of self-compacting high performance concrete in *Proceedings of regional symposium on infrastructure development in civil engineering*, page 19-20.
- Tattersall G.H. & Bloomer S.J., 1979: Further development of the two-point test for workability and extension of its range. *Magazine of Concrete Research*, vol. 31, page 202-210.
- Toutou Z., Cador M., Roussel N., Vilbe E., Le Roy R., 2005 : « Rhéologie des bétons autoplacants, Evaluation de la thixotropie », *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées* 258 – 259 - Octobre – Novembre – Décembre, pp 15 – 27.

- Turcry P., 2004 : "Retrait et fissuration des bétons autoplaçants – Influence de la formulation". Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes, France.

Chapitre 2

PARAMÈTRES INFLUENTS SUR LES PROPRIÉTÉS DES BAP

Ce chapitre présente une étude détaillée sur l'influence de certains constituants sur le comportement final à l'état frais et durci des mélanges.

A ce titre, nous nous intéresserons dans un premier temps sur les additions minérales spécialement les fillers calcaires, cendres volantes, les fumées de silice.

Par la suite, nous présenterons un état de l'art sur l'influence des additions organiques et plus précisément les superplastifiants.

Ensuite, nous mettrons en valeur l'influence du volume de la pâte, du rapport E/C et nous terminerons ce chapitre avec l'effet de facteur de compactage.

SOMMAIRE DU CHAPITRE 2

I. Introduction.....	43
II. Influence des additions sur les propriétés des BAP	43
III. Influence des superplastifiants sur les propriétés des BAP	52
IV. Influence du volume de la pâte sur les propriétés des BAP	56
V. Influence du rapport E/C sur les propriétés des BAP	58
VI. Influence du PF sur les propriétés des BAP	59
Références bibliographiques	61

I. Introduction

La meilleure façon d'assurer et d'atteindre au mieux les propriétés visées d'un BAP à l'état frais et durci est sans doute d'attacher une importance toute particulière à l'influence des paramètres de composition.

Chaque constituant joue un rôle différent dans l'écoulement et dans le comportement rhéologique à l'état frais et sur la résistance du mélange. Son rôle dépend essentiellement de son état (fluide et solide) et de sa nature minéralogique, chimique, et morphologique.

II. Influence des additions sur les propriétés des BAP

Pour leurs assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP contiennent une quantité de fines supérieure à celle des bétons conventionnels. Ces fines proviennent du ciment et des additions.

Les additions utilisées sont en général des cendres volantes, fumées de silice, laitier de haut fourneau ou les fillers calcaires. Elles sont définies par la norme européenne EN 206-1 (2004) pour la conformité du béton comme "matériaux en minéraux finement divisés qui peuvent être ajoutés au béton afin d'améliorer certaines de ses propriétés".

Les additifs de type I sont étiquetés «presque inerte », tandis que les additifs de type II sont des «minéraux pouzzolaniques ou latentes-hydraulique ». Leur utilisation est intéressante sur le plan rhéologique car ils sont d'une part moins réactifs à court terme que le ciment, ce qui permet d'avoir un temps prolongé d'ouvrabilité et d'autre part, la combinaison de plusieurs matériaux cimentaires ayant des granulométries différentes permet aussi d'améliorer la granulométrie totale des particules fines ainsi que celle du mélange de béton. Ceci favorise l'augmentation de la stabilité et l'accroissement de la déformabilité du béton.

II.1 Les fillers calcaires

Les fillers calcaires sont des produits secs finement divisés obtenus par broyage industriel des roches calcaires, dont les caractéristiques sont définies par la norme NF P18 – 305. Ils sont actuellement classés comme additions de type I par la nouvelle norme européenne NF EN 206-1.

Les fillers calcaires peuvent exister dans les granulats et notamment le sable produit par concassage.

La Figure 2.1 montre que les fillers calcaires s'insèrent dans le squelette granulaire du ciment et permet de combler les vides entre les autres particules de dimensions plus importantes du béton (ciment, granulats). Cet effet se traduit par une compacité plus importante du squelette granulaire et va donc avoir des effets sur les propriétés du béton aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

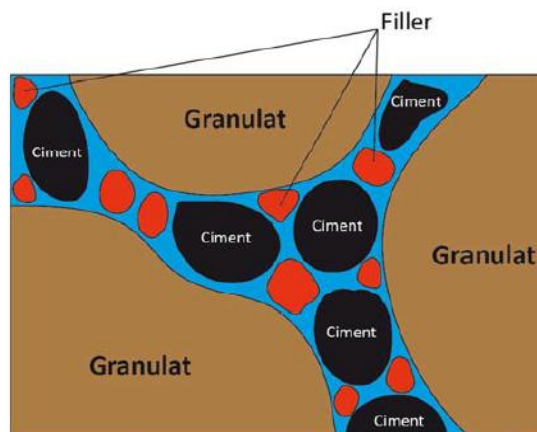


Figure 2.1. Illustration de l'effet filler

II.1.1 L'influence des fillers calcaires sur la rhéologie

L'influence des fillers calcaires sur les propriétés du béton depuis l'état frais jusqu'à l'état durci est un aspect important à prendre en compte pour limiter l'apparition de désordres (perte de maniabilité, baisse de résistances).

Du fait de sa grande utilisation dans l'industrie, de nombreuses études ont montré généralement le rôle important des fillers dans les bétons, les mortiers, en soulignant que leur présence excessive était souvent un facteur néfaste. Toutefois, ces études ont été réalisées le plus souvent sur des mortiers normaux dans lesquels une partie du sable ou du ciment a été substituée par des fillers calcaires (Benachour et col, 2008).

El Hilali (2009) a montré que l'ajout de fillers calcaires de surface spécifique élevée améliore la fluidité des BAP, particulièrement en milieu confiné. Les fillers augmentent la compacité du mélange, améliorent la résistance à la ségrégation et la robustesse de la formulation. De même, il apparaît que la finesse des fillers influe significativement sur la demande en superplastifiant (SP). Une augmentation de la surface de Blaine des fillers

conduirait à une consommation plus élevée du (SP) et donc à une diminution rapide de l'ouvrabilité au cours du temps.

Dans le même ordre d'idée, Esping (2008) a montré que pour un dosage en eau constant à l'échelle du béton, le seuil de cisaillement et la viscosité sont augmentés avec l'augmentation de la surface spécifique du filler mesurée par la technique BET (Figure 2.2).

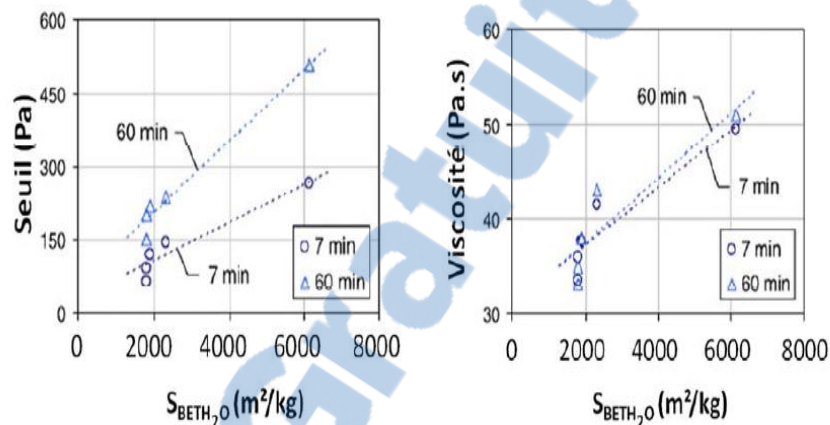


Figure 2.2. Evolution des propriétés rhéologiques des BAP en fonction de la surface spécifique des fillers calcaires (Esping, 2008).

Les fillers calcaires ont une bonne affinité avec la matrice cimentaire. Par ailleurs, ils confèrent au béton frais un pouvoir de rétention d'eau qui permet de limiter le ressuage et la ségrégation (El Barrak, 2005). Cependant, si leur présence devient excessive, la compacité du béton diminue et la plupart des effets bénéfiques s'estompent, entraînant des effets néfastes sur la rhéologie, la résistance, la durabilité, etc. Benachour et col. (2008) ont observé que le mortier qui contient un taux de fillers calcaires supérieur à 15% par substitution au sable est plus ferme.

Les résultats obtenus par Felekoglu (2007) ont montré que les fillers calcaires augmentent la viscosité des pâtes de ciment, en améliorant la stabilité et la non-ségrégation, pour un dosage en superplastifiant et un rapport eau/ (ciment+fillers) constants.

Le même auteur Felekoglu (2008) a fait une étude comparative entre un sable riche et un sable pauvre en fines dans les bétons autoplacants. Un sable naturel lavé, un sable calcaire concassé lavé et deux autres sables calcaires contenant différents taux de fines ont été utilisés pour déterminer les propriétés des BAP à l'état frais et durci. Il a été

observé que les fines calcaires du sable concassé augmentent la déformabilité de la pâte fraîche et la viscosité plastique des BAP. Comparé aux BAP formulés avec des sables lavés, la stabilité et la déformabilité sont améliorées avec l'utilisation des sables concassés riches en fines. Ces BAP présentent alors des meilleures performances à l'état frais sans diminution de la résistance à la compression à l'état durci.

Yahia et col. (2005) ont montré que chaque rapport E/C correspond à un dosage optimum en filler calcaire qui peut assurer un écoulement optimal du mélange cimentaire. Au-delà de ce seuil, les frictions entre particules sont de plus en plus importantes et donc la viscosité sera plus élevée.

D'un autre côté Taleb (2009) a constaté que le besoin en eau est plus important lorsqu'il s'agit d'utiliser des fines minérales en substitution d'une partie de ciment et d'après les résultats obtenus il a souligné que les fillers calcaires diminuent la viscosité du béton jusqu'à un certain taux de substitution, au-delà duquel les frictions entre les particules deviennent plus importantes et augmentent, par conséquent, la viscosité du mélange (Figure 2.3).

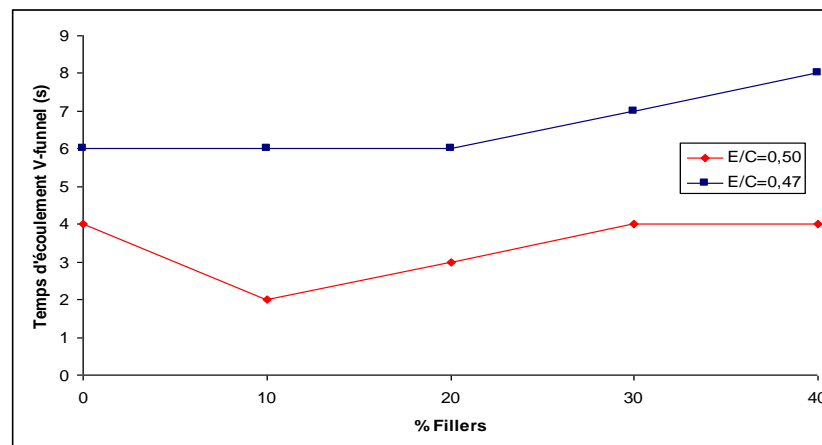


Figure 2.3. Temps d'écoulement au V-funnel en fonction du pourcentage de fillers calcaires (Taleb, 2009).

A. Ghezal (1999) a formulé deux bétons autoplaçants avec différents pourcentages en fumée de silice et de fillers calcaires dont la dimension des particules est de l'ordre de 3 μm et un ciment portland. L'auteur a constaté que les deux bétons présentent des paramètres rhéologiques acceptables mesurés avec le rhéomètre IBB (rhéomètre utilisé à

l'université de Sherbrooke), et les valeurs de la capacité de remplissage mesurées avec l'essai du caisson sont très satisfaisantes (Cité par Bensebti, 2008).

Bouhamou et col. (2008) ont souligné que le ressuage diminue lorsque le dosage en fines est augmenté parce que les particules fines s'hydratent plus rapidement et aussi parce que leur taux de sédimentation est plus faible. Ils ont remarqué aussi que l'augmentation du dosage en fines calcaires engendre une diminution du taux de remplissage à cause de l'augmentation de la viscosité.

Zhu et col. (2005) ont étudié l'influence de différents types de fillers calcaires sur les BAP. Ils montrent que le type de filler a une forte incidence sur la quantité de superplastifiant pour un étalement donnée. En effet, le filler à base de craie demande plus d'adjuvant que le filler calcaire. La différence intervient dans la présence d'impuretés, la compacité et le processus d'absorption.

Diamantonis et col. (2010) ont montré que le filler calcaire est le meilleur matériau qui peut être utilisé comme un additif dans les BAP parce qu'il améliore le comportement rhéologique de la pâte de ciment, puisque les mélanges qui contiennent les fillers ont une faible valeur de taux de cisaillement par rapport aux mélanges qui contiennent les fumées de silice, les cendres volantes, ou la pouzzolane.

II.1.2 L'influence des fillers calcaires sur la résistance

Il a été montré que la présence de filler calcaire comme addition dans les BAP peut également avoir une action positive sur la compacité du mélange et par conséquent sur la résistance mécanique. Cet effet positif dépend fortement du dosage en filler et le maximum de résistance est généralement atteint avec un certain taux de substitution (Topçu et col (2003), Felekoglu (2007), Taleb (2009)). Au-delà, l'effet du filler n'entraîne pas de modification des résistances ou alors entraîne une diminution (Figure 2.4).

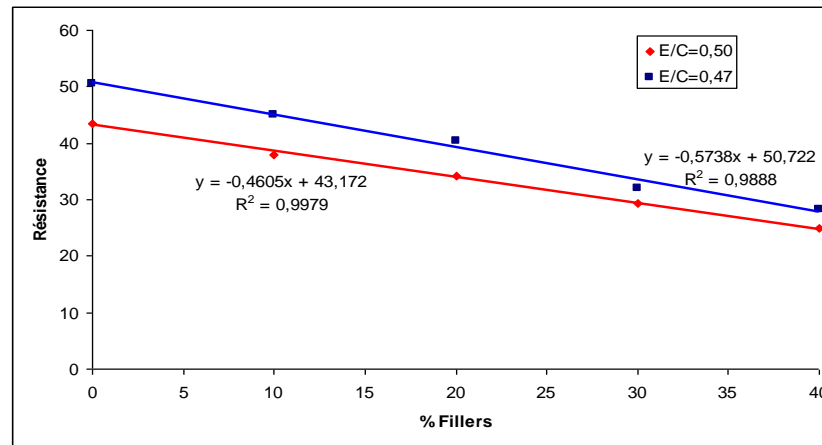


Figure 2.4. Résistance à la compression à 28 jours en fonction du pourcentage de fillers (Taleb, 2009).

Felekoglu (2007) a montré aussi que les fillers calcaires n'ont pas tous la même efficacité. La plus grande amélioration de la résistance est obtenue avec 10% de fillers issus des filtres de carrières (QLP). Au-delà de cette valeur, la résistance diminue (Figure 2.5).

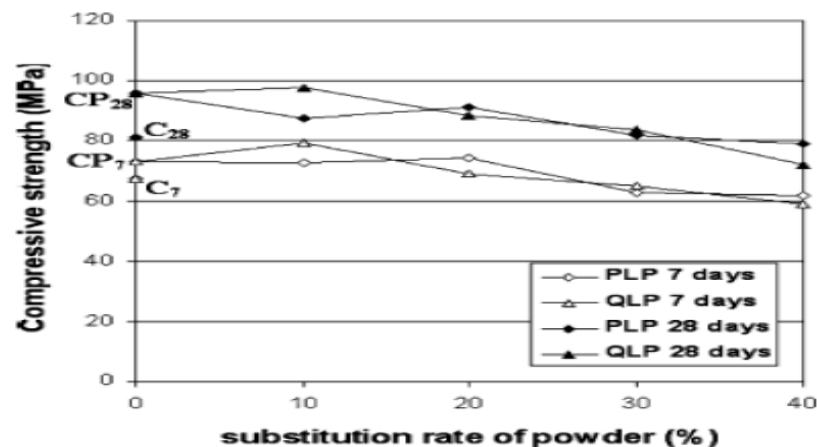


Figure 2.5. La résistance à la compression des pâtes de ciment (Felekoglu, 2007).

L'utilisation des fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges (entre 1 et 7 jours). Les particules fines du filler, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense (Ye et col, 2007).

Il a été aussi montré que la finesse des fillers calcaires dans un BAP mène de manière significative à une augmentation de la résistance à la compression particulièrement aux jeunes âges par comparaison à un béton vibré avec les mêmes rapports Eau/liant (Zhu et col, 2005). Ye et col. (2007) expliquent cela par le fait que les fines de calcaires agissent en

tant que sites de nucléation pour l'hydratation de silicate de calcium. Les fillers de calcaires ont une réaction avec les C_3A pour former un carboaluminate qui a des propriétés cimentaires et aussi une réaction avec les C_3S et C_2S pour former le carbosilicate calicium hydraté (Domone, 2007).

II.2. Cendres volantes

La norme NF EN 450-1 définit la cendre volante comme une poudre fine constituée de particules vitreuses de forme sphérique, issues de la combustion de charbon pulvérisé en présence ou non de co-combustibles, ayant des propriétés pouzzolaniques.

Selon la norme, les cendres volantes sont des additions de type II, c'est à dire un matériau finement divisé à caractère inorganique, pouzzolanique ou hydraulique latent qui peut être incorporé au béton afin d'en améliorer certaines propriétés ou pour obtenir des propriétés spéciales.

II.2.1. L'influence de la cendre volante sur la rhéologie

Les cendres volantes sont parmi les additions qui ont été utilisées avec succès dans les BAP pour améliorer la maniabilité (Domone, 2006).

En termes de rhéologie, les cendres volantes présentent une faible influence sur le seuil et la viscosité des pâtes de ciment. Cependant Nanthagopalan et col. (2008) ont remarqué que leurs utilisations peut améliorer la fluidité, car leur forme sphérique permet de réduire les frottements entre les grains de ciment. D'un autre côté, par leurs faibles demandes en eau par rapport au ciment, elles sont donc bénéfiques pour la formulation des bétons autoplaçants, puisqu'elles permettent de baisser la viscosité et d'améliorer les propriétés mécaniques des bétons.

Par ailleurs, Ferraris et col. (2001) ont montré que le diamètre moyen des cendres volantes à une légère influence sur la valeur du seuil d'écoulement, les mélanges les plus fluides étant obtenus avec les particules les plus fines (diamètre moyen $3\mu m$). Associées à un superplastifiant, les cendres volantes permettent de réduire le dosage en adjuvant nécessaire à l'obtention d'une certaine fluidité (seuil de cisaillement de l'ordre de 20 Pa), mais le rapport E/C doit être suffisamment important, sinon la demande en adjuvant augmente fortement.

Banfill (1982) cité dans Naji (2009) a signalé toute fois que la substitution jusqu'à 60% du ciment par des cendres volantes réduit le seuil de cisaillement mais cela a peu d'effet sur la viscosité plastique.

Par ailleurs Assaad et col. (2003) ont trouvé des résultats complètement différents. Ils ont remarqué que l'incorporation des cendres volantes créaient la friction interne de la pâte ce qui avait pour conséquence d'augmenter le seuil de cisaillement.

Les cendres volantes peuvent également réduire la ségrégation et améliorer la stabilité (Shadle et col, 2002).

II.2.2. L'influence de la cendre volante sur la résistance

Dinakar et col. (2008) ont souligné que la cendre volante influe positivement sur la résistance à la compression et peut réduire sensiblement la demande en ciment dans les BAP, ils sont arrivés à substituer une grande quantité de ciment par la cendre volante mais son effet le plus notable a été d'augmenter la résistance à long terme par réaction pouzzolannique.

Khatib (2008) a pu obtenir des BAP en substituant plus de 60% de la masse des liants. Ses résultats indiquent que l'utilisation des cendres volantes dans le BAP produit une résistance élevée à long terme (Figure 2.6) et un faible retrait. A titre d'exemple, une substitution de 80% de ciment par des cendres volantes réduit le retrait de deux tiers. Cependant, la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage des cendres volantes dans le mélange.

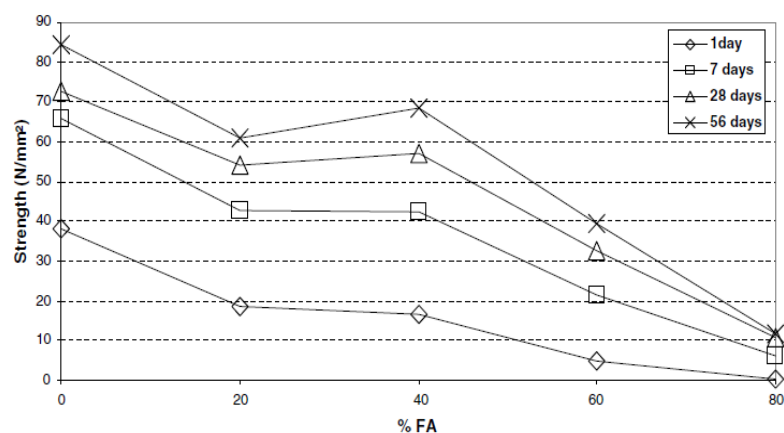


Figure 2.6. L'influence de la cendre volante sur la résistance (Khatib, 2008).

Siad (2010) a constaté dans une étude comparative entre l'efficacité des différents types d'additions, que l'expansion et la perte de résistance n'ont pas été enregistrées pour les BAP qui contiennent la cendre volante.

Dans le même ordre d'idée Felekoglu et col. (2003) ont étudié l'effet des différentes additions minérales (filler calcaire de classe F, filler calcaire de classe C, cendre volante de classe F et cendre volante de classe C) sur la résistance à la compression des BAP. Ils ont trouvé que les BAP à base de cendres volantes (classe C et F) donnent des résistances plus élevées que celles des BAP à base de fillers calcaires.

II.3. Fumées de silice

La fumée de silice est un coproduit industriel de la fabrication du silicium métallique ou de divers alliages de ferrosilicium. Elle est produite lors de la réduction du quartz très pur par du charbon dans un four à arc électrique ensuite elle est recueillie par filtration des gaz qui s'échappent lors de la combustion, dont les caractéristiques sont définies par la norme NF P 18-502-1. Les fumées de silice sont actuellement classés comme additions de type II par la nouvelle norme européenne EN 206-1.

Conformes à la norme EN 13263, la fumée de silice fournit de très bonnes propriétés aussi bien au niveau de la rhéologie qu'au niveau des propriétés mécaniques et chimiques, tout en améliorant la durabilité du béton.

II.3.1. L'influence de la fumée de silice sur la rhéologie

Nanthagopalan et col. (2008) ont remarqué que la fumée de silice a une influence sur l'écoulement du béton parce que leur demande en eau est importante par rapport au ciment, ce qui peut réduire les propriétés d'ouvrabilité et augmenter la viscosité.

Même si Carlsward et col. (2003) ont constaté que les fumées de silice ne modifient pas la viscosité, plusieurs autres auteurs Ferraris et col. (2001), Park et col. (2005) ont trouvé que les fumées de silice augmentent le seuil de cisaillement et la viscosité tout en améliorant la compacité des mélanges.

De Larrard (1999) a montré que ce type de matériau présenterait une moindre chaleur d'hydratation, ainsi qu'un meilleur maintien de maniabilité.

II.3.2. L'influence de la fumée de silice sur la résistance

L'utilisation de la fumée de silice augmente considérablement la résistance à la compression des BAP, cette augmentation est remarquée particulièrement au jeune âge. Domone (2006), dans son étude sur les propriétés des BAP à l'état durci a montré qu'à 28 jours les BAP à base de fumée de silice présentent plus de performances mécaniques que ceux des BAP à base de cendre volante, et ces derniers sont plus performants que les BAP confectionnés avec les fillers calcaires.

De Larrard (1999) montre qu'il est possible de réduire le dosage en ciment d'un béton à hautes performances d'environ 34% sans modifier la résistance, en substituant au ciment une fine quasi-interterte, et en ajoutant une faible quantité de fumée de silice.

III. Influence des superplastifiants sur les propriétés des BAP

L'amélioration de l'ouvrabilité nécessite parfois une augmentation du dosage en eau et cela au détriment de la résistance. Pour conserver cette résistance, la solution consiste à avoir recours à des adjuvants plastifiants ou superplastifiants qui permettent d'augmenter les qualités de plasticité, fluidité et ouvrabilité tout en diminuant le dosage en eau ce qui entraîne une amélioration de la résistance. C'est pourquoi on donne une attention aux études de l'influence des adjuvants sur les propriétés des bétons autoplaçants.

La norme NF EN 934-2 définit l'adjuvant comme un produit incorporé au moment du malaxage du béton à un dosage inférieur ou égal à 5% en masse du poids de ciment du béton, pour modifier les propriétés du mélange à l'état frais et durci. Cette norme classe les adjuvants pour bétons, mortiers et coulis, suivant leur fonction principale. Nous pouvons distinguer trois grandes catégories : ceux qui modifient l'ouvrabilité du béton (plastifiants ou réducteurs d'eau, superplastifiants), ceux qui modifient la prise et le durcissement (accélérateurs de prise et de durcissement, retardateurs de prise), ceux qui modifient certaines propriétés particulières (entraîneurs d'air, générateurs de gaz, hydrofuges de masse).

Nous nous intéressons ici seulement aux superplastifiants car ils sont parmi les adjuvants qui entrent dans la formulation des BAP, ils permettent d'obtenir des bétons maniabiles et ouvrables par défloculation des grains de ciment. À une consistance donnée ils offrent la

possibilité de réduire la quantité d'eau nécessaire à la fabrication et la mise en place du béton, et par conséquent augmenter les caractéristiques mécaniques du béton.

III.1. L'influence des superplastifiants sur la rhéologie

Le superplastifiant peut avoir plusieurs fonctions dans un mélange cimentaire :

- la fluidification : il provoque un gain important d'ouvrabilité d'un mélange.
- La plastification : il permet d'augmenter l'ouvrabilité, sans diminuer les résistances à long terme de la pâte, du mortier ou du béton à même teneur en eau.
- réducteur d'eau : il permet de réduire le rapport E/C pour une même ouvrabilité. A titre d'exemple le rapport E/C peut diminuer de 0.5 (sans adjuvant) à 0.35 (avec adjuvant) tout en gardant les mêmes propriétés rhéologiques (Laichaoui et col., 2011).

Les superplastifiants permettent aux grains de ciment d'acquérir des charges identiques et créer ainsi un phénomène de dispersion des particules par répulsion électrostatique. Bonneau (1997) explique ce phénomène par la fixation des polymères à la surface des particules solides du ciment par adsorption (Figure 2.7). Cette adsorption s'effectue sur les phases hydratées du ciment ceci permet de libérer une partie de l'eau qui a été piégée par les grains de ciment flocculés et diminue ainsi les frictions intergranulaires. On assistera alors à une amélioration de l'ouvrabilité du béton. Ainsi le seuil de cisaillement et la viscosité d'un mélange cimentaire diminuent avec l'ajout d'un superplastifiant (El Barrak, 2005).

Croiset et col. (2012) ont montré que l'affaissement est une fonction exponentielle de la quantité de superplastifiant.

Bonen et col. (2005) ont étudié les effets de la teneur en superplastifiant sur les BAP. Il a été montré que, pour n'importe quel rapport superplastifiant/liant, l'étalement augmente à mesure que le rapport granulats/liant diminue.

Selon Pan (2011), environs 0,01% de SP peut provoquer 10 Pa de la diminution du seuil de cisaillement.

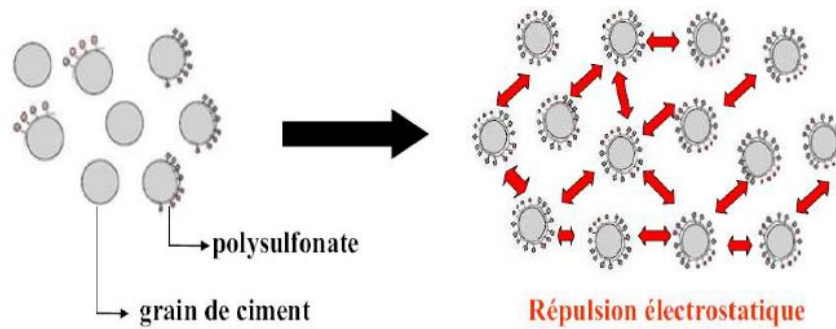


Figure 2.7. Dispersion des grains de ciment par répulsion électrostatique

En présence du superplastifiant les polymères organiques vont limiter l'agglomération des grains, ce qui aura pour conséquence une diminution voire une suppression du seuil d'écoulement (Rickert, 2005 cité par Tabet, 2012).

Flatt et col. (2001) divisent la quantité de superplastifiant ajouté à la suspension de ciment en trois parties, la première partie est consommée par des réactions chimiques, en particulier lors de la formation de CSH. La deuxième partie est adsorbée sur la surface des particules de ciment. La troisième partie est la quantité de superplastifiant qui reste dans la phase aqueuse une fois que le système est saturé avec du polymère.

D'un autre côté Phan (2006) a montré que l'augmentation de la teneur en SP au-delà d'un certain seuil peut être inutile sur le comportement de la pâte et peut entraîner la diminution de la viscosité, parce que les superplastifiants ne déflocculent plus la pâte. Donc un dosage en excès d'adjuvant dans le béton fait apparaître des phénomènes secondaires néfastes tels que l'entraînement de grosses bulles d'air ou la ségrégation des particules de ciment du fait qu'il n'y a plus de forces électrostatiques qui les maintient.

Hot (2013) a suggéré que la viscosité du fluide interstitielle et le changement de l'état de floculation dû à la présence de molécules de polymère adsorbé, serait à l'origine de la diminution plus ou moins prononcée de la viscosité macroscopique suite à l'ajout d'un polymère.

Il convient aussi de noter qu'en plus du dosage en SP, plusieurs auteurs ont montré que même la nature de superplastifiant a une grande influence sur la variation des paramètres rhéologique des coulis de ciment et sur le béton (Baalbaki (1998), Laichaoui et col (2011)).

Baalbaki (1998) a aussi souligné l'importance du mode d'introduction des adjuvants. Il a constaté que l'augmentation de la viscosité dans le temps est plus importante avec le

ciment à forte teneur en C_3A lorsque le réducteur d'eau est ajouté en mode différé (3 à 5 minutes après le premier contact en eau-ciment).

Il a expliqué le phénomène par le fait que lorsque l'adjuvant est introduit avec l'eau de gâchage, il peut s'adsorber rapidement sur les phases aluminates. La formation de l'ettringite est retardée et même l'adjuvant participe à la formation des produits d'hydratation, ce qui explique la perte de maniabilité. Cependant lorsqu'on introduit l'adjuvant plus tard, il demeure disponible dans la solution et sa présence assure au béton une bonne maniabilité.

III.2. L'influence des superplastifiants sur la résistance

En présence des superplastifiants, la résistance à court terme est plus élevée pour un béton ordinaire. Selon Phan (2007) ceci est dû d'une part à l'élimination de l'eau en excès suivie de la diminution de la porosité capillaire et d'autre part de la libération de surface des particules de ciment qui seront plus sujettes à l'hydratation.

Meyer (1979) cité par Boudchicha (2007) a étudié l'influence d'un superplastifiant sur la résistance à jeune âge d'un béton dosé à 370 kg/m^3 de ciment à maniabilité constante, les résultats montrent que la réduction du rapport E/C va permettre d'augmenter les performances mécaniques du mélange (Figure 2.8).

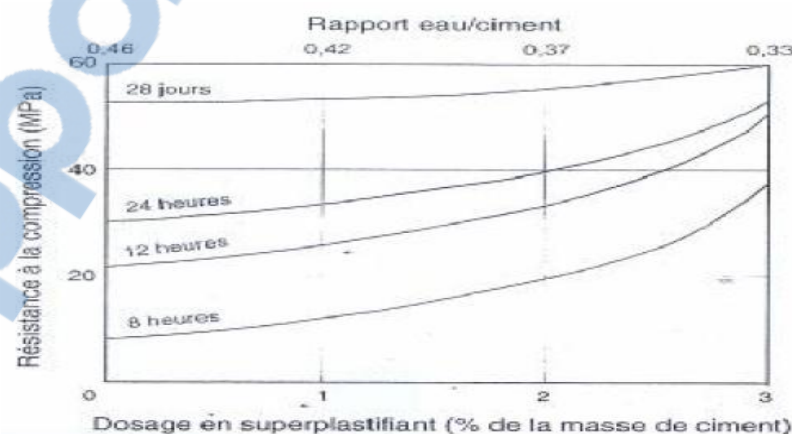


Figure 2.8. Influence d'un superplastifiant sur la résistance à jeune âge (Meyer, 1979 cité par Boudchicha, 2007).

IV. Influence du volume de la pâte sur les propriétés des BAP

Les BAP contiennent un volume de pâte (ciment + eau efficace + air occlus + additions) élevé dont le rôle est d'écarter les granulats, afin de diminuer les frottements qui provoquent la limitation vis-à-vis de l'étalement du béton et la capacité de remplissage des coffrages.

IV.1. Influence du volume de la pâte sur la rhéologie

L'augmentation du volume de la pâte (V_p) augmente généralement la fluidité. Ainsi, ce volume fournit suffisamment de cohésion pour le béton frais ; il réduit la résistance au cisaillement de la composition et améliore en plus sa fluidité en surmontant le frottement entre les particules. Cependant, l'expérience a montré que la pâte ne peut pas être augmentée au-delà d'un certain seuil, car cela pourrait interférer avec les caractéristiques d'écoulement des BAP (Girish et col., 2010).

Dans ce contexte Zsigovics (2005) a estimé que la meilleure consistance d'un béton autoplaçant est liée à l'augmentation relative de la quantité de pâte dans le béton, il a montré qu'il y a une valeur optimale de volume de la pâte. Au-delà de cette valeur l'étalement diminue.

Girish et col. (2010) ont étudié l'influence du volume de la pâte sur le comportement du BAP, ils ont observé que l'étalement croît avec l'augmentation du volume de la pâte mais seulement jusqu'à une valeur optimale (Figure 2.9).

Ils ont montré aussi que T_{50} qui est parfois considéré comme une indication de la viscosité plastique d'un mélange frais diminue avec une augmentation du volume de la pâte.

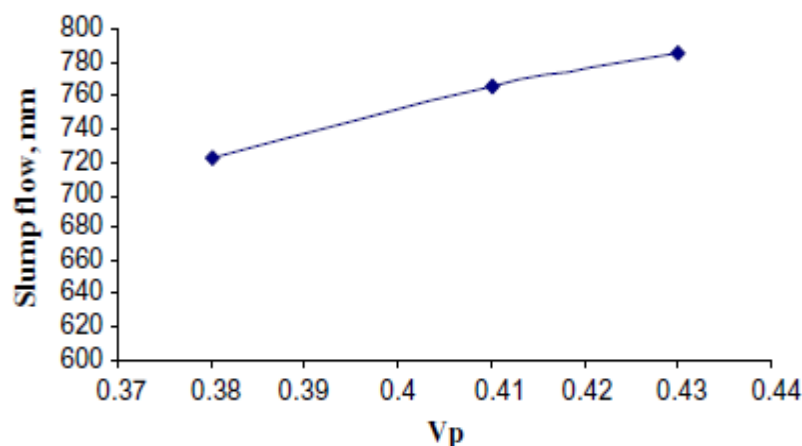


Figure 2.9. Relation entre le volume de la pâte et l'étalement d'un BAP (Girish et col, 2010).

D'après Bouhamou et col. (2008) cette amélioration de la maniabilité est due principalement à la réduction de la teneur des gros granulats dont l'augmentation du volume et plus particulièrement des granulats concassés conduit à un frottement important.

De son côté Hermida (2008) a constaté qu'une réduction du volume de pâte au-dessous d'une valeur optimale se traduira par une perte d'ouvrabilité. Celle-ci se notera tant par une augmentation du seuil d'écoulement que par une augmentation de la viscosité plastique dans les cas des bétons fluides.

IV.2. Influence du volume de la pâte sur la résistance

Des études ont mis en évidence que le volume de pâte a un certain effet sur les propriétés mécaniques du matériau, Bouhamou et col. (2011) ont remarqué que le volume de pâte contribue à augmenter les résistances avant de provoquer leur diminution lorsque son taux dépasse une certaine valeur critique (Figure 2.10).

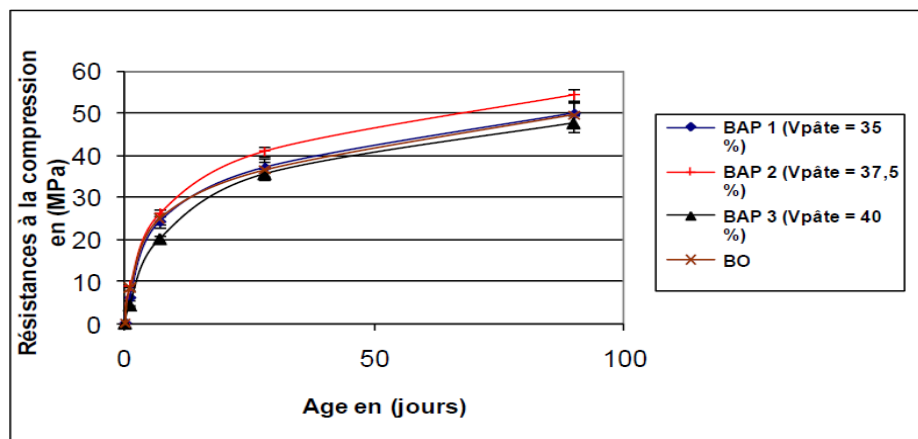


Figure 2.10. Influence du volume de pâte sur les résistances à la compression du BAP (Bouhamou, 2011).

Dans le même ordre d'idée, Rozière et col. (2007) ont affirmé que la résistance à la compression à 28 jours diminue avec l'augmentation du volume de la pâte, par exemple quand le volume de la pâte augmente de 57% la résistance à la compression diminue de 12%.

Il a aussi été montré par d'autres auteurs De Larrard (1999) ; Sedran (1999) ; Kolias et col., (2005) que la résistance à la compression d'un mélange de béton diminue avec une

augmentation de la distance moyenne entre deux gros granulats adjacents, elle est appelée épaisseur maximale de pâte, cette distance augmente avec le volume d'une pâte.

V. Influence du rapport E/C sur les propriétés des BAP

Le rapport E/C est le paramètre qui contrôle la résistance d'un béton ordinaire, par exemple un faible rapport E/C correspond à une résistance en compression élevée. Or pour un BAP ce même paramètre est relié principalement à la fluidité ou à la viscosité du béton et a une incidence directe sur les différentes propriétés des bétons à l'état frais et à l'état durci. Domone (2006) a trouvé que le rapport massique moyen E/L est égale 0,34 lors d'une analyse étalée sur 11 ans sur des BAP utilisés des différents pays du monde.

V.1. Influence du rapport E/C sur la rhéologie

Les bétons autoplaçants sont des bétons très sensibles aux variations du rapport E/L, Abdelouahed col. (2011) et Bouhamou et col. (2008) ont trouvé qu'il y a une relation proportionnelle entre le rapport E/L et l'étalement, le rapport E/L implique une augmentation dans l'étalement (Figure 2.11), ainsi ils ont conclu que le dosage en eau reste une grandeur nécessaire pour normaliser la fluidité d'un BAP.

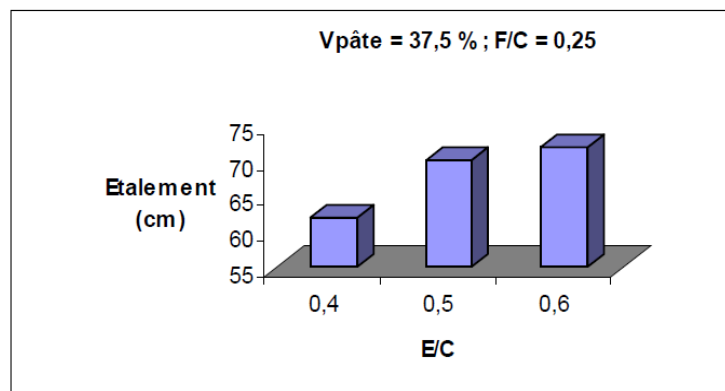


Figure 2.11. La variation d'étalement en fonction du rapport E/L (Bouhamou et col., 2008).

El Chabib et col. (2006) ont montré que la diminution du rapport E/C réduit de manière significative la ségrégation dynamique, ceci est attribué à l'augmentation à la fois de la limite d'élasticité et de la viscosité plastique du béton.

En outre, la diminution supplémentaire du rapport E/L n'influence pas la stabilité dynamique mais augmente considérablement la viscosité.

De leur côté Utsi et col. (2003) ont montré que l'augmentation du dosage en eau ou du rapport E/C réduit les paramètres rhéologiques tels que le seuil de cisaillement et la viscosité.

V.2. Influence du rapport E/C sur la résistance

Il est clair que l'augmentation de la résistance peut être obtenue en réduisant la teneur en eau libre et donc E/C.

Persson (2001) a montré que la résistance diminue avec l'augmentation du rapport E/L (Figure 2.12). Il a trouvé une corrélation entre le dosage en eau et la résistance en fonction du temps.

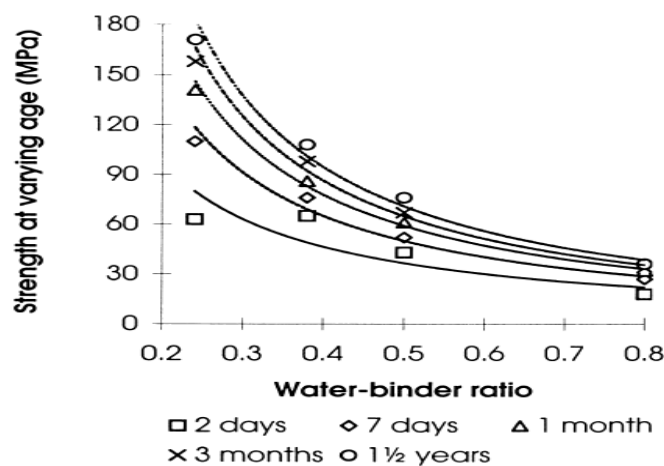


Figure 2.12. La variation de la résistance à la compression en fonction du rapport E/L (Persson, 2001).

VI. L'influence du PF sur les propriétés des BAP

Ce facteur représente le rapport entre la masse volumique apparente de l'empilement granulaire compacté par vibration et la masse volumique du squelette à l'état empilé sans compactage, il influe sur la résistance et la fluidité.

Su et col. (2001,2003) ont montré qu'un coefficient (PF) élevé est un signe d'utilisation d'un plus grand volume de granulats au détriment de la pâte. En conséquence, la fluidité du béton va diminuer. D'un autre côté, une petite valeur du coefficient (PF) implique un béton avec surdosage de pâte.

Ils ont remarqué aussi que la résistance en compression est maximale pour une valeur optimale de PF, au-delà de cette valeur la résistance diminue (Figure 2.13).

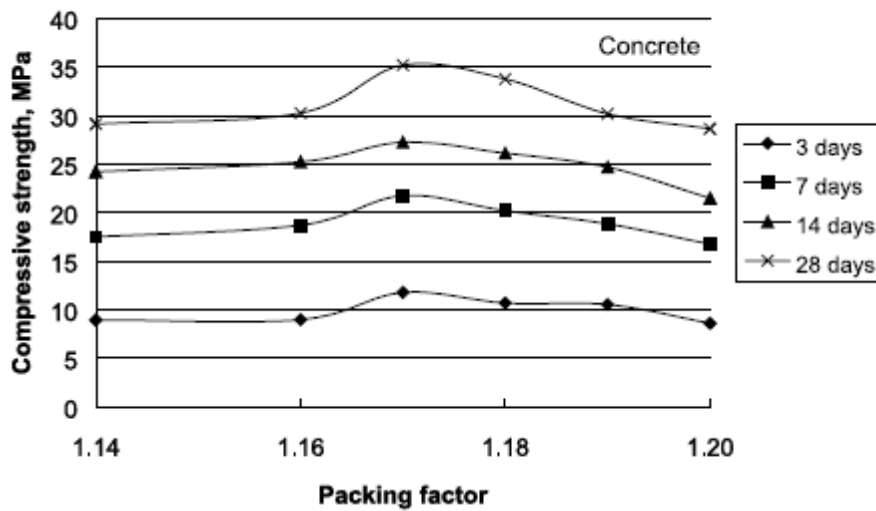


Figure 2.13. Effet du PF sur la résistance du béton. (Su et col, 2003)

Références bibliographiques

- Abdelouahed A., Belachia M., Sebbagh T., 2011: étude de comportement des nouveaux bétons « béton autoplaçant » sous des conditions extrêmes, 1^{er} Séminaire National de Génie Civil sur les Matériaux et Protection de l'Environnement, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem, Algérie.
- Assaad J., Khayat K.H., Mesbah H., 2003: Assessment of thixotropy of flowble and self-consolidating concrete, *ACI Materials Journal*, vol. 100, page 99-107.
- Baalbaki M., 1998 : "Influence des interactions du couple ciment/adjuvant dispersant sur les propriétés des bétons". Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Canada.
- Benachour Y., Davy C.A., Skoczylas F., Houari H., 2008: Effect of a high calcite filler addition upon microstructural, mechanical, shrinkage and transport properties of a mortar, *Cement and Concrete Research*, vol.38, page 727–736.
- Bensebti S.E., 2008 : "Formulation et propriétés des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux". Thèse de doctorat, Université Mentouri-Constantine, Algérie.
- Bonen D. & Shah S.P., 2005: Fresh and hardened properties of self-consolidating concrete, *Structural Engineering Material*, vol. 7, page 14-66.
- Boudchicha A., 2007 : "Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons". Thèse de doctorat, Université Mentouri, Constantine, Algérie.
- Bouhamou N., Belas N., Mesbah H., Mebrouki A., 2011 : influence du volume de pâte sur le comportement du béton autoplaçant vis-à-vis du retrait, 1^{er} Séminaire National de Génie Civil sur les Matériaux et Protection de l'Environnement, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem, Algérie.
- Bouhamou N., Belas N., Mesbah H., Mebrouki A., Yahia A., 2008 : Influence des paramètres de composition sur le comportement du béton autoplaçant à l'état frais, *Afrique Science*, vol. 4, page 1-20.
- Carlsward J., Emborg M., Utsi S., Oberg P., 2003: Effect of constituents on the workability and rheology of self-compacting concrete, proceeding of the 3rd

international RILEM conference on self-compacting concrete, Island, page 143-153.

- Croiset A. & Croiset L., 2012: Maîtrise de la mise en œuvre des nouveaux bétons, PFE de Master 2, Université Cergy Pontoise, France.
- de Larrard F., 1999 : Structures granulaires et formulation des bétons - Ouvrage original : «Concrete Mixture Proportioning– A scientific Approach» , Modern Concrete Technology Series N° 9, Londres, Traduit par : André Lecomte, p 414.
- Diamantonis N., Marinos I., Katsiotis M.S., Sakellariou A., Papathanasiou A., Kaloidas V., Katsioti M., 2010: Investigations about the influence of fine additives on the viscosity of cement paste for self-compacting concrete, Construction and Building Materials, vol. 24, page 1518–1522.
- Dinakar P., Babu K.G., Santhanam M., 2008: Durability properties of high volume fly ash self compacting concretes, Cement and Concrete Composites, vol.30, page 880–886.
- Domone P.L., 2006: Self-compacting concrete: an analysis of 11 years of case studies, Cement and Concrete Composites, vol.28, page 197-208.
- Domone P.L., 2007: A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete, Cement and Concrete Composites, vol. 29, page 1–12.
- El Barrak M., 2005 : "Contribution à l'étude de l'aptitude a l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais". Thèse de doctorat, l'université Toulouse III – Paul Sabatier, France.
- El Chabib H., Moncef N., 2006: Effect of Mixture Design Parameters on Segregation of Self-Consolidating Concrete, ACI Materials Journal/September-October.
- EL Hilali A., 2009 : "Etude expérimentale de la rhéologie et du Comportement des bétons autoplaçants (BAP): Influence des fines calcaires et des fibres végétales". Thèse de doctorat, l'université Cergy Pontoise, France.
- Esping O., 2008: Effect of limestone filler BET(H₂O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete, Cement and Concrete Research, vol.38, page 938- 944.

- Felekoglu B., 2007: Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case), *Resources Conservation & Recycling*, vol.51, page 770–791.
- Felekoglu B., 2008: A comparative study on the performance of sands rich and poor in fines in self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, vol. 22, page 646–654.
- Felekoglu B., Yardimci M., Baradan B., 2003: A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self compacting concrete, proceeding of the 3rd international RILEM conference on self-compacting concrete, Island, page 446-455.
- Ferraris C.F., Obla K.H., Hill R., 2001: Influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete, *Cement and concrete research*, vol.31, page 245-255.
- Flatt R.J., Houst Y. F., 2001: A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers, *Cement and concrete research*, vol.31, page 1169–1176.
- Girish S., Ranganath R.V., Jagadish Vengala., 2010: Influence of powder and paste on flow properties of SCC, *Construction and Building Materials*, vol. 24, page 2481–2488
- Hermida G., 2008 : "Influence du volume de pâte et de la concentration en ciment sur la performance du béton : vers le développement d'un béton à contenu minimal en pâte". Thèse de doctorat, l'école normale supérieure de Cachan, France.
- Hot J., 2013: "Influence des polymères de type superplastifiants et agents entraîneurs d'air sur la viscosité macroscopique des matériaux cimentaires". Thèse de doctorat, Université Paris-Est, France.
- Khatib J.M., 2008: Performance of self-compacting concrete containing fly ash, *Construction and Building Materials*, vol. 22, page 1963–1971.
- Kolas S., Georgiou C., 2005: The effect of paste volume and of water content on the strength and water absorption of concrete, *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, page 211–216.

- Laichaoui A., Kettab R., Bali A., 2011 : influence de la nature du superplastifiant sur la rhéologie des coulis de ciment au laitier, acte de la 29^{ème} rencontre de l'AUGC, Université AbouBekr Belkaid, Tlemcen, Algérie.
- Naji S., 2009 : "Développement d'essais pour évaluer la thixotropie et la robustesse des bétons autoplaçants", mémoire de maîtrise en sciences appliquées en Génie Civil, Université de Sherbrooke, Canada.
- Nanthagopalan P., Haist M., Santhanam M., Müller H.S., 2008: Investigation on the influence of granular packing on the flow properties of cementitious suspensions , Cement and Concrete Composites, vol.30, page 763–768.
- Pan J., 2011 : influence des adjuvants chimiques sur la performance des mortiers de béton équivalant à rhéologie adaptée, mémoire de maitrise, université de Sherbrooke, Canada.
- Park C.K., Noh M.H., Park T.H., 2005: Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures, Cement and Concrete Research, vol.35, page 842-849.
- Persson B., 2001: A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete, Cement and Concrete Research, vol. 31, page 193 – 198
- Phan T. H., 2006 : Comportement thixotropique des pâtes de bétons auto – plaçants, XXIV^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil 2006, Ecole Normale Supérieure de Cachan, France.
- Phan T.H., 2007 : "Rhéologie et Stabilité des pâtes de ciments utilisées dans la formulation des Bétons Fluides". Thèse de doctorat, l'école normale supérieure de CACHAN, France.
- Rozière E., Granger S., Turcry P., Loukili A., 2007: Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete, Cementand Concrete Composites, vol.29, page 626–636
- Sedran T., 1999 : "Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants". Thèse de doctorat, l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.

- Shadle R. & Somerville S., 2002: The Benefits of Utilizing Fly Ash in Producing Self-Compacting Concrete, First North American Conference on the Design and Use of Self- Consolidating Concrete, Chicago, IL: ACBM, page 235-241.
- Siad H., 2010 : "Influence du type d'addition minérale sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons autoplaçants". Thèse de doctorat, l'institut National des Sciences Appliquées de Rennes, France.
- Su N. & Miao B., 2003: A new method for mix design of medium strength concrete with low cement content, Cement and Concrete Composites, vol.25, page 215-222.
- Su N., Hsu K.C., Chai H.W., 2001: A simple mix design method for self-compacting concrete, Cement and Concrete Research, vol. 31, n° 12, page 1799-1807.
- Tabet N., 2012 : Contribution à l'étude de l'influence de la nature et des dimensions des fibres sur le comportement physico- mécanique des bétons autoplaçants fibres (BAPF), Mémoire de magister, l'université M'hamed bougra-Boumerdes, Algérie.
- Taleb O., 2009 : Optimisation de la formulation des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux, mémoire de magister de l'université de Tlemcen, Algérie.
- Topçu I.B., Uğurlu A., 2003: Effect of the use of mineral filler on the properties of concrete, Cement and Concrete Research, vol.33, page 1071-1075.
- Utsi S., Emborg M., Carsward J., 2003: Relation between workability and rheological parameters, 3rd International RILEM symposium on self-compacting concrete, RILEM Publication s.a.r.l, page 311-322
- Yahia A., Tanimura M., Shimoyama Y., 2005: Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio , Cement and Concrete Research, vol. 35, page 532– 539.
- Ye G., Liu X., De Schutter G., Poppe A.M., Taerwe L., 2007: Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes, Cement and Concrete Composites, vol. 29, page 94-102.
- Zhu W. & Gibbs J.C., 2005: Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete, Cement and Concrete Research, vol.35, page 1457-1462.

- Zsigovics I., 2005: Effect of limestone powder on the consistency and compressive strength of SCC. In Proceedings of SCC. ACBM, Chicago.

Chapitre 3

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX

Avant d'entamer une formulation il est nécessaire de connaître les matériaux utilisés à cet effet. Leurs caractéristiques sont déterminées au moyen d'un certain nombre d'essais normalisés. Dans ce chapitre, nous exposons les caractéristiques des matériaux utilisés pour la formulation de nos bétons.

SOMMAIRE DU CHAPITRE 3

I. Le ciment	68
II. Les fillers calcaires	69
III. Les granulats	69
IV. Eau de gâchage	75
V. Les adjuvants	76
Références bibliographiques	77

I. Le ciment

Le ciment utilisé est un ciment portland composé CPJ CEM II 42.5/A de la Société des Ciments de Béni-Saf appartenant à la wilaya d'Ain-Temouchent. Ce ciment est conforme à la norme NF P 15-301, il est composé de 85% de clinker ; 3% de gypse, 10% de pouzzolane et de 2% de calcaire sableux (Taleb, 2009).

Les détails des propriétés chimiques et physico – mécaniques sont présentés dans les Tableaux 3.1 et 3.2.

Tableau 3.1. Composition chimique et minéralogique du ciment (%) (Taleb, 2009).

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	CaO libre	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
27.97	5.43	3.05	56.37	0.71	-	0.30	0.43	0.75	59.98	2.15	9,87	9.31

Tableau 3.2. Propriétés physico – mécaniques du ciment (Taleb, 2009).

Surface spécifique Blaine (cm^2/g)	3598
Consistance (%)	25,30
Expansion à chaud (mm)	1,00
Début de prise (mn)	217
Fin de prise (mn)	280
Refus sur un tamis de $100\mu\text{m}$ (%)	1,00
Résistance à la flexion	
02 jours (bars)	26,91
07 jours (bars)	63,18
28 jours (bars)	78,39
Résistance à la compression	
02 jours (bars)	123,15
07 jours (bars)	343,75
28 jours (bars)	453,12

Les masses volumiques (apparente et absolue) ont été déterminées conformément à la norme NF P 18-558. Nous avons utilisé pour la détermination de la masse volumique absolue, la méthode de pycnomètre à liquide. Les résultats sont récapitulés dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3. La masse volumique apparente et absolue du ciment.

La masse volumique apparente (Kg/m ³)	La masse volumique absolue (Kg/m ³)
932	3032

Nous remarquons que ces masses volumiques répondent aux exigences imposés par la norme NA 231, comprises entre 900-1100 kg/m³ pour la masse volumique apparente et 2900-3150 kg/m³ pour la masse volumique absolue.

II. Les fillers calcaires

Les fillers calcaires proviennent de la carrière d'El Maleh situé à 12 km d'Ain Temouchent. La roche est de nature calcaire dolomitique. Sa composition chimique est résumée dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.4. Propriétés chimiques des fillers calcaires (Taleb, 2009).

Eléments	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	CO ₃	Anhydrite Carbonatée	Eau de combinaison	Perte au feu
Min %	4.73	33.81	18.59	0.49	93.64	41.2	0.49	41.69
Max %	5.64	34.09	20.06	0.54	96.97	42.67	0.56	43.23
Moy %	5,18	33,95	19.32	0.51	95.30	41.93	0.52	42.46

Les fillers calcaires présentent une masse volumique absolue égale 2675 kg/m³ et une masse volumique apparente égale à 971 kg/m³.

III. Les granulats

Les granulats utilisés proviennent de la carrière de Sidi Abdelli, propriété de l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG). Ce choix est dicté par le fait que c'est la carrière qui approvisionne principalement la région à cause de son importance en production.

La composition chimique de la roche exploitée dans la carrière est présentée dans le Tableau 3.5.

Tableau 3.5. Composition chimique de la roche exploitée dans la carrière de Djebel Abiod (Hanini, 2012).

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	P.F.
Min%	0.34	0.23	0.13	32.52	0.22	0.40	42.91
Max%	0.42	0.27	0.29	55.21	20.11	0.85	45.76
Moy%	0.38	0.25	0.23	44.38	9.88	0.66	44.30

III.1. Le sable

Le sable est un granulat calcaire concassé est commercialisé en tant que classe granulaire 0/4. Ses caractéristiques physiques sont représentées dans le Tableau 3.6.

Tableau 3.6. Caractéristiques physiques du sable.

M _v apparente (Kg/m ³) (NA 255)	1477	
M _v absolue (Kg/m ³) (NA 255)	La méthode de l'éprouvette graduée	2742
	La méthode du ballon	2687
équivalent de sable(%) (NFP 18-598)	ESV	70
	ESP	67.5
Module de finesse	2.3	
Coefficient d'absorption (%) (NF P 18-555)	1.65	

- Le sable est propre et il répond aux exigences de la norme P 18-541 qui fixe les limites à $ESV \geq 65\%$ et à $ESP \geq 60\%$, pour les sables concassés ou broyés.

Il est nécessaire de déterminer le coefficient d'absorption du sable pour la formulation des bétons autoplacants car un sable composé d'une grande quantité des fines peut avoir une grande demande en eau ce qui peut être néfaste pour un BAP. L'essai a été réalisé selon la norme NF P 18-555 (Figure 3.1).



Figure 3.1. Les étapes pour la détermination du coefficient d'absorption du sable.

Pour des besoins de notre étude, nous avons aussi déterminé les masses volumiques absolues et apparentes du sable lavé à un tamis de 80 μm , qui sont respectivement de 2650 kg/m^3 et 1521 kg/m^3 .

III.2. Le gravier

Les graviers de l'ENG sont disponibles sous forme des classes granulaires 4/8, 8/16 et 16/25. Les caractéristiques physiques des gravillons utilisés dans notre étude sont représentées dans le Tableau 3.7.

Tableau 3.7. Caractérisation physique du gravier.

La classe		Gravier 4/8	Gravier 8/16
$M_{v \text{ apparente}}$ (Kg/m ³) (NA 255)		1301	1313
$M_{v \text{ absolue}}$ (Kg/m ³) (NA 255)	La méthode de l'éprouvette graduée	2576	2612
	La méthode de ballon	2641	-
Propreté (%) (NF P18-591)		0.84	0.67
Los Angles (%) (NF P 18-573)		25	27
Micro – Deval (%) (NF P 18-572)		5.64	10.4
Coefficient d'absorption (%) (NF P 18-554)		1.3	0.5

- Le gravier présente une propreté satisfaisante puisque, selon les spécifications exigées par la norme P 18-541, le pourcentage des éléments inférieurs à 0.5 mm doit être inférieur à 3 % dans le cas des granulats concassés.
- Le gravier présente une bonne résistance à l'usure, sachant que la norme XP P 18-545 exige des valeurs maxima tolérées inférieures à 35 %.
- Le gravier répond aux exigences de la norme P 18-541 qui impose un coefficient Los Angeles inférieures à 40 %.
- les coefficients d'absorption du gravier répondent aux exigences de la norme P18-541 qui impose un coefficient d'absorption ≤ 5 %.
- les masses volumiques (apparente et absolue) répondent aux spécifications de la norme NF EN 12620 qui impose une masse volumique apparente comprise entre 1300 kg/m³ et 1600 kg/m³ et une masse volumique absolue comprise entre 2500 kg/m³ et 2700 kg/m³.

III.3. Analyse granulométrique

Les courbes granulométriques des différents granulats peuvent être déterminées par l'essai de l'analyse granulométrique faite conformément à la norme NA 2607. Cet essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une

série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

Les analyses granulométriques établies pour chaque fraction sont présentées dans les Tableaux 3.8, 3.9 et 3.10.

Tableau 3.8. Analyse granulométrique du sable

Sable 0/4				
La masse de l'échantillon = 1 kg				
Ouverture de tamis (mm)	masse des refus (g)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage des refus cumulés (%)	Pourcentage des tamisats cumulés(%)
6,3	0	0	0	100
5	0	0	0	100
4	13	13	1,3	98,7
3,15	36	49	4,8	95,2
2,5	56	105	10,4	89,6
2	67	172	17	83
1,6	69	241	23,8	76,2
1,25	71,5	312,5	30,9	69,1
1	64,5	377	37,2	62,8
0,8	36,5	413,5	40,8	59,2
0,63	78,5	492	48,6	51,4
0,5	55,5	547,5	54,1	45,9
0,4	46,5	594	58,7	41,3
0,315	76,5	670,5	66,2	33,8
0,250	31,5	702	69,3	30,7
0,2	22,5	724,5	71,5	28,5
0,16	26,5	751	74,2	25,8
0,125	43,5	794,5	78,5	21,5
0,1	15,5	810	80	20,0
0,08	29,5	839,5	82,9	17,1
0,063	10	849,5	83,9	16,1
Fond	163,2	1012,7	100	0

Tableau 3.9. Analyse granulométrique du gravier 4/8.

Gravier 4/8				
La masse de l'échantillon = 1.6 kg				
Ouverture de tamis (mm)	masse des refus (g)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage des refus cumulés (%)	Pourcentage des tamisats cumulés(%)
12.5	0	0	0	100
10	9	9	0.56	99.44
8	103.5	112.5	7.03	92.97
6.3	403	515.5	32.22	67.78
5	508.5	1024	64	36
4	442	1466	91.63	8.37
3.15	80.5	1546.5	96.66	3.34
2.5	17.5	1564	97.75	2.25
2	4	1568	98	2
Fond	29.5	1597.5	100	0

Tableau 3.10. Analyse granulométrique du gravier 8/16.

Gravier 8/16				
La masse de l'échantillon = 3.2 kg				
Ouverture de tamis (mm)	masse des refus (g)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage des refus cumulés (%)	Pourcentage des tamisats cumulés(%)
25	0	0	0	100
20	0	0	0	100
16	81.5	81.5	2.55	97.45
12.5	1041	1122.5	35.08	64.92
10	1352	2474.5	77.36	22.64
8	575	3049.5	95.3	4.7
6.3	116	3165.5	98.92	1.08
5	9	3174.5	99.2	0.8
Fond	14.5	3189	100	0

La Figure 3.2 représente les courbes granulométriques des différents granulats étudiés.

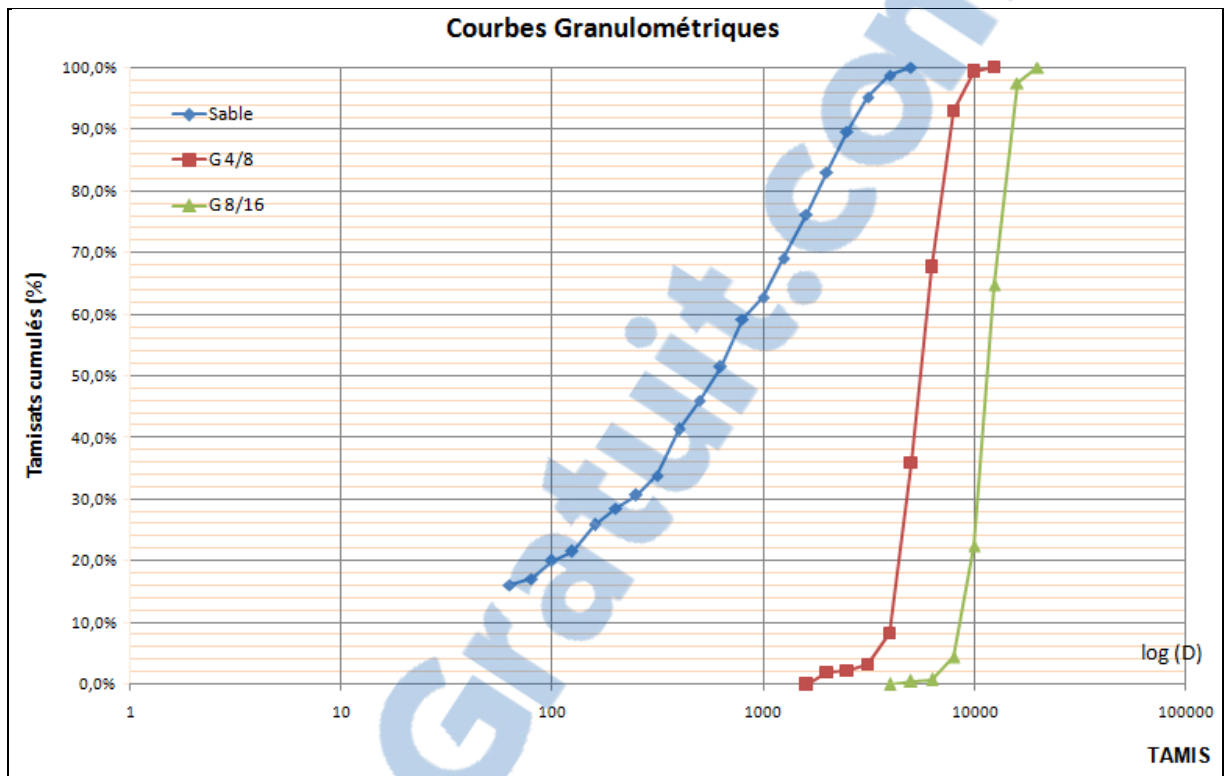


Figure 3.2. Courbes granulométriques des granulats.

L'analyse granulométrique a révélé que la teneur en fines est de 16,12% pour le sable avec un module de finesse de 2,3. Au vue de ces résultats, le sable est conforme aux exigences de la norme P 18-541 qui fixe un module de finesse compris entre 1,8 à 3,2 selon les gisements et exige un module optimum de 2,5.

IV. Eau de gâchage

L'eau utilisée est distribuée par le réseau du service public de la Daira de Chetouane appartenant à la ville de Tlemcen. Sa composition chimique répond aux prescriptions de la norme XP P 18-303, cette composition est résumée dans le Tableau 3.11.

Tableau 3.11. Caractéristiques chimiques de l'eau (Boukli, 2010).

Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	CO ₃	NO ₃	PH	T (°C)
74.4	49	40	5	95	170	300	42.3	7.5	17.1

V. Les adjuvants

Pour notre étude, nous avons choisi d'utiliser deux adjuvants commercialisés par le groupe des sociétés HASNAOUI (Sidi Bel Abbes), ces adjuvants sont conformes à la norme EN 934-2. Le premier est de type superplastifiant haut réducteur d'eau avec effet retardateur spécialement formulé pour le béton prêt à l'emploi. Il est désigné sous l'appellation « TEK–SUPERFLOW 2000 R ». Ses propriétés physiques sont résumées dans le Tableau 3.12 :

Tableau 3.12.Caractéristiques du superplastifiant « TEK – SUPERFLOW 2000 R »

Etat	Liquide
Couleur	Brune
Densité à 20° C	$1,17 \pm 3 \%$
pH à 20°C	9.5 ± 1
Teneur en chlorures	$\leq 1\%$
Extrait sec	$35\% \pm 2\%$

Le deuxième adjuvant est aussi un superplastifiant très haut réducteur d'eau de dernière génération à base de polymère acrylique. Il est désigné sous l'appellation « UNICUM PC 6 », ses propriétés physiques sont résumées dans le Tableau 3.13.

Tableau 3.13.Caractéristiques du superplastifiant « UNICUM PC 6 »

Etat	Liquide
Couleur	Brune
Densité à 20° C	$1,07 \pm 2 \%$
pH à 20°C	5 ± 1
Teneur en chlorures	$\leq 1\%$
Extrait sec	$34\% \pm 2\%$

Références bibliographiques

- BoukliHacene S.M., 2010 : "Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen", thèse de doctorat de l'université de Tlemcen, Algérie.
- Hanini W., 2012 : Etude de l'incidence de la granularité sur la compacité des mélanges granulaires, mémoire de magister de l'université de Tlemcen, Algérie.
- Taleb O., 2009 : Optimisation de la formulation des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux, mémoire de magister de l'université de Tlemcen, Algérie.

Chapitre 4

PARTIE EXPÉRIMENTALE

Dans la première partie de notre travail expérimental, nous proposons une nouvelle démarche pour formuler des BAP en utilisant la méthode chinoise tout en impliquant la norme NF EN 206-1.

Nous avons aussi choisi d'utiliser des fillers calcaires comme des additions de substitution au ciment vu leurs disponibilité dans la région. L'objectif de cette substitution est d'étudier le comportement des éco-bétons à caractère autoplaçant.

Dans la seconde partie, nous essayons de trouver des relations entre les paramètres rhéologiques des bétons autoplaçants étudiés et des MBE correspondants.

Enfin, nous clôturons ce travail expérimental par une étude comparative entre les approches déjà utilisées dans notre laboratoire « EOLE » et la méthode que nous avons adoptée pour formuler nos bétons autoplaçants.

SOMMAIRE DU CHAPITRE 4

I. Formulation des BAP par la méthode chinoise	79
II. Caractérisation des bétons autoplaçants étudiés	90
III. Formulation des MBE	99
IV. Corrélation BAP/MBE	107
V. Etude comparative entre les méthodes de formulation	108
VI. Bilan	110

I. Formulation des BAP par la méthode chinoise

La particularité de cette démarche est la prise en compte de la compacité des granulats après compactage, et puis le remplissage des vides des granulats avec la pâte. La deuxième particularité de cette démarche est d'impliquer des méthodes expérimentales existantes dans notre laboratoire.

I.1. Détermination du facteur de compacité « PF »

L'essai consiste à déterminer le volume occupé par le mélange (gravier + sable) dans une éprouvette cylindrique de hauteur 320 mm et de diamètre 160 mm avant et après compactage. Pour la détermination du volume de l'échantillon avec compactage, un piston de 20 kg appliquant une pression de 10 KPa est utilisé. Cet échantillon est soumis à une vibration de 150 HZ.

Dans un premier temps, nous avons choisi d'étudier l'influence du rapport $G_{4/8}/G_{8/16}$ pour un rapport G/S égale à 1. A cet effet, trois proportions granulaires ont été considérées. Il s'agit d'une combinaison massique de 67% de granulats de fraction 4/8 et 33% de 8/16, une combinaison massique de 50% de 4/8 et 50% de 8/16 et une troisième combinaison massique de 33% de 4/8 et 67% de 8/16.

Nous avons pris pour les trois essais un échantillon de 7.5 Kg du mélange (gravier + sable). Pour la détermination du volume de l'échantillon sans compactage, nous avons rempli l'éprouvette en laissant le matériau s'écouler sous l'effet de la gravité sans aucune autre sollicitation, en mesurant ensuite sa hauteur finale (Figure 4.1).

Pour la détermination du volume de l'échantillon avec compactage, le matériau est versé dans l'éprouvette en trois couches successives. Le remplissage de chacune de ces couches est suivi d'une vibration pendant 20 secondes. Ensuite, le piston est placé dans le moule rempli de matériau, et une vibration est appliquée pendant 90 secondes. La hauteur finale de l'échantillon est aussi déterminée dans ce cas.



Figure 4.1. Mode opératoire pour l'essai de compacité.

La combinaison massique de 33% du gravier 4/8 et 67% du gravier 8/16 nous a permis d'obtenir le meilleur arrangement. Raison pour laquelle nous avons opté de choisir cette combinaison pour déterminer le PF. L'essai donc est reconduit en faisant varier le rapport G/S. La Figure 4.2 résume les résultats expérimentaux obtenus.

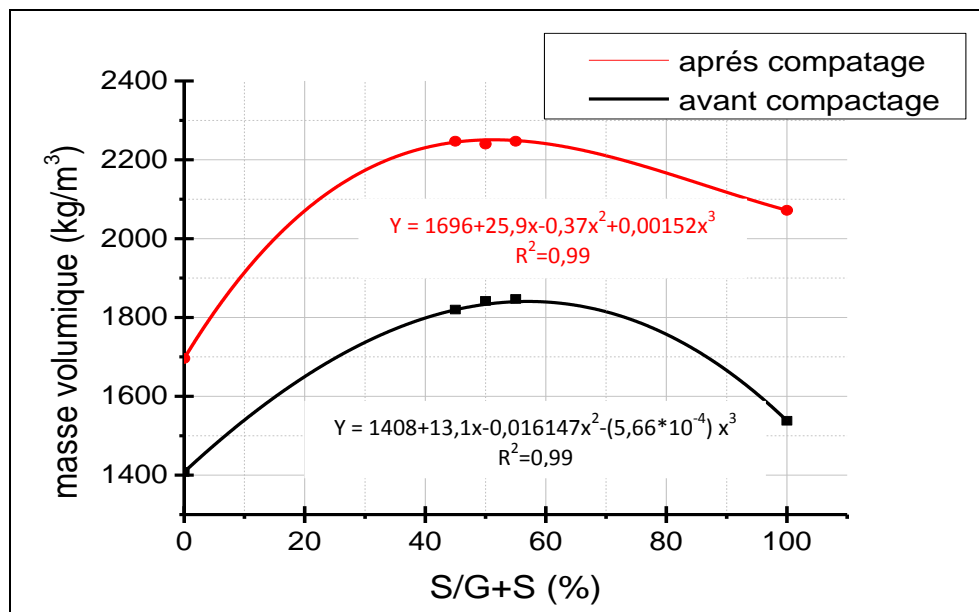


Figure 4.2. Évolution des masses volumiques apparentes des granulats avant et après compactage en fonction du rapport S/G+S.

Les deux points particuliers sont ceux qui correspondent aux rapports S/ G+S = 0% et S/G+S =100% et qui représentent respectivement les masses volumiques du gravier et du sable.

Les valeurs optimales des masses volumiques se trouvent aux sommets des courbes avant et après compactage. Le PF est défini comme étant le rapport entre ces deux masses volumiques.

$$PF = \frac{\rho_{\text{après}}}{\rho_{\text{avant}}} \quad (4.1)$$

Avec :

$\rho_{\text{après}}$: la masse volumique apparente de l'échantillon après compactage (kg/m^3).

ρ_{avant} : la masse volumique apparente de l'échantillon avant compactage (kg/m^3).

A partir des essais réalisés, la valeur optimale du facteur de compacité « PF » est de 1,22. Elle a été obtenue pour les masses volumiques correspondantes au rapport G/S égal à 1 ($S/G+S = 50\%$). Ce rapport est en adéquation avec les recommandations du l'AFGC. Par ailleurs le rapport $G_{4/8}/G_{8/16}$ est de 0,5.

I.2. Détermination du dosage minimal en ciment et du rapport $E_{\text{eff}}/L_{\text{équi}}$

Le dosage minimal du liant équivalent ($L_{\text{équi}}$) et le rapport $E_{\text{eff}}/L_{\text{équi}}$ maximal sont choisis en fonction de la classe d'exposition et ceci conformément à la norme NF EN206-1.

Le dosage en ciment est déduit par la formule suivante :

$$L_{\text{équivalent}} = C + k.A \quad (4.2)$$

Où

C : le dosage en ciment.

A : le dosage en additions.

k : coefficient qui dépend de la nature de l'addition.

Nous avons choisi dans notre étude de formuler un BAP pour la classe d'environnement très agressif (XA) qui nécessite une teneur en liant équivalent très élevée de 380 kg/m^3 .

Puisque le ciment utilisé est du type CEM II donc $k=0$, et la teneur en liant équivalent serait égale à celle du ciment donc $C = 380 \text{ kg/m}^3$. Cette classe d'exposition exige un rapport $E_{\text{eff}}/L_{\text{équi}} = 0,5$ donc $E_{\text{eff}} = 190 \text{ l/m}^3$.

I.3. Détermination du rapport E/F

Le rapport E/F est déterminé de telle façon que la fluidité de la pâte des fillers est identique à celle de la pâte pure du ciment pour un rapport E/C=0,5. Les résultats des essais sont consignés dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1. Résultats d'étalement des pâtes pures de ciment et de fillers.

		Etalement (mm)
E/C	0,5	115
E/F	0,3	55
	0,4	100
	0,42	115

Nous avons trouvé qu'un rapport E/F égal 0,42 permet de répondre à notre objectif.

I.4. Dosage de saturation

Le dosage de saturation en superplastifiant a été déterminé par la méthode du mini cône selon la norme NF EN 1961. Cette méthode consiste à évaluer le dosage de saturation de superplastifiants à travers un essai d'étalement sur une très petite quantité de pâte de ciment en utilisant le cône présenté à la Figure 4.3. Les diamètres sont mesurés selon deux axes perpendiculaires, et la moyenne est considérée comme la valeur d'étalement au mini cône.



Figure 4.3. Mini-cône

I.4.1. Dosage de saturation pour une pâte de ciment

Pour déterminer le dosage de saturation de la pâte du ciment, nous avons pris 200g de ciment avec un rapport E/C égale à 0,5. Nous avons ainsi étudié le dosage de saturation

de deux types de superplastifiants. Les courbes de la Figure 4.4 montrent l'évolution de l'étalement en fonction du dosage en adjuvant.

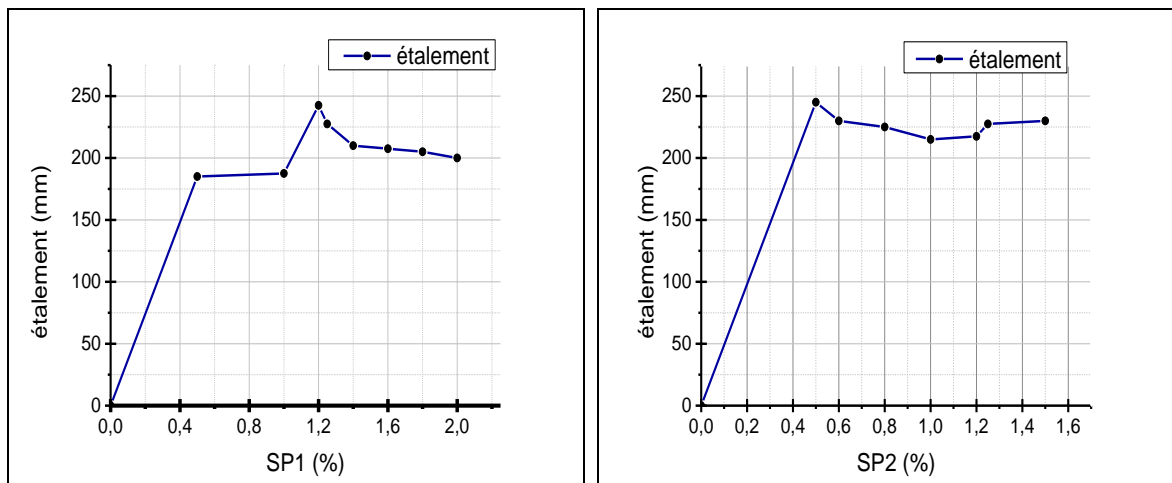


Figure 4.4. Variation de l'étalement de la pâte de ciment en fonction du dosage en superplastifiant.

Nous avons trouvé que le dosage de saturation est de l'ordre 1,2% pour le premier superplastifiant (TEK-SUPERFLOW 2000 R). Cependant le dosage maximal du deuxième superplastifiant (UNICUM PC 6) est de l'ordre de 0,5%.

I.4.2. Dosage de saturation pour une pâte de fillers calcaires

Pour déterminer le dosage de saturation de la pâte de fillers nous avons pris 200g du fillers avec un rapport E/F égal à 0,42 et nous avons fait varier le dosage des deux superplastifiants utilisés.

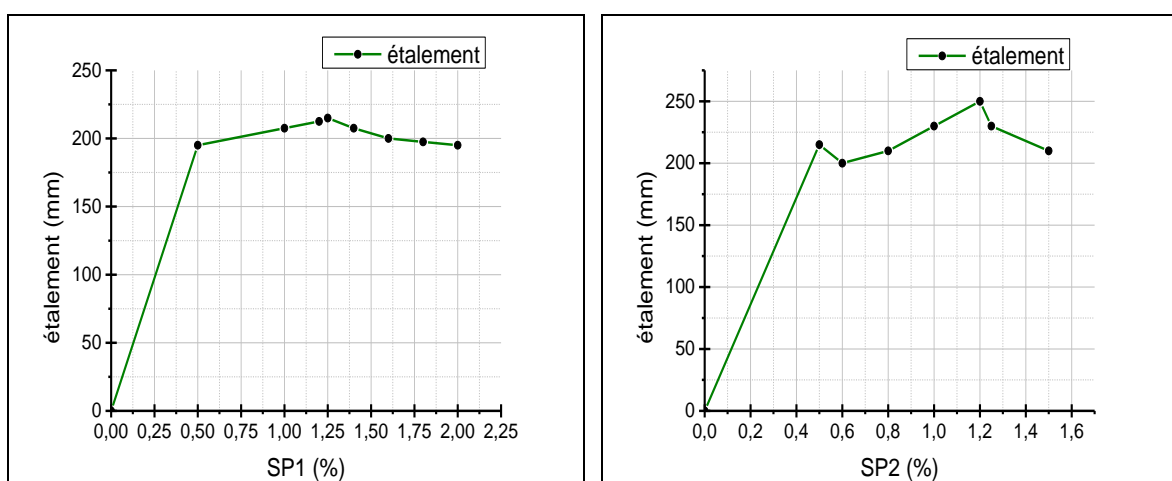


Figure 4.5. Variation de l'étalement de la pâte de fillers en fonction du dosage en superplastifiant.

D'après la Figure 4.5, nous constatons que le dosage de saturation est de l'ordre de 1,25% pour SP1 (TEK–SUPERFLOW 2000 R), et qu'il est de l'ordre de 1,20% pour SP2 (UNICUM PC 6).

Nous avons jugé utile de déterminer les dosages de saturation pour le superplastifiant (TEK–SUPERFLOW 2000 R) pour les pâtes de ciment et de fillers calcaires pour n'importe quels rapports E/C et E/F sur une fourchette d'étude.

Ceci permettra d'avoir directement les dosages nécessaires des superplastifiants sans pour autant refaire les essais au mini-cône. Pour ce faire, la technique des plans d'expérience reste la plus adaptée pour réduire le nombre d'essais.

Un plan factoriel complet de 2^2 a été employé pour évaluer l'influence de deux niveaux différents pour chacune des deux variables constituant la pâte. Ces variables sont bien évidemment le rapport E/C ou le rapport E/F et le superplastifiant. Les niveaux initiaux des deux variables ont été choisis de telle façon à balayer une fourchette du rapport E/C qui répond à toutes les classes d'expositions (NF EN 206-1) afin de trouver le rapport E/F qui permet de donner une fluidité identique. Pour visualiser ce point, nous avons choisi l'étalement comme élément de réponse et pour la reproductibilité de nos résultats nous avons réalisé chaque essai à deux reprises.

Un total de 8 mélanges a été préparé pour développer les modèles statistiques et un mélange supplémentaire (point central) pour évaluer l'exactitude des modèles proposés. Pour la pâte de ciment, ces modèles sont valables pour une large gamme de mélanges avec un rapport E/C variant de 0,45 à 0,55, un dosage en superplastifiant variant de 1% à 1,25%.

Cependant pour la pâte de fillers, le rapport E/F variant de 0,37 à 0,47 et le dosage en superplastifiant variant de 1% à 1,25%.

Les formulations sont résumées dans les Tableaux 4.2 et 4.3 selon leurs ordres de préparations dans le laboratoire après la randomisation des essais.

Tableau 4.2. Formulation des pâtes de ciment selon un plan d'expérience.

N° de formulation	E/C	Le dosage en superplastifiant (%)	Le dosage en ciment (kg)	Le dosage en eau (l)	Réponse (mm)
1	0,55	1	1,35	0,74	220
2	0,55	1,25	1,35	0,74	200
3	0,45	1	1,52	0,68	162,5
4	0,45	1,25	1,52	0,68	197,5
5	0,55	1	1,35	0,74	185
6	0,45	1,25	1,52	0,68	190
7	0,55	1,25	1,35	0,74	205
8	0,45	1	1,52	0,68	175

Tableau 4.3. Formulation des pâtes de fillers selon un plan d'expérience.

N° de formulation	E/F	Le dosage en superplastifiant (%)	Le dosage en fillers (kg)	Le dosage en eau (l)	Réponse (mm)
1	0,47	1	1,41	0,66	230
2	0,47	1	1,41	0,66	240
3	0,37	1,25	1,6	0,6	200
4	0,37	1	1,60	0,59	210
5	0,47	1,25	1,50	0,66	190
6	0,37	1	1,60	0,59	190
7	0,37	1,25	1,6	0,6	210
8	0,47	1,25	1,50	0,66	200

Les Figures 4.6 et 4.7 représentent respectivement les réponses de la pâte de ciment et des fillers.

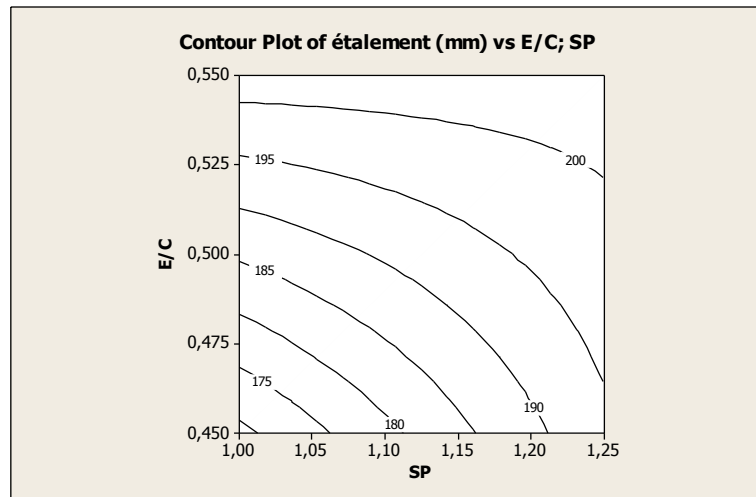


Figure 4.6. Iso-réponse de l'étalement de la pâte de ciment en fonction du rapport E/C et le dosage en superplastifiant.

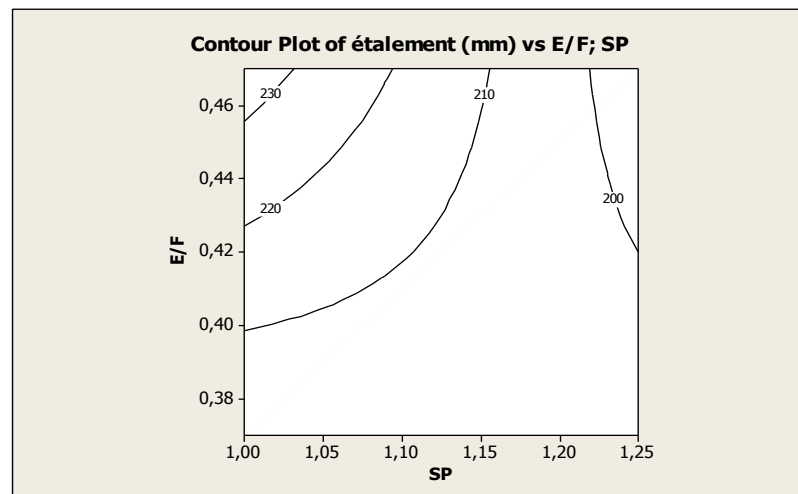


Figure 4.7. Iso-réponse de l'étalement de la pâte de fillers en fonction du rapport E/F et le dosage en superplastifiant.

- **Détermination des coefficients du modèle**

La méthode des plans d'expériences permet une représentation mathématique de la réponse «y» en fonction des facteurs de l'étude. Les coefficients des modèles sont obtenus à l'aide d'une régression multiple exécutée sur le logiciel d'analyse statistique MINITAB 16.

$$\text{étalement(mm)} = -533.125 + 1337.5 \frac{E}{C} + 550 \text{ SP} - 1000 \frac{E}{C} \times \text{SP} \quad (4.3)$$

$$R^2 = 67.63 \%$$

$$\text{étalement(mm)} = -615.5 + 2150 \frac{E}{F} + 686 \text{ SP} - 1800 \frac{E}{F} \times \text{SP} \quad (4.4)$$

$$R^2 = 84.7 \%$$

A partir de ces modèles, nous constatons que l'augmentation de l'étalement est conditionnée d'abord par l'accroissement des rapports E/C ou E/F, suivie par l'augmentation de la teneur en superplastifiant.

I.5. Dosage en granulats

Les compositions massiques du gravier et du sable sont déduites respectivement à partir des équations 4.5 et 4.6.

$$M_g = PF \times \rho_g \times \left(1 - \frac{S}{S+G}\right) \quad (4.5)$$

$$M_s = PF \times \rho_s \times \left(\frac{S}{S+G}\right) \quad (4.6)$$

I.6. Dosage en fillers calcaires

Il est important de mettre en évidence notre apport concernant le calcul de la masse de l'addition qui dans le cadre de notre travail sont les fillers calcaires.

Cette masse a été calculée selon la démarche suivante :

$$V_{\text{pâte fillers}} = 1 - V_g - V_s - V_c - V_E - V_a \quad (4.7)$$

$$V_{\text{pâte fillers}} = 1 - \frac{M_g}{1000 \times G_g} - \frac{M_s}{1000 \times G_s} - \frac{M_c}{1000 \times G_c} - \frac{M_{EC}}{1000 \times G_E} - V_a \quad (4.8)$$

En outre :

$$V_{\text{pâte fillers}} = V_F + V_{EF} \quad (4.9)$$

$$V_{\text{pâte fillers}} = \frac{M_F}{1000 \times G_F} + \frac{E_F}{1000} \quad (4.10)$$

Par ailleurs, l'équation 4.10 devient :

$$V_{\text{pâte fillers}} = \frac{M_F}{1000 \times G_F} \left(1 + \frac{E}{F} \times G_F \right) \quad (4.11)$$

Par contre dans la méthode chinoise développée par Su et col. (2001,2003), le calcul de la masse de l'addition se fait par l'équation 4.12.

$$V_{\text{PCV}} + V_{\text{PLHF}} = \left(1 + \frac{E}{CV} \right) \times A \% \times \frac{M_{\text{pm}}}{1000 \times G_{\text{CV}}} + \left(1 + \frac{E}{\text{LHF}} \right) \times B \% \times \frac{M_{\text{pm}}}{1000 \times G_{\text{LHF}}} \quad (4.12)$$

I.7. Dosage en eau

La quantité d'eau de gâchage du BAP étudié est la quantité d'eau nécessaire pour le ciment et les fillers plus la quantité d'eau absorbée par les granulats moins la quantité d'eau apportée par le SP.

$$E_T = E_C + E_F + E_G + E_S - E_{\text{SP}} \quad (4.13)$$

Les Tableaux 4.4 et 4.5 regroupent les formulations de référence de notre étude.

Tableau 4.4. Composition du BAP à base du superplastifiant SP1

Le rapport $\frac{G}{S}$	1			
Le rapport $\frac{E}{C}$	0.5			
Le rapport $\frac{E}{F}$	0.42			
Le dosage en ciment (kg/m ³)	380			
Le dosage en fillers (kg/m ³)	29			
Le dosage en gravier (kg/m ³)	848	33%	Gravier 4/8	283
		67%	Gravier 8/16	565
Le dosage en sable (kg/m ³)	848			
Le dosage en SP (kg/m ³)	5			
Le dosage en eau (kg/m ³)	220			

Tableau 4.5. Composition du BAP à base du superplastifiant SP2

Le rapport $\frac{G}{S}$	1			
Le rapport $\frac{E}{C}$	0.5			
Le rapport $\frac{E}{F}$	0.42			
Le dosage en ciment (kg/m ³)	380			
Le dosage en fillers (kg/m ³)	29			
Le dosage en gravier (kg/m ³)	849	33%	Gravier 3/8	283
		67%	Gravier 8/16	566
Le dosage en sable (kg/m ³)	849			
Le dosage en SP (kg/m ³)	2,3			
Le dosage en eau (kg/m ³)	221			

Afin d'étudier l'influence du dosage en fillers calcaires sur les propriétés du BAP à l'état frais et durci, nous avons confectionné plusieurs bétons en faisant varier le dosage en fillers entre 0% et 40% du poids du liant (ciment + fillers) (F/L=0% ; F/L=15% ; F/L=25% ; F/L=40%). Les compositions sont regroupées dans les Tableaux 4.6 et 4.7.

Tableau 4.6. Composition du BAP à base du superplastifiant SP1 pour les différents rapports F/L.

F/L	0%	15%	25%	40%
Le dosage en ciment (kg/m ³)	408	349	310	250
Le dosage en fillers (kg/m ³)	0	62	103	166
Le dosage en gravier (kg/m ³)	848	848	848	848
Le dosage en sable (kg/m ³)	848	848	848	848
Le dosage en SP (kg/m ³)	4,89	4,96	5	5,1
Le dosage en eau (kg/m ³)	221	218	215	212

Tableau 4.7. Composition du BAP à base du superplastifiant SP2 pour les différents rapports F/L.

F/L	0%	15%	25%	40%
Le dosage en ciment (kg/m^3)	408	349	309	259
Le dosage en fillers (kg/m^3)	0	62	103	173
Le dosage en gravier (kg/m^3)	849	849	849	832
Le dosage en sable (kg/m^3)	849	849	849	832
Le dosage en SP (kg/m^3)	2,04	2,5	2,8	3,4
Le dosage en eau (kg/m^3)	223	220	217	220

II. Caractérisation des bétons autoplacants étudiés

Tous les bétons que nous avons réalisés dans le cadre de ce travail ont été caractérisés selon les normes en vigueur.

II.1. Essais de la norme 206-9

Les bétons formulés ont été testés par les différents essais recommandés par l'AFGC et qui permettent de caractériser les propriétés du BAP à l'état frais. Pour chaque béton nous avons réalisé l'essai d'étalement au cône d'Abrams, l'essai de J-RING, l'essai V-funnel et l'essai de stabilité au tamis (Figure 4.8).



Figure 4.8. Les essais réalisés pour la caractérisation des BAP à l'état frais.

Pour la réalisation de tous les essais, nous avons procédé à la confection de gâchées de grande volume (30l). Malheureusement, ce volume était insuffisant pour réaliser l'ensemble des essais. Raison pour laquelle nous n'avons pas pu réaliser l'essai de la boîte en L. il faut noter que seul l'essai au rhéomètre nécessite 23 l de volume de béton.

Les résultats des essais, réalisés sur les gâchées de 30l sont représentés sur les figures suivantes:

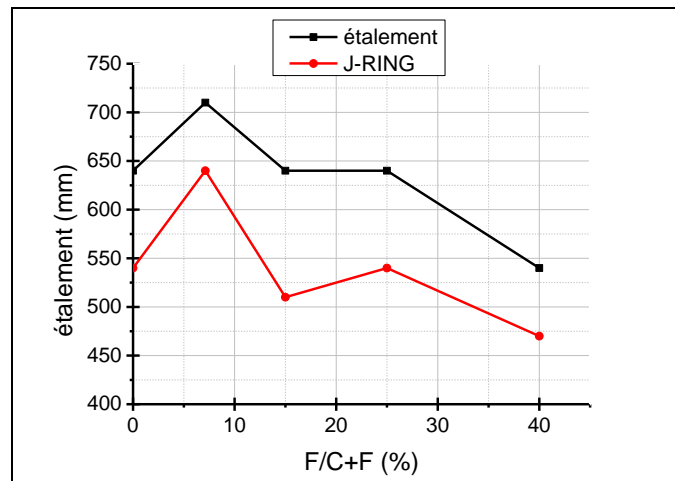


Figure 4.9. Etalement des BAP en fonction du pourcentage de fillers (SP1).

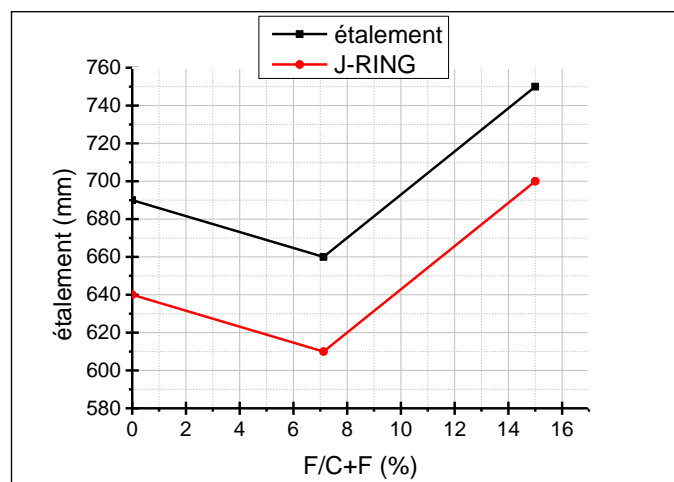


Figure 4.10. Etalement des BAP en fonction du pourcentage de fillers (SP2).

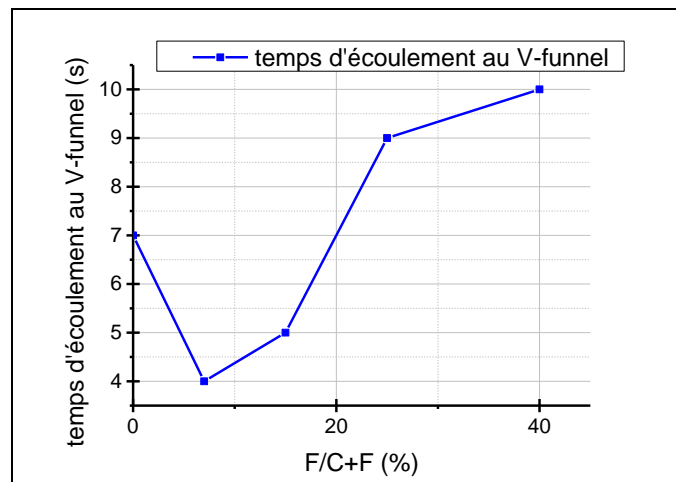


Figure 4.11. Temps d'écoulement au V-funnel en fonction du pourcentage de fillers calcaires (SP1).

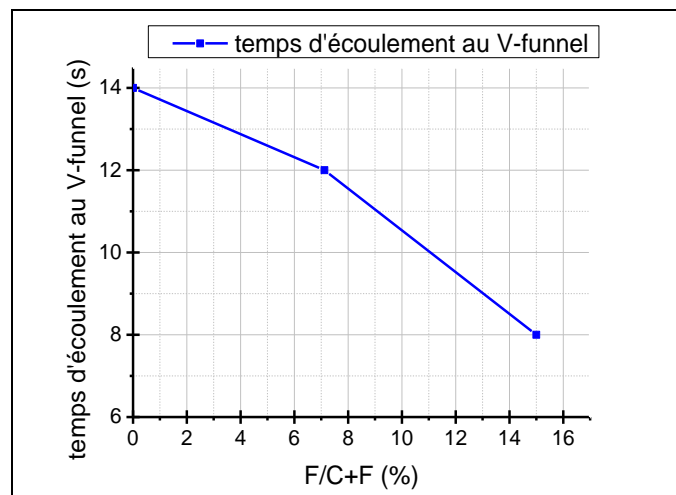


Figure 4.12. Temps d'écoulement au V-funnel en fonction du pourcentage de fillers calcaires (SP2).

Les résultats issus des essais au cône d'Abrams montrent l'effet bénéfique des deux superplastifiants sur la fluidité des mélanges. Nous remarquons aussi que le meilleur étalement est celui du BAP formulé à base du SP1 pour un rapport $\frac{F}{C+F} = 7\%$. Au-delà de ce seuil les valeurs des étalements diminuent.

Néanmoins, il est possible de formuler des BAP avec un rapport $\frac{F}{C+F} = 25\%$ c'est-à-dire avec une substitution d'un quart du ciment. Nous remarquons aussi qu'il est possible de

formuler des BAP dosé à 310 kg/m^3 en ciment. Cela permet de réduire considérablement le coût du mélange tout en ayant un comportement à l'état frais meilleur que celui d'un béton ordinaire.

Une substitution massique de 40% du ciment par ces additions (une teneur en ciment de 250 kg/m^3 avec une teneur en fillers de 166 kg/m^3) a aussi permis d'avoir une fluidité intéressante qui peut être adapté pour un béton semi autoplaçant « BSAP ».

Nous remarquons ainsi qu'il n'y a pas de corrélation entre le liant équivalent et la fluidité du mélange lorsque nous sommes dans le cas d'un CEM II où $k=0$.

Sur le plan rhéologique, le liant équivalent ne peut pas refléter réellement le vrai dosage du liant utilisé. Cette remarque peut être étendue même dans les autres cas où k est différent de zéro, puisque ce dernier est en fonction de l'addition utilisée. Il serait donc aberrant de représenter les résultats de la rhéologie en fonction du dosage du liant équivalent.

Les résultats obtenus par l'essai de l'anneau japonais (J. Ring) confirment les résultats du cône sans anneau.

D'un autre côté, il est clair à la lecture des résultats que le deuxième superplastifiant a un effet plus important sur la fluidité.

Néanmoins, nous avons constaté un début d'instabilité visuelle lorsque le rapport $\frac{F}{C+F}$ est égal à 15%. Raison pour laquelle, nous nous sommes arrêtés à ce seuil. Nous pensons éventuellement que ce changement de tendance peut être attribué à l'utilisation d'un autre sable de l'ENG qui n'avait pas apparemment les mêmes caractéristiques que celui utilisé initialement.

Les résultats consignés dans les Tableaux 4.8 et 4.9 montrent que les bétons obtenus sont stables, nous constatons clairement l'amélioration de la stabilité des bétons grâce à l'apport des fillers calcaires. Ce résultat a été vérifié dans les travaux de Taleb (2009).

Tableau 4.8. Les résultats d'essai de stabilité au tamis des BAP à base du superplastifiant SP1

F/L (%)	0	7	15	25	40
Essai de stabilité au tamis P%	0,9	1,65	0,7	0	0

Tableau 4.9. Les résultats d'essai de stabilité au tamis des BAP à base du superplastifiant SP2.

F/L (%)	0	7	15
Essai de stabilité au tamis P%	7	0,59	7,2

Pour le second superplastifiant, nous avons remarqué la formation d'une laitance autour de la galette pour un rapport F/L égal 15% (Figure 4.13).



Figure 4.13. L'instabilité du béton (essai J-RING).

L'essai de stabilité au tamis a par ailleurs révélé une valeur de 7.2% pour ce même mélange. Il est donc important d'effectuer un essai qualitatif et un autre quantitatif pour s'assurer de la stabilité du mélange.

II.2 Les essais rhéologiques

Pour mesurer les paramètres rhéologiques, nous avons jugé intéressant d'utiliser un nouveau rhéomètre adapté aux bétons et aux mortiers (Figure 4.14).

Les bétons sont caractérisés en régime permanent d'écoulement. La vitesse de la partie mobile est augmentée rapidement pour s'affranchir des propriétés dépendantes du temps comme la thixotropie et pour tester le matériau dans un état suffisamment déstructuré. Ensuite le matériau est testé en effectuant des mesures à vitesse de rotation décroissante. Le profil de vitesse est défini dans la Figure 4.15.



Figure 4.14. Rhéomètre utilisé pour les essais rhéologiques.

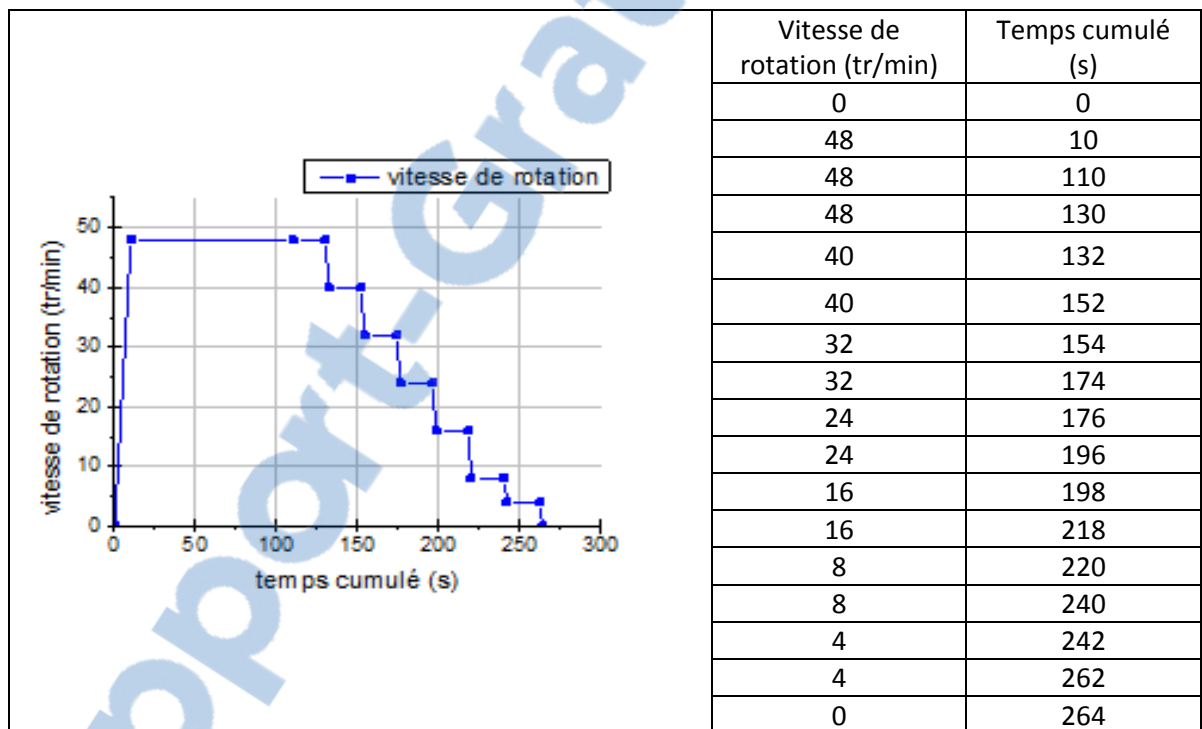


Figure 4.15. Profil de vitesse imposé au cours des essais rhéologiques du béton.

La Figure 4.16 montre l'évolution de la contrainte de cisaillement (τ) en fonction du taux de cisaillement. Il est clair que le BAP suit un comportement similaire à celui des fluides Binghamiens.

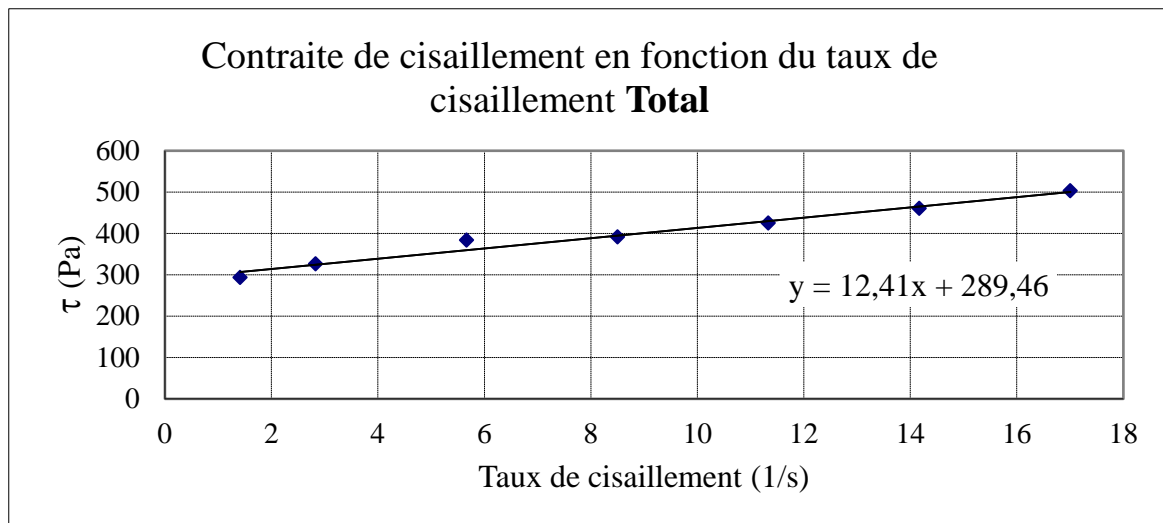


Figure 4.16. Comportement rhéologique de BAP de référence.

Les Figures 4.17 et 4.18 représentent l'influence du rapport F/L et le type de superplastifiant sur les paramètres rhéologiques (le seuil de cisaillement et la viscosité).

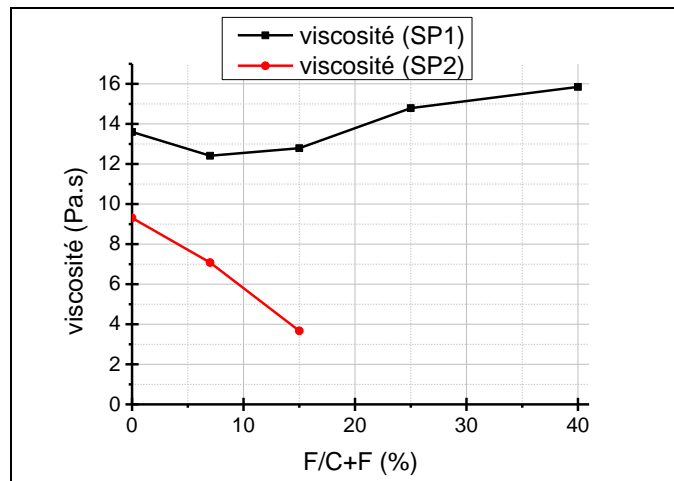


Figure 4.17. L'influence des paramètres de composition sur la viscosité.

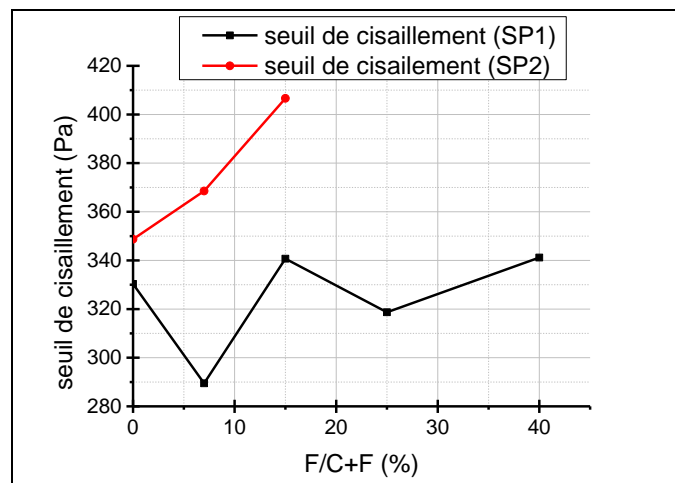


Figure 4.18. L'influence des paramètres de composition sur le seuil de cisaillement.

A partir des Figures 4.9 et 4.18 nous constatons qu'il y a une corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement. L'augmentation de la valeur d'étalement est signe de baisse du seuil de cisaillement.

Tous les bétons autoplaçants formulés à base du « SUPER-FLOW 2000 » ont présenté des seuils de cisaillement inférieurs à ceux formulés avec l'adjuvant « UNICUM PC 6 ». Donc l'utilisation du « SUPER-FLOW 2000 » peut être intéressante lors de la mise en œuvre du béton.

Concernant le « SUPER-FLOW 2000 », une autre corrélation intéressante a été décelée entre le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. Nous avons constaté aussi, qu'une diminution de la viscosité engendre une réduction du seuil de cisaillement.

Malheureusement, nous n'avons pas trouvé le même comportement pour les BAP avec le deuxième superplastifiant.

Nous avons aussi constaté une séparation entre la phase liquide et solide lors de l'essai de rhéologie des BAP formulés avec le superplastifiant « UNICUM PC 6 » pour un rapport

$$\frac{F}{C+F} = 15\% .$$

II.3. Résistance des BAP

L'essai a été réalisé selon la norme NF P 18-406, les éprouvettes utilisées sont des éprouvettes cylindriques 11×22 cm. Le choix de l'utilisation de ces moules est justifié par le fait que le diamètre maximal des granulats est égale à 16 mm (NF P 18-400).

Après la rectification des éprouvettes pour assurer la planéité des leurs surfaces, ces dernières sont placées entre les plateaux de la presse universel. L'erreur de centrage doit être inférieure à 1% du diamètre de l'éprouvette, raison pour laquelle un gabarit doit être utilisé. La charge est appliquée à une vitesse de chargement constante égale 0,5 MPa/s pendant toute la durée des essais jusqu'à la rupture (Figure 4.19).



Figure 4.19. Essai de compression

L'évolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction du taux de substitution du ciment par des fillers calcaires et le type du superplastifiant est représentée sur la Figure 4.20.

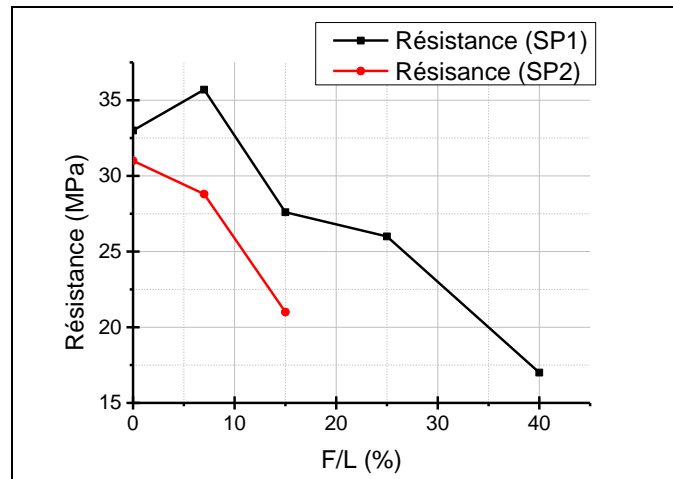


Figure 4.20. Résistance à la compression à 28 jours en fonction du pourcentage de fillers. Les résultats montrent que la résistance a tendance à diminuer en augmentant le taux de substitution. Cette substitution partielle du ciment par des fillers calcaires a un effet positif sur les propriétés rhéologiques de la pâte. Si le critère de résistance est imposé, un dosage maximal de 7% de fillers peut être suffisant.

Nous avons aussi constaté qu'avec le superplastifiant du type « SUPERFLOW 2000 R » nous avons pu obtenir de meilleurs résistances qu'avec le superplastifiant « UNICUM PC 6 ».

III. Formulation des MBE

Les différents mélanges du MBE que nous avons étudié sont ceux issues des différentes formules des BAP définies précédemment. Aussi, nous avons remplacé le volume du gravier par un autre volume de sable lavé qui présente la même surface développée. Nous avons choisi d'utiliser un sable lavé pour éviter tout artefact du aux fines présentes dans le sable.

Les Tableaux 4.10, 4.11 et 4.12 regroupent respectivement les valeurs de surfaces développées pour le gravier, le sable et le sable lavé.

Tableau 4.10. La surface développée du mélange des graviers.

surface développée pour 33% du gravier 4/8 et 67% du gravier 8/16												
$T m_i$	0	0,08	0,16	0,315	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16
$T M_i$	0,08	0,16	0,315	0,63	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20
d_i	0,04	0,12	0,2375	0,4725	3,575	4,5	5,65	7,15	9	11,25	14,25	18
Mu_i (kg)	0	0,004	0,0025	0,008	0,028	0,1	0,128	0,071	0,1575	0,283	0,2115	0,006
V_i (m ³)	3,35 E-14	9,05 E-13	7,0 E-12	5,52 E-11	2,39 E-08	4,77 E-08	9,44 E-08	1,91 E-07	3,82 E-07	7,46 E-07	1,52 E-06	3,05 E-06
s_i (m ²)	5,02 E-09	4,52 E-08	1,77 E-07	7,01 E-07	4,02 E-05	6,36 E-05	1,00 E-04	1,61 E-04	2,54 E-04	3,97 E-04	6,38 E-04	1,02 E-03
μ_i (m ³ /kg)	3,85 E-04	3,85 E-04	3,85 E-04	3,85 E-04	3,85 E-04	3,85 E-04	3,85 E-04	3,85 E-04	3,85 E-04	3,85 E-04	3,85 E-04	3,85 E-04
V_i (m ³)	0	1,54 E-06	9,62 E-07	3,08 E-06	1,08 E-05	3,85 E-05	4,92 E-05	2,73 E-05	6,06 E-05	1,09 E-04	8,13 E-05	2,31 E-06
N_i	0	1700294,8	137074,65	55704,79	450,13	806,07	521,28	142,68	158,69	146	53,69	0,76
S_i (m ²)	0	0,0769	0,0243	0,039	0,018	0,051	0,052	0,023	0,040	0,058	0,034	0,0007
SD (m²)	0,418275743											

Tableau 4.11. La surface développée du sable.

Surface développée pour 1kg de sable										
$T m_i$	0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5
$T M_i$	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3
d_i	0,04	0,12	0,2375	0,4725	0,94	1,875	2,825	3,575	4,5	5,65
Mu_i (kg)	0,1732	0,0885	0,0805	0,1785	0,1795	0,2075	0,056	0,036	0,013	0
v_i (m ³)	3,4E-14	9,1E-13	7,0E-12	5,5E-11	4,4E-10	3,5E-09	1,2E-08	2,4E-08	4,8E-08	9,4E-08
s_i (m ²)	5,0E-09	4,5E-08	1,8E-07	7,0E-07	2,8E-06	1,1E-05	2,5E-05	4,0E-05	6,4E-05	1,0E-04
μ_i (m ³ /kg)	3,7E-04	3,7E-04	3,7E-04	3,7E-04	3,7E-04	3,7E-04	3,7E-04	3,7E-04	3,7E-04	3,7E-04
Vi (m ³)	6,3E-05	3,2E-05	2,9E-05	6,5E-05	6,6E-05	7,6E-05	2,0E-05	1,3E-05	4,7E-06	0
Ni	1884958708	35672493	4185419,2	1178600,7	150527,14	21925,44	1730,08	548,79	99,37	0
Si (m ²)	9,474	1,614	0,742	0,827	0,418	0,242	0,044	0,022	0,006	0
SD (m²)	13,38868947									

Tableau 4.12. La surface développée du sable lavé.

Surface développée pour 1kg de sable propre										
Tm_i	0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5
TM_i	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3
d_i	0,04	0,12	0,2375	0,4725	0,94	1,875	2,825	3,575	4,5	5,65
Mu_i (kg)	0,0024	0,1494	0,075	0,2228	0,197	0,2344	0,0586	0,0506	0,0124	0
v_i (m ³)	3,35 E-14	9,05E-13	7,01E-12	5,52E-11	4,35E-10	3,45E-09	1,18E-08	2,39E-08	4,77E-08	9,44E-08
s_i (m ²)	5,03E-09	4,52E-08	1,77E-07	7,01E-07	2,78E-06	1,10E-05	2,51E-05	4,02E-05	6,36E-05	1,00E-04
μ_i (m ³ /kg)	3,77E-04	3,77E-04	3,77E-04	3,77E-04	3,77E-04	3,77E-04	3,77E-04	3,77E-04	3,77E-04	3,77E-04
V_i (m ³)	9,06E-07	5,64E-05	2,83E-05	8,41E-05	7,43E-05	8,85E-05	2,21E-05	1,91E-05	4,68E-06	0
N_i	27026311,09	62310662	4034836,4	1522177,3	170937,82	25627,68	1873,26	798,14	98,07	0
S_i (m ²)	0,136	2,819	0,715	1,068	0,475	0,283	0,047	0,032	0,006	0
SD (m²)	5,580145882									

Les formulations des MBE obtenus sont regroupées dans les Tableaux 4.13 et 4.14.

Tableau 4.13. Composition du MBE à base du superplastifiant (SP1) pour les différents rapports F/L.

F/L	0%	7%	15%	25%	30%	35%	40%
Le dosage en ciment (kg/m^3)	410	372	351	311	291	271	251
Le dosage en fillers (kg/m^3)	0	28,47	62	104	125	146	167
Le dosage en sable (kg/m^3)	821	831,62	821	821	821	821	821
Le dosage en sable lavé (kg/m^3)	61,5	62,3	61,5	61,5	61,5	61,5	61,5
Le dosage en SP (kg/m^3)	4,92	4,89	4,98	5,02	5,05	5,07	5,1
Le dosage en eau (kg/m^3)	216	210	213	210	209	208	207

Tableau 4.14. Composition du MBE à base du superplastifiant (SP2) pour les différents rapports F/L.

F/L	0%	7%	15%	25%
Le dosage en ciment (kg/m^3)	409	372	350	311
Le dosage en fillers (kg/m^3)	0	28,5	61,82	104
Le dosage en sable (kg/m^3)	822	833	822	822
Le dosage en sable lavé (kg/m^3)	61,55	62,36	61,55	61,55
Le dosage en SP (kg/m^3)	2,05	2,2	2,5	2,8
Le dosage en eau (kg/m^3)	218	211	214	212

Les Figures 4.21 et 4.22 représentent les résultats d'étalements des MBE.

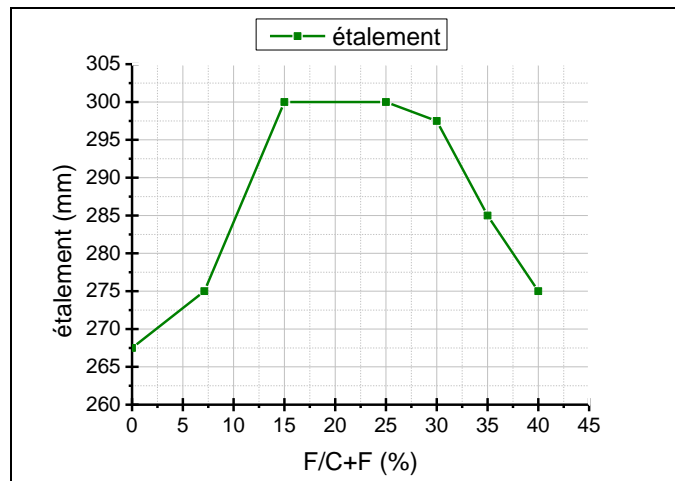


Figure 4.21. Etalement des MBE en fonction du pourcentage de fillers (SP1)

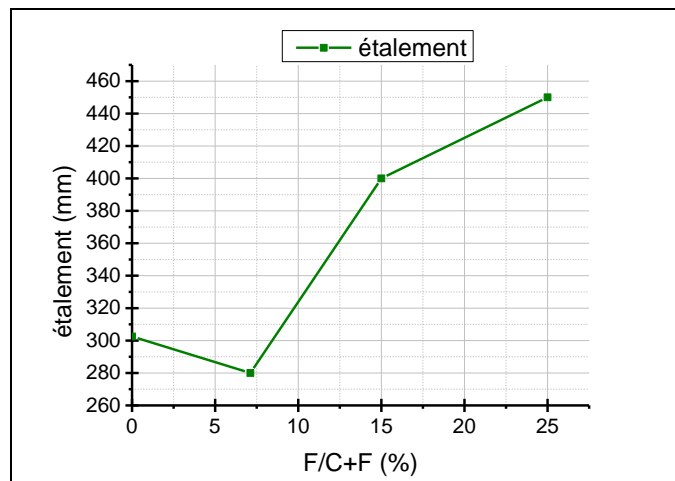


Figure 4.22. Etalement des MBE en fonction du pourcentage de fillers (SP2)

En analysant les résultats obtenus, nous pouvons remarquer que l'étalement commence à diminuer lorsque le rapport F/L dépasse 15%. Ce qui confirme encore l'hypothèse qui stipule que la présence excessive des fillers calcaires a des effets néfastes sur la rhéologie. Lors de l'utilisation du SP2, nous avons remarqué aussi qu'il y a une instabilité du MBE quand le rapport F/L est de l'ordre de 25% (Figure 4.23).



Figure 4.23. Manifestation d'instabilité du mortier.

III.1. Les essais rhéologiques des MBE

Les profils de vitesse imposés pour les mesures des paramètres rhéologiques du MBE sont définis dans la Figure 4.24.

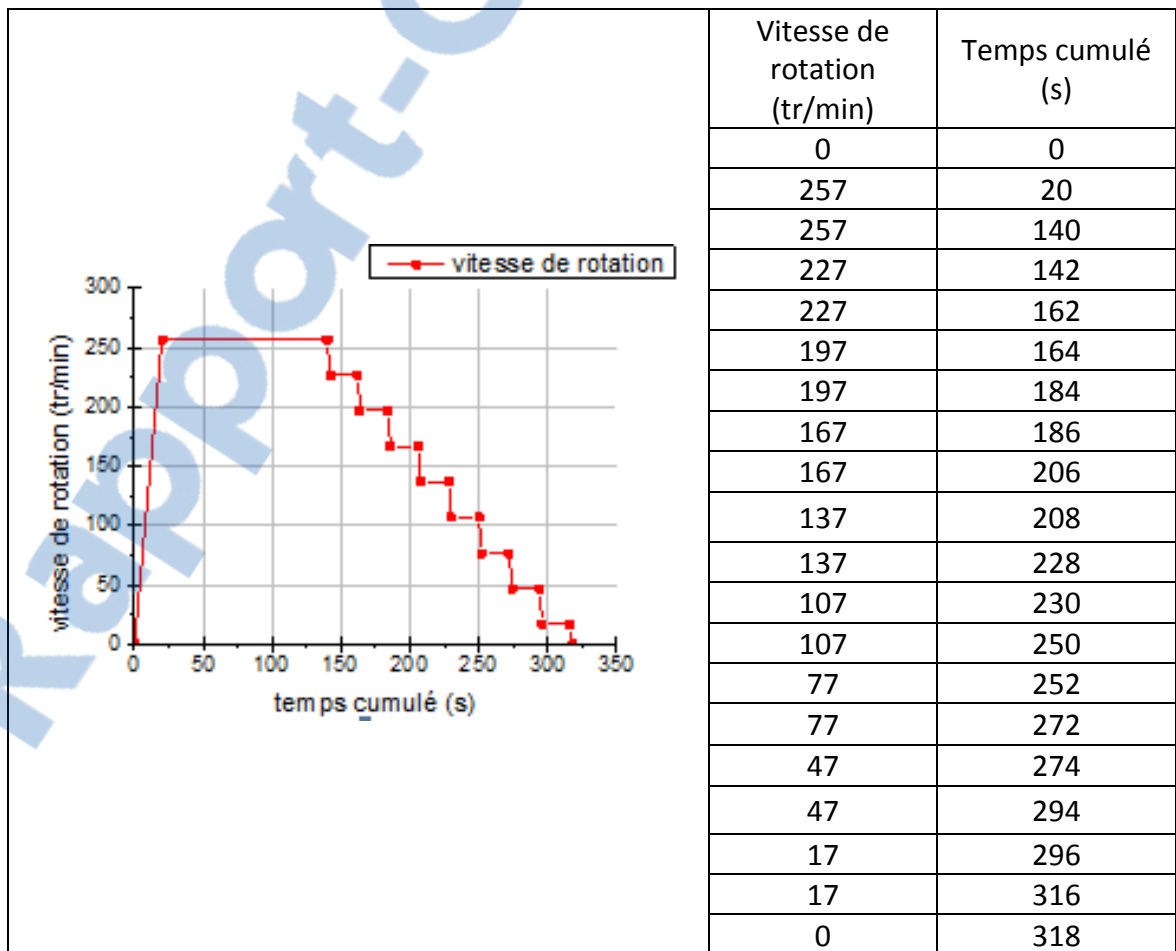


Figure 4.24. Profil de vitesse imposé au cours des essais rhéologiques du mortier.

Les Figures 4.25 et 4.26 représentent l'influence du rapport F/L et le type de superplastifiant sur les paramètres rhéologiques des MBE étudiés.

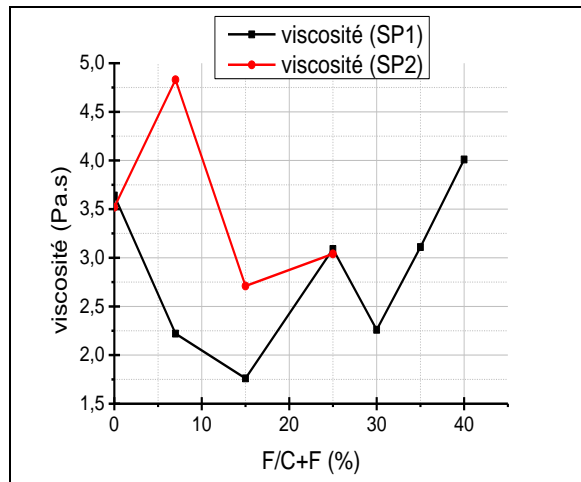


Figure 4.25. L'influence des paramètres de composition sur la viscosité du MBE.

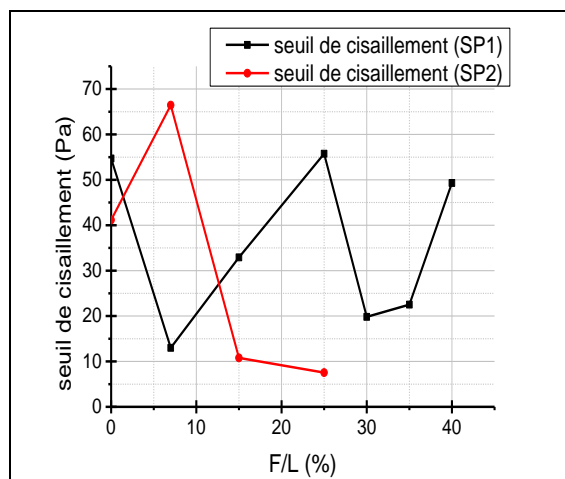


Figure 4.26. L'influence des paramètres de composition sur le seuil de cisaillement du MBE.

La substitution d'une partie du ciment par des additions minérales a une influence notable sur les paramètres rhéologiques initiaux des mortiers.

D'après les Figures 4.25 et 4.26 nous déduisons qu'il est nécessaire de trouver une bonne combinaison entre le dosage en additions et l'adjuvant utilisé pour assurer les meilleures caractéristiques à l'état frais. Par ailleurs, nous trouvons toujours cette corrélation entre la viscosité et le seuil de cisaillement.

IV. Corrélation BAP/MBE

Au cours des essais réalisés, aucune relation ne semble se dégager entre les diamètres finaux d'étalement des MBE et BAP (Figure 4.27). Néanmoins le nombre de point ne peut pas être représentatif pour trouver réellement une corrélation. Mais il convient de préciser que l'ensemble des bétons était fluide comme leurs mortiers associés. Le nombre limité des essais reste un obstacle pour trouver une corrélation entre les paramètres rhéologiques des BAP et MBE.

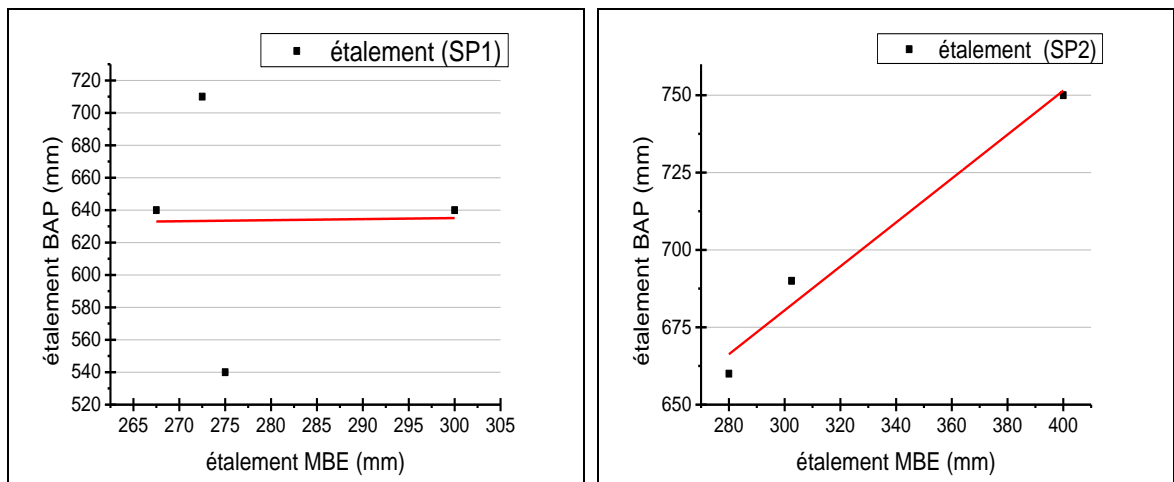


Figure 4.27. Relation entre l'étalement du BAP/MBE

Il semble que le comportement est identique puisque l'augmentation de la viscosité ou du seuil de cisaillement du MBE engendre une croissance de la viscosité ou du seuil de cisaillement du béton.

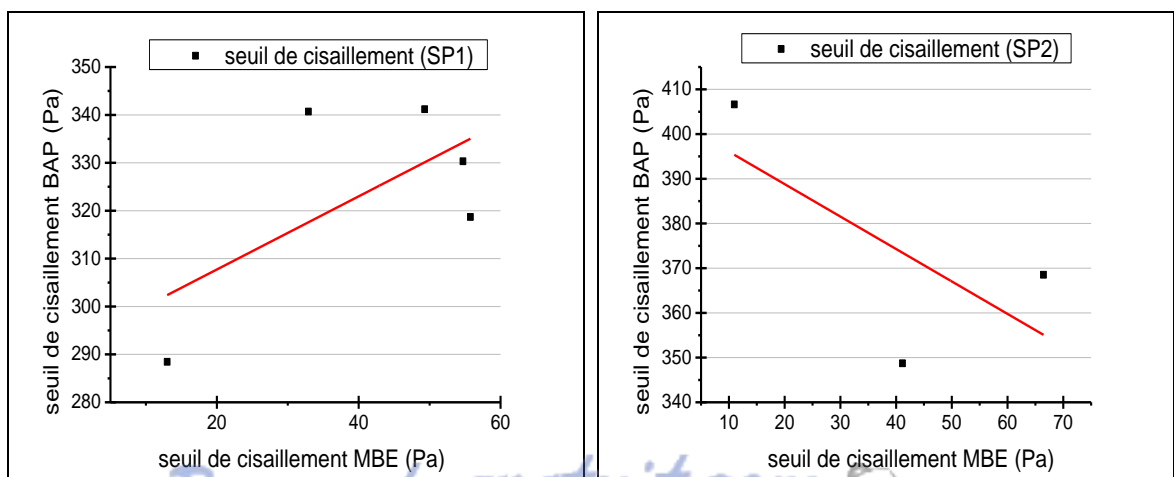


Figure 4.28. Relation entre seuil de cisaillement du BAP/MBE.

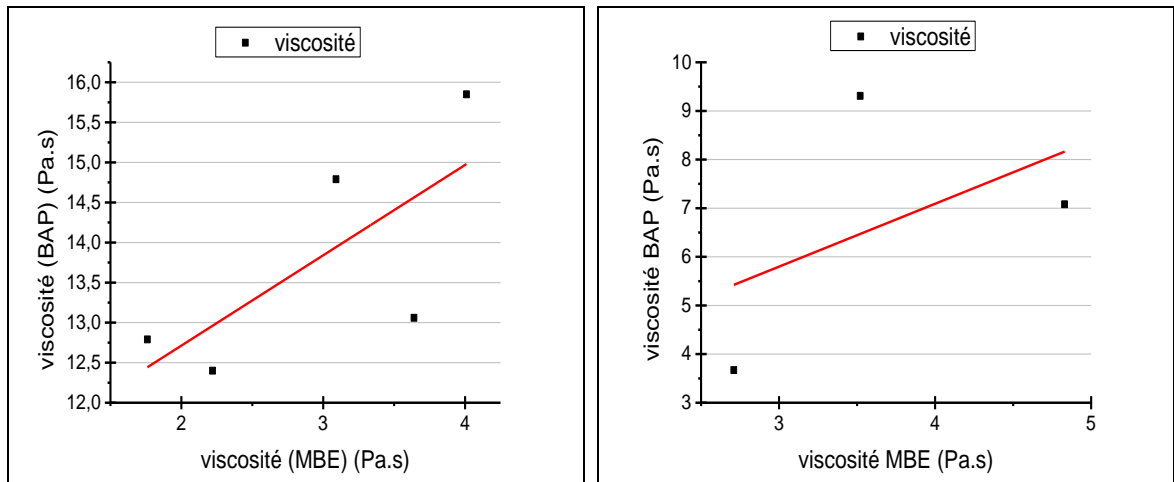


Figure 4.29. Relation entre viscosité du BAP/MBE.

D'une manière générale, les résultats trouvés rejoignent ceux de M. Mouret et col. (2011). A ce sujet il est aussi nécessaire de rappeler que jusqu'au jour actuel, le projet national CALIBÉ (2010) n'a validé cette corrélation que pour les bétons ayant un affaissement entre 10 et 22 cm.

V. Etude comparative entre les méthodes de formulation

Nous présentons dans le Tableau 4.15 une comparaison de trois méthodes de formulation des bétons autoplaçants. La première est la méthode de formulation par l'expérience (Taleb, 2009). La deuxième approche est basée sur la théorie de la pâte en excès (Guellil, 2012). La troisième approche est celle que nous avons choisie pour la formulation de nos BAP (la méthode chinoise). Cette étude comparative permet également d'estimer la différence de coût entre les BAP obtenus en se basant sur ces trois approches.

Tableau 4.15. Comparaison de différentes approches de formulations.

			Méthode de formulation par expérience (Taleb, 2009)	Méthode de la pâte en excès (Guellil, 2012)	Méthode chinoise
Formulation	Dosage en ciment (kg/m ³)		440	350	380
	Dosage en fillers (kg/m ³)		110	144	29
	Dosage en sable (kg/m ³)		750	722	848
	Dosage en gravier (kg/m ³)		750	722	848
	Dosage en SP (kg/m ³)		6,6	2,8	5
	Dosage en eau (l/m ³)		275	238	220
	Volume de la pâte (l/m ³)		410	340	350
Caractérisation à l'état frais	Etalement (mm)		700	740	710
	J-RING (mm)		670	690	640
	V-funnel (s)		3	12,07	
	Stabilité au tamis (%)		9,32	11,88	1,65
Caractérisation à l'état durci	f _{c28} (MPa)		34	34,7	35,7
Etude technico- économique	composant	Prix unitaire DA/tonne TTC	Prix pour 1 m ³ du béton (DA/m ³)		
	Ciment 42.5 (Béni Saf)	14000	6160	4900	5320
	Sable ENG	1200	900	866	1018
	Gravier ENG	1120	840	809	950
	Fillers ENG Maleh	1900	209	273	55
	Adjuvant	100 DA/kg	660	280	500
	Eau	-	-	-	-
	Total		8769	7128	7843

Nous remarquons que les bétons formulés par la méthode de formulation par l'expérience sont constitués d'un volume de la pâte plus élevé que ceux formulés par les deux autres méthodes. Ce qui engendre une augmentation du coût.

Même si les bétons formulés à base de la théorie de la pâte en excès semblent plus économiques, mais ils sont sous dosés en granulats, ce qui avait une incidence directe sur la densité du béton.

La méthode chinoise nous a permis d'obtenir des bétons autoplacants qui donnent une meilleure résistance par rapport aux autres bétons.

VI. Bilan

Cette étude nous a permis de faire le point sur l'influence des fillers calcaires, ainsi que l'influence des adjuvants sur les propriétés des bétons autoplacants à l'état frais et durci. L'ensemble des résultats obtenus révèle que :

- La caractérisation des bétons formulés par la méthode chinoise a permis d'évaluer l'efficacité et la faisabilité de cette méthode car les résultats obtenus répondent aux recommandations de l'AFGC.
- L'incorporation des fillers calcaires dans la formulation des bétons autoplacants a un effet positif non seulement sur le comportement des bétons à l'état frais mais aussi sur la résistance mécanique.
- Concernant les superplastifiants que nous avons utilisés pour formuler nos bétons autoplacants, nos résultats ont abouti à conclure que le premier superplastifiant « SUPERFLOW 2000 R » offre aux bétons des meilleures performances par rapport au deuxième superplastifiant « UNICUM PC 6 ».
- L'étude de corrélation entre les différents bétons autoplacants et les MBE correspondants n'a pas abouti à un résultat concluant.

Références bibliographiques

- Guellil M.K., 2012 : "Formulation des bétons autoplaçants par la méthode de la pâte en excès", Mémoire de magister, université de Tlemcen, Algérie.
- Mouret M., Bascou A., El Barrak M., 2011 : les bétons autoplaçants, Eyrolles, France.
- Projet National CALIBE, Groupe de travail traitant des « Anomalies de Comportement Rhéologique des bétons », 2000.
- Taleb O., 2009 : Optimisation de la formulation des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux, mémoire de magister de l'université de Tlemcen, Algérie.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'objectif de ce travail consiste à évaluer l'effet des fillers calcaires et des adjuvants sur la performance des bétons autoplaçants vis-à-vis des propriétés rhéologiques et mécaniques.

Pour répondre à cet objectif nous avons commencé par mettre en évidence une nouvelle approche de formulation connu sous l'appellation de « la méthode chinoise », ensuite nous avons fait varier le dosage en fillers et le type de superplastifiant.

Les résultats obtenus montrent l'effet favorable de ce type d'addition sur le béton frais par l'amélioration de la fluidité, que sur le béton durci par l'augmentation de la résistance mécanique. Nous remarquons aussi qu'il est possible de formuler des BAP dosé à 310 kg/m³ en ciment. Cela permet de réduire considérablement le coût du mélange tout en ayant un comportement à l'état frais meilleur que celui d'un béton ordinaire.

La recherche bibliographique et les résultats obtenus montrent aussi que le dosage en fillers calcaires important est susceptible d'entraîner des effets néfastes sur la rhéologie et la résistance.

Il a été démontré que l'utilisation du superplastifiant « SUPERFLOW 2000 R » améliore considérablement l'ouvrabilité et donne un gain de résistance.

La recherche bibliographique a aussi fait jaillir des résultats parfois contradictoires sur la corrélation entre les paramètres rhéologiques des BAP et celles de leurs MBE correspondants.

En parallèle des études sur le béton, nous avons étudié l'influence des fillers calcaires sur les propriétés des MBE. L'étude de corrélation entre les différents bétons autoplaçants et les MBE correspondants n'a pas aboutit à un résultat concluant.

Perspectives :

L'étude entreprise a été menée au sein de notre laboratoire sur des bétons constitués à partir des matériaux de notre région, à savoir, les granulats d'une des plus grandes

carrières de la région, celle de l'ENG Sidi Abdelli, ainsi que le ciment de Beni-Saf. Bien que, nous avons obtenus des résultats encourageants, un travail reste à faire en encourageant tous les intervenants dans le domaine de la construction à utiliser ce type de bétons innovants.

Pour ce faire, une généralisation de cette étude sur une gamme élargie de graviers, de ciments ainsi que l'utilisation d'autres types d'additions minérales non calcaires pour une plus grande efficacité et économie et aller vers un control rationel et global de la qualité du béton.

Par une étude minutieuse sur la rhéologie de ces bétons innovants, nous proposons aussi de mettre la lumière sur les problèmes souvent rencontrés dans les BAP, à savoir la ségrégation et la thixotropie.

D'un auitre coté, il serait intéressant d'étendre cette étude à la durabilité des bétons autoplaçants.

ANNEXES

ANNEXE A

1. CALCUL DES SURFACES DÉVELOPPÉES PAR LES GRANULATS

La première partie consiste à évaluer la surface développée par chacun des granulats dans le béton. Pour ce faire, il faut d'abord admettre les hypothèses suivantes :

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

Au niveau des granulats il convient de considérer les différents cas pouvant se présenter :

- **Cas 1** - Les différents gravillons présentent des masses volumiques très voisines (écart inférieur ou égal à $0,05 \text{ kg/dm}^3$)
- **Cas 2** - Les différents gravillons présentent des masses volumiques différentes (écart supérieur à $0,05 \text{ kg/dm}^3$).
- **Cas 3** - Le cas des sables.

1.1 CAS DES GRAVILLONS DE MASSES VOLUMIQUES VOISINES

Dans ce cas, il devient possible de calculer directement la surface développée dans le béton par les grains du mélange de tous ces gravillons. Dans ce contexte, le calcul de cette surface développée est organisé chronologiquement comme suit :

- 1/ Calcul de la granulométrie du mélange des gravillons du béton.
- 2/ Définition des tranches granulaires successives dans ce mélange.
- 3/ Calcul de la masse de chaque tranche granulaire.
- 4/ Calcul du diamètre de la particule moyenne dans chaque tranche.

5/ Calcul du volume de la particule moyenne dans chaque tranche.

6/ Calcul de la surface développée de la particule moyenne dans chaque tranche.

7/ Calcul du volume massique de la matrice du gravillon du mélange.

8/ Calcul du volume total de l'ensemble des particules dans chaque tranche granulaire.

9/ Calcul du nombre de particules moyennes dans chaque tranche granulaire.

10/ Calcul de la surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche granulaire.

11/ Somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche granulaire du mélange de gravillons.

1.1.1. Calcul de la granulométrie du mélange des gravillons du béton

Si on considère par exemple deux gravillons G_3 et G_4 , qui présentent les caractéristiques suivantes :

Tableau 1 - Caractéristiques des gravillons du béton			
Gravillon	dosage dans le béton	masse volumique	refus au tamis ti
G_3	g_3	μ_3	Ri_3
G_4	g_4	μ_4	Ri_4

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

$$r_i = (g_3 \cdot Ri_3 + g_4 \cdot Ri_4) / (g_3 + g_4)$$

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

$$\mu_g = (g_3 \cdot \mu_3 + g_4 \cdot \mu_4) / (g_3 + g_4)$$

1.1.2. Définition des tranches granulaires successives dans ce mélange

Chaque tranche granulaire est limitée par un tamis supérieur $[T M_i]$ et par un tamis inférieur $[T m_i]$. Les refus correspondant à ces tamis sont respectivement $R M_i$ et $R m_i$ (exprimé en %).

Les tamis à considérer sont les suivants :

20 / 16 / 12,5 / 10 / 8 / 6,3 / 5 / 4 / 3,15 / 2,5 / 1,25 / 0,63 / 0,315 / 0,16 / 0,08 / <0,08 mm

1.1.3. Calcul de la masse de chaque tranche granulaire

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

$$M_i = (R m_i - R M_i) \times (g_3 + g_4) / 100$$

1.1.4. Calcul du diamètre de la particule moyenne dans chaque tranche

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

$$d_i = (T M_i + T m_i) / 2$$

1.1.5. Calcul du volume de la particule moyenne dans chaque tranche

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

$$v_i = (\pi \cdot d_i^3) / 6$$

1.1.6. Calcul de la surface développée de la particule moyenne dans chaque tranche

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

$$s_i = \pi \cdot d_i^2$$

1.1.7. Calcul du volume massique de la matrice du gravillon du mélange

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

1.1.8. Calcul du volume total de l'ensemble des particules dans chaque tranche granulaire

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

$$V_i = \omega \cdot M_i$$

1.1.9. Calcul du nombre de particules moyennes dans chaque tranche granulaire

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

$$N_i = V_i / v_i$$

1.1.10. Calcul de la surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche granulaire

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

$$S_i = N_i \cdot s_i$$

1.1.11 Calcul de la somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche granulaire du mélange de gravillon

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

$$SD = \sum_i S_i$$

1.2 CAS DES GRAVILLONS DE MASSES VOLUMIQUES DIFFÉRENTES

Dans ce cas, le calcul doit être effectué séparément pour chaque gravillon et dans ce contexte le calcul de la surface développée par chaque classe de gravillons du béton est organisé chronologiquement comme suit :

- 1/ Définition des tranches granulaires successives du gravillon considéré.
- 2/ Calcul de la masse de chaque tranche granulaire.
- 3/ Calcul du diamètre de la particule moyenne dans chaque tranche.
- 4/ Calcul du volume de la particule moyenne dans chaque tranche.
- 5/ Calcul de la surface développée de la particule moyenne dans chaque tranche.
- 6/ Calcul du volume massique de la matrice du gravillon.
- 7/ Calcul du volume total de l'ensemble des particules dans chaque tranche granulaire.
- 8/ Calcul du nombre de particules moyennes dans chaque tranche granulaire.
- 9/ Calcul de la surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche granulaire.
- 10/ Somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche granulaire du gravillon.

1.3 CAS DES SABLES DU BÉTON

Il convient de déterminer la surface développée par le sable du béton et qui sera utilisé dans le mortier MBE. La démarche adoptée est rigoureusement identique à celle utilisée pour les gravillons même dans le cas d'emploi de deux sables de masses volumiques distinctes.

ANNENE B

Tableau NA.F.1 — Valeurs limites applicables en France pour la composition et les propriétés du béton en fonction de la classe d'exposition																		
Classes d'exposition																		
Aucun risque de corrosion ou d'attaque	Corrosion induite par carbonatation				Corrosion induite par les chlorures				Attaque gel / dégel				Environnements chimiquement agressifs					
	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3 (a) (m)	XF1 (b)	XF2 (b)	XF3 (b) (c)	XF4 (b) (c)	XA1	XA2	XA3	
Rapport E_c /liant éq maximal (d)	—	0,65			Valeurs numériques identiques à XS2 (f)				Valeurs numériques identiques à XF1 (g)				0,55	0,60	0,55	0,55	0,45	0,45
Classe de résistance minimale	—	C20/25			C30/37	C35/45	C30/37	C30/37	C25/30	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C40/50		
Teneur mini en liant éq (kg/m ³) (d) (e)	150	260 (h)			Valeurs numériques identiques à XC1 (f)				Valeurs numériques identiques à XF1 (g)				330	280 (h)	300	315	340	385
Teneur minimale en air (%)	—	—			—				—				4 (i)	4 (i)	4 (i)	—	—	—
Cendres volantes	0,30	0,30			0,15				0,15				0,30	0,30	0,30	0,15 (j)	0,30 (k)	0,00
Fumées de silice	0,10	0,10			0,10				0,10				0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Laitier moulu	0,30	0,30			0,15				0,15				0,30	0,30	0,30	0,15	0,30 (k)	0,00
Addition calcaire	0,25	0,25			0,05				0,05				0,25	0,25	0,25	0,05	0,00	0,00
Addition siliceuse	0,20	0,20			0,15				0,15				0,20	0,20	0,20	0,05	0,00	0,00
Nature du ciment	—	—			PM (l)				PM (l)				—	—	—	(m)	(n)	(n)
Rapport maximal A/(A+C)																		

a) Pour les parcs de stationnement de véhicules, sauf spécification contraire, ne sont concernées que les parties supérieures des dalles et rampes exposées directement aux sels et ne comportant pas de revêtement pouvant assurer la protection du béton.

b) En France, les classes d'exposition XF1, XF2, XF3 et XF4 sont indiquées dans la carte donnant les zones de gel. Pour les classes XF3 et XF4, les granulats doivent être non oléifs au sens de NF EN 12620.

c) Pour les classes XF3 et XF4, l'attention du prescripteur du béton est attirée sur le fait que dans le cas d'ouvrages importants, sensibles ou particulièrement exposés, il est souhaitable d'avoir recours à des essais complémentaires (pour l'environnement XF3 : XP P 18-424 ou XP P 18-425; ASTM C457-98,... et de plus, pour l'environnement XF4, XP P 18-420) afin de s'assurer de l'adéquation du béton aux performances attendues.

d) Exigence applicable à la charge telle que définie en 3.1.20.

e) Ces valeurs sont définies pour $C_{max} = 20$ mm. La quantité de liant équivalent à ajouter (+) ou à déduire (–) en pourcentage de la valeur indiquée, en fonction de la dimension nominale supérieure du plus gros granulat, exprimée en millimètre est $D \leq 12,5$: + 10 % ; $D = 14$: + 7,5 % ; $D = 16$: + 5 % ; $D = 22,4$: – 2,5 % ; $D = 25$: – 5 % ; $D \geq 31,5$: – 10 %.

f) En France, les bétons soumis à des environnements correspondant aux classes d'exposition XC2, XC3, XC4, XS1 et XD1 sont assimilés à des bétons correspondant aux classes d'expositions suivantes : XC2 = XC1, XC3 = XF1, XC4 = XF1, XS1 = XS2 et XD1 = XF1.

g) Ces valeurs pour XC4 sont valables pour un enrobage de 30 mm en attendant les prescriptions de l'Eurocode 2. Dans le cas d'enrobage inférieur, le prescripteur devra préciser la valeur du ratio eau efficace / liant équivalent à retenir.

h) Pour le béton précontraint, la valeur est portée à 300 kg/m³.

i) Le respect de cette valeur nécessite l'utilisation d'un agent entraînant d'air. Il est possible de déroger à la teneur minimale en air pour les bétons à haute performance en appliquant les Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel.

j) Pour l'environnement XF4, l'utilisation de cendres volantes peut induire des difficultés à entraîner de l'air dans le béton. Il est recommandé de n'utiliser dans ce cas que des cendres de catégorie A selon NF EN 450-1 et de renforcer le contrôle de la quantité d'air entraînée.

k) Cette valeur limite est fixée à 0,15 lorsque la classe d'agressivité résulte de la présence de sulfates (voir Tableau 2).

l) La composition de l'addition teneur en sulfates, en sulfates, etc) doit être telle que le liant respecte les exigences de NF P 15-317.

m) Pour les bétons soumis à l'eau de mer, utiliser un ciment PM. En cas d'utilisation de sels de déverglaçage dont la teneur en sulfate soluble est supérieure ou égale à 3 %, utiliser un ciment PM ou un ciment ES.

n) Pour le choix du ciment et des additifs, se référer à P 18-01.1. Lorsque la classe d'agressivité résulte de la présence de sulfates, pour la classe XA1, utiliser un ciment PM et la composition du liant doit être telle qu'il respecte les exigences de NF P 15-317 et pour les classes XA2 et XA3, utiliser un ciment ES et la composition du liant doit être telle qu'il respecte les exigences de XP P 15-319.

NOTE Pour le choix de la classe d'exposition, voir 4.1 et NA.4.1.

RESUME

Le béton autoplaçant se distingue par sa grande fluidité. Le volume de la pâte doit être assez important pour réduire les frictions entre les granulats et assurer une maniabilité importante tout en limitant le ressuage et la ségrégation.

Par ailleurs, la prise en compte de l'impact environnemental de l'activité humaine, en particulier dans le secteur du BTP impose aux entreprises de la construction à utiliser de plus en plus des bétons écologiques. Ces derniers sont obtenus en diminuant la quantité de clinker et par l'utilisation des matériaux de substitution (additions minérales). Ces additions peuvent entraîner des problèmes de mise en œuvre du béton en raison de la présence des fines dans ces matériaux qui peuvent réagir différemment du ciment en présence d'eau et d'adjuvant.

Notre étude a pour objectif d'étudier l'influence des fillers calcaires sur la rhéologie des bétons autoplaçants formulés avec différents types d'adjuvants.

Mots clés : Bétons autoplaçants, seuil de cisaillement, viscosité, additions minérales, superplastifiant.

ABSTRACT

Self-compacting concrete is characterized by its high fluidity. The volume of the paste should be large enough to reduce friction between the aggregates and to provide an important maneuverability while minimizing bleeding and segregation.

Moreover, taking into account the environmental impact of human activity, especially in the construction sector which requires the use of more the ecological concrete, these are obtained by decreasing the amount of clinker and by the use of alternative materials (mineral additions). Such additions may lead to problems in the time of implementing the concrete, due to the presence of fines in these materials which can react differently from the cement in companionship of water and adjuvant.

Our study aims to investigate the influence of the limestone fillers on the rheology of self-compacting concretes with different types of adjuvants.

Keywords: self-compacting concretes, shear threshold, viscosity, mineral additions, superplasticizer.

ملخص

تتميز الخرسانة الذاتية الرص بسيولة عالية. حجم العجينة يجب أن يكون كبيراً بما يكفي للحد من الاحتكاك بين وحدات الركام وتوفير القدرة على الانسيابية مع تقليل النزيف والانفصال الحبي.

علاوة على ذلك، مع الأخذ بعين الاعتبار الأثر البيئي للنشاط البشري، لا سيما في قطاع البناء والتشييد الذي يتطلب استخدام على نطاق واسع الخرسانة الإيكولوجية حيث يتم الحصول عليها من خلال خفض كمية الكلنكر وعن طريق استخدام مواد بديلة (المضافات المعدنية). قد تؤدي هذه الإضافات إلى مشاكل في تحضير الخرسانة، وذلك بسبب وجود غرامات في هذه المواد التي يمكن أن تتفاعل بشكل مختلف عن الأسمنت في وجود الماء والمواد المساعدة.

تهدف دراستنا للتحقيق في تأثير غبار حجر الكلس على جريان الخرسانة الذاتية الرص باستعمال أنواع مختلفة من المواد المساعدة.

كلمات البحث :

الخرسانة الذاتية الرص، عتبة القص، اللزوجة، المضافات المعدنية، الملدن الفائق.