



UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER – BISKRA



FACULTÉ DES SCIENCES ET DES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

N° d'ordre :

Série :

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : **GÉNIE CIVIL**

Option : **Structures et Mécanique des sols**

Présenté par

BRAHIM NÉCIRA

- Thème -

**ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES ET MÉCANIQUES
DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS**

Soutenu le : 20 /11/ 2006

Devant le jury :

Président :	B. MEZGHICHE	M.C	Université de BISKRA
Rapporteur:	A. GUETTALA	M.C	Université de BISKRA
Examineurs:	M. MELLAS	Pr.Ha	Université de BISKRA
	R. CHEBILI	M.C	Université de BISKRA

Remerciements

Avant de présenter ce travail, je désire exprimer ma gratitude ainsi que ma profonde reconnaissance à Monsieur Abed Elhamid GUETTALA, Maître de conférence à l'Université de Biskra, pour toute la confiance qu'il m'a témoignée. Ses conseils m'ont été particulièrement précieux pour l'élaboration de ce travail sous sa bienveillante direction.

Je voudrais également adresser mes vifs remerciements au président de jury. Monsieur B. MEZGHICHE, Maître de conférence à l'Université de Biskra, qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence de jury. Je tiens à lui exprimer ma plus profonde gratitude.

Je tiens aussi à remercier les membres de jury : Monsieur M. MELLAS, Professeur habilité à l'Université de Biskra et Monsieur R. CHEBILI, Maître de conférence à l'Université de Biskra, pour l'intérêt qu'ils portent à ce travail en acceptant de le juger.

Il m'est particulièrement agréable de remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Finalement, j'adresse mes sentiments les plus respectueux à ma famille et mes amis qui m'ont toujours soutenu et aidé.

ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES ET MÉCANIQUES DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS

Résumé

Il semble que le béton autoplaçant soit l'un des meilleurs bétons actuels sur lequel on doit y compter en face des défis existants dans le monde de la construction ; et ceci, relativement à ses caractéristiques rhéologiques (une grande fluidité, une haute déformabilité tout en étant stable) avec de bonnes propriétés mécaniques. Pour parvenir à ces données intéressantes, le BAP doit comporter un peu de gravillons, beaucoup d'additions minérales, un dosage élevé de superplastifiant et assez souvent un agent colloïdal. Cependant, il n'existe pas à l'heure actuelle de méthodologie précise permettant de formuler ce type de bétons.

À cet effet, le présent mémoire porte sur le développement d'une série optimale des BAP, suivant un plan d'expérience bien déterminé. Cette étude permet également de mettre en évidence l'effet de principaux facteurs de composition sur le comportement rhéologique et mécanique des BAP, tels que (la forme, la granulométrie et le volume de gravillons), (le rapport volumique S/P et le rapport massique E/L), (la nature et le dosage d'additions minérales) et (la concentration en superplastifiant et en agent colloïdal).

Mots clés : bétons autoplaçants / propriétés rhéologiques / propriétés mécaniques / gravillons / additions minérales / superplastifiant / agent colloïdal.

تبدو الخرسانة ذاتية القولبة (خ ذق) واحدة من أفضل الخرسانات الموجودة حاليا، حيث يمكن الإعتماد عليها في مواجهة التحديات الراهنة في عالم البناء، و هذا بفضل مميزاتها الريولوجية (سيولة كبيرة، قدرة تشوه عالية مع الحفاظ على الإستقرار)، بالإضافة إلى امتلاكها لخصائص ميكانيكية جيدة. و من أجل الحصول على هذه المعطيات الهامة، يجب أن تحوي الـ (خ ذق) على قليل من الحصى، كثير من الإضافات المعدنية، تركيز مرتفع من الملدن المتفوق و ربما أيضا على مساعد اللزوجة، غير أنه لا توجد لحد الساعة طريقة محددة تسمح بتشكيل هذا النوع من الخرسانة.

لهذا السبب، يهدف موضوع هذه المذكرة إلى إنشاء مجموعة مثالية من الـ (خ ذق)، و هذا وفق منهج واضح المعالم. هذه الدراسة توضح أيضا تأثير أهم عوامل التشكيلة على السلوك الريولوجي و الميكانيكي لـ (خ ذق) مثل (شكل، تدرج حبيبي و حجم الحصى)، (النسبة الحجمية رمل/العجينة و النسبة الكتلية ماء/إسمنت)، (طبيعة و تركيز الإضافات المعدنية) و (تركيز الملدن المتفوق و مساعد اللزوجة).

كلمات مفتاحية : خرسانة ذاتية القولبة / خواص ريولوجية / خواص ميكانيكية / حصى / إضافات معدنية / ملدن متفوق / مساعد اللزوجة.

Abréviations

AC	Agent colloïdal.
AC %	Dosage en agent colloïdal exprimé en [% de poids de liant].
AM	Addition minérale.
BAP	Béton autoplaçant.
BO	Béton ordinaire.
B-GC	Béton avec gravillons concassés.
B-GR	Béton avec gravillons roulés.
E	Eau efficace.
E/C	Rapport massique de l'eau efficace sur le ciment.
E/L	Rapport massique de l'eau efficace sur le liant.
FC	Fillers calcaires.
FS	Fumée de silice.
LT	Laitier de haut fourneau.
PZ	Pouzzolanes naturelles.
SP	Superplastifiant.
SP %	Dosage en superplastifiant exprimé en [% de poids de liant].
S/P	Rapport volumique du sable sur la pâte.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
I BÉTONS AUTOPLAÇANTS : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	4
1 CONCEPT DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS	5
1.1. INTRODUCTION	5
1.2. UNE NOUVELLE GENERATION DE BETON S'IMPOSE	6
1.3. LE CAHIER DE CHARGES D'UN BAP	7
1.4. LA STRUCTURE DES BAP	9
1.5. LES PRINCIPAUX CONSTITUANTS DES BAP	11
1.5.1. Matériaux de base	11
1.5.1.1. Les granulats	11
1.5.1.2. Le ciment	12
1.5.1.3. L'eau de gâchage	12
1.5.2. Additions minérales	12
1.5.2.1. Les fillers calcaires	13
1.5.2.2. Les pouzzolanes naturelles	13
1.5.2.3. Le laitier de haut fourneau	13
1.5.2.4. La fumée de silice	14
1.5.2.5. Les cendres volante	14
1.5.3. Adjuvants chimiques	15
1.5.3.1. Les superplastifiants	15
1.5.3.2. Les agents colloïdaux	17
1.6. LES INNOVATIONS DES BAP	18
1.7. EXEMPLES D'APPLICATIONS	20
1.8. DIVERSES APPELLATIONS	21
1.9. BILAN	22

2 CARACTÉRISATION ET FORMULATION DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS	23
2.1. INTRODUCTION	23
2.2. CARACTERISATION À L'ÉTAT FRAIS	24
2.2.1. Essai évaluant la fluidité (Étalement)	24
2.2.2. Essais évaluant la déformabilité	25
2.2.2.1. Essai de la boîte en «L»	25
2.2.2.2. Essai de la boîte en «U»	26
2.2.2.3. Essai de caisson	27
2.2.3. Essais évaluant la stabilité	28
2.2.3.1. Essai de stabilité au tamis	29
2.2.3.2. Essai d'entonnoir	30
2.2.4. Essais évaluant l'écoulement (Rhéomètre à béton)	31
2.3. CARACTERISATION À L'ÉTAT DURCI	34
2.3.1. Les résistances mécaniques	34
2.3.2. Les déformations	34
2.3.3. L'adhérence acier-béton	35
2.3.4. La durabilité	35
2.4. FACTEURS INFLUENÇANT LES PERFORMANCES DES BAP	36
2.4.1. Forme, granulométrie et volume des gravillons	36
2.4.2. Rapport volumique sable/pâte	38
2.4.3. Rapport massique eau/liant	39
2.4.4. Nature et dosage d'additions minérales	39
2.4.5. Type et dosage d'adjuvants	43
2.5. FORMULATION DES BAP	46
2.5.1. Formuler un béton	46
2.5.2. Pratique actuelle de la formulation des BAP	47
2.5.3. Revue des méthodes de formulation des BAP	48
2.5.3.1. Méthode basée sur l'optimisation du mortier	48
2.5.3.2. Méthode basée sur l'optimisation du volume de pâte	50
2.5.3.3. Méthode basée sur l'optimisation du squelette granulaire	53
2.5.3. Exemple de formulation	55
2.6. BILAN	57
II BÉTONS AUTOPLAÇANTS : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE	58
3 MATÉRIAUX, MÉLANGES ET ESSAIS UTILISÉS	59
3.1. INTRODUCTION	59
3.2. MATÉRIAUX UTILISÉS	60
3.2.1. Sable	60
3.2.2. Gravillons	61
3.2.3. Ciment	62
3.2.4. Eau de gâchage	63

3.2.5. Additions minérales	63
3.2.5.1. Fillers calcaires	63
3.2.5.2. Pouzzolanes naturelles	63
3.2.5.3. Laitier de haut fourneau	63
3.2.5.4. Fumée de silice	64
3.2.6. Adjuvants chimiques	65
3.2.6.1. Superplastifiant	65
3.2.6.2. Agent colloïdal	65
3.3. CONFECTION DES MÉLANGES	66
3.3.1. Confection des bétons	66
3.3.2. Confection des mortiers	67
3.4. ESSAIS RÉALISÉS	67
3.4.1. Essais réalisés à l'état frais	67
3.4.2. Essais réalisés à l'état durci	69
3.5. BILAN	71
4 OPTIMISATION DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS	72
3.1. INTRODUCTION	72
4.2. PROBLÉMATIQUE	73
4.3. OBJECTIF DE LA RECHERCHE	74
4.4. PARAMETRES DE L'ÉTUDE	74
4.5. PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS	75
4.5.1. Développement des formulations des BAP	75
4.5.1.1. Optimisation de la forme des gravillons	75
4.5.1.2. Optimisation de la granulométrie des gravillons	79
4.5.1.3. Optimisation du volume des gravillons	88
4.5.1.4. Optimisation des rapports S/P et E/C	92
4.5.1.5. Optimisation de la nature et du dosage d'additions minérales	99
4.5.1.6. Optimisation des dosages en superplastifiant et en agent colloïdal.	109
4.5.2. Évaluation des propriétés mécanique des BAP optimisés	116
4.5.2.1. La résistance à la compression aux différents ages	117
4.5.2.2. La résistance à la traction	118
4.5.2.3. Le module élastique	118
4.5.2.4. Le retrait total	119
4.6. BILAN	121
CONCLUSION	124
Bibliographie	127

Liste des tableaux

N°	Tableau	Page
2.1	Cahier des charges spécifique pour les BAP	55
2.2	les différentes compositions obtenues avec chaque approche [60]	56
2.3	Résultats des essais de caractérisation [60]	56
3.1	Les caractéristiques physiques du sable	61
3.2	Les caractéristiques physiques des gravillons	61
3.3	Les analyses chimiques et physiques du ciment	62
3.4	La composition chimique des pouzzolanes naturelles	63
3.5	La composition chimique du laitier	64
3.6	Programme des essais réalisés à l'état frais	69
4.1	Compositions des bétons destinés à l'optimisation de la forme des gravillons	75
4.2	Dosages des bétons destinés à l'optimisation de la taille maximale des gravillons	79
4.3	Mélanges destinés à l'optimisation de la combinaison granulaire des gravillons	83
4.4	Compositions des bétons destinés à l'optimisation du volume des gravillons	88
4.5	Compositions des bétons destinés à l'optimisation des rapports S/P et E/C	93
4.6	Compositions des BAP destinés à l'optimisation des FC, PZ et LT	100
4.7	Compositions des bétons destinés à l'optimisation de la FS	104
4.8	Bétons destinés à l'étude de l'effet du SP et AC sur la maniabilité et la résistance	109
4.9	Compositions des BAP optimisés et des BO	116
4.10	Les formulations des BAP développés et leurs propriétés rhéologique et mécaniques ..	123

Liste des figures

N°	Figure	Page
1.1	Phénomène de blocage des gravillons au droit d'un obstacle [53]	8
1.2	Comparaison de la structure d'un BAP et d'un BO	9
1.3	Représentation schématique des molécules de base constituant les superplastifiants les plus connus [23]	16
1.4	Pâte de ciment non adjuvantée : floculation des grains	17
1.5	Pâte de ciment additionnée d'un superplastifiant : dispersion des grains	17
2.1	Représentation schématiques de l'essai d'étalement	25
2.2	Schéma détaillé de la boîte en «L»	26
2.3	Schéma descriptif de la boîte en «U» [18]	27
2.4	Schéma descriptif du caisson [64]	28
2.5	Représentation schématiques de l'essai de stabilité au tamis [43]	29
2.6	Schéma descriptif de l'entonnoir [31]	30
2.7	Courbe de comportement rhéologique pour les corps de Bingham	32
2.8	Vue du rhéomètres à béton IBB [4]	33
2.9	Effet de la taille maximale des gravillons sur la capacité de remplissage [53]	37
2.10	Effet du volume des gravillons sur l'étalement pour différents rapports S/P [55]	38
2.11	Effet du volume de gravillons sur la capacité de remplissage pour différents rapports S/P [64]	38
2.12	Relation entre l'étalement et le dosage en eau d'un béton avec et sans superplastifiant [39]	44
2.13	Propriété du béton optimisé pour différents dosages en agent colloïdal [57]	45
2.14	Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité	49
2.15	Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2)	50
2.16	Volume limite de blocage V_{bi} en fonction du rapport de l'espacement "e" des armatures de la boîte en «L» et le diamètre d_i du granulat	52

N°	Figure	Page
3.1	La courbe granulométrique du sable	60
3.2	Les courbes granulométriques des gravillons	62
4.1	Effet de la forme des gravillons sur la fluidité pour différents SP %	76
4.2	Effet de la forme des gravillons sur la déformabilité pour différents SP %	77
4.3	Effet de la forme des gravillons sur la stabilité pour différents SP %	77
4.4	Effet de la forme des gravillons sur la résistance à la compression pour différents SP %	78
4.5	Mesure de la compacité en fonction de la taille maximale des gravillons	80
4.6	Effet de la taille maximale des gravillons sur la fluidité	81
4.7	Effet de la taille maximale des gravillons sur la déformabilité	81
4.8	Effet de la taille maximale des gravillons sur la stabilité	82
4.9	Effet de la taille maximale des gravillons sur la résistance de la compression	83
4.10	Mesure de la compacité en fonction des combinaisons granulaires des gravillons	84
4.11	Effet de la combinaison granulaire des gravillons sur la fluidité	85
4.12	Effet de la combinaison granulaire des gravillons sur la déformabilité	86
4.13	Effet de la combinaison granulaire des gravillons sur la stabilité	87
4.14	Effet de la combinaison granulaire des gravillons sur la résistance à la compression	87
4.15	Effet du volume des gravillons sur la fluidité	89
4.16	Effet du volume des gravillons sur la déformabilité	90
4.17	Effet du volume des gravillons sur la stabilité	91
4.18	Effet du volume des gravillons sur la résistance de la compression	91
4.19	Effet des rapports S/P et E/C sur la fluidité	95
4.20	Effet des rapports S/P et E/C sur la déformabilité	96
4.21	Effet des rapports S/P et E/C sur la stabilité	97
4.22	Effet des rapports S/P et E/C sur la résistance à la compression	98
4.23	Effet des additions minérales (FC, PZ et LT) sur la fluidité	101
4.24	Effet des additions minérales (FC, PZ et LT) sur la déformabilité	102
4.25	Effet des additions minérales (FC, PZ et LT) sur la stabilité	102
4.26	Effet des additions minérales (FC, PZ et LT) sur la résistance à la compression	103

N°	Figure	Page
4.27	Effet de la fumée de silice sur la fluidité	106
4.28	Effet de la fumée de silice sur la déformabilité	106
4.29	Effet de la fumée de silice sur la stabilité	107
4.30	Effet de la fumée de silice sur la résistance à la compression	108
4.31	Effet des dosages en SP et en AC sur la fluidité	110
4.32	Effet des dosages en SP et en AC sur la déformabilité	111
4.33	Effet des dosages en SP et en AC sur la stabilité	111
4.34	Effet des dosages en SP et en AC sur la résistance à la compression	112
4.35	Le dosage en SP nécessaire pour atteindre un étalement de 80 cm en fonction du dosage en AC	113
4.36	Effet de l'AC sur la déformabilité des BAP ayant un étalement de 80 cm	114
4.37	Effet de l'AC sur la stabilité des BAP ayant un étalement de 80 cm	114
4.38	Effet de l'AC sur la résistance à la compression des BAP ayant un étalement de 80 cm .	115
4.39	Évolution de la résistance à la compression des BAP optimisés et des BO en fonction des jours	117
4.40	Résistance à la traction à 28 j des BAP optimisés et des BO	118
4.41	Module élastique à 28 j des BAP optimisés et des BO	119
4.42	Évolution du retrait total des mortiers dérivés (BAP optimisés et BO)	120

Liste des photos

N°	Photo	Page
1.1	Durant le coulage du BAP dans une dalle encombrée, les gravillons nagent sans aucune ségrégation [20]	7
1.2	Mise en place de BAP au moyen d'une benne par un seul ouvrier	19
1.3	Le serrage du BAP est réalisé sans apport de vibration	19
1.4	Eléments préfabriqués de BAP possèdent de surfaces bien finies	19
1.5	La maison de la musique à Porto représente un cristal, nécessitant 20000 m ³ de BAP blanc	19
2.1	Les différentes étapes de l'essai d'étalement [20]	25
2.2	L'écoulement de BAP dans la boîte en «L» [20]	26
2.3	Dispositif de l'essai du caisson	28
2.4	Dispositif de l'essai de stabilité au tamis [1]	29
2.5	L'écoulement du BAP durant l'essai de l'entonnoir [20]	30
2.6	Essais d'optimisation des dosages en eau et en superplastifiant sur mortiers [60]	50
3.1	Les additions minérales utilisées dans notre étude	64
3.2	Les adjuvants chimiques utilisés dans notre étude	65
3.3	Dispositifs mesurant les propriétés rhéologiques des bétons	68
3.4	Dispositifs mesurant les propriétés mécaniques des bétons	70

INTRODUCTION

Jusqu'à nos jours, le béton demeure le matériau le plus utilisé dans le monde du bâtiment et son utilité pour la construction se développe largement chaque année. Toutefois, pour édifier des ouvrages durables et fiables, il est nécessaire, non seulement de développer un béton de qualité, mais aussi d'assurer une mise en place correcte afin de répondre aux exigences demandées pour la mise en service de la structure.

Le progrès actuel relatif aux structures modernes qui se caractérisent par la complexité de leurs géométries telles que les formes variables et les courbures multiples, ainsi que par leur forte concentration en armatures, ce qui rend l'application des bétons usuels à ces types d'ouvrages très difficile avec des défaillances structurales très probables.

L'idée de produire des bétons très maniables qui s'étalent, sans aucune vibration, dans les coffrages, est une solution intéressante. C'est ainsi que l'idée de produire des bétons autoplaçants est née. Cette nouvelle génération de béton n'est plus prioritairement valorisée par sa seule résistance à la compression, mais par l'ensemble de toutes ses nouvelles propriétés rhéologiques.

Les BAP se caractérisent par une grande fluidité et une grande capacité de remplissage tout en étant stables et garantissent aussi de bonnes performances mécaniques et de durabilité. De telles caractéristiques sont directement liées à sa composition. En effet, les recherches menées, au cours des dernières années, montrent que les BAP sont formulés différemment des bétons ordinaires : ils contiennent plus d'éléments fins qui doivent comporter au moins une addition minérale, moins de gravillons, un dosage élevé en superplastifiant et assez souvent un agent colloïdal. L'expérience Japonaise a mis en évidence la faisabilité de ces bétons sur des chantiers importants ainsi que leurs intérêt technico-économique.

Les BAP se développent aujourd'hui un peu partout dans le monde. Cependant, les données disponibles à leur sujet montrent que leur formulation est encore différente d'un pays à un autre. Par ailleurs, les chercheurs se trouvent confrontés à une autre difficulté lorsqu'ils s'intéressent à ce sujet. En effet, il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode de formulation généralisée permettant d'arranger les divers constituants de BAP, au nombre minimal de six, en fonction d'un cahier des charges donné. Par conséquent, les formulateurs ont actuellement conçu leurs BAP de manière empirique.

Pour ces raisons, le présent mémoire a pour objectif principal le développement d'une série optimale des BAP destinée aux ouvrages complexes et fortement armés, suivant un plan d'expérience bien déterminé. Les formulations développées doivent avoir un meilleur comportement rhéologique vis-à-vis de la fluidité (étalement), la capacité de remplissage (déformabilité) et la résistance à la ségrégation (stabilité). Elles doivent aussi posséder de bonnes performances mécaniques. Cette étude permet également de déterminer l'influence des principaux paramètres de composition sur les propriétés des BAP à l'état frais et durci.

Le présent mémoire s'articule en deux parties :

La première partie, comporte deux chapitres, est consacrée à la recherche bibliographique. Elle présente une revue approfondie et critique sur l'état de recherches relatives aux BAP.

Au premier chapitre, nous exposons un aperçu détaillé sur les BAP en tant que nouveau matériau, sans oublier leur historique et leurs innovations.

Après avoir décrit les différents essais développés afin de caractériser la rhéologie des BAP, le deuxième chapitre fait un survol sur leurs propriétés à l'état durci. Il expose finalement les facteurs influençant leurs performances ainsi que leurs méthodes de formulation.

La deuxième partie, contient le troisième et le quatrième chapitre, est consacrée à l'étude expérimentale. Cette étude nous a permis de développer un certain nombre de formulation des BAP.

Le troisième chapitre regroupe les caractéristiques des matériaux utilisés durant notre étude, les procédures de confection des mélanges, ainsi que les différents essais effectués.

Dans le quatrième chapitre sont présentés la problématique évoquée dans la recherche bibliographique, l'objectif visé dans cette étude ainsi que les différents paramètres étudiés. Enfin, nous exposons en détail les résultats obtenus et leurs discussions.

Finalement, la conclusion propose une synthèse des résultats obtenus dans notre travail ainsi que des perspectives de recherche.

Première partie

BÉTONS AUTOPLAÇANTS :
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1

CONCEPT DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS

1.1. INTRODUCTION

Les spécialistes du béton utilisent des termes comme *béton à haute performance* ou *béton compacté au rouleau* pour désigner différents types de bétons. Ces termes signifient ce qui peut être attendu comme caractéristiques. Dans le premier cas, cette haute performance fait souvent référence à la résistance de compression ou à la durabilité. Dans le deuxième terme, ce qui importe, c'est d'avoir un béton qui puisse être mis en place d'une façon particulière. Ces dernières années, avec l'avènement **des bétons autoplaçants**, c'est maintenant la maniabilité qui attire l'attention.

Ce chapitre présente un aperçu détaillé sur les BAP en tant que nouveau matériau. Il expose d'abord l'historique de leur développement ainsi que leur définition. Après avoir décrit le cahier des charges d'un BAP, ce chapitre fait une synthèse sur la spécificité de sa structure, en suite, il donne une description des constituants entrant dans la fabrication des BAP. Finalement, il met en relief les innovations et les avantages apportés par les BAP et donne quelques exemples d'ouvrages réalisés par l'utilisation de ce nouveau matériau.

1.2. UNE NOUVELLE GÉNÉRATION DE BÉTON S'IMPOSE

Au Japon, le nombre d'ouvriers qualifiés dans la construction n'a cessé de diminuer depuis le début des années 1980, engendrant une perte de connaissance, notamment dans les techniques de vibration du béton. De plus les ouvrages actuels se caractérisent par la complexité de leurs architectures telles que les formes variables, les courbures multiples, ainsi que leur forte concentration en armatures. Pour cela le problème de la durabilité des structures en béton est considéré comme un problème majeur auquel la société japonaise fait face. L'idée de produire des bétons très fluides, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour le serrage, est apparue comme une solution intéressante [45].

Cette idée a été proposée, d'abord, en 1986 par le Professeur H. Okamura à l'Université de Kochi (Tokyo). Ensuite, et après des recherches profondes sur la maniabilité du béton, les chercheurs K. Ozawa et K. Maekawa de la même Université ont développé le premier prototype de BAP pendant l'été de 1988. Ces résultats ont été présentés par K. Ozawa pour la première fois au 2^{ème} Congrès de l'Asie de l'Est et Pacifique sur le Génie Civil et la Construction, tenu en Janvier 1989 à Chiangmai (Thaïlande) [46]. Trois années plus tard, en Mai 1992, au 4^{ème} Congrès International CANMET & ACI à Istanbul, l'intervention du K. Ozawa a accéléré la diffusion mondiale du concept de cette nouvelle génération de béton [47].

Les BAP sont des bétons spéciaux, très fluides, qui se mettent en place et se serrent sous le seul effet de la gravité, donc sans apport de vibration interne ou externe, même dans des coffrages très ferrailés. Ces bétons ne sont évidemment qualifiés d'autoplaçants que si le matériau durci final présente des propriétés homogènes, c'est-à-dire s'il n'a pas subi de ségrégation (*photo 1.1*).

À titre d'exemple, les bétons fluidifiés, par ajout d'un excès d'eau, que l'on rencontre fréquemment dans l'industrie du bâtiment, ne rentre pas dans cette catégorie, car une telle fluidification se fait au détriment de la résistance, de la durabilité et de la qualité de parements des bétons [53].

Ajoutons, enfin, que les grands groupes industriels japonais ont rapidement adopté ce type de béton. Toutefois, dans les autres pays, l'utilisation des BAP ne se répand que très lentement car leur formulation est inhabituelle et nécessite une certaine expérience.



Photo 1.1 : *Durant le coulage du BAP dans une dalle encombrée, les gravillons nagent sans aucune ségrégation [20].*

1.3. LE CAHIER DE CHARGES D'UN BAP

Les BAP se distinguent des bétons dits ordinaires (BO), ou bétons spéciaux à vibrer, par leur comportement à l'état frais. Notre propos sera donc focalisé sur leur cahier des charges en terme de rhéologie, dont le détail est décrit ci-dessous.

- Un BAP doit, tout d'abord, s'écouler sous son propre poids, et avec un débit suffisant en milieu infini (pour une dalle, par exemple). Ceci se traduit dans la pratique par un étalement et une vitesse d'étalement importants [14].
- Un BAP doit également pouvoir s'écouler, sans apport de vibration, au travers de zones confinées (dans un coffrage très ferrailé, au droit d'un diaphragme, etc.). Pour cela, une grande fluidité du béton n'est pas une condition suffisante. En effet, lors de l'écoulement d'un béton fluide au droit d'un obstacle, les gravillons cisailent le mortier et ont tendance à venir en contact les uns avec les autres si ce dernier n'est pas assez résistant au cisaillement (*figure 1.1*). Des voûtes peuvent ainsi se former par contacts solides, se colmater avec des parties fines et interrompre l'écoulement. Il faut donc qu'un BAP présente une bonne résistance à la ségrégation dynamique en phase d'écoulement dans une zone confinée [53].

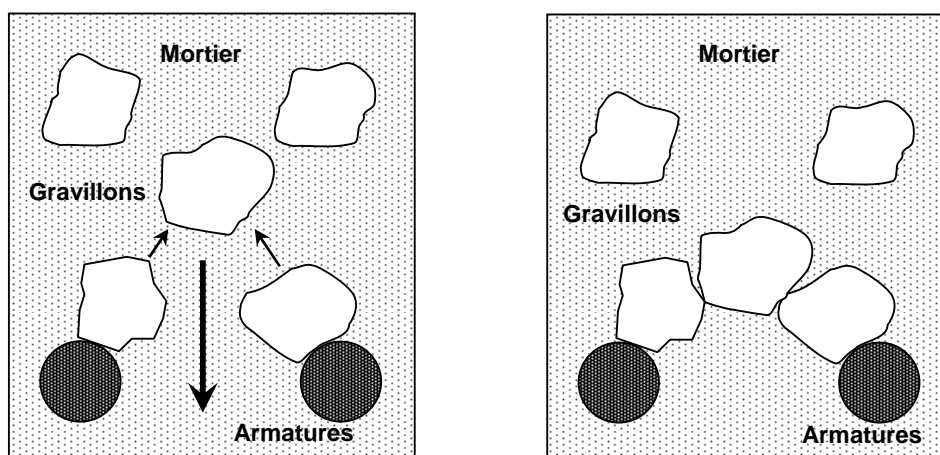


Figure 1.1 : Phénomène de blocage des gravillons au droit d'un obstacle [53].

- Un BAP doit aussi avoir une bonne résistance à la ségrégation statique (une fois mis en place) jusqu'à sa prise, pour des raisons évidentes d'homogénéité de ses propriétés mécaniques. De façon corollaire, il ne doit pas subir un tassement ou un ressuage trop fort car ceci peut générer une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées par rapport à celles situées en zone inférieure lors du coulage, ainsi que l'apparition de fissures [14] & [35].
- Ajoutons, enfin, que le pompage apparaissant comme le moyen de transport naturel de ce béton, il faut donc s'assurer de sa pompabilité. Comme un BAP présente une consistance spécialement fluide, il exerce une pression de type hydrostatique sur les coffrages, lesquels doivent être rigides et étanches.

En conclusion, la principale difficulté, à laquelle les formulateurs de BAP sont confrontés, est de pouvoir concilier des propriétés a priori contradictoires ; d'une part, une grande déformabilité (capacité de remplissage) et, d'autre part, une haute stabilité afin de limiter la ségrégation et le ressuage et d'obtenir finalement un béton très maniable. La déformabilité peut se définir comme étant la capacité du béton à s'étendre à l'horizontal sur une grande distance et à se faufiler sans peine au travers d'armatures serrées. De son côté, la stabilité est la capacité du béton à conserver un corps homogène dans toute son étendue [50]. Finalement la maniabilité est la propriété qui détermine la facilité avec laquelle le béton peut être malaxé, placé, consolidé et fini tout en conservant son homogénéité.

1.4. LA STRUCTURE DES BAP

Pour parvenir au cahier des charges précédent, les BAP sont formulés différemment des BO (figure 1.2). Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau, de l'air et d'une addition minérale, est privilégiée au détriment des gravillons. En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition minérale qui sert de substitut aux gravillons. Cependant, cette formulation n'est pas suffisante pour atteindre la fluidité, il est donc nécessaire d'ajouter aux BAP un défloculant (superplastifiant), sans lequel la demande en eau du mélange serait trop élevée [60]. D'autres adjuvants chimiques tels que les agents colloïdaux (dits aussi agents de viscosité) peuvent être introduits afin d'empêcher la ségrégation et d'assurer une meilleure stabilité de béton. En revanche, leur utilisation est au contraire peu répandue, car ils engendrent un surcoût, qui s'ajoute à ceux dus au superplastifiant et aux additions minérales. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie.

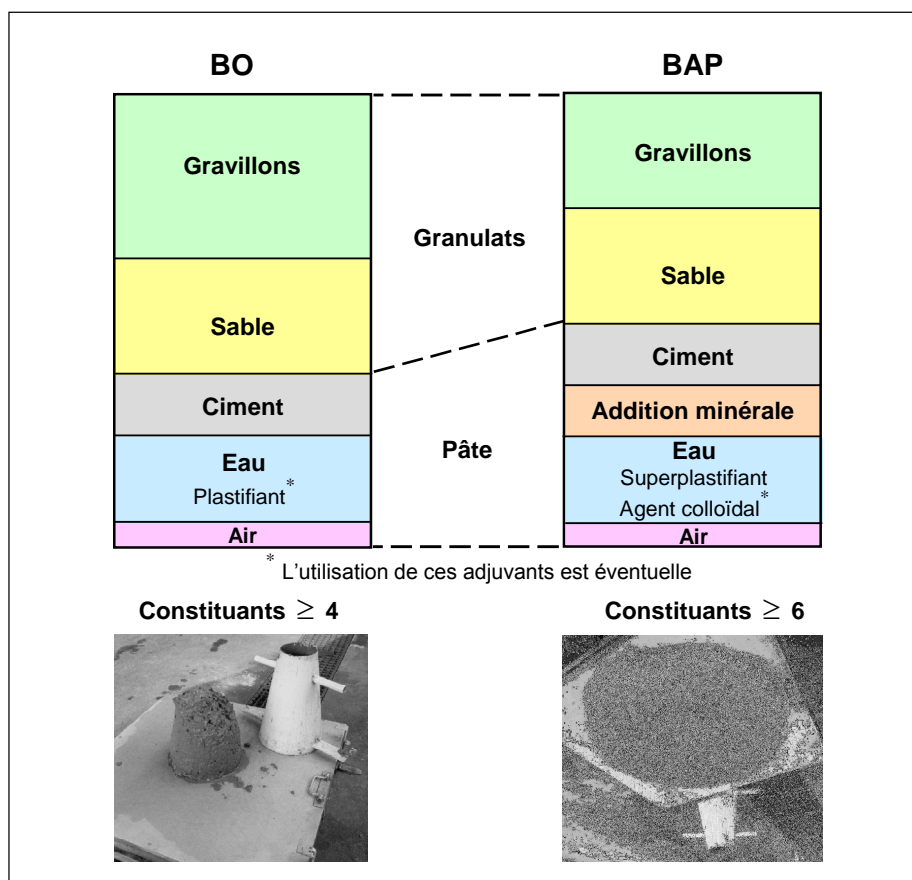


Figure 1.2 : Comparaison de la structure d'un BAP et d'un BO.

De manière plus approfondie, les recherches consacrées aux BAP nous permettent de souligner cinq particularités de leur structure dont le détail est décrit ci-dessous.

a. Un volume de pâte élevé :

Les frottements entre les gravillons limitent l'étalement et l'écoulement des bétons. C'est pourquoi, les BAP contiennent un volume de pâte important dont le rôle est d'écartier les gravillons les uns des autres [14].

b. Une quantité importante de fines :

Pour leur assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP renferment une quantité de fines supérieures à celle des BO. Toutefois, pour éviter des problèmes d'élévation excessive de la température lors de l'hydratation ainsi que pour abaisser leur coût global, le liant est souvent un composé binaire [64], voire ternaire [57] ; ciment portland mélangé avec cendres volantes, laitier, fillers calcaires, pouzzolanes naturelles, ou fumée de silice.

c. Un faible volume de gravillons :

Comme les gravillons sont à l'origine du blocage de béton en milieu confiné, il faut en limiter leur volume. D'un autre côté la présence de gravillons permet de diminuer le volume de vides du squelette granulaire du béton et donc de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir la maniabilité et la résistance mécanique souhaitées. En général, ces considérations conduisent à adopter un rapport massique (gravillons/sable) de l'ordre de 1 dans les BAP. Bien évidemment ce rapport peut être revu à la hausse si le confinement est faible (dans un ouvrage peu ferrailé par exemple) ou à la baisse dans le cas contraire [14].

d. Un fort dosage de superplastifiant :

L'introduction de dosage relativement important de superplastifiant dans les BAP permet en premier lieu de réduire la teneur en eau tout en conservant leur grande maniabilité. Toutefois, un dosage trop élevé (proche ou supérieur au dosage de saturation [8]) peut augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage.

e. L'utilisation éventuelle d'agent colloïdal :

Bien que ce ne soit pas systématique, les BAP contiennent la plus part du temps un agent colloïdal [53]. Ce produit, comme les fines, a pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation des granulats en rendant la pâte plus épaisse. De façon schématique l'utilisation de ce produit semble se justifier dans le cas des bétons ayant des rapports eau/liant élevés car les fines ne sont pas toujours suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. Il semble par contre inutile dans le cas de BAP ayant des rapports massique eau/liant faible (BAP de résistance supérieure à 50 MPa). Pour la gamme des bétons intermédiaire, leur utilité est à étudier au cas par cas. L'agent colloïdal a la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations d'eau vis-à-vis du problème du ressuage et de la ségrégation [38] & [54].

1.5. LES PRINCIPAUX CONSTITUANTS DES BAP

Les constituants des BAP peuvent être assez différents de ceux des BO. Ils peuvent différer tant par leurs proportions que par leur choix. Étant donné le mode de mise en place des BAP, il convient de porter une attention particulière au type de liant ainsi qu'à la granulométrie des gravillons si l'on désire obtenir de meilleures qualités de béton.

Généralement, on peut diviser les constituants entrant dans la fabrication du BAP, selon leur utilisation, en trois catégories ; les matériaux de base (ciment, granulats et eau de gâchage), les additions minérales, ainsi que les adjuvants chimiques.

1.5.1. Matériaux de base

Les granulats, le ciment et l'eau forment les éléments de base de tous types de béton. Ils sont qualifiés ainsi puisqu'ils sont historiquement les seuls constituants des bétons de nos ancêtres et parce qu'ils ont toujours les plus grosses proportions relatives dans le mélange de BAP.

1.5.1.1. Les granulats

Le choix des granulats pour les BAP est très important. Il s'agit en fait de déterminer leur granulométrie permettant de minimiser le plus possible le volume d'air dans le but d'améliorer les propriétés du béton.

Les granulats se divisent principalement en deux catégories soient les gravillons ($\Phi > 5 \text{ mm}$) et le sable ($\Phi \leq 5 \text{ mm}$).

Dans le cas des BAP, les gravillons sont essentiellement caractérisés par leur dimension maximale, cette dimension étant principalement limitée à 20 mm afin d'empêcher le risque de blocage lors de la mise en place. Les gravillons roulés ou concassés peuvent en principe être utilisés. En outre, le sable recommandé à la confection des BAP doit comporter des quantités assez fortes d'éléments fins ($\Phi \leq 0.125 \text{ mm}$), dans la plage de 4 à 8 %. Ainsi, ses grains passants au tamis de 2 mm doivent être compris entre 38 et 42 % [20]. Cette optimisation de sable permet d'améliorer le comportement rhéologique des BAP, mais elle entraîne un surcoût supplémentaire.

1.5.1.2. Le ciment

En principe, tous les types normalisés de ciment conviennent pour la fabrication de BAP. Cependant, l'utilisation du ciment portland (contenant seulement le clinker) nous donne toute latitude pour varier et contrôler les quantités introduites des additions minérales. Les analyses chimiques et minéralogiques du ciment sont d'une grande importance, mais elles sont souvent transparentes à l'utilisateur puisque celles-ci sont effectuées à la cimenterie et sont des critères d'assurance qualité.

1.5.1.3. L'eau de gâchage

Pour convenir à la confection de BAP, l'eau de gâchage ne doit contenir ni composés risquant d'attaquer chimiquement le ciment, les granulats ou les armatures, ni particules en suspension dont la quantité pourrait modifier ses qualités originelles. À cet effet, une analyse chimique de l'eau non potable peut être nécessaire pour détecter toute teneur trop élevée en ces impuretés.

1.5.2. Additions minérales

L'emploi des pouzzolanes minérales pour faire des mortiers et des bétons est connu depuis l'Antiquité. Ces pouzzolanes désignent un grand nombre d'additions minérales aux origines diverses, mais qui présentent tous, le fait d'être fins et de réagir en présence d'eau et de chaux. De nos jours, des quantités considérables de plusieurs types de ces additions continuent d'être utilisées.

Nous présentons ci-dessous les différentes additions minérales éventuelles qu'on peut incorporer dans les compositions des BAP :

1.5.2.1. Les fillers calcaires

Les fillers calcaires, matériaux fins dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 μm , sont obtenus par broyage ou par pulvérisation des roches calcaires naturelles ou non. Ils sont généralement considérés comme une addition inerte, mais le fait qu'ils présentent certaines propriétés hydrauliques n'est pas en soi désavantageux, de même que s'ils présentent une réaction avec certains composés développés au cours de l'hydratation [42].

Pour pouvoir être considérés comme un constituant principal du liant, les fillers calcaires doivent présenter une proportion de carbonate de calcium CaCO_3 supérieur à 75 % en masse [9].

1.5.2.2. Les pouzzolanes naturelles

Les pouzzolanes naturelles, substances finement broyées ont une finesse à peu près identiques à celles du ciment, sont généralement d'origine volcanique ou des roches sédimentaires. Elles n'ont pas des propriétés hydrauliques intrinsèques mais, en présence d'eau avec de l'hydroxyde de chaux libéré par le clinker au cours de son hydratation, elles forment, elles aussi des hydrates stables et peu solubles dans l'eau. Les constituants qui, par le même processus que les pouzzolanes, conduisent également à la formation d'hydrates stables sont réputés avoir des propriétés pouzzolaniques [10].

Les pouzzolanes naturelles sont essentiellement composées de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25 %), d'alumine et d'oxyde de fer [9].

1.5.2.3. Le laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau. Après le broyage, il se présente sous forme de nodules dont les diamètres sont compris entre 10 et 45 μm . La composition chimique de laitier comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 et 35 %, de l'alumine entre 12 et 30 % ainsi que de la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker [9].

Le laitier granulé broyé est considéré comme un véritable ciment car il suffit d'ajouter un catalyseur activant pour amorcer la prise et le développement des résistances mécaniques [62].

1.5.2.4. La fumée de silice

La fumée de silice est un sous-produit de l'industrie des alliages de silicium et notamment ferrosilicium récupérée dans les fumées émises par les fours électriques de fabrication de ces produits. Elle se présente sous forme de particules sphériques plus ou moins grisâtres et extrêmement fines dont le diamètre moyen est de l'ordre de 0.1 μm (100 fois plus petits que ceux du ciment) [9]. Sa composition chimique doit contenir au moins 85 % de dioxyde de silicium SiO_2 . La fumée de silice possède des propriétés pouzzolaniques s'avérant plus élevées que celles des pouzzolanes naturelles en raison de sa forte teneur en silice amorphe.

1.5.2.5. Les cendres volantes

Les cendres volantes, pouzzolanes d'origine industriel, sont des produits pulvérulents proviennent du dépoussiérage des gaz de la combustion du charbon dans les centrales thermiques. Elles apparaissent sous forme de particules sphériques vitreuses pleines ou creuses dont les diamètres sont compris entre 0.5 et 200 μm (50 % des grains ont un diamètre environ de 30 μm).

Les cendres volantes peuvent être divisées en deux catégories suivant leur teneur en chaux [9] :

- Les cendres volantes siliceuses (V) : sont constituées de silice réactive, entre 40 et 55 %, proportion qui ne doit jamais être inférieure à 25 %, et d'alumine entre 20 et 30 % environ, la proportion de chaux réactive devant être inférieure à 5 %. Ce type de cendres volantes présente des propriétés pouzzolaniques.
- Les cendres volantes calciques (W) : moins souvent utilisées, elles doivent contenir, quant à elles, une proportion de chaux réactive supérieure à 5 %. Auquel cas, outre leurs propriétés pouzzolaniques, elles peuvent présenter des propriétés hydrauliques.

1.5.3. Adjuvants chimiques

Les adjuvants chimiques sont des agents organiques ou inorganiques qui, incorporés dans les bétons lors de leur malaxage ou avant leur mise en œuvre à des doses inférieures à 5 % du poids de liant, provoquent des modifications de certaines propriétés de ceux-ci comme la rhéologie, les propriétés mécaniques et la durabilité.

L'utilisation des adjuvants avait commencé déjà du temps des Romains et des Grecs qui les ajoutaient au mélange de la chaux et des pouzzolanes pour édifier leurs constructions [61]. À cette époque les adjuvants du béton étaient le sang et le blanc d'oeuf.

Depuis plusieurs dizaines d'années, leur usage s'est généralisé et on peut admettre aujourd'hui que la grande majorité des bétons prêts à l'emploi contiennent des adjuvants. Au fur et à mesure du développement de leur emploi, la formulation des adjuvants est devenue de plus en plus élaborée et fait appel à des produits de synthèse.

Dans cette section, on s'intéressera seulement aux adjuvants modifiant la rhéologie des BAP puisque cette catégorie d'adjuvants a servi de base aux présents travaux de recherche. Dans cette catégorie d'adjuvants, il existe deux types bien distincts : le premier est celui des superplastifiants et le second celui des agents colloïdaux.

1.5.3.1. Les superplastifiants

Ce sont des réducteurs d'eau à haute efficacité, et se présentent généralement sous forme de liquide. Ils sont composés de longues molécules organiques de masse élevée. Les plus couramment utilisés sont les sels de sodium ou de calcium du polynaphtalène sulfoné, et les sels de sodium de la polymélamine sulfonée. Les copolymères acrylate-ester ou polyacrylates ont récemment été introduits sur le marché.

La figure (1.3) propose une représentation schématique des molécules de base qui constituent ces polymères [23].

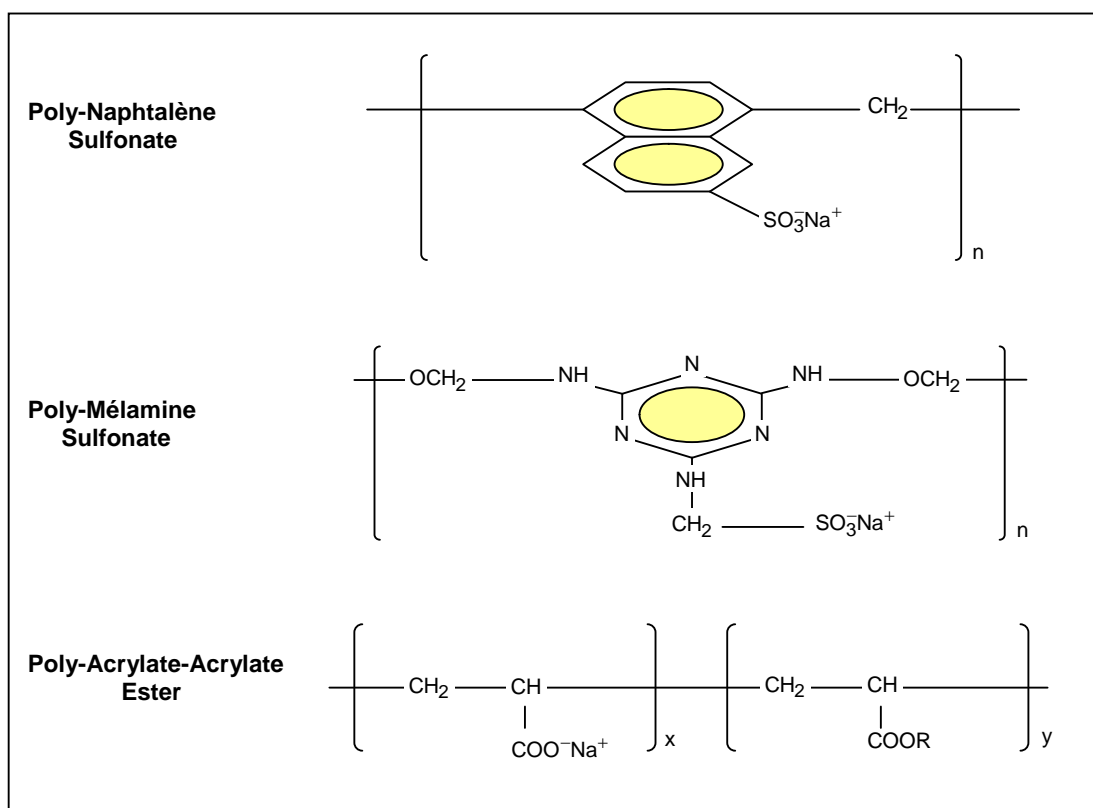


Figure 1.3 : Représentation schématique des molécules de base constituant les superplastifiants les plus connus [23].

Le mode d'action des superplastifiants est extrêmement complexe. Il peut être expliqué comme suit [3] :

Lorsqu'ils sont en contact avec un milieu aussi polaire que l'eau, les grains de ciment, qui présentent un grand nombre de charges opposées (positives et négatives) sur leur surface, tendent à s'agglomérer sous forme d'amas (floculation). Par conséquent, cette floculation piège un certain volume d'eau entre les grains de ciment (eau captive) qui n'est plus disponible pour assurer une bonne maniabilité au béton (*figure 1.4*).

Les superplastifiants en s'adsorbant à la surface des grains de ciment brisent cette dynamique. Ils neutralisent les différentes charges et donnent la même charge électrostatique à chaque grain de ciment. Ces charges de même signe vont créer des forces répulsives entre les particules et, par conséquent, la dispersion des grains de ciment libère de l'eau qui est maintenant disponible à la lubrification du mélange d'où l'augmentation de la maniabilité (*figure 1.5*).

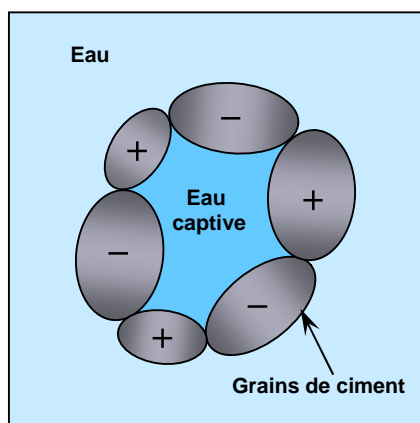


Figure 1.4 : Pâte de ciment non adjuvante : floculation des grains.

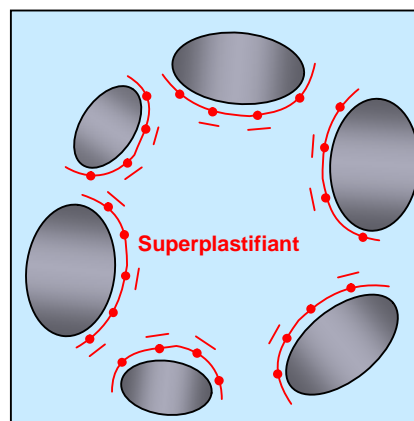


Figure 1.5 : Pâte de ciment additionnée d'un superplastifiant : dispersion des grains.

1.5.3.2. Les agents colloïdaux

En 1977, des agents colloïdaux améliorant la viscosité et la stabilité du béton ont été développés en Allemagne. Ces adjuvants, se présentent généralement sous forme de poudre, sont fréquemment utilisés pour empêcher le délavement à l'état frais des bétons coulés sous l'eau, comme agent de pompage, et pour améliorer la cohésion de mélange des BAP. Leur utilisation commence à être populaire, mais ils sont actuellement relativement chers comparés aux autres adjuvants.

La plupart des agents colloïdaux sont composés d'éther de cellulose ou de polymères de type acrylique qui sont solubles dans l'eau [40]. Ils ont été classés selon leur origine en trois catégories [24] :

- a. *Polymères naturels* : Ils comprennent des gommages naturelles, des protéines de certaines plantes et l'amidon.
- b. *Polymères semi-synthétiques* : Ils comprennent des dérivés de l'amidon, des dérivés de l'éther de cellulose comme l'hydroxyle de cellulose, l'hydroxyle de méthyle de propyle de cellulose et le méthyle carboxyle de cellulose, ainsi qu'un électrolyte comme de l'alumine de sodium.
- c. *Polymères synthétiques* : Ils comprennent de l'éthylène comme de l'oxyde de polyéthylène et de vinyle comme l'alcool de polyvinyle.

Le mécanisme d'action des agents colloïdaux est fonction du type et de la concentration des polymères. Il peut être décomposé en trois phases [27] :

1. *Adsorption* : Les longues chaînes de polymères adhèrent à la périphérie des molécules d'eau par un phénomène d'adsorption et fixation d'une partie de l'eau. La quantité d'eau adsorbée dépend de la longueur des polymères et de leur surface spécifique.
2. *Association* : Les molécules des chaînes de polymères adjacentes peuvent développer entre elles des forces d'attraction qui bloquent les mouvements de l'eau et provoquent la formation d'un gel qui augmente conséquemment la viscosité.
3. *Entrelacement* : Les chaînes de polymère peuvent s'entrelacer et s'emmêler spécialement dans des mélanges à forte concentration d'agent colloïdal. Cet entrelacement augmente la viscosité.

1.6. LES INNOVATIONS DES BAP

À la différence des bétons à haute performance, qui demeurent des bétons destinés aux chantiers exceptionnels, les BAP se vulgarisent petit à petit en séduisant le monde du bâtiment. Leur production reste minime de 1 à 4 % du volume total, mais les BAP ont les atouts nécessaires à la consolidation de leur développement actuel [60], entre autres, on peut citer :

- La mise en place des BAP est grandement facile et peut généralement être réalisée par un seul ouvrier, même dans le cas de volumes importants (*photo 1.2*). Donc, il est raisonnable de penser que la main d'œuvre nécessaire serait moindre.
- La suppression de vibration permet de limiter la consommation d'énergie tout en réduisant les nuisances sonores pour l'environnement (*photo 1.3*). En conséquence, les délais d'exécution et le coût global des constructions pourraient ainsi être moindres.
- La grande maniabilité assure la fabrication d'ouvrages dont la finition est toujours d'une qualité acceptable (*photo 1.4*). Par ailleurs, l'obtention d'une meilleure qualité de BAP est pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers durant la réalisation. Cela va dans le sens d'une durabilité accrue.

- Comme les BAP pourraient être coulés dans n'importe quelle forme et taille des coffrages, les architectes peuvent désormais exploiter des modèles complètement nouveaux pour des structures élégantes (*photo 1.5*).



Photo 1.2 : Mise en place de BAP au moyen d'une benne par un seul ouvrier.



Photo 1.3 : Le serrage du BAP est réalisé sans apport de vibration.



Photo 1.4 : Eléments préfabriqués de BAP possèdent de surfaces bien finies.



Photo 1.5 : La maison de la musique à Porto représente un cristal, nécessitant 20000 m³ de BAP blanc.

1.7. EXEMPLES D'APPLICATIONS

Le champ d'applications des BAP serait au moins égal à celui des BO. De plus, il est envisageable que les domaines d'applications deviennent plus nombreux pour les deux raisons, techniques et économiques. Ils comprennent aujourd'hui les ouvrages d'arts (ponts, tunnels, etc.), les constructions coulées sous l'eau (barrages, plates-formes, etc.), les bâtiments (gratte-ciels, préfabrications, etc.) et finalement les travaux de réparation surtout sous l'eau.

Pour mettre en évidence la faisabilité des BAP même sur des chantiers importants, on peut citer quelques ouvrages où ce type de béton a été la solution la plus adéquate pour leur réalisation.

- *Le pont Akashi Kaikyo (Japon) 1998* : l'un des plus longs ponts suspendus au monde (3910 m), où 433000 m³ de BAP contenant du laitier ont été versés dans le coffrage des fondations et des piliers très congestionnés sans vibration [44].
- *Le pont de l'aéroport Kansai (Osaka)* : il a été réalisé avec du BAP coulé sous l'eau contenant un agent colloïdal [25]. L'accès au coffrage et le fort ferrailage ne permettent pas la vibration.
- *La tour Roppongi Hillis Mori (Tokyo) 2003* : grâce au BAP, cette tour (238 m de hauteur) a été construite durant un délai record de 9 mois. L'utilisation des BAP a permis de couler des sections de plus de 100 m en hauteur sans ségrégation des granulats due à la gravité [11].
- *Les piliers du pont d'Oakland (Californie)* : ils ont été réparés avec des BAP fabriqués avec un agent colloïdal et de la fumée de silice ou de la cendre volante [26]. La densité de ferrailage et la présence de nombreuses installations temporaires nécessitaient l'utilisation d'un BAP.
- *La centrale nucléaire de Sainte-Lucie* : La structure de cette centrale a été réparée avec un volume de 1530 m³ de BAP coulé sous l'eau contenant un agent colloïdal et un liant comportant (6 % de fumée de silice + 12 % de cendre volante) [17].

- *Le barrage Red Rock (États-Unis)* : il a été réparé avec un BAP contenant un agent colloïdal coulé à une profondeur de 8 m [41]. Le ferrailage important et la profondeur rendaient difficile l'insertion du tuyau de pompage dans le coffrage.

1.8. DIVERSES APPELLATIONS

L'habitude a été prise de décliner les BAP en deux familles d'applications. La première emploie le terme *béton autoplaçant*, ou *BAP*, pour désigner les bétons destinés aux applications verticales et éléments massifs (voiles, poutres, piles, etc.). La seconde désignée sous l'appellation *béton autonivelants*, ou *BAN*, ceux destinés aux applications horizontales (dalles).

Dans cette catégorie, il faut ajouter les mortiers autonivelants, qui connaissent un succès important pour les chapes (désignées par extension par *chapes fluides*) [60].

Chaque famille de BAP est formulée suivant un même principe, mais possède néanmoins certaines particularités. La formulation des BAN comporte a priori moins de contraintes que celle des BAP. Dans leur cas, il suffit d'assurer la fluidité et l'étalement. En revanche, la déformabilité et la stabilité des BAN sont rarement contrôlées, puisque les dalles sont des milieux peu confinés. Il est à noter que les BAN doivent être peu visqueux pour avoir une grande capacité d'autonivellement. Sauf mention, on emploie dans la suite l'appellation générique de BAP, sans distinguer les applications, pour désigner tous bétons répondant au cahier de charges de ce béton.

1.9. BILAN

Les BAP, une nouvelle génération de béton venant du Japon est apparue ces dernières années. Ce sont des bétons très fluides et se mettent en œuvre sous le seul effet de la gravité, donc sans apport de vibration, même dans des coffrages complexes et très encombrés, tout en donnant un produit final homogène. L'expérience japonaise a mis en évidence la faisabilité des BAP sur des chantiers importants ainsi que leur intérêt technico-économique.

La principale difficulté de fabriquer de tels bétons est que l'on recherche à concilier des propriétés a priori contradictoires ; d'une part, une grande fluidité et déformabilité et, d'autre part, une haute stabilité afin d'obtenir finalement un béton très maniable.

Pour satisfaire ces exigences rhéologiques, la formulation des BAP doit renfermer une forte teneur en pâte au détriment de celle des gravillons. De plus, il est nécessaire d'ajouter, à cette formulation, au moins une addition minérale et un superplastifiant en proportions bien précises. Ajoutons, enfin, que l'utilisation des agents colloïdaux est éventuelle.

Chapitre 2

CARACTÉRISATION ET FORMULATION DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS

2.1. INTRODUCTION

Avec l'apparition des BAP dont le point d'intérêt principal est la maniabilité, il n'est donc pas surprenant que plusieurs chercheurs se tournent vers la science de la rhéologie pour tenter de se donner de meilleurs outils pour évaluer, comprendre et prédire la maniabilité des bétons. Par ailleurs, Le problème de la formulation des bétons s'est singulièrement compliqué dans les années récentes, principalement du fait de l'utilisation de nouveaux constituants tels que les additions minérales, les superplastifiants, ou les agents colloïdaux, qui sont venus s'ajouter à la panoplie classique des granulats et des ciments.

Dans ce chapitre sont présentés, d'abord, une description critique sur les différents essais utilisés en pratique pour caractériser les BAP à l'état frais, ainsi qu'un survol sur leurs propriétés à l'état durci. En suite, ce chapitre traite, au niveau de la composition des BAP, les principaux paramètres influençant leurs performances rhéologiques et mécaniques. Finalement, il se termine par un exposé des grandes méthodes de formulation des BAP, des plus empiriques aux plus sophistiquées.

2.2. CARACTERISATION À L'ÉTAT FRAIS

Les BAP sont des matériaux encore relativement nouveaux au monde de construction. Les formulateurs se trouvent confrontés à une autre difficulté lorsqu'ils s'intéressent à caractériser leurs propriétés à l'état frais, car il n'existe pas, à l'heure actuelle, d'essais normalisés ni de critères associés pour s'assurer qu'un béton est effectivement "autoplaçant" [53]. Pour remédier cette lacune, les chercheurs ont développé différents types d'essais sur béton, qui permettent d'évaluer l'ordre de grandeur de fluidité, de déformabilité, de stabilité et d'autres tentent de mesurer les valeurs fondamentales de l'écoulement.

Les prochaines tentatives présentent les principaux de ces tests suivant un classement définissant les paramètres rhéologiques.

2.2.1. Essai évaluant la fluidité (Étalement)

L'essai d'étalement est utilisé pour caractériser la fluidité des BAP. Il s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams. Cependant, l'affaissement est toujours supérieur à 25 cm, on mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute [53]. Ce diamètre, appelé étalement D , donne une indication sur la mobilité du BAP dans un milieu non confiné. Les valeurs ciblées d'étalement sont généralement fixées dans la fourchette 60 à 75 cm [14]. Il est possible aussi de mesurer le temps d'écoulement du béton pour atteindre un étalement de 50 cm (noté $T50$) ce qui donne un indice sur la viscosité d'un mélange de béton.

Une observation visuel permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. Par exemple, avec un béton peu stable, on remarque une séparation de la pâte et des granulats. Cependant cette observation est difficilement quantifiable. *La figure (2.1)* représente schématiquement l'essai d'étalement et *la photo (2.1)* montre ses différents processus.

Cet essai est très facile à réaliser en chantier et ne nécessite qu'un petit échantillon (6 l) de béton. En revanche, il ne met pas en relief l'importance du caractère hétérogène du béton, il s'est donc avéré nécessaire de développer une autre famille d'essais [53].

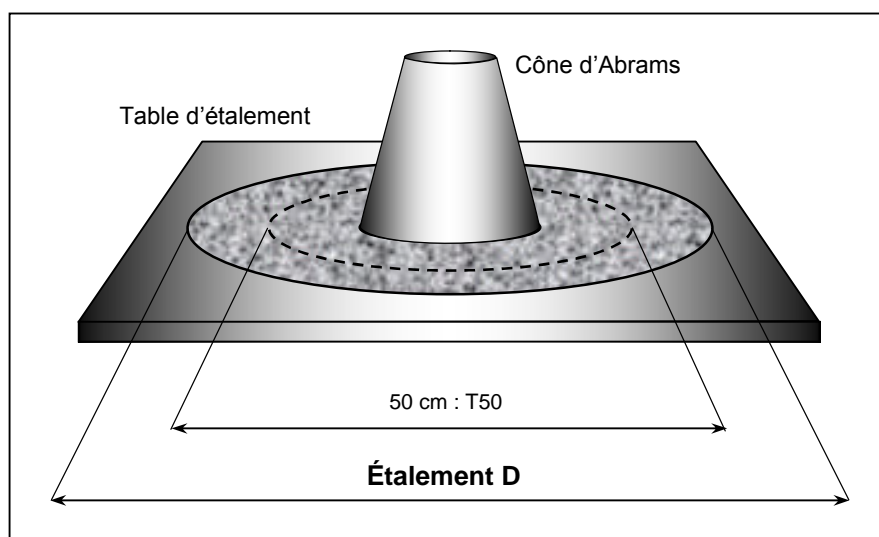


Figure 2.1 : Représentation schématiques de l'essai d'étalement.



Photo 2.1 : Les différentes étapes de l'essai d'étalement [20].

2.2.2. Essais évaluant la déformabilité

Pratiquement, tous les laboratoires ont bricolé leur propre montage pour caractériser la capacité de remplissage de BAP, ce qui complique grandement l'analyse des résultats de la littérature. Ces essais procèdent, néanmoins, du même principe et les plus courants sont présentés ci-dessous.

2.2.2.1. Essai de la boîte en «L»

L'essai de la boîte en «L» permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables.

Le principe de cet essai est le suivant ; La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton (le volume nécessaire est d'environ 13 l). Après une minute, la trappe est levée permettant l'écoulement du béton dans la partie horizontale de la boîte à travers trois armatures de diamètre 14 mm et distant entre eux de 39 mm. Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs finales de béton aux extrémités (H_1 à l'extrémité de la partie verticale et H_2 à celle de la partie horizontale) et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H_2/H_1 qui renseigne sur la mobilité de BAP en milieu confiné. Ce taux doit être supérieur à 0.80 pour obtenir un BAP [14]. La figure (2.2) montre en détail le schéma de la boîte en «L» avec ses dimensions et la photo (2.2) représente l'écoulement de BAP lors de cet essai.

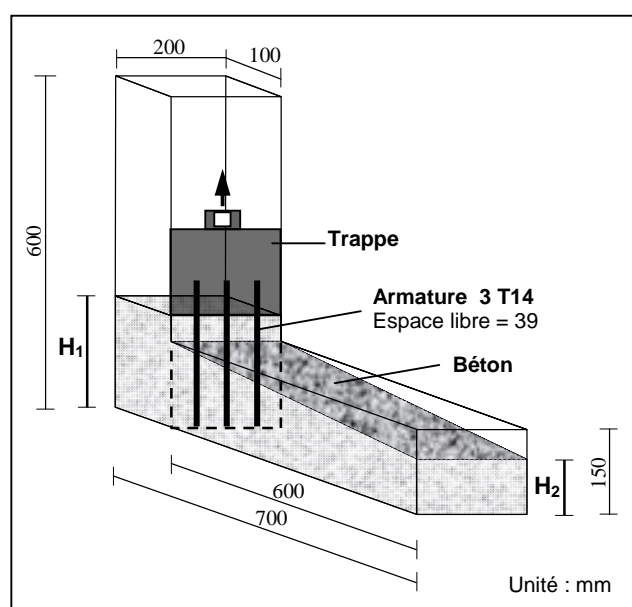


Figure 2.2 : Schéma détaillé de la boîte en «L».



Photo 2.2 : L'écoulement de BAP dans la boîte en «L» [20].

2.2.2.2. Essai de la boîte en «U»

Cet essai sert à mesurer la capacité de remplissage du BAP dans un coffrage confiné et fortement ferrillé. La boîte «U» divisé en deux parties symétriques R_1 et R_2 par une cloison centrale dont le fond est doté d'une trappe coulissante qui peut libérer la grille d'armatures (figure 2.3). L'essai de boîte en «U» nécessite 16 l de béton et s'appuie sur la mesure de la hauteur H de béton dans la partie R_2 , après remplissage de la partie R_1 et ouverture de la trappe.

Dans ce cas, les auteurs estiment qu'un béton sera "autoplaçant" si la hauteur de remplissage H est supérieure à 30 cm [53].

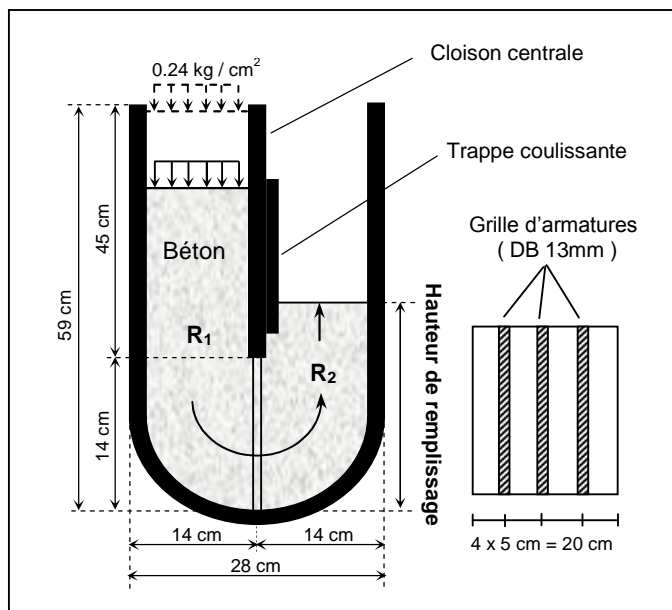


Figure 2.3 : Schéma descriptif de la boîte en «U» [18].

2.2.2.3. Essai de caisson

L'essai de caisson sert à mesurer l'aptitude de déformabilité qui tente d'évaluer la facilité d'écoulement du béton dans les coffrages très ferrailés. Ce teste requiert 35 l de béton et consiste à remplir la partie X de la cuvette transparente avec le béton jusqu'à une hauteur de 220 mm avec un débit constant à travers un entonnoir, le béton s'écoule ensuite entre des tuyaux de diamètre 16 mm. L'aptitude de déformabilité est définie comme étant le ratio $A/(A+B)$ avec A ; la surface remplie par le béton et B ; la surface vide. Dans ce cas, l'auteur estime qu'un béton sera autoplaçant s'il atteint un ratio de remplissage supérieur à 60 % [28]. La figure (2.4) et la photo (2.3) montrent le montage nécessaire pour faire cet essai.

Dans les faits, la hauteur de 220 mm varie plutôt entre 200 et 240 mm selon la viscosité du béton. Certains bétons s'immobilisent rapidement après avoir transvidé tandis que d'autres s'affaissent tranquillement sous leur propre poids. Le ratio de déformabilité n'est plus donc calculé en fonction d'une valeur fixe de 220 mm, mais bien à partir de la hauteur réelle du béton après son immobilisation.

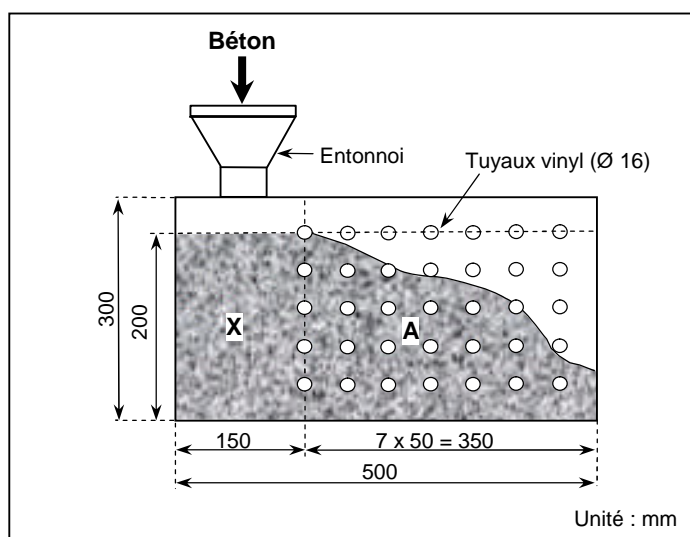


Figure 2.4 : Schéma descriptif du caisson [64].

Photo 2.3 : Dispositif de l'essai du caisson.

La lecture des divers travaux conduit, cependant, à formuler plusieurs critiques concernant les essais qui caractérisent la capacité de remplissage. Les volumes de matériaux utilisés sont, en générale, important (jusqu'à 35 l) et les essais très fastidieux à exécuter. Cela exclut donc leur utilisation sur chantier et limite cette dernière au laboratoire. Il faut, de plus, noter qu'un béton n'est pas "autoplaçant" en soi, mais vis-à-vis d'une structure et de conditions de confinement. Or, ces essais sont très sensibles au type de confinement (largeur de la maille des aciers, diamètres des tiges, géométrie, etc.) par rapport au diamètre maximale des granulats, et ne sont donc pas forcément représentatifs des structures réelles [53]. Ajoutons enfin que les tests évaluant la déformabilité ne sont malheureusement pas suffisants pour prédire si un BAP est stable ou non. Il serait donc souhaitable de consulter d'autres tests pour évaluer cette grandeur.

2.2.3. Essais évaluant la stabilité

Il est indispensable de caractériser la résistance des BAP à la ségrégation car leur grande fluidité peut conduire à une mauvaise suspension des gravillons [14]. Toutefois, il est inutile de mesurer le ressuage puisque le volume important des fines dans les BAP réduit considérablement la quantité d'eau remontante à la surface. La caractérisation de stabilité par des mesures sur béton durci s'avère assez lourde et prend beaucoup de temps, comme (comptage des gravillons sur des éprouvettes sciées en deux, auscultation sonique à différentes hauteurs d'un mur, etc.).

Pour cela, des essais faciles à exécuter ont été développés afin d'évaluer la résistance à la ségrégation ; les plus couramment utilisés sont présentés ci-dessous.

2.2.3.1. Essai de stabilité au tamis

L'essai de stabilité au tamis vise à qualifier les BAP vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un BAP en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier. Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité.

La procédure de cet essai est la suivante ; À la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés dans un seau. Après une attente de quinze minutes, un échantillon de 4,8 kg est versé du seau sur un tamis de maille 5 mm (*figure 2.5*) et (*photo 2.4*). Deux minutes plus tard, on pèse la quantité de pâte (laitance) ayant traversé le tamis. Le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon donne l'indice de ségrégation π . La mesure de cet indice conduit à classer les formules de BAP de la façon suivante [14] :

- $0 \leq \pi \leq 15 \%$ stabilité satisfaisante.
- $15 \% < \pi \leq 30 \%$ stabilité critique, l'essai à refaire in situ.
- $\pi > 30 \%$ stabilité très mauvaise, béton inutilisable.

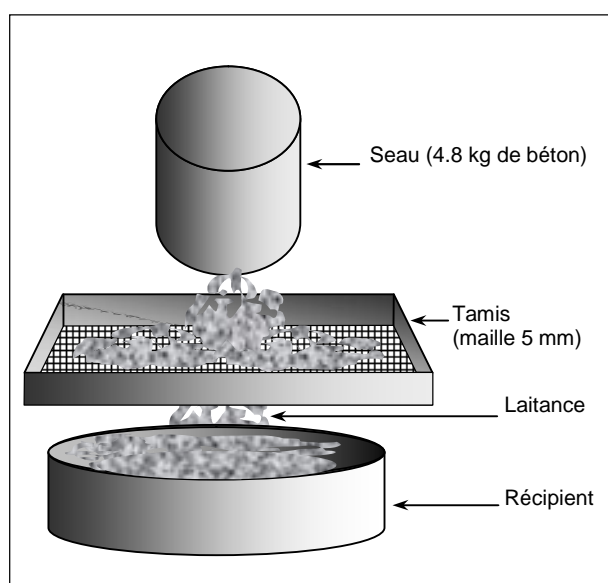


Figure 2.5 : Représentation schématiques de l'essai de stabilité au tamis [43].



Photo 2.4 : Dispositif de l'essai de stabilité au tamis [1].

2.2.3.2. Essai d'entonnoir

Cet essai permet d'évaluer la résistance à la ségrégation [6]. Il est effectué à l'aide d'un entonnoir rectangulaire dont les dimensions sont définies à la figure (2.6). Au départ de l'essai, l'entonnoir qui est fermé à son extrémité inférieure par un clapet, est rempli en une seule étape et sans consolidation du BAP dont le volume est d'environ 10 l. Après avoir ouvert le clapet, ce qui provoque l'écoulement du béton sous son poids propre, le temps de vidange totale est mesuré. Lors de l'écoulement, l'entonnoir confine le béton en deux dimensions ce qui simule un coffrage fortement armé (photo 2.5). Pour obtenir un BAP, un temps inférieur à 6 secondes est nécessaire [31]. Par ailleurs, Un temps élevé signifie que le béton comporte une grande viscosité ou une mauvaise stabilité.

La difficulté principale de ce test en laboratoire est de mesurer de manière adéquate et impartiale le temps d'écoulement du béton. Le chronomètre est activé précisément dès que le clapet est ouvert, mais le temps d'arrêt est plus difficile à déterminer puisque les bétons testés n'ont pas tous la même viscosité. Certains bétons très fluides (peu visqueux) passent à travers l'entonnoir sans laisser de dépôts derrière eux, cependant, les bétons plus visqueux n'ont pas une fin d'écoulement si démarquée ce qui prête à interprétation entre différents manipulateurs [34].

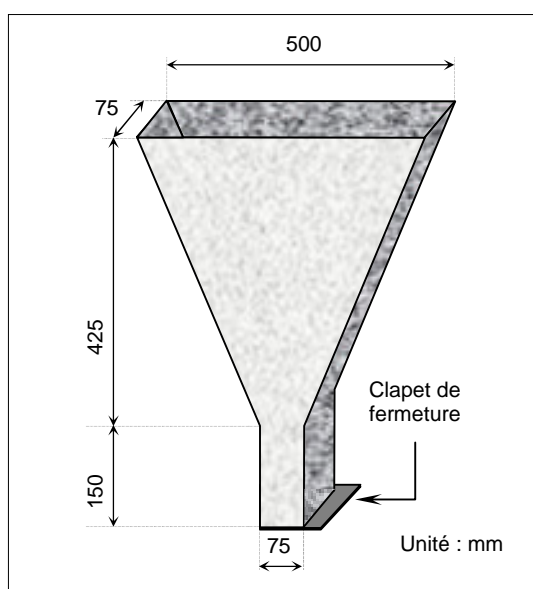


Figure 2.6 : Schéma descriptif de l'entonnoir [31].

Photo 2.5 : L'écoulement du BAP durant l'essai de l'entonnoir [20].

Le principal défaut de tous les essais présentés précédemment est de ne caractériser le comportement du béton que pour un seul mode de sollicitation. Or, ces essais sollicitent le béton de façon quasi-statique où la gravité intervient seul pour provoquer l'écoulement tandis que la mise en place peut dans certains cas se faire de façon dynamique (pompage du béton). En plus, ces essais ne fournissent que des grandeurs technologiques, dépendantes de la géométrie des montages. Ils permettent donc de comparer des bétons entre eux, mais ne sont pas extrapolables à des prédictions pour des structures réelles [53]. Un dernier type d'essai a donc été développé afin de déterminer le comportement propre du béton frais pour tous les modes de sollicitation possibles.

Ajoutons, enfin, que l'Association Française de Génie Civil a préconisé de caractériser les BAP à l'état frais à l'aide de trois essais simultanés, à savoir ; mesure d'étalement, essai de la boîte en «L» et l'essai de stabilité au tamis.

2.2.4. Essais évaluant l'écoulement (Rhéomètre à béton)

La rhéologie, branche de la science de la physique étudie les écoulements et les déformations de la matière sous l'effet des contraintes, considère que le comportement du béton frais, même extrêmement fluide comme le BAP, correspond au corps viscoplastique (modèle de Bingham) [58].

Les corps Binghamiens ne peuvent s'écouler tant que la contrainte de cisaillement n'est pas supérieure à la contrainte minimale d'écoulement, soit le seuil de cisaillement. Lorsque cette contrainte minimale est vaincue, le taux de cisaillement appliqué sur le matériau devient alors proportionnel à la contrainte de cisaillement (relation linéaire). La constante de proportionnalité, qui caractérise l'existence d'une résistance à l'écoulement, est la viscosité plastique. La courbe d'écoulement d'un corps Binghamien est une droite (*figure 2.7*) dont l'équation prend la forme suivante :

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\varepsilon}$$

Avec ;

$\dot{\varepsilon}$: Taux de cisaillement (s^{-1}).

τ : Contrainte de cisaillement (Pa).

τ_0 : Seuil de cisaillement (Pa).

μ : Viscosité plastique (Pa.s).

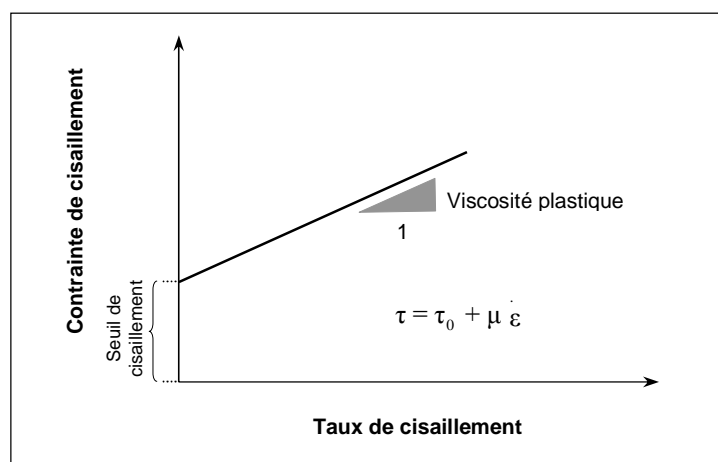


Figure 2.7 : Courbe de comportement rhéologique pour les corps de Bingham.

Par conséquent, il faut donc deux constantes physiques pour définir l'écoulement du BAP à l'état frais. Il s'agit des deux propriétés rhéologiques intrinsèques au comportement du béton frais. Il reste maintenant à trouver la méthode la plus appropriée pour les mesurer. Plus précisément, il faut déterminer les deux paramètres fondamentaux du modèle Binghamien (τ_0 et μ) à partir de la mesure des contraintes de cisaillement pour des conditions connues de cisaillement [58]. Pour cela, les scientifiques utilisent plus particulièrement les rhéomètres à béton.

Les rhéomètres à béton sont généralement plus complexes que les rhéomètres traditionnels, destinés aux corps liquides ou solides, parce que le béton est en fait un matériau composite constitué de pâte et de granulats. C'est G.H. Tattersall qui fut le premier à proposer des appareils mieux adaptés à la suspension granulaire en introduisant des rhéomètres de type malaxeur [59]. Par la suite, plusieurs chercheurs ont amélioré ce modèle avec le même principe. Entre autres, on peut citer les rhéomètres les plus connus au monde :

- Rhéomètre BML : développé par O.H. Wallevik et O.E. Gjorv [63].
- Rhéomètre BT-Rhéom : développé au LCPC de Paris par une équipe multidisciplinaire [21].
- Rhéomètre IBB : développé par D. Beaupré à l'Université de British Columbia en 1994 [4].

Pour limiter cette étude, on présente seulement le rhéomètre IBB car il est le plus vulgarisé en laboratoires des matériaux, et tous les rhéomètres à béton ont des conceptions similaires. Ce rhéomètre (Innovation Béton Beaupré) est principalement composé d'un bol contenant un béton (d'une capacité de 20 l) et d'un agitateur en forme de H (*figure 2.8*).

Son fonctionnement est simple ; l'appareil impose différentes vitesses de rotation (vitesse de cisaillement) à l'agitateur qui tourne, donc, avec un mouvement planétaire dans le béton. Un capteur de vitesse enregistre automatiquement les vitesses sur l'ordinateur de même que les couples de cisaillement sont mesurés à l'aide d'un lecteur de couple placé sur l'arbre principal. L'essai est piloté automatiquement par l'ordinateur.

Des graphiques du couple T (N.m) en fonction de la vitesse N (tours/s) peuvent donc être mesurés. Avec les résultats de cet appareil, il est possible de tracer une courbe qui a l'allure d'un corps de Bingham ($T = g + h N$), ce qui suggère que g soit fonction du seuil de cisaillement τ_0 tandis que h soit fonction de la viscosité plastique μ .

Dans cette configuration, un béton sera considéré comme BAP s'il possède un seuil de cisaillement tout près de zéro et une viscosité accrue diminue le risque de ségrégation.

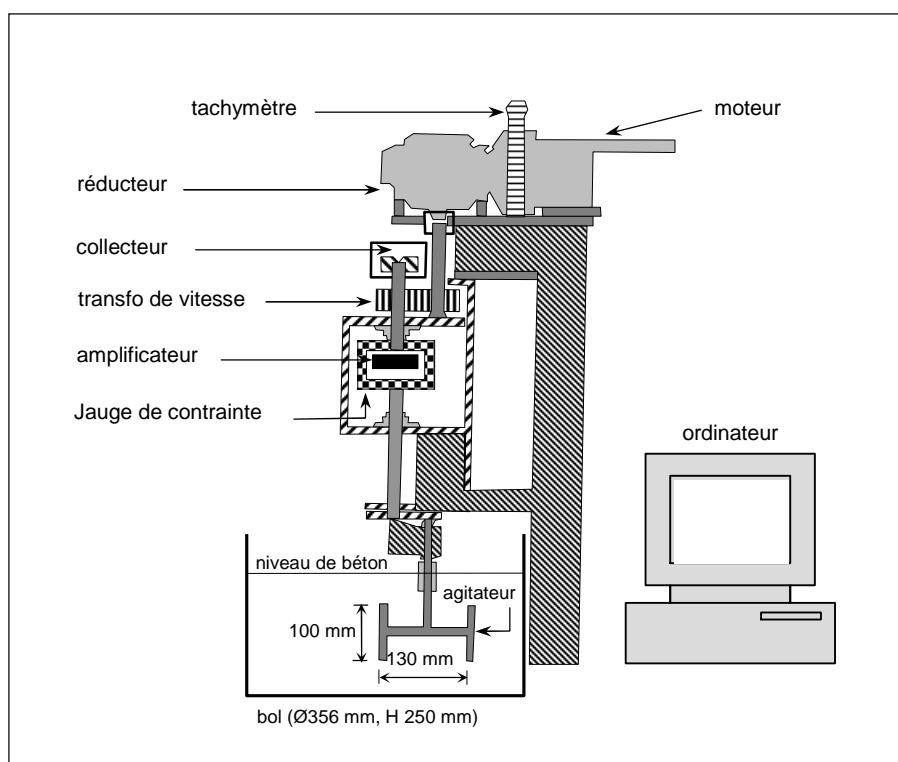


Figure 2.8 : Vue du rhéomètres à béton IBB [4].

2.3. CARACTERISATION À L'ÉTAT DURCI

Les facteurs qui dictent les propriétés mécaniques des BAP sont les mêmes que ceux qui gouvernent celles des BO. Le défi est donc d'utiliser ce savoir-faire pour obtenir des BAP possédant une bonne maniabilité et des caractéristiques satisfaisantes à l'état durci.

Faisons un tour d'horizon des données disponibles relatives aux performances mécaniques des BAP.

2.3.1. Les résistances mécaniques

La résistance à la compression : Les BAP peuvent présenter une gamme étendue de résistances à la compression en jouant sur la nature du liant qui les compose (ciment, additions) et le rapport E/L [53]. Il faut, toutefois, s'attendre à des résistances au jeune âge modérées lorsque les bétons contiennent de grosses proportions d'additions ou lorsque l'usage d'un agent colloïdal nécessite un fort dosage en superplastifiant.

La résistance à la traction : Les spécificités de composition des BAP permettent d'anticiper une légère différence de rapport entre la résistance à la traction et celle à la compression par rapport aux BO [12]. En effet, les résultats obtenus confirment que pour les mêmes résistances à la compression les BAP possèdent des résistances à la traction légèrement supérieures à celles des BO [13] [22].

2.3.2. Les déformations

Le module d'élasticité : Comme les BAP renferment un faible volume de granulats, il faut prévoir des modules d'élasticité plus faibles que pour des bétons de mêmes résistances mais de rhéologie conventionnelle (affaissement au cône d'Abrams compris entre 15 et 25 cm). De manière plus précise, pour expliquer ce fait, on peut imaginer le béton comme un composite à deux phases composées d'une matrice, la pâte de liant durcie, et en second lieu, d'inclusion des granulats. Sachant que le module d'élasticité est principalement affecté par les granulats, les BAP sont donc susceptibles d'être plus déformables que les BO. Néanmoins, plusieurs recherches concernant le module d'élasticité des BAP montre qu'il est souvent proche à celui de BO, lorsque les deux types de béton ont la même résistance [48] [49].

Le retrait total : L'influence du volume de la matrice de la pâte sur le retrait total du béton conduit à penser que ce type de déformation sera augmenté pour les BAP par rapport aux BO, et ce d'autant plus que la proportion granulaire s'éloigne des valeurs courantes des BO [14]. Cependant, Les données sur le retrait total, et donc sur le retrait de séchage, sont très partagées ; d'un côté, le retrait total est trouvé équivalent pour les BAP et BO [48] [49] ; de l'autre, il est trouvé sensiblement supérieur dans le cas des BAP [2] [22] [37].

Le fluage : Les études sur le fluage sont encore peu nombreuses, en tout cas par rapport à celles sur le retrait. Cela explique peut-être pourquoi les résultats des recherches sont plus homogènes. Le fluage des BAP paraît comparable à celui des BO de même résistance, en mode endogène ou en mode de dessiccation [7] [48] [49].

2.3.3. L'adhérence acier-béton

Bien que l'absence de vibration et le changement de compositions du béton aient une influence non négligeable sur la liaison acier-béton, plusieurs études montrent que l'adhérence des BAP aux armatures est similaire à celle des BO [13] [36]. Dans certaines configurations (nappes supérieures de pièces épaisses), la meilleure stabilité des BAP vis-à-vis du ressuage élimine les défauts rencontrés avec certains BO et peut améliorer l'enrobage des armatures [36].

2.3.4. La durabilité

En général, la durabilité est relative aux paramètres de composition en termes de porosité, de nature chimique du liant et de la minéralogie des granulats pour l'alcali-réaction [14].

Grâce à leurs additions minérales, les BAP présentent d'excellente étanchéité ainsi que des meilleures résistances aux agents acides ou salins contenus dans l'eau. Toutefois, il apparaît possible de produire et de stabiliser suffisamment d'air dans ces bétons avec un agent entraîneur d'air pour les protéger efficacement des cycles gel-dégel.

2.4. FACTEURS INFLUENÇANT LES PERFORMANCES DES BAP

Les facteurs qui affectent les performances rhéologiques et mécaniques des BAP sont nombreux. Tous les changements effectués sur leur composition influencent à des niveaux différents leurs propriétés. La présente partie se propose de mettre en valeur les principaux de ces facteurs.

2.4.1. Forme, granulométrie et volume des gravillons

Avant de montrer l'effet de ces facteurs, faisons un rappel sur la compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de la matière solide des grains sur le volume total du système (grains + vides). Elle dépend bien sûr du mode de compactage. Par conséquent, l'indice des vides est l'inverse de la compacité. L'avantage d'une compacité élevée se traduit principalement par une diminution de l'eau libre dans le mélange, ce qui affecte la stabilité du béton frais. Ainsi, pour une même maniabilité, il est possible d'abaisser la quantité d'eau avec tous les avantages que ceci comporte (plus de résistance, perméabilité réduite, etc.).

Dans le cas de BAP, puisque l'énergie de compactage est nulle, la compacité de gravillons dépend seulement de leur forme et leur granulométrie. En effet, K.H. Khayat [32] a recommandé d'utiliser des gravillons roulés car ils possèdent un volume des vides plus réduit que celui de gravillons concassés. Cependant, la surface lisse des gravillons roulés affecte la force d'adhésion entre la matrice cimentaire et ceux-ci, ce qui provoque peut être une diminution des résistances mécaniques.

De plus, la granulométrie des gravillons a des influences directes sur la maniabilité, soit par leur dimension maximale ou par leurs proportions des grains de même dimension. La dimension maximale affecte essentiellement la capacité de remplissage des BAP, et elle demeure toujours inversement proportionnelle à cette propriété. *La figure (2.9)* montre que la capacité de remplissage diminue de 72 % lorsqu'on augmente la taille maximale des gravillons de $\varnothing 12.5$ à $\varnothing 20$ mm [53]. Néanmoins, une dimension maximale plus faible engendre systématiquement une augmentation de leur surface spécifique, laquelle détermine la quantité d'eau nécessaire pour humidifier tous les solides. Cet inconvénient n'a pas d'importance du fait que le fort dosage en superplastifiant permet de conserver le rapport E/L désiré.

Ajoutons enfin que, à dosage en ciment égal, plus la dimension maximale des gravillons est élevée et plus la résistance à la compression est forte [62].

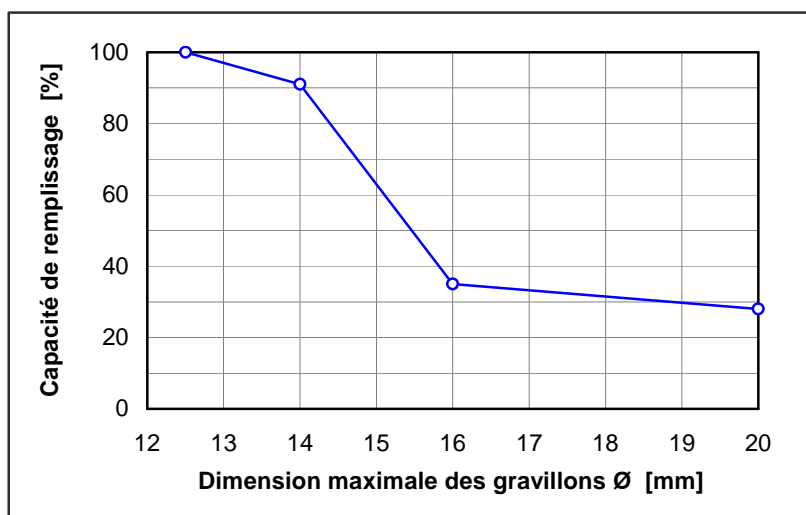


Figure 2.9 : Effet de la taille maximale des gravillons sur la capacité de remplissage [53].

Il y a lieu de rappeler que pour des gravillons de même classe granulaire, leurs compacités ne sont pas obligatoirement équivalentes car les proportions des grains de même dimension sont différentes. Pour une classe granulométrique donnée, la compacité serait maximale si les proportions des grains de petites dimensions peuvent remplir, mais sans excès, le volume des vides intergranulaires. Plusieurs recherches ont combiné deux classes granulaires différentes de gravillons afin d'augmenter la compacité. Ces combinaisons permettent d'améliorer à la fois l'étalement, la capacité de remplissage ainsi que les résistances mécaniques des BAP [1] [33].

On a déjà mentionné qu'un faible volume de gravillons joue un rôle essentiel sur la rhéologie des BAP. En fait, un volume important de ceux-ci, dépassant 350 l, peut détériorer toutes les performances à l'état frais. *Les figures (2.10) et (2.11)* reproduites d'après M. Sonebi [55] et M. Yurugi et coll. [64] montrent respectivement que les développements de l'étalement et la capacité de remplissage des BAP sont des fonctions décroissantes du volume des gravillons. Cependant, la réduction de ce volume se fait au détriment des résistances mécaniques et du module élastique des bétons ainsi qu'elle accélère le phénomène de retrait.

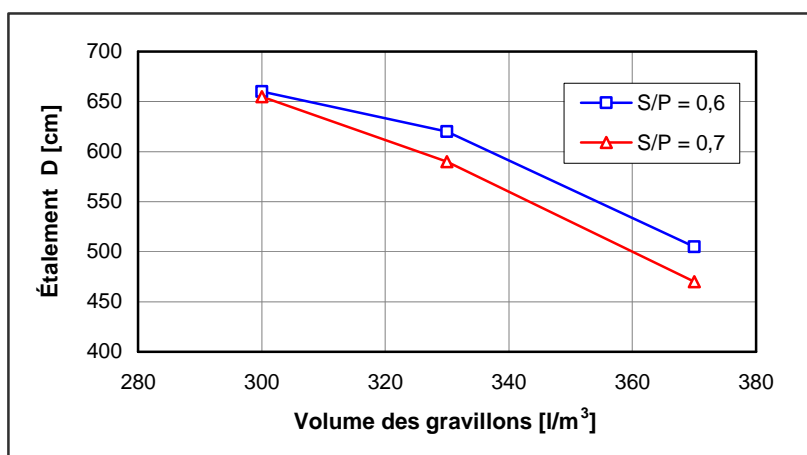


Figure 2.10 : Effet du volume des gravillons sur l'étalement pour différents rapports S/P [55].

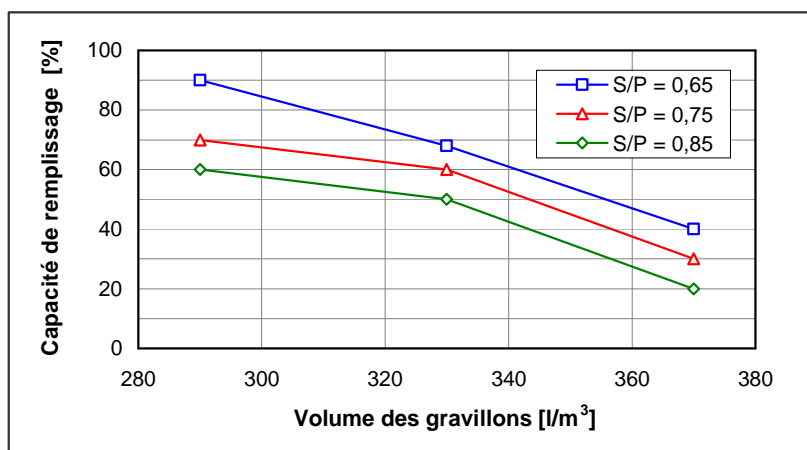


Figure 2.11 : Effet du volume de gravillons sur la capacité de remplissage pour différents rapports S/P [64].

2.4.2. Rapport volumique sable/pâte

Avec un faible volume des gravillons de 300 à 330 l/m^3 , l'effet de la variation du rapport S/P semble être plus efficace pour l'amélioration de l'étalement des BAP. Par contre, cet effet est très réduit si le volume des gravillons est important (370 l/m^3) [33]. Par ailleurs, pour un BAP ayant un étalement de 60 à 70 cm et une bonne capacité de remplissage, M. Yurugi et coll. [64] ont trouvé que le rapport S/P doit être compris entre 0.65 à 0.75, mais lorsque ce rapport est de 0.85, ils ont montré qu'il est très difficile d'obtenir un BAP. K.H. Khayat [33] et également M. Sonebi [55] ont trouvé que la valeur optimisée du rapport S/P qui donne les meilleurs étalement et capacité de remplissage est de 0.6.

La réduction du rapport S/P signifie une augmentation des quantités du liant et de l'eau. Cette augmentation entraîne une montée en hydrate formé plus importante et par conséquent elle augmente les résistances mécaniques des BAP. Cependant, avec un volume de sable faible par rapport au volume de pâte, le module élastique a tendance de diminuer (les granulats sont en général 3 à 15 fois plus rigide que la pâte) [14]. En plus, parce que le sable n'est pas sujet au retrait, l'augmentation donc de volume de pâte peut provoquer une augmentation de retrait total [42].

2.4.3. Rapport massique eau/liant

Le principal paramètre affectant les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons est sans aucun doute le rapport E/L ou E/C (dans le cas où le liant contient le ciment seulement). Généralement, le rapport E/L utilisé dans le BAP est situé dans une large plage de 0.25 à 0.5 dépend bien sûr du type d'application et des performances visées.

Avec un dosage de superplastifiant donné, l'étalement des BAP est absolument augmenté avec un rapport E/L élevé. Par contre, l'accroissement de ce rapport peut diminuer la stabilité de mélange des BAP et produit aussi la ségrégation et le ressuage. En plus, cet accroissement de rapport E/L est accompagné d'une diminution du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique [59].

Il existe pour chaque béton et pour une mise en œuvre donnée une teneur en eau optimale donnant les résistances maximales [62]. Ainsi, il est très évident que les résistances mécaniques diminuent avec l'augmentation du rapport E/C. Par contre, un faible rapport E/C améliore absolument les résistances, mais un dosage élevé en superplastifiant serait nécessaire pour garantir une bonne fluidité. Par ailleurs, le module élastique diminue aussi lorsque le rapport E/L s'accroît [42]. Cependant, le retrait total est une fonction croissante du rapport E/L [42], parce que la quantité d'eau évaporable augmente.

2.4.4. Nature et dosage d'additions minérales

Le comportement du liant, qui comporte le ciment avec addition minérale, présente généralement les caractéristiques suivantes [56] :

- La réaction est lente, le dégagement de chaleur et le développement des résistances sont également lents.
- Les produits d'hydratation remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance et l'imperméabilité des bétons par affinage de ces pores capillaires et par transformation des gros cristaux de CH en un produit d'hydratation faiblement cristallisé (affinage des grains).
- Au lieu de fournir de la chaux, comme dans le cas du ciment portland, la réaction pouzzolanique en consomme et améliore plusieurs caractéristiques de durabilité du béton.

Ces caractéristiques dépendent bien sûr de la nature et du dosage d'additions minérales qu'on a utilisés. Cette section présente les influences de ces deux paramètres sur les performances des BO et particulièrement des BAP à l'états frais et durci.

a. Fillers calcaires

À l'état frais : l'ajout de fillers calcaires peut avoir plusieurs fonctions, comme par exemple de compléter la courbe granulométrique d'un ciment déficient en grains fins. Les fillers peuvent également augmenter le seuil de cisaillement mais ne modifie pas la viscosité plastique (l'effet s'oriente vers un effet fluidifiant) [51]. L'effet des fillers calcaires sur la maniabilité dépend surtout de sa finesse. Quand ils sont finement broyés, il y aura une augmentation de la maniabilité ou une réduction de la quantité d'eau requise pour obtenir un étalement donné. Par ailleurs, K.H. Khayat a trouvé que l'étalement et la stabilité des BAP sont accrus lorsque la quantité de fillers calcaires est limitée à 30 % de la masse de liant. Au-delà de cette valeur, ces paramètres décroissent [33].

À l'état durci : l'influence de l'ajout de fillers calcaires sur les résistances mécaniques est manifeste. Généralement, les résistances mécaniques des BAP diminuent en fonction de l'augmentation de proportion massique de fillers dans le liant. Par ailleurs, le retrait de séchage peut diminuer avec l'emploi d'un filler calcaire, si sa finesse permet d'augmenter la compacité du squelette, et donc réduire les transferts d'humidité [5]. Certains fillers semblent au contraire augmenter le retrait des BAP [19].

b. Pouzzolanes naturelles

À l'état frais : à notre connaissance, aucune étude n'a fait l'objet d'utilisation des pouzzolanes naturelles dans la confection des BAP. Cependant, on peut citer que, lorsque ces pouzzolanes sont finement broyées (leur finesse est proche de celle des fillers calcaires), et se substituant de 10 à 30 % du ciment, permet d'augmenter la quantité d'eau libre dans le mélange du béton, ce qui augmente alors la fluidité ou qui permet, à fluidité égale, de diminuer quelque peu le rapport E/L, ainsi que la ségrégation et le ressuage sont habituellement faibles.

À l'état durci : l'effet le plus notable des pouzzolanes naturelles est d'améliorer la densité de matrice de la pâte qui sera plus résistante aux eaux agressives et permettent une fixation progressive des alcalis du ciment. Cependant, les résistances mécaniques à court terme (≥ 28 jours) diminuent en fonction de l'augmentation de proportion massique de pouzzolanes dans le liant, mais les résistances à long terme (≤ 90 jours) d'un béton contenant des pouzzolanes sont comparables à celles d'un béton confectionné seulement avec du ciment. Par ailleurs, il semble que l'utilisation des pouzzolanes naturelles n'affecte pas le retrait.

c. Laitier de haut fourneau

À l'état frais : l'incorporation de laitier dans le béton peut améliorer la maniabilité et la cohésion. La meilleure dispersion des grains de ciment explique ce phénomène, de même que les caractéristiques de surface des grains de laitier plus lisses et absorbant un peu d'eau lors du malaxage. Lorsque le laitier est broyé à une grande finesse, le ressuage du béton est diminué [42]. La quantité de laitier dans les BAP destinés aux ouvrages sous l'eau peut atteindre jusqu'à 50 % de la masse de liant [55].

À l'état durci : les bétons contenant le laitier résistent bien à l'action des eaux agressives surtout en immersion complète. La bonne résistance chimique est liée à la faible teneur en chaux et à la forte compacité des hydrates formés. La présence de laitier dans le béton conduit à une diminution des résistances mécaniques au jeune âge, mais elles continuent de croître de façon significative au-delà de 28 jours. Les plus petites particules de laitier ($\geq 10 \mu\text{m}$) contribuent à la résistance au jeune âge tandis que ses plus grosses particules ($\leq 45 \mu\text{m}$) accroissent la résistance à long terme. Il faut noter que les bétons de

laitier conservés humides présentent de très fortes résistances finales. Le retrait du béton à base de laitier est augmenté dans les premiers temps, mais globalement ni le retrait ni le fluage ne sont pas affectés de façon préjudiciable par l'utilisation de laitier [42].

d. Fumée de silice

À l'état frais : à cause de leur très grande surface spécifique qui doit être mouillée, l'incorporation de fumée de silice dans le béton tend à augmenter le besoin en eau pour atteindre la même maniabilité qu'un béton confectionné seulement avec du ciment. Cependant, en présence d'un superplastifiant et utilisée en petite quantité pour des bétons ayant un faible rapport E/L, la fumée de silice peut combler l'espace entre les grains de ciment, ce qui augmente quelque peu la quantité d'eau libre dans le mélange de béton et accroît sensiblement la maniabilité [30]. De plus, les BAP contenant de la fumée de silice à un dosage de 3 % de la quantité de liant possèdent une cohésion très forte qui peut éliminer la ségrégation et le ressuage [33]. Ce dosage peut atteindre à 10 % de la masse de liant afin de faciliter le pompage et le bétonnage sous l'eau [55].

À l'état durci : l'utilisation combinée de fumée de silice et de superplastifiant est avantageuse et rend possible la confection de bétons ayant de faibles rapports E/L, ce qui améliore l'augmentation des résistances mécaniques. Généralement, les résistances mécaniques à 28 jours sont des fonctions croissantes de l'augmentation de fumée de silice dans le mélange jusqu'à une certaine limite, mais les résistances finales des bétons contenant la fumée de silice sont comparables à celles des bétons confectionnés seulement avec du ciment [42]. De plus, l'utilisation de fumée de silice à un dosage inférieur à 8 % de la quantité de liant, permet d'obtenir des bétons plus denses et plus imperméables, donc plus durables. Cependant, étant donné que le risque de retrait est très élevé pour ces types de béton, la cure des bétons doit être bien effectuée [50].

e. Cendres volantes

À l'état frais : l'influence des cendres volantes sur les propriétés du béton frais est liée à la forme de leurs particules. En fait, la réduction en besoin d'eau du béton due à la présence des cendres volantes est habituellement attribuée à leur forme sphérique. En particulier, s'il y a suffisamment de grains fins de cendres volantes pour couvrir la surface

des grains du ciment, ces derniers sont défloculés et le besoin en eau pour une maniabilité donnée est réduit. Il semble donc que l'action des cendres volantes sur le besoin en eau est comme celle des superplastifiants [42]. En effet, la maniabilité des BAP augmente avec l'augmentation du dosage en cendres volantes jusqu'à environ 20 % du poids de liant [33].

À l'état durci : L'effet des cendres volantes sur le béton durci est semblable à celui des pouzzolanes naturelles.

2.4.5. Type et dosage d'adjuvants

Cette section présente les influences des superplastifiants, des agents colloïdaux et leurs dosages sur les performances des BO et particulièrement des BAP à l'états frais et durci.

a. Superplastifiants

À l'état frais : les BAP requièrent habituellement une grande quantité de superplastifiant. Leur dosage varie entre 3 l/m³ à près de 20 l/m³ pour les mélanges de béton dont la courbe granulométrique est médiocre. Cependant, l'utilisation importante de superplastifiant pour les BAP n'est pas la seule explication de leur grande maniabilité. En effet, à concentration très élevée de superplastifiant, différents problèmes surviennent comme une retardation excessive de la prise du béton, de la ségrégation, du ressuage et un réseau de bulles d'air instable. Pour éviter ces problèmes, les BAP doivent donc contenir des agents colloïdaux ou avoir des constituants granulaires optimisés au point de vue de leurs compacités [50].

Par ailleurs, comme le montre *la figure (2.12)*, l'utilisation des superplastifiants permet d'abaisser la teneur en eau de 45 kg tout en maintenant un même étalement, ce qui donne de grandes performances du béton durci. De plus, elle permet d'améliorer l'étalement, afin de confectionner un béton extrêmement fluide, sans le besoin d'ajouter une quantité d'eau supplémentaire.

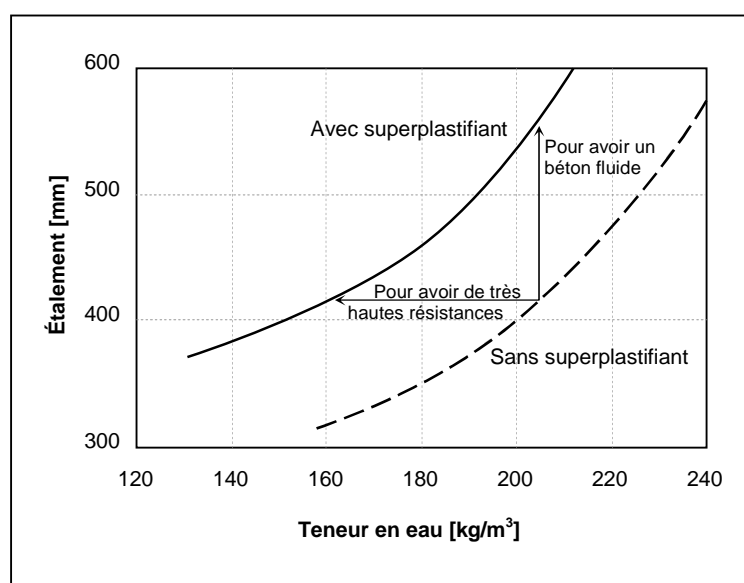


Figure 2.12 : Relation entre l'étalement et le dosage en eau d'un béton avec et sans superplastifiant [39].

À l'état durci : lorsqu'ils sont utilisés comme réducteurs d'eau, les superplastifiants ont un effet plus que bénéfique sur les résistances mécaniques du béton et sa durabilité. Ceci s'explique facilement étant donné l'abaissement substantiel du rapport E/L que permet l'utilisation de superplastifiant. Il est bien connu que le rapport E/L a un lien direct avec les résistances mécaniques du béton et sa durabilité. Toutefois, dans les cas où le superplastifiant n'est pas utilisé comme réducteur d'eau, son effet reste bénéfique mais dans un ordre de grandeur moindre. Ceci s'explique par le fait qu'une meilleure dispersion des grains de ciments peut diminuer la porosité capillaire et ainsi augmenter les résistances [30]. Par ailleurs, les superplastifiants n'influencent pas le retrait, le fluage, le module d'élasticité ni la résistance au gel-dégel du béton [42].

b. Agents colloïdaux

À l'état frais : les agents colloïdaux affectent grandement la fluidité des bétons en les rendant plus collants et visqueux. Il peut paraître paradoxal d'utiliser ces adjuvants dans les BAP, puisque d'un côté on augmente la viscosité plastique et le seuil de cisaillement, et de l'autre côté on cherche à fluidifier le mélange avec un superplastifiant. Pour maintenir donc l'étalement d'un BAP en augmentant la dose de superplastifiant avec le dosage en agents colloïdaux.

Le premier intérêt de l'utilisation des agents colloïdaux apparaît sur la figure (2.13). Ce graphique représente les propriétés de béton ayant le même squelette granulaire, mais dont la teneur en superplastifiant a été ajustée pour chaque dosage en agent colloïdal afin d'avoir la plus grande hauteur de remplissage au test du «U». On voit très bien que, pour un jeu de constituants donné, on améliore les propriétés du béton frais en combinant agent colloïdal et superplastifiant à des dosages respectifs de 0.6 et 1.4 % [53].

De plus, les solutions contenant des agents colloïdaux sont caractérisées comme pseudoplastiques, c'est-à-dire qu'en augmentant la vitesse de malaxage ou de pompage, le mélange devient plus fluide (la viscosité diminue). Si on arrête de malaxer ou de pomper, la viscosité augmente. C'est une des raisons pour laquelle les agents colloïdaux augmentent la stabilité des mélanges [52].

Ajoutons, enfin, que les agents colloïdaux peuvent prendre l'eau libre dans leurs chaînes, ce qui également évite l'apparition d'eau de ressuage.

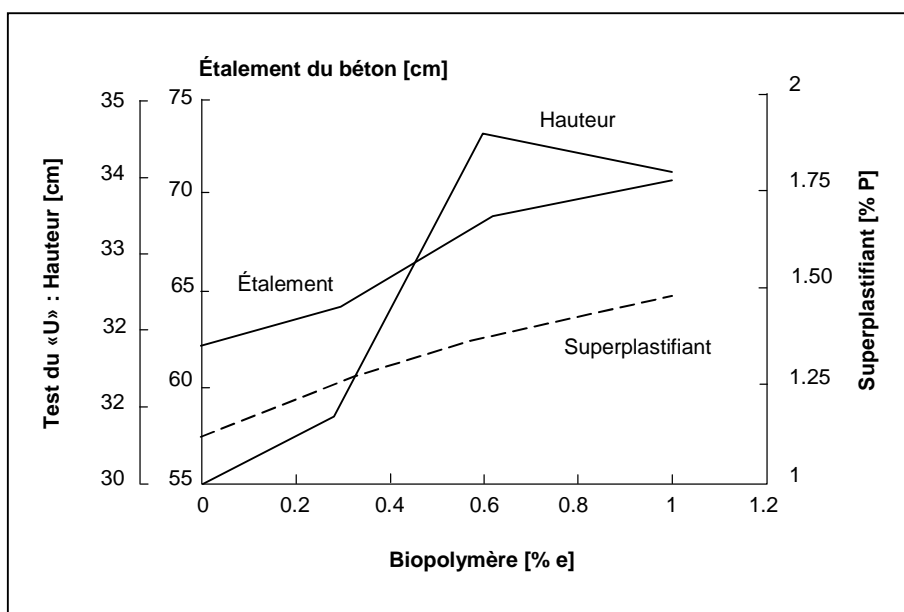


Figure 2.13 : Propriété du béton optimisé pour différents dosages en agent colloïdal [57].

À l'état durci : selon l'étude de K.H. Khayat [29], les agents colloïdaux ne semblent pas affecter les résistances mécaniques des bétons ayant des rapports E/L élevé de l'ordre de 0.60. Cependant, pour de faibles rapports E/L de l'ordre de 0.45 et 0.3, la présence des agents colloïdaux peut diminuer légèrement les résistances mécaniques à cause d'une concentration importante de grands pores capillaires dans ces bétons.

K.H. Khayat a montré aussi que les bétons contenant des agents colloïdaux ont des modules d'élasticité plus faibles de 0 à 20 % que ceux des bétons sans agents colloïdaux. Ainsi, étant donné que la résistance à la compression ainsi que le réseau de bulle d'air sont peu affectés par les agents colloïdaux, leurs effets directs sur la durabilité devraient être minimales [29].

Par ailleurs, l'utilisation des agents colloïdaux dans les travaux sous l'eau apporte des effets indirects comme une stabilité accrue et une meilleure résistance au lessivage qui aident grandement à améliorer le rapport des résistances mécaniques des bétons coulés sous l'eau et ceux coulés dans l'air [55].

2.5. FORMULATION DES BAP

2.5.1. Formuler un béton

Formuler un béton, c'est trouver un arrangement des divers constituants répondant à un cahier des charges donné. Dans les cas courants, le cahier des charges concerne la résistance à la compression à 28 jours et la consistance, c'est-à-dire l'affaissement au cône d'Abrams. Pour des chantiers plus spécifiques, d'autres propriétés peuvent être demandées, comme, par exemple, une prise retardée, une résistance élevée au jeune âge, ou un dégagement de chaleur minimal. La solution trouvée doit si possible être optimale, ce qui signifie bien souvent avoir le plus faible prix de revient.

Pour formuler les BO, la méthode la plus utilisée dans l'industrie est celle dite de Dreux-Gorisse. Elle propose différents abaques pour estimer les dosages en eau et en ciment permettant d'obtenir la résistance et l'affaissement souhaités. Elle se distingue également par une méthode originale pour proportionner les granulats, qui consiste à caler la courbe granulométrique du mélange sables / gravillons sur une courbe de référence.

La mise au point d'une formule de BAP est beaucoup plus complexe, parce que, d'abord, les constituants sont au nombre minimal de six, contre quatre dans le cas des BO. Ensuite, le cahier des charges d'un BAP comporte plus de clauses, en particulier à l'état frais ; il faut assurer, en plus de l'étalement, la capacité de remplissage et la stabilité. Enfin, et surtout, les propriétés des BAP sont contradictoires ; un béton riche d'une pâte fluide est très sensible à la ségrégation [60].

2.5.2. Pratique actuelle de la formulation des BAP

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années.

Par chance, le cahier des charges des BAP est très souvent réduit à sa plus simple expression, puisqu'il ne concerne que les propriétés à l'état frais. En fait, l'industrie du bâtiment utilise principalement des bétons possédant des résistances à la compression à 28 jours de 25 à 35 MPa. Or, par expérience, on sait que ces résistances "ordinaires" sont facilement atteintes par les BAP (d'autant plus que leurs rapports E/C sont proches de ceux des BO qu'ils doivent remplacer).

En outre, l'aspect économique n'est pas encore le critère prédominant de la formulation ; les dosages en superplastifiant et en fines ne sont donc pas bornés. Il est vrai, paradoxalement, que l'utilisation des agents de viscosité n'est pas très diffusée, justement à cause de leur coût.

Avec le temps, et le retour d'expérience, certaines plages se sont dessinées pour chaque constituant, facilitant un peu le travail du formulateur.

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport massique gravillons/sable proche de 1.
- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m³.
- La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par les normes de formulation des bétons, soit en général de 300 à 350 kg/m³. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m³.
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

La formulation se fait par tâtonnement sur la base de ces plages. Certains formulateurs ont certes développés leur propre outil. Ce sont le plus souvent des méthodes dérivées de la méthode Dreux-Gorisse, avec une courbe granulométrique de référence englobant les éléments fins. Ces approches sont intéressantes dans le sens où elles permettent de détecter les classes granulaires manquantes.

On ne peut toutefois pas les considérer comme des techniques à proprement parler de composition, car il n'existe pas de courbe de référence universelle. Ce sont donc plus des supports qui facilitent la formulation.

Après la conception sur le papier, la formule est vérifiée et optimisée par des essais de caractérisation. Le nombre d'essais à réaliser dépend de la justesse de la composition initiale. On comprend dès lors le caractère fastidieux que peut prendre la formulation d'un BAP [60].

2.5.3. Revue des méthodes de formulation des BAP

Dans l'industrie du béton, la formulation des BAP est aujourd'hui essentiellement empirique. Il existe pourtant dans la littérature des techniques scientifiques de formulation.

P. Turcry [60] a présenté une revue des grandes familles d'approches de formulation des BAP, dont le résumé est décrit ci-dessous ; d'abord une solution proposée par les chercheurs japonais à l'origine du concept du BAP et basée sur l'optimisation du mortier, ensuite une approche basée sur l'optimisation du volume de pâte, enfin une approche basée sur l'optimisation du squelette granulaire.

2.5.3.1. Méthode basée sur l'optimisation du mortier

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kochi se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcoût engendré sur le matériau est compensé, au Japon, par les économies sur la main d'oeuvre.

Les concepteurs des BAP, proposent de les formuler en composant en premier lieu le mortier du béton. Dans le mortier, la proportion de sable est posée arbitrairement. Il reste ensuite à trouver expérimentalement les dosages en eau et en superplastifiant, pour un liant donné (rapport massique addition sur ciment fixé), et suivant certains critères de rhéologie. La formule finale est obtenue en ajoutant au mortier un volume de gravillons limité. Les détails de formulation sont les suivants :

Dosage des gravillons : Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m³ de béton est limité à la moitié de sa compacité (*figure 2.14*).

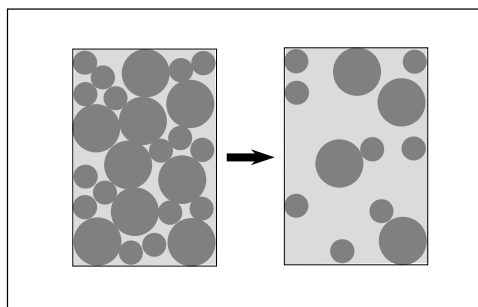


Figure 2.14 : Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité.

Dosage du sable : Le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.

Dosage du liant : La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins, la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit une masse minimale de ciment de 350 kg/m³). Les rapports massiques E/C et (addition/ciment) peuvent également être choisis sur des critères de résistances mécaniques.

Dosage de l'eau et du superplastifiant : Les dosages en eau et en superplastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. Ces essais mesurent les étalements avec un cône à mortier (*photo 2.6.a*) et l'écoulement des mortiers à l'entonnoir (*photo 2.6.b*). Les auteurs définissent alors l'étalement relatif Dr par l'équation suivante ;

$$Dr = \frac{d^2 - d_0^2}{d^2}$$

Où d est le diamètre de la galette et d_0 la base du cône. Ils définissent également l'écoulement relatif T par l'équation ;

$$T = \frac{10}{t_e}$$

Où t_e est le temps d'écoulement à l'entonnoir.

Les auteurs ont montré que la relation entre l'étalement et l'écoulement est linéaire lorsque le dosage en eau varie à quantité de superplastifiant constante. À l'aide de peu d'essais, il est alors possible de trouver un couple adjuvant/eau permettant de fluidifier de manière optimale le mortier. Selon ces auteurs, le couple ($Dr = 10$; $T = 1$) est optimal dans le sens où il donne un béton fluide avec un risque de ségrégation minimale.

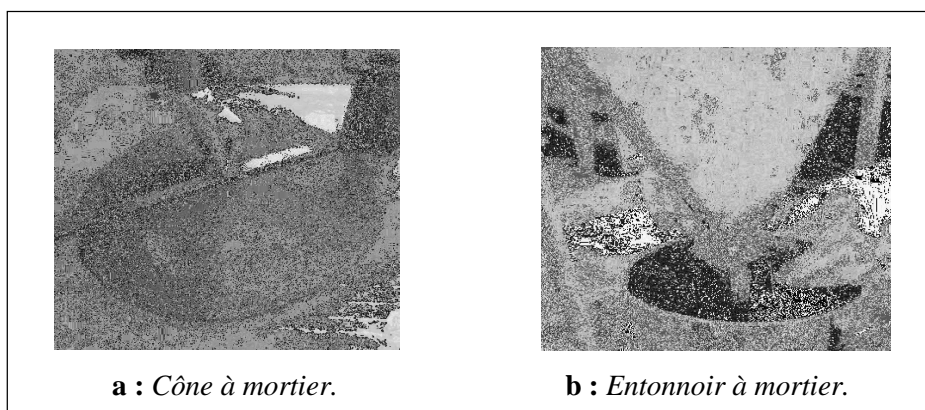


Photo 2.6 : Essais d'optimisation des dosages en eau et en superplastifiant sur mortiers [60].

2.5.3.2. Méthode basée sur l'optimisation du volume de pâte

Le béton est considéré ici comme un mélange biphasique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte. Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant. Les auteurs introduisent la notion d'excès de pâte schématisée sur la figure (2.15). La formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale. Cette quantité est supposée jouer deux rôles dans un BAP ; d'abord, elle fluidifie le matériau en limitant les contacts entre les granulats, ensuite, elle écarte suffisamment les gravillons pour éviter la formation d'amas contre les armatures, responsables de blocages de l'écoulement.

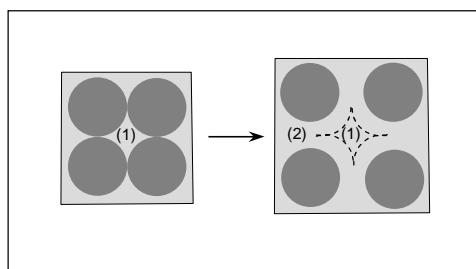


Figure 2.15 : Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2).

Les auteurs font l'hypothèse qu'il existe un volume de pâte minimal permettant de remplir chacune de ces deux fonctions. Ils proposent les deux critères suivants :

Critère de fluidité : Le volume de pâte minimal $V_{f\min}$ qu'il faut pour fluidifier 1 m³ de béton s'écrit :

$$V_{f\min} = 1 - \frac{1 - V_{vides}}{C_e}$$

Où V_{vides} est la porosité du mélange de sable et de gravillon.

Et C_e est un coefficient "d'écartement". Lorsqu'il vaut 1, $V_{f\min}$ est égal à V_{vides} : le volume de pâte remplit la porosité des granulats. Lorsque C_e est supérieur à 1, la pâte comble la porosité et écarte les granulats. Ce coefficient est calculé comme suit :

$$C_e = \left(\frac{e_{\min}}{D_{moyen}} + 1 \right)^3$$

$$D_{moyen} = \frac{\sum (m_i \times d_i)}{\sum m_i}$$

Où D_{moyen} est le diamètre moyen des granulats [mm] ; d_i est le diamètre du tamis i [mm] ; m_i est la masse de granulats sur le tamis i [kg] ; e_{\min} est la distance moyenne entre les granulats minimale pour fluidifier le béton [mm].

La détermination de e_{\min} se fait de manière expérimentale. Des bétons avec des volumes de pâte décroissants sont confectionnés ; les auteurs considèrent que le volume limite de fluidité est atteint lorsque l'étalement du béton est inférieur à 65 cm ou lorsqu'il y a ségrégation. Au final, ils obtiennent des courbes donnant la distance e_{\min} en fonction de D_{moyen} pour différents rapports E/L et diamètres maximaux du gravillon. On note que les auteurs n'ont choisi que trois paramètres pour décrire e_{\min} (E/L, D_{moyen} et D_{\max}) au détriment, par exemple, du dosage en superplastifiant. Ils expliquent ce choix par un souci de simplicité du modèle.

Critère de non-blocage : V_{bi} représente le volume limite de granulats de taille d_i , au-delà duquel le béton ne s'écoule plus dans un milieu confiné, comme la boîte en «L». Les auteurs proposent de modéliser V_{bi} linéairement en fonction du rapport de l'espacement "e" des armatures de la boîte en «L» et du diamètre d_i (figure 2.16). On remarque que le volume critique d'un sable quelconque ($e/d_i > 15$) est de 840 l/m^3 : le sable n'est pas prépondérant dans le critère du blocage, si le béton est fluide. Le reste de la courbe, c'est-à-dire l'ordonnée du point A, est à déterminer expérimentalement pour les gravillons utilisés dans le béton à formuler. Il y a donc un grand nombre d'essais à réaliser pour obtenir la courbe du volume critique.

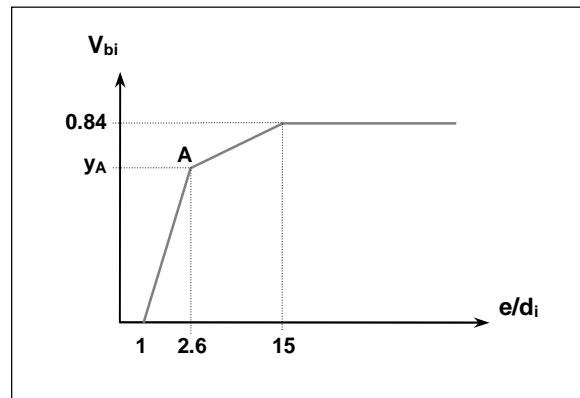


Figure 2.16 : Volume limite de blocage V_{bi} en fonction du rapport de l'espacement "e" des armatures de la boîte en «L» et le diamètre d_i du granulat.

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

$$R = \sum_i \frac{V_i}{V_{bi}}$$

En posant $R = 1$, il vient l'expression suivante, qui donne le volume de pâte $V_{p\min}$, pour 1 m^3 de béton, en deçà duquel il y a risque de blocage lors de l'écoulement du béton en milieu confiné.

$$V_{p\min} = 1 - \frac{\rho_g + (\rho_s - \rho_g) \times N_g}{\sum \frac{p_{gi} \times N_g \times \rho_s}{V_{bi}} + \sum \frac{p_{si} \times (1 - N_g) \times \rho_g}{V_{bi}}}$$

Où ρ_g et ρ_s sont les masses volumiques respectives du gravillon et du sable [kg/m^3]; N_g est le rapport entre la masse de gravillon et la masse totale de granulats; p_{gi} (respectivement p_{si}) est la proportion dans le gravillon (respectivement dans le sable) du diamètre d_i [%].

2.5.3.3. Méthode basée sur l'optimisation du squelette granulaire

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons. Il est connu par exemple que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte. La maniabilité est elle-aussi tributaire de l'arrangement du squelette granulaire.

Reprenons *la figure (2.15)*, en considérant maintenant que la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains (2) est importante, plus la suspension est fluide. À quantité d'eau constante, si on minimise la porosité (1) de l'empilement de grains, on maximise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange. Cet exemple simple nous montre donc le lien entre la rhéologie du béton et l'arrangement de son squelette granulaire.

Les chercheurs du LCPC ont essayé de modéliser le comportement du béton à l'état frais à partir du calcul de la compacité de l'empilement des grains solides (des fines aux gravillons). En effet, les auteurs ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Ce modèle, nommé Modèle d'Empilement Compressible, permet le calcul de la compacité virtuelle du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage. À l'aide de ces variables, décrites ci-après, sont modélisées la viscosité plastique et le seuil de cisaillement du béton.

Compacité virtuelle γ : Dans un empilement, si tous les grains étaient rangés de manière optimale, le système pourrait avoir une compacité maximale, la compacité virtuelle. Pour un mélange de n classes granulaires, la compacité virtuelle partielle γ_i des grains de diamètre d_i s'écrit :

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

Où y_j est la proportion volumique des grains de diamètres d_j dans l'empilement. β_i est la compacité virtuelle des grains d_i ; c'est une caractéristique propre à cette classe, qui est déduite de mesures de compacité sur une plus grande étendue granulaire (dans le cas du béton : un gravillon, un sable ou une fine). $a_{i,j}$ et $b_{i,j}$ sont des coefficients empiriques, qui servent à modéliser respectivement les effets de desserrement et les effets de parois d'une classe sur une autre.

Indice de serrage K' : Un empilement ne peut pas atteindre sa compacité virtuelle. Une grandeur représentative du degré de compaction a donc été créée. Cet indice de serrage K' est défini comme la somme des indices de serrage K'_i de chaque classe granulaire d_i et s'écrit selon l'équation suivante ;

$$K' = \sum_i K'_i = \sum_i \frac{y_i / \beta_i}{1/\phi - 1/\gamma_i}$$

Pour un indice de serrage K' infini, la compacité réelle ϕ du mélange de grains est égale à la compacité virtuelle.

Il reste qu'un BAP n'est pas qu'un béton fluide, mais aussi un béton stable, capable de remplir un coffrage ferrailé. La modélisation de la rhéologie n'est donc pas suffisante pour formuler complètement un BAP.

Intuitivement, il est concevable que les autres propriétés, stabilité et mobilité en milieu confiné, dépendent également des indices de serrage des grains. La ségrégation des gravillons doit notamment être contrôlée par le serrage des fines, décrit par l'indice K'_p ; le risque de blocage de l'écoulement doit augmenter quant-à-lui avec la concentration en gros gravillons, fonction de l'indice K'_G . Après vérification expérimentale de ces hypothèses, les auteurs proposent de modéliser la stabilité et la capacité de remplissage d'un BAP par des valeurs limites sur les indices K'_p et K'_G .

Ces modèles rhéologiques sont compilés dans un logiciel de formulation des bétons (Bétonlab- Pro2). À partir des caractéristiques des constituants, le logiciel simule la plupart des propriétés du béton formulé (par exemple, les résistances à diverses échéances, le module élastique et l'amplitude des déformations différées).

Le logiciel est également pourvu d'un module d'optimisation, qui calcule à partir d'un cahier des charges précis la formule de béton, optimale suivant un critère donné. Les auteurs proposent un cahier des charges spécifique pour les BAP, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton (*tableau 2.1*).

Tableau 2.1 : *Cahier des charges spécifique pour les BAP.*

Propriétés	Cahier des charges
Seuil de cisaillement τ_0 [Pa]	≤ 500
Viscosité plastique μ [Pa.s]	≤ 300
Indice de serrage des fines K'_p	≥ 3.3
Indice de serrage des gravillons K'_G	≤ 1.4

2.5.3. Exemple de formulation

P. Turcry [60] a fait une étude complète sur l'efficacité des approches de formulation précédentes. Dans cette étude, il a confectionné, suivant la procédure de chaque méthode, deux BAP différents par la classe granulométriques des granulats (0/10 mm et 0/14 mm), nommés respectivement BAP 0/10 et BAP 0/14.

Le tableau (2.2) montre les différents dosages de compositions obtenus avec chaque approche. On remarque que toutes les formules comportent un volume de pâte très important (supérieur à 350 l/m³).

Tableau 2.2 : les différentes compositions obtenues avec chaque approche [60].

Constituants	BAP 0/10 [kg/m ³]			BAP 0/14 [kg/m ³]		
	MBOM ¹	MBOVP ²	MBOSG ³	MBOM ¹	MBOVP ²	MBOSG ³
Gravillons 10/14	0	0	0	436	721	544
Gravillons 6/10	873	917	808	436	211	279
Sable 0/3	704	813	810	704	827	806
Ciment CEM2 42.5	400	350	350	400	350	350
Fillers calcaires	330	210	275	330	210	275
Eau efficace	170	170	170	170	170	180
Superplastifiant	7.4	5.7	6.1	7.4	5.7	5.8
Volume de pâte [l]	424	363	388	424	368	400
G/S	1.24	1.13	1	1.24	1.13	1.02
E/L	0.23	0.31	0.28	0.23	0.3	0.28

¹ Méthode basée sur l'optimisation du mortier.

² Méthode basée sur l'optimisation du volume de pâte.

³ Méthode basée sur l'optimisation du squelette granulaire.

Après la formulation des BAP, P. Turcry a caractérisé ces formulations à l'aide des essais préconisés par l'AFGC. Le tableau (2.3) donne les résultats des essais de caractérisation. Tous les bétons testés présentent un étalement supérieur à 65 cm, soit une grande fluidité. Selon l'auteur, aucune couronne de laitance ou de mortier n'a été remarquée en périphérie du béton après étalement. Cette absence de ségrégation est confirmée par les résultats de l'essai au tamis (même si la formule Japonaise 0/14" atteint la limite préconisée). Les deux bétons composés avec la deuxième méthode sont bloqués dans la boîte en «L».

Tableau 2.3 : Résultats des essais de caractérisation [60].

Caractérisation	BAP 0/10			BAP 0/14			Cibles
	MBOM	MBOVP	MBOSG	MBOM	MBOVP	MBOSG	
Étalement D [cm]	75	68.5	72	71	68	70	≥ 60
Taux de remplissage H ₂ /H ₁	0.82	0.30	0.80	0.85	0.40	0.80	> 0.80
Indice de ségrégation π [%]	13.8	12	2	15	2.6	3.9	≤ 15

2.6. BILAN

Afin d'apprécier les propriétés rhéologiques des BAP, l'AFGC [14] a émis des recommandations qui se limitent en trois essais (mesure d'étalement, essai de la boîte en «L» et l'essai de stabilité au tamis). Cependant, la voie aujourd'hui la plus prometteuse semble être de caractériser ces bétons par leur viscosité plastique et leur seuil de cisaillement.

Grâce à leur formulation, les BAP possèdent généralement de bonnes résistances mécaniques et de durabilité, et dépendent bien sûr de la teneur en eau et de la nature du liant [53]. En revanche, il faut prévoir un module élastique plus fiable que pour des BO de même résistance à la compression. À l'opposé, les déformations différées, retrait et fluage sont susceptibles d'être augmentées.

L'optimisation de la formulation des BAP nécessite un réglage minutieux de plusieurs paramètres. En effet, Il existe cinq paramètres clés de mélange pouvant avoir une influence significative sur leurs performances, qui sont ; la forme, granulométrie et volume de gravillons, rapport volumique S/P, rapport massique E/L, nature et dosage d'additions minérales et la concentration en superplastifiant et en agent colloïdal.

Il reste que, pour l'heure, il n'existe pas pour les BAP de méthode de formulation généralisée permettant de choisir précisément les proportions des constituant en fonction des propriétés souhaitées [60]. Les méthodes actuelles sont toutes relativement complexes, relativement peu précises et essentiellement basées sur les résultats empiriques.

Orientation de l'étude :

Du fait que les données disponibles dans la littérature sur l'influence des constituants des BAP sur leurs performances restent encore divergentes, ainsi que l'absence d'une méthodologie pratique de leur formulation, c'est pourquoi l'optimisation des formulations de BAP reste jusqu'à présent plus un art qu'une science. Or, les chercheurs ont, par tâtonnement, optimisé les BAP par leur expérience acquise.

Nous avons par conséquent orienté notre recherche expérimentale dans le but de développer et d'optimiser des formulations de BAP se caractérisant par d'excellentes performances rhéologiques et mécaniques.

Deuxième partie

**BÉTONS AUTOPLAÇANTS :
ÉTUDE EXPÉRIMENTALE**

Chapitre 3

MATÉRIAUX, MÉLANGES ET ESSAIS UTILISÉS

3.1. INTRODUCTION

L'emploi judicieux des matériaux utilisés dans la construction exige la connaissance de leurs diverses propriétés ; physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques, permettant de faire un choix répondant à leur destination [15]. Par ailleurs, il est essentiel que ces matériaux soient malaxés correctement afin de produire un mélange homogène à grande échelle et possédant par conséquent des propriétés uniformes. Ainsi, pour évaluer ces propriétés, on doit choisir des moyens adéquats afin de parvenir à un meilleur contrôle.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la présentation des caractéristiques de matériaux utilisés durant ce projet de recherche, les procédures des malaxages pour confectionner nos mélanges ; bétons et mortiers, ainsi que les différents essais expérimentaux pour les caractériser à l'état frais et durci. Ajoutons que notre travail expérimental a été effectué suivant les normes Européennes en vigueur, sauf les essais utilisés pour caractériser nos mélanges frais ainsi que la mesure du module élastique, qui ne sont pas encore normalisés.

3.2. MATÉRIAUX UTILISÉS

Dans le cadre de cette étude, nous avons confectionné les différents bétons et mortiers en se basant sur les matériaux locaux suivants :

3.2.1. Sable

Le sable employé dans notre étude est prélevé d'Oued Djedi situé à 35 Km de la ville de Biskra, il s'agit d'un sable siliceux de classe granulaire (0/5 mm) et utilisé couramment dans la confection du béton dans cette région. La courbe granulométrique de ce sable, représentée dans *la figure (3.1)*, est comprise dans le fuseau de contrôle pour le sable à béton selon la norme (EN 12620) ; d'ailleurs ce fuseau est en générale jugé peu propice à la fabrication des bétons. Les caractéristiques physiques du sable utilisé sont représentées dans *le tableau (3.1)*.

Afin d'éviter toute contamination avec les agents extérieurs, le sable a été entreposé dans des sacs bien fermés.

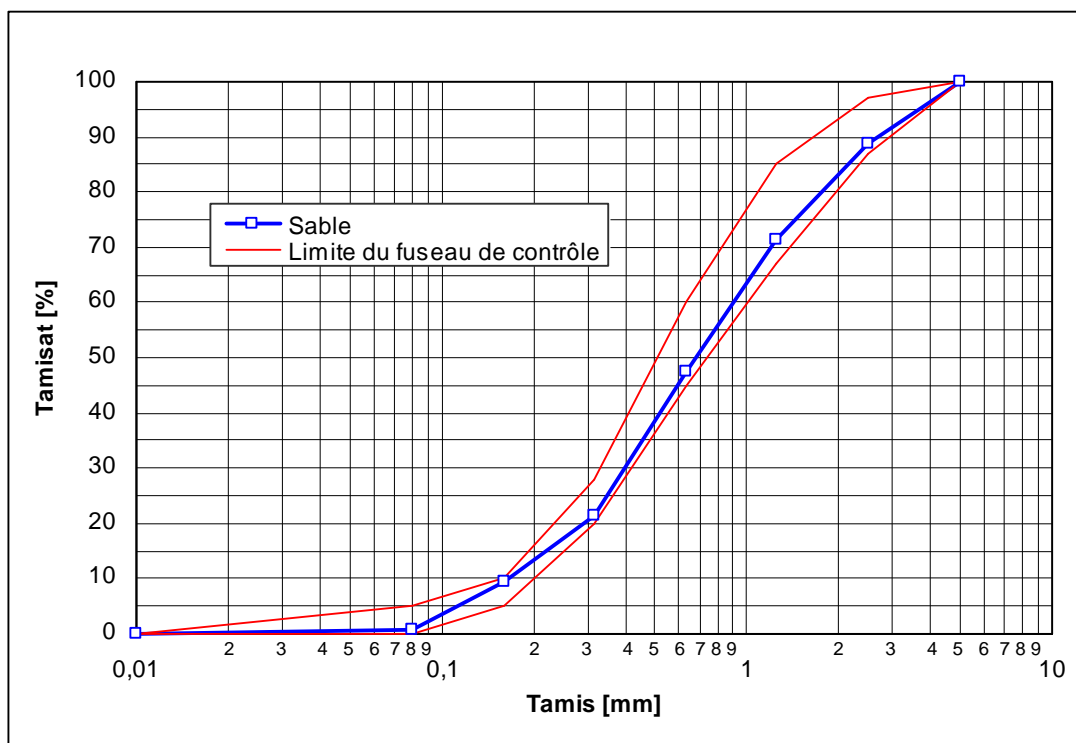


Figure 3.1 : La courbe granulométrique du sable.

Tableau 3.1 : *Les caractéristiques physiques du sable.*

Caractéristiques physiques	Valeurs
Densité apparente	1.68
Densité absolue	2.54
Module de finesse	2.06
Equivalant de sable [%]	77

3.2.2. Gravillons

Nous avons utilisé durant cette étude deux types de gravillons :

- Les premiers sont des gravillons concassés, de nature calcaire et sont disponibles dans le marché Algérien sous forme granulaire de (7/15 mm) et (15/25 mm), ils proviennent du gisement de Aïn-Touta à 80 Km au nord de Biskra.
- Les seconds sont des gravillons roulés, siliceux et prélevés de Oued Jedaï, ils ont été sélectionnés selon leurs diamètres adéquats (5/20 mm).

Afin d'obtenir une bonne adhérence entre la pâte du liant et les gravillons, nous avons procédé à leur lavage et qui, une fois séchés, ont été conservés dans des sacs bien fermés. Les caractéristiques physiques et l'analyse granulométrique de ces gravillons sont représentées dans *le tableau (3.2)* et *la figure (3.2)* respectivement.

Il est à noter que la confection de notre BAP est basée sur l'utilisation des premiers gravillons et que les seconds, roulés sont étudiés à titre comparatif.

Tableau 3.2 : *Les caractéristiques physiques des gravillons.*

Caractéristiques physiques	G. concassés (7/15)	G. concassés (15/25)	G. roulés (5/20)
Densité apparente	1.39	1.41	1.46
Densité absolue	2.62	2.62	2.59
Coefficient Los Angeles [%]	23	23	25.5
Observation	durs	durs	assez durs

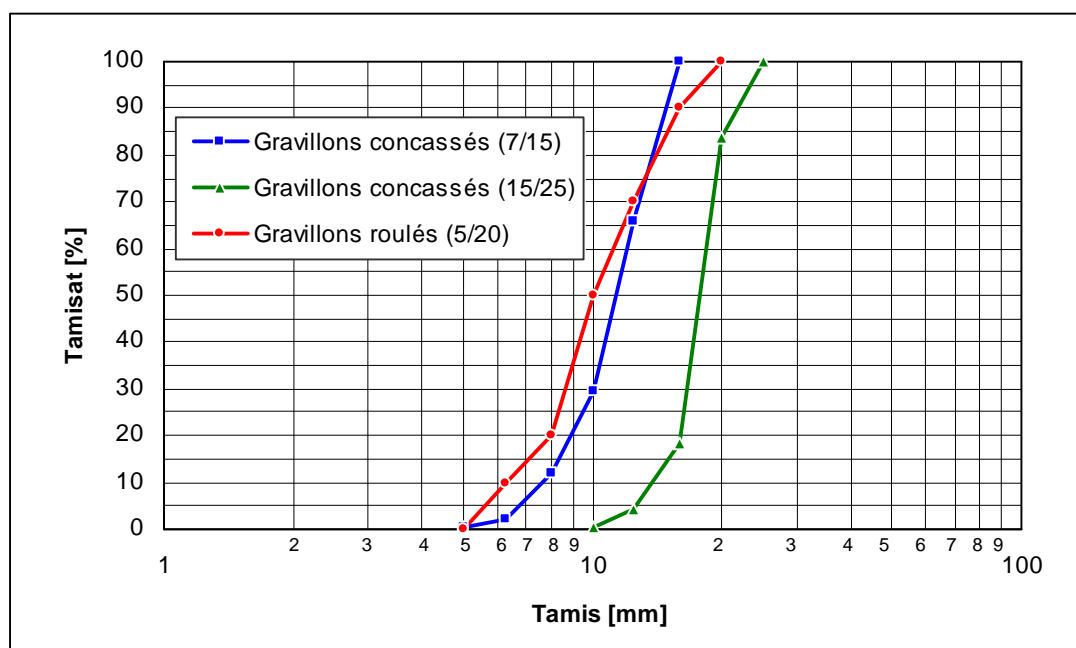


Figure 3.2 : Les courbes granulométriques des gravillons.

3.2.3. Ciment

Tous les mélanges ont été fabriqués avec un seul type de ciment (CPJ-CEM II/42.5 A) provenant d'une unique livraison de la cimenterie (SCIMAT) à Aïn-Touta. Ainsi, la qualité de ce ciment constitue une constante au niveau des paramètres d'étude.

Ses analyses chimiques et physiques communiquées par le producteur sont données dans le tableau (3.3).

Tableau 3.3 : Les analyses chimiques et physiques du ciment.

Composition chimique [%]		Caractéristiques physiques	
CaO	61.69	Densité absolue	3.15
SiO ₂	20.34	Densité apparente	1.09
Al ₂ O ₃	5.37	Surface spécifique Blaine [cm ² /g]	3371
P.A.F	5.03	Consistance normale [% H ₂ O]	25.6
Fe ₂ O ₃	3.00	Début de prise [min]	123
SO ₃	2.20	Fin de prise [min]	180
MgO	1.80	Expansion à Chaud [mm]	1.80
Insol.	1.12	Refus au tamis 45 µm [%]	17.40

3.2.4. Eau de gâchage

L'eau utilisée est celle du robinet de l'Université de Biskra, dont la température est comprise entre 18 et 20° C. Nous supposons qu'elle répond à toutes les prescriptions de la norme (EN 1008) en matière de béton.

3.2.5. Additions minérales

Nous avons utilisé quatre types d'additions minérales, présentées ci-dessous, provenant de plusieurs régions en Algérie. Notons que leurs informations techniques relatives à ce type d'utilisation ainsi que l'expérience pratique demeurent assez limitées. La photo (3.1) représente l'état de ces additions minérales.

3.2.5.1. Fillers calcaires

Il s'agit de roches calcaires broyées, disponibles dans la majorité des carrières de Biskra. Ils possèdent les caractéristiques physiques suivantes ; (densité absolue = 2.50, densité apparente = 1.09 et surface spécifique = 3070 cm²/g).

3.2.5.2. Pouzzolanes naturelles

Elles sont naturelles d'origines volcaniques, extraites du gisement de Beni-Saf situé dans l'Ouest Algérien. Elles possèdent les caractéristiques physiques suivantes ; (densité absolue = 2.73, densité apparente = 1.15 et surface spécifique = 3000 cm²/g). Leur composition chimique est donnée dans le tableau (3.4).

Tableau 3.4 : La composition chimique des pouzzolanes naturelles.

Élément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	P.A.F	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	SO ₃
Proportion [%]	45.9	17.1	10.6	10.2	4.2	4.0	3.4	1.8	1.5

3.2.5.3. Laitier de haut fourneau

Ce produit, granulé et broyé, provient de la fabrication de la fonte dans le complexe sidérurgique d'El-Hadjar situé dans l'Est Algérien.

Les caractéristiques physiques de celui-ci sont ; (densité absolue = 2.73, densité apparente = 1.08 et surface spécifique = 3000 cm²/g). La composition chimique de ce laitier est représentée dans *le tableau (3.5)*.

Tableau 3.5 : *La composition chimique du laitier.*

Élément	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	S	Fe ₂ O ₃
Proportion [%]	40.8	43.0	6.4	5.2	3.0	0.8	0.5

3.2.5.4. Fumée de silice

Elle est à base de microsilice provenant de la société «GRANITEX» sous forme de poudre grise. Cette Fumée de silice est désignée par le nom «MEDAPLAST HP». Ses caractéristiques physiques sont ; (densité absolue = 1.87, densité apparente = 0.5 et surface spécifique = 204700 cm²/g).

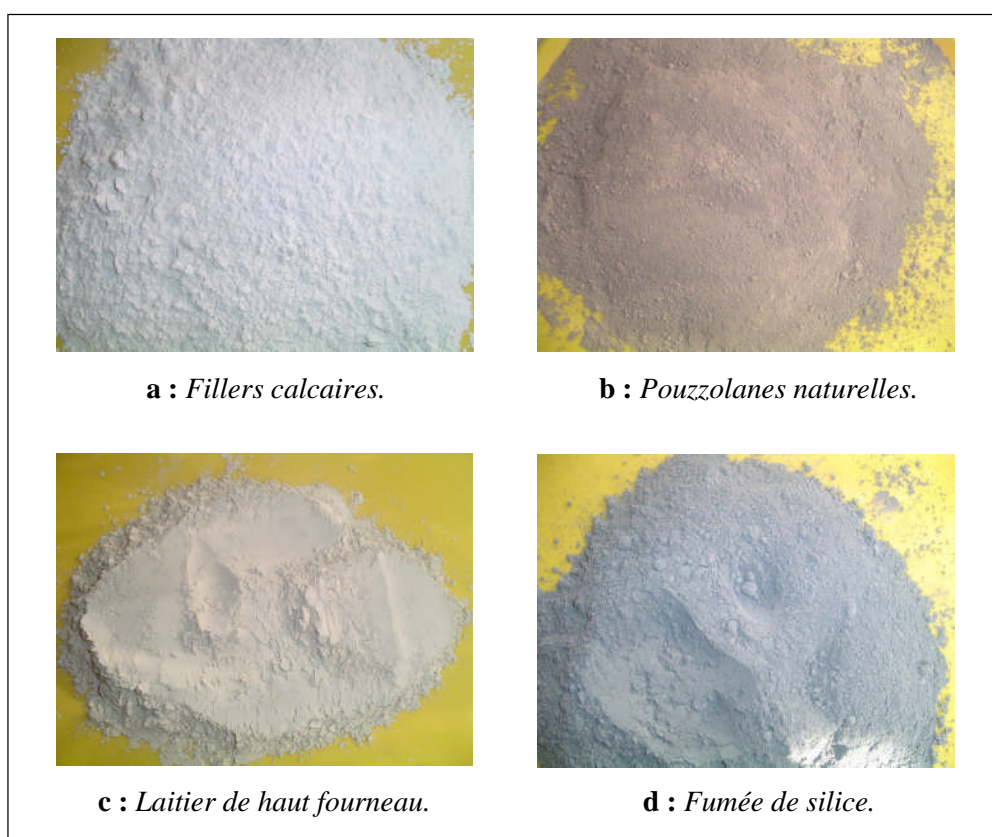


Photo 3.1 : *Les additions minérales utilisées dans notre étude.*

3.2.6. Adjuvants chimiques

Nous avons utilisé deux catégories d'adjuvants, présentées ci-dessous, produisant par la même société «GRANITEX». Ajoutons que, pour des raisons de confidentialité, le producteur ne fournit pas la composition chimique de ces adjuvants. La photo (3.2) représente l'état de ces adjuvants chimiques.

3.2.6.1. Superplastifiant

Il se présente sous forme de liquide jaunâtre et est conçu à base de polycarboxylates. Ce haut réducteur d'eau est appelé «MEDAFLOW 30». Sa densité absolue est de 1.07 et sa concentration en particule solide est de 30 %. Le contenant de superplastifiant a été agité avant chaque utilisation afin de bien homogénéiser la solution.

3.2.6.2. Agent colloïdal

Il se présente sous forme de poudre blanche soluble dans l'eau et est destiné normalement à la confection de bétons et mortiers coulés sous l'eau. Cet Agent colloïdal est désigné par le nom «MEDACOL BSE» et possède une densité absolue de 0.5. Notons que ce type d'agent colloïdal est compatible avec le superplastifiant utilisé.



Photo 3.2 : Les adjuvants chimiques utilisés dans notre étude.

3.3. CONFECTION DES MÉLANGES

Durant notre étude de recherche, nous nous basons sur la confection des mélanges de béton dont le nombre de gâchées réalisées s'élève à 144. Chaque gâchée est divisée en plusieurs éprouvettes destinées aux différents essais de caractérisation. Neuf mélanges de mortier ont été également confectionnés afin de mieux comprendre le comportement de nos BAP.

Dans les sections suivantes, nous présentons les procédures de confection de chaque mélange, béton et mortier.

3.3.1. Confection des bétons

Le malaxage des bétons au laboratoire a été effectué dans un malaxeur à cuve verticale tournante d'une capacité de 100 l. Le but recherché est de répartir, le plus régulièrement possible, chaque constituant afin d'assurer un mélange homogène et d'obtenir ainsi les mêmes propriétés.

La séquence d'introduction des différents matériaux est faite selon la norme (EN 12390-2) sauf dans le cas de l'ajout de l'agent colloïdal. Cette séquence se présente comme suit :

1. On verse d'abord le sable dans le malaxeur pour l'homogénéiser pendant environ 30 s.
2. On ajoute le liant (ciment seulement ou ciment et addition minérale) et on malaxe pendant 1 min.
3. On additionne les gravillons et on malaxe à sec durant 1 min.
4. On introduit ensuite les trois quarts de la quantité d'eau et l'agent colloïdal, s'il est utilisé, et on malaxe pendant 2 min.
5. On ajoute, au fur et à mesure, le reste de l'eau et le superplastifiant et on malaxe durant 2 min environ jusqu'à l'homogénéisation de l'ensemble.
6. On arrête enfin le malaxeur et on commence les essais à l'état frais immédiatement.

3.3.2. Confection des mortiers

Le malaxage des mortiers a été effectué à l'aide d'un malaxeur à axe vertical d'une capacité de 5 l. la pale de malaxeur pouvant tourner à deux vitesses (lente et rapide).

La séquence du malaxage est conforme à la norme (EN 196-1) sauf dans le cas de l'ajout de l'agent colloïdal. Cette introduction se fait comme suit :

1. On introduit l'eau et le superplastifiant en premier dans le malaxeur et on verse ensuite le ciment et l'agent colloïdal, s'il est utilisé.
2. Aussitôt après, on met le malaxeur en marche à vitesse lente.
3. Après 30 s de malaxage, on introduit régulièrement le sable normalisé pendant les 30 s suivantes.
4. On met alors le malaxeur à sa vitesse rapide et on continue le malaxage pendant 30s supplémentaires.
5. On arrête le malaxeur pendant 1 min et 30 s. Durant les 15 premières secondes, on enlève au moyen d'une raclette de caoutchouc le mélange adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.
6. On reprend ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s.
7. On arrête enfin le malaxeur et on commence les essais à l'état frais immédiatement.

3.4. ESSAIS RÉALISÉS

Deux familles d'essais sont réalisées pour caractériser nos mélanges au laboratoire ; les essais à l'état frais pour évaluer la maniabilité et les essais à l'état durci pour déterminer les performances mécaniques.

3.4.1. Essais réalisés à l'état frais

Comme rapporté à *la section (2.2)*, il existe dans la littérature plusieurs tests caractérisant les propriétés rhéologiques des BAP. Cependant, dans notre étude, nous nous basons sur les essais recommandés par l'AFGC [14] seulement, car ils sont suffisants pour estimer la rhéologie de nos mélanges.

Ces essais : mesure d'étalement, essai de la boîte en «L» et l'essai de stabilité au tamis, sont décrits en détail dans *les sections (2.2.1), (2.2.2.1) et (2.2.3.1) respectivement.*

Il est à noter que les instruments nécessaires à ces essais ont été réalisés et montés en atelier par nos propres moyens (*photo 3.3*).

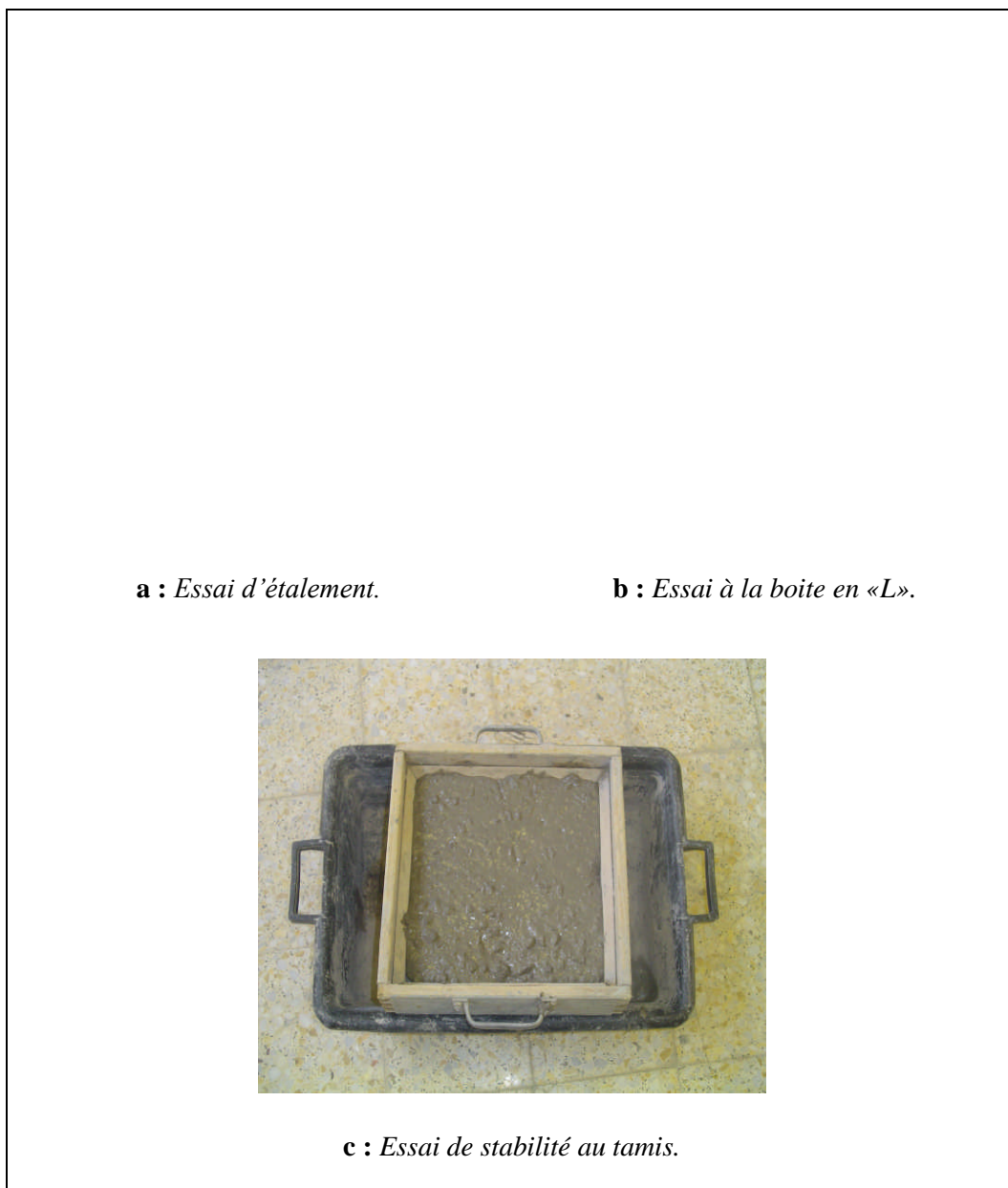


Photo 3.3 : *Dispositifs mesurant les propriétés rhéologiques des bétons.*

Le programme de tous les essais réalisés à l'état frais est résumé dans *le tableau (3.6).*

Tableau 3.6 : Programme des essais réalisés à l'état frais.

Type d'essais	Paramètre étudié	Valeur mesurée	cibles	Unité
étalement	fluidité	Etalement : D	≥ 60	[cm]
boite en «L»	déformabilité	taux de remplissage : H_2/H_1	≥ 0.8	--
stabilité au tamis	stabilité	indice de ségrégation : π	≤ 15	[%]

3.4.2. Essais réalisés à l'état durci

Quatre types d'essais ont été effectués à l'état durci afin de déterminer les performances mécaniques de nos mélanges. Il s'agit de trois essais sur béton, qui dictent la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module élastique. Ainsi que un seul essai sur mortier pour évaluer le retrait. Les procédures de ces essais sont détaillées ci-dessous et leurs dispositifs sont représentés dans *les photos (3.4)*.

a . Essais de compression : Il est réalisé, conformément à la norme (EN 12390-3), sur des éprouvettes cylindriques de (16 x 32 cm) mûries à l'eau. Les résultats de la résistance à la compression f_{cj} obtenus à 7, 28 et 90 jours représentent la moyenne de trois échantillons. La machine utilisée pour l'écrasement uniaxial des cylindres est une presse hydraulique dont la capacité maximale est de 1500 kN en compression.

b . Essais de traction par flexion : Il est réalisé, selon la norme (EN 12390-5), sur des éprouvettes prismatiques de (10 x 10 x 40 cm³) mûries à l'eau. La résistance à la traction f_{t28} obtenue à 28 jours provient de la moyenne des résultats sur trois échantillons. L'appareil utilisé est une presse hydraulique de flexion dont la capacité maximale est de 150 kN en cisaillement.

c . Mesure du module élastique (Extensomètre) : Le module élastique est déterminé, à 28 jours, lors d'essais de compression sur des éprouvettes cylindriques de (16 x 32 cm) mûries à l'eau. Ces éprouvettes sont équipées d'extensomètre axial d'un seul capteur permettant de mesurer les déformations longitudinales de l'échantillon sous des chargements croissants jusqu'à une contrainte maximale égale

à 60 % de f_{c28} . Il est alors possible de tracer la courbe contrainte-déformation. Sur la pente de cette courbe, nous pouvons déduire le module élastique, noté E_{28} . Ses résultats sont obtenus par la moyenne de deux essais.

d. Mesure du retrait (déformètre) : Afin de faciliter le travail expérimental, nous avons choisi de travailler sur mortier, plutôt que béton. La mesure de retrait s'effectue donc sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (7 x 7 x 28 cm³), selon les normes (EN 1367-4 et EN 12617-4). Ces éprouvettes sont équipées de plots métalliques à chaque extrémité et placées verticalement dans le déformètre, qui permet le suivi de la variation de la longueur de l'échantillon. Les mesures se font chaque deux jours après le démoulage et durent 3 mois.

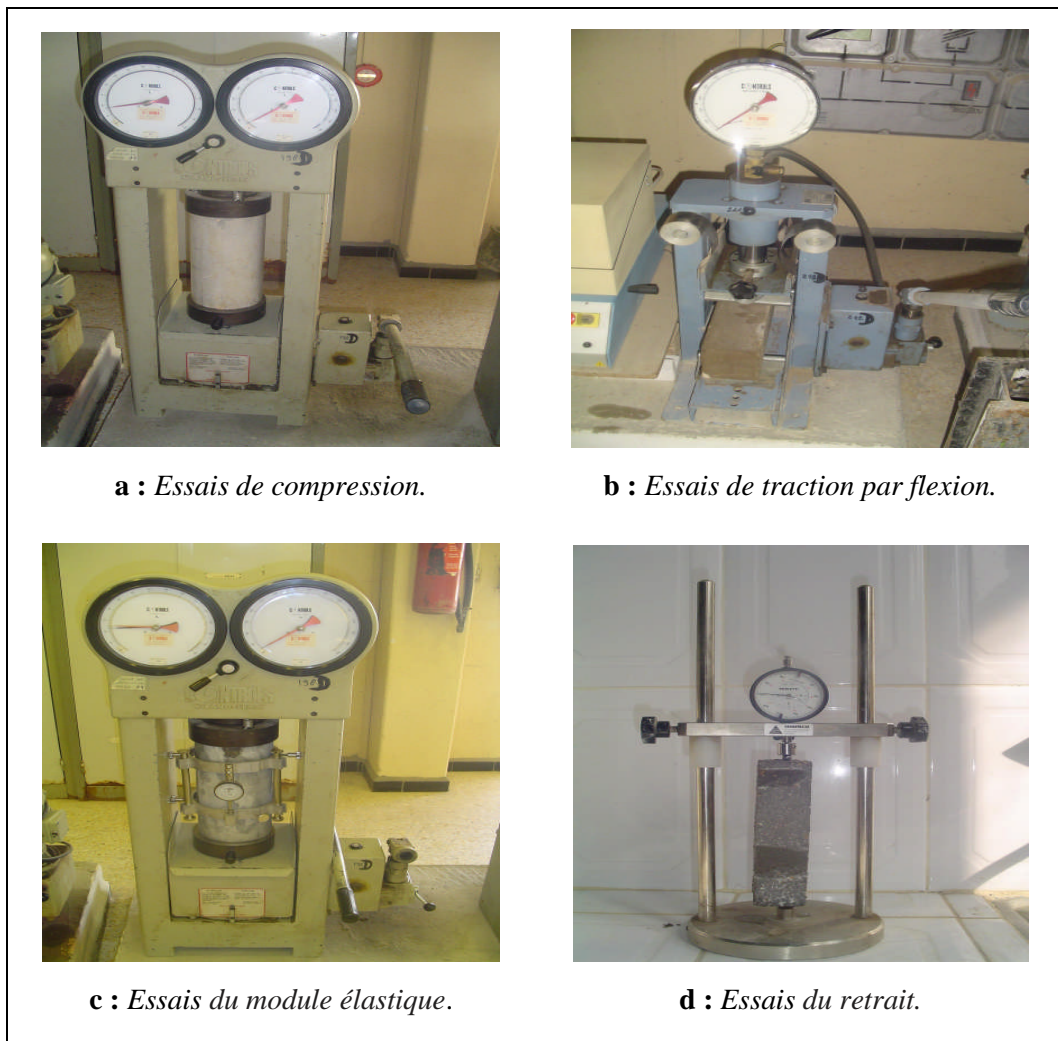


Photo 3.4 : Dispositifs mesurant les propriétés mécaniques des bétons.

3.5. BILAN

Bien que les caractéristiques relatives aux matériaux utilisés ne soient pas tous disponibles, celles en notre disposition sont suffisantes pour réaliser notre étude expérimentale. De plus, il semble que la qualité de ces matériaux se classe parmi les meilleures dans le marché Algérien.

Les méthodes effectuées pour confectionner nos mélanges permettent de donner des bétons et mortiers, dont la surface de tous les granulats est enrobée de pâte du liant et qui sont alors homogènes. D'autre part, les essais réalisés au cours de notre recherche permettent d'évaluer l'essentiel des propriétés des mélanges confectionnés.

Chapitre 4

OPTIMISATION DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS

4.1. INTRODUCTION

Le BAP est un mélange de granulats, de ciment, d'addition minérale, d'eau, de superplastifiant et éventuellement d'un agent colloïdal. On peut obtenir une infinité de bétons, en faisant varier les proportions de ces constituants, et il est certain que, parmi ces bétons, tant par leur nature propre qu'en raison du travail à exécuter, certains seront mauvais, d'autres seront acceptables, d'autres enfin, les moins nombreux, seront bons.

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats, du dosage en liant, d'eau, ainsi que d'adjuvants afin de réaliser un béton dont les qualités sont celles recherchées pour la construction de l'ouvrage, ou de la partie d'ouvrage en cause [16].

Ce chapitre présente la problématique soulevée dans les chapitres précédents concernant le développement des formulations des BAP. Aussi, il énonce l'objectif visé au cours de ce projet de recherche ainsi que les paramètres étudiés pour l'atteindre. Finalement, les résultats expérimentaux obtenus sont présentés et discutés en détail pour faire ressortir les meilleures formulations de BAP.

4.2. PROBLÉMATIQUE

Le problème de la formulation des bétons s'est renouvelé en profondeur au cours des dernières décennies, principalement du fait de l'utilisation croissante et souvent conjointe du superplastifiant et de l'agent colloïdal d'une part et des additions minérales d'autre part.

De nos jours, il n'existe pas encore de méthode de formulation généralisée permettant de choisir précisément les proportions des constituants en fonction des propriétés souhaitées du BAP. Les méthodes actuelles sont toutes relativement complexes, relativement peu précises et essentiellement basées sur les résultats empiriques. Elles permettent généralement d'obtenir un BAP possédant les propriétés mécaniques désirées mais elles ne permettent pas toujours d'atteindre la maniabilité souhaitée. C'est pourquoi les chercheurs ont, par tâtonnement, optimisé les BAP par leur expérience acquise.

En effet, l'optimisation de la formulation d'un BAP est encore plus un art qu'une science. On sait que si l'on veut augmenter la résistance mécanique des BAP, il faut absolument diminuer le rapport E/L, sans nuire à la maniabilité. Cette diminution du rapport E/L peut être obtenue de plusieurs façons ; en augmentant la quantité de liant, en diminuant la quantité d'eau de gâchage, en augmentant le dosage en superplastifiant, en faisant les deux à la fois ou encore, en utilisant des additions minérales qui exigent moins d'eau que le ciment portland.

Cependant, plus on diminue la quantité d'eau de gâchage, plus on doit augmenter le dosage en superplastifiant afin de maintenir une maniabilité donnée. Jusqu'où peut-on aller dans ce sens d'un point de vue pratique et économique, étant donné la part non négligeable que peut représenter le coût du superplastifiant dans le coût total du BAP ? Ou encore, vaut-il mieux augmenter le dosage en ciment et utiliser plus d'eau de gâchage ou augmenter le dosage en superplastifiant et réduire la quantité de ciment ?

D'autre part, les propriétés rhéologiques et mécaniques des BAP sont très étroitement liées à cinq paramètres clés de mélange, qui sont ; (forme, granulométrie et volume de gravillons), (rapport S/P et rapport E/L), (nature et dosage d'additions minérales) et (concentration en superplastifiant et en agent colloïdal). Donc, l'optimisation de la formulation des BAP nécessite un réglage minutieux de ces paramètres.

4.3. OBJECTIF DE LA RECHERCHE

Le présent mémoire a pour objectif principal le développement d'une série de BAP destinée aux ouvrages complexes et fortement armés, suivant une optimisation poussée de leurs paramètres clés de composition. Les formulations développées doivent se caractériser par une grande fluidité et déformabilité tout en assurant une meilleure stabilité. Elles doivent aussi posséder de meilleures résistances à la compression et à la traction avec un module élastique et un retrait qui ne sont pas trop éloignés à ceux du BO.

Cette étude permet également de déterminer l'influence des principaux paramètres de composition sur les propriétés des BAP à l'état frais et durci.

4.4. PARAMETRES DE L'ÉTUDE

Afin de développer des formulations de BAP, nous avons, en premier lieu, étudié l'effet des principaux paramètres clés de composition sur les propriétés rhéologiques des BAP (étalement, taux de remplissage et indice de ségrégation) et sur leur résistance à la compression à 28 j. Les paramètres étudiés liés à l'optimisation des BAP sont :

- La forme, la granulométrie et le volume de gravillons.
- Le rapport volumique S/P et le rapport massique E/L.
- La nature et le dosage d'additions minérales, telles que les fillers calcaires, les pouzzolanes naturelles, le laitier de haut fourneau et la fumée de silice.
- La concentration en superplastifiant et en agent colloïdal.

Après avoir optimisé les paramètres cités précédemment, nous avons sélectionné un certain nombre de formulation, qui présentent les meilleures performances, afin d'évaluer leurs propriétés mécaniques suivantes :

- La résistance à la compression à court et à long terme (7 et 90 j).
- La résistance à la traction à 28 j.
- Le module élastique à 28 j.
- le retrait total pendant 90 j.

Nous avons également comparé ces propriétés mécaniques avec celles de BO ayant une résistance très proche.

4.5. PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

Cette section décrit les principaux résultats obtenus lors de programme d'étude ainsi que leurs discussions. Les résultats sont présentés sous forme de courbes et histogramme. Pour chaque paramètre, une brève description des mélanges est également présentée.

4.5.1. Développement des formulations des BAP

4.5.1.1. Optimisation de la forme des gravillons

Cette phase consiste seulement à étudier l'influence de la forme des gravillons sur les propriétés rhéologiques et mécaniques. Les gravillons concassés sont a priori optimisés dans notre étude puisqu'ils sont les seuls disponibles au marché. Nous avons commencé l'étude de fabriquer des bétons ne contenant ni d'addition minérale ni d'agent colloïdal.

Deux séries de béton ont été formulées, la première avec gravillons roulés (B-GR) et l'autre avec gravillons concassés (B-GC). Dans tous les mélanges, le volume des gravillons et les rapports S/P et E/C ont été maintenus constants. Pour chaque série, nous faisons varier le SP % de 0.57, 1.14, 1.71 et 2.28. Ces dosages sont choisis de façon à couvrir une grande plage de fluidité. Il est à noter que la série (B-GC) comprend une combinaison massique des gravillons de (80 % de 7/15 et 20 % de 15/20) pour assurer une distribution granulométrique similaire à celle des gravillons roulés. *Le tableau (4.1) décrit les compositions de mélanges confectionnés dans cette phase.*

Tableau 4.1 : Compositions des bétons destinés à l'optimisation de la forme des gravillons.

Constituants	B-GR				B-GC				
	1	2	3	4	1	2	3	4	
SP [kg/m ³]	2.5	5	7.5	10	2.5	5	7.5	10	
Gravillons roulés [kg/m ³]	829				0				
Gravillons concassés [kg/m ³]	0				838				
Sable [kg/m ³]	794								
Ciment [kg/m ³]	438								
E [kg/m ³]	219								
S/P = 0.85				E/C = 0.5					

Résultats et discussions

L'effet de la forme des gravillons sur la maniabilité, exprimée par l'étalement, le taux de remplissage et l'indice de ségrégation, est représenté sur *les figures (4.1, 4.2 et 4.3)*. On peut observer globalement que l'effet de la forme roulée des gravillons sur la maniabilité, et notamment pour des faibles dosages en SP, est bénéfique.

En effet, *la figure (4.1)* montre clairement que les bétons constituant des gravillons roulés étalent beaucoup plus que ceux comportant des gravillons concassés. À titre d'exemple, les gravillons roulés améliorent la fluidité de l'ordre de 17.24 et 12.24 %, pour des dosages en SP de 2.5 et 5 kg respectivement, par rapport aux gravillons concassés. Cette amélioration est limitée pour des mélanges contenant des dosages élevés en SP. Ceci peut être expliquée par l'effet prédominant du SP sur la fluidité.

Les gravillons roulés ayant une compacité plus élevée que celle des gravillons concassés de telle manière que la consommation d'eau nécessaire pour remplir le volume des vides soit réduite. Par conséquent, pour une même quantité d'eau donnée, la fluidité des bétons contenant des gravillons roulés est plus élevée.

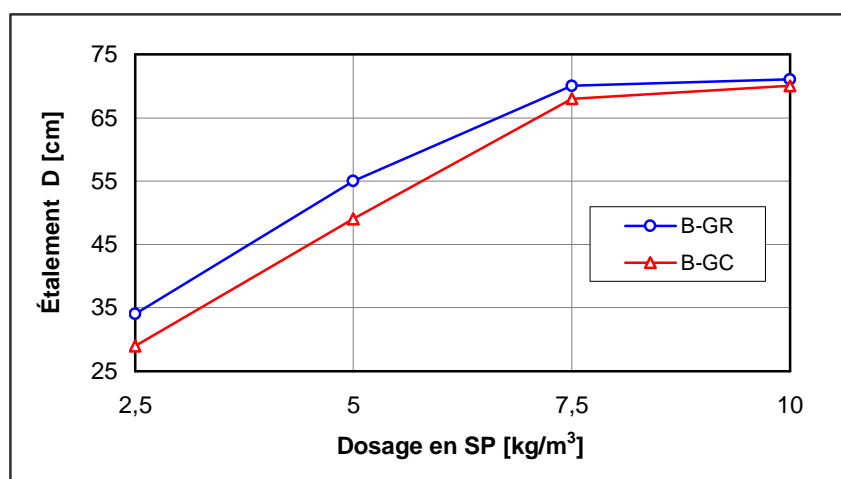


Figure 4.1 : Effet de la forme des gravillons sur la fluidité pour différents SP %.

De plus, *la figure (4.2)* montre également que, pour des dosages faibles en SP, la déformabilité des bétons des gravillons roulés est plus élevée que celle des bétons de gravillons concassés. Par exemple, les gravillons roulés augmentent la déformabilité de 73.33 et 21.87 %, pour des dosages en SP de 2.5 et 5 kg respectivement, par rapport aux

gravillons concassés. Au-delà de ces faibles dosages, la forme des gravillons n'influence plus la déformabilité. En effet, les gravillons roulés ont une texture lisse qui peut limiter la friction entre eux et favorise un meilleur glissement contrairement aux gravillons concassés qui possèdent une texture rugueuse provoquant des blocages entre les armatures.

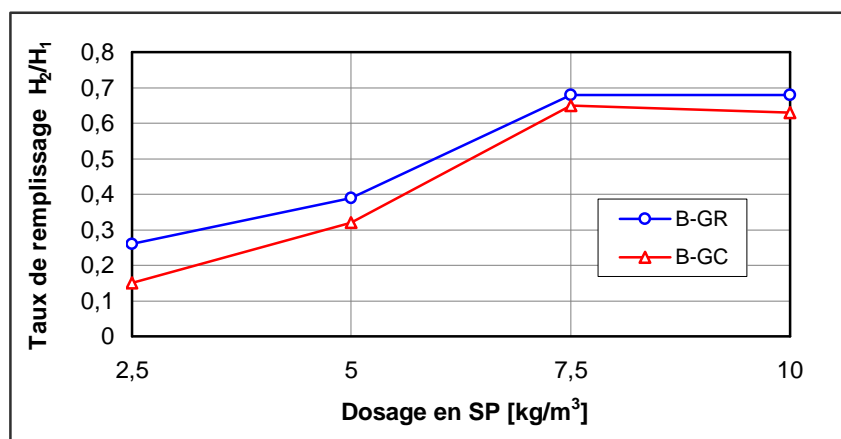


Figure 4.2 : Effet de la forme des gravillons sur la déformabilité pour différents SP %.

Concernant le dernier paramètre rhéologique, la stabilité, la figure (4.3) démontre que les courbes de l'indice de ségrégation en fonction de la forme des gravillons, roulée et concassée, présentent la même allure quelque soit le dosage en SP. Il est alors possible de dire que la forme des gravillons n'affecte pas la stabilité des BAP.

Ajoutons enfin que l'effet bénéfique des gravillons roulés sur la maniabilité des BAP a été bien démontré par K.H. Khayat [32] qui a recommandé de fabriquer les BAP avec ce type des gravillons même si son coût de revient est plus ou moins égal à d'autres gravillons.

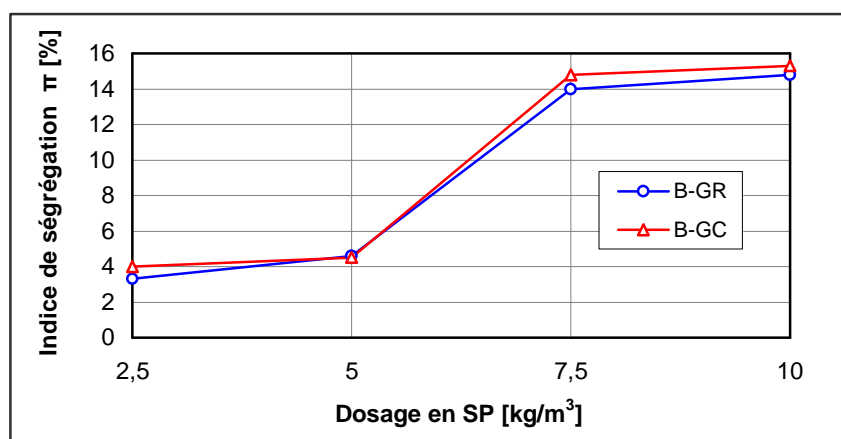


Figure 4.3 : Effet de la forme des gravillons sur la stabilité pour différents SP %.

La figure (4.4) représente l'effet de la forme des gravillons sur la résistance à la compression pour différents SP %. On constate que la forme des gravillons influence significativement la résistance à la compression pour tous les dosages en SP. Les gravillons roulés n'offrent pas, à l'état durci, les meilleures résistances à la compression contrairement, à l'état frais, où ils améliorent la majorité des propriétés rhéologiques.

En fait, avec des dosages en SP de 2.5, 5, 7.5 et 10 kg, les mélanges contenant des gravillons concassés augmentent respectivement la résistance à la compression de 10, 8.33, 13.46 et 11.54 % par rapport à ceux comprenant des gravillons roulés.

Ceci s'explique du fait que la dureté des gravillons concassés est plus grande que celle des gravillons roulés. De plus, la texture rugueuse des gravillons concassés génère une meilleure liaison entre la matrice cimentaire et ceux-ci. De même que la plus grande surface spécifique des gravillons concassés a pour effet de développer une force d'adhésion plus importante.

Par ailleurs, on remarque que, pour les deux formes des gravillons, la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du dosage en SP. Généralement, l'incorporation de SP dans les bétons provoque la ségrégation des constituants qui fait détruire la résistance mécanique.

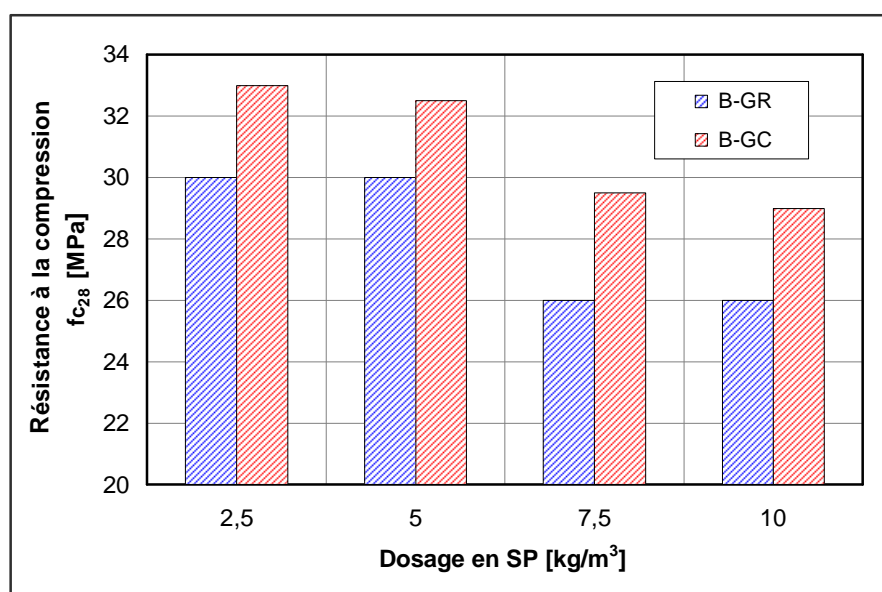


Figure 4.4 : Effet de la forme des gravillons sur la résistance à la compression pour différents SP%.

4.5.1.2 Optimisation de la granulométrie des gravillons

Dans la formulation des BAP, l'optimisation de la granulométrie des gravillons a une importance capitale, car elle peut avoir des effets considérables sur la maniabilité. En fait, la granulométrie désirée des BAP est essentiellement caractérisée par sa dimension maximale et ses proportions de grains de même dimension. Ces deux facteurs étant principalement fixés par une maximisation de la compacité et la capacité de remplissage des BAP. Cette phase consiste donc à sélectionner, en premier lieu, une classe granulométrique des gravillons se caractérisant par sa taille maximale, puis à trouver une combinaison massique des proportions de grains de même dimension déterminant la distribution granulométrique.

Avant de confectionner nos mélanges, nous avons mesuré, pour chaque combinaison des gravillons utilisés, la compacité obtenue dans une éprouvette cylindrique de (16, 32 cm) remplie sans tassement ou vibration.

a. Sélection de la taille maximale

Afin de déterminer une taille maximale adéquate des gravillons qui améliore la maniabilité et la résistance à la compression des mélanges, six combinaisons massiques de gravillons ont été considérées qui présentent les tailles maximales présentées ci-dessous. Nous avons formulé avec ces combinaisons six éprouvettes du béton ayant les mêmes dosages de compositions (*tableau 4.2*).

1. Ø25 : (50 % de 7/15 et 50 % de 15/25).
2. Ø20 : (60 % de 7/15 et 40 % de 15/20).
3. Ø16 : (90 % de 7/15 et 10 % de 15/16).
4. Ø15 : (100 % de 7/15).
5. Ø12.5 : (100 % de 7/12.5).
6. Ø10 : (100 % de 7/10).

Tableau 4.2 : Dosages des bétons destinés à l'optimisation de la taille maximale des gravillons.

Compositions	Gravillons	Sable	Ciment	E	SP
Volumes [l]	320	312.5	139	219	5.61
Dosages [kg]	838	794	438	219	6
S/P = 0.85			E/C = 0.5		

Résultats et discussions

La mesure de la compacité pour chaque classe granulométrique est représentée sur la figure (4.5). L'analyse de ce graphique montre que la compacité des gravillons demeure toujours proportionnelle à leur taille maximale. En effet, la compacité est augmentée de 10.62 % lorsque on accroît la dimension maximale des gravillons de 10 à 25 mm.

Cette tendance a également été constatée par A.M. Neville [42] pour tous les types de granulats. Il a affirmé que le volume total des vides dans un béton serait plus faible (la compacité est plus élevée) lorsque l'étendue granulométrique était plus large, c'est-à-dire lorsque l'écart entre la dimension maximale et la dimension minimale des granulats est plus élevé [42].

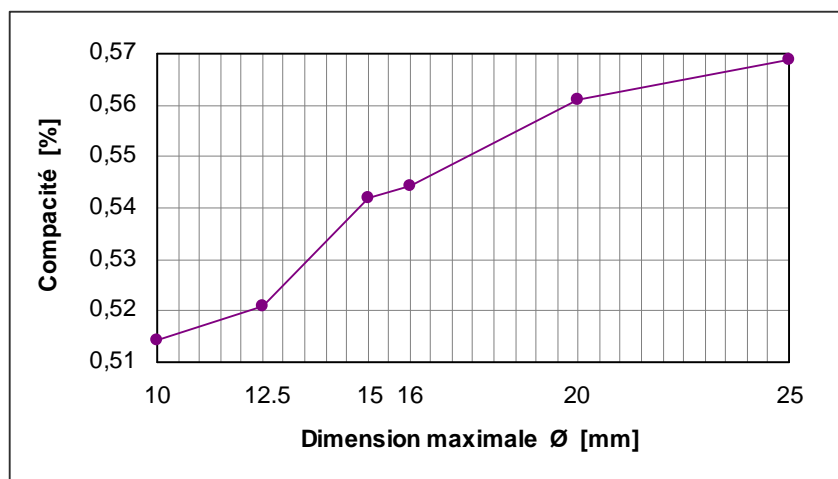


Figure 4.5 : Mesure de la compacité en fonction de la taille maximale des gravillons.

La figure (4.6) donne la courbe de l'influence de la dimension maximale des gravillons sur la fluidité. Sur la plage de la taille maximale de [10 à 20 mm], on peut constater une évolution de la fluidité en fonction de l'augmentation de celle-ci. Par exemple, si la taille maximale passe de 10 à 20 mm, la fluidité est améliorée de 29.17 % grâce à l'augmentation de la compacité qui suit pratiquement la même allure de la fluidité. Cependant, le cas de la classe granulométrique de la taille maximale de 25 mm présente la grande compacité, mais, en même temps, la pâte de ciment ne peut pas mieux étaler les grains de grosse dimension. Pour cela, la fluidité est abaissée de 8.06 % lorsque la taille maximale des gravillons s'accroît de 20 à 25 mm.

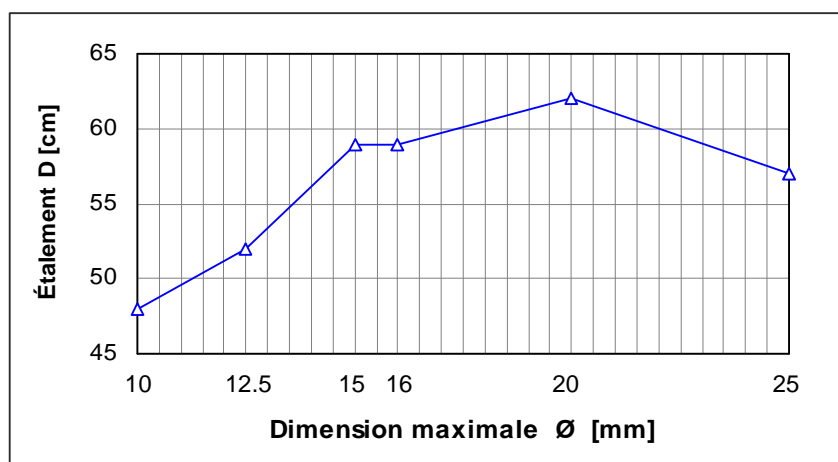


Figure 4.6 : Effet de la taille maximale des gravillons sur la fluidité.

La figure (4.7) met en évidence l'effet négatif de l'augmentation de la taille maximale des gravillons sur la déformabilité. En effet, plus la taille maximale des gravillons est grande, plus le taux de remplissage est faible. Ce dernier peut diminuer de 74,71 % lorsqu'on augmente la taille maximale des gravillons de 10 à 25 mm. Généralement, les gravillons de plus en plus gros peuvent se rapprocher les uns des autres et ne peuvent pas traverser l'espacement entre les armatures lors du coulage, ce qui provoque donc une suspension de l'écoulement des bétons.

Les résultats obtenus semblent similaires à ceux de T. Sedran [53] qui a montré la sensibilité de la capacité de remplissage des BAP au diamètre maximal du granulats. Il a utilisé, durant son étude, l'essai de passoire qui est un des premiers essais développés pour caractériser la déformabilité des BAP et il est abandonné aujourd'hui.

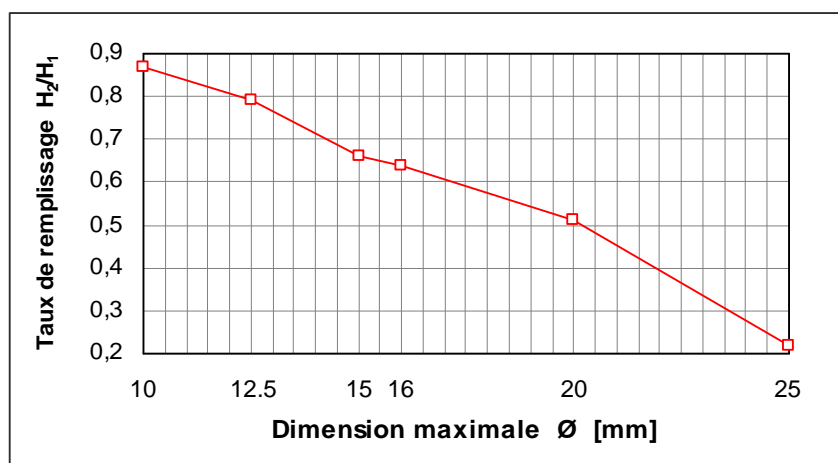


Figure 4.7 : Effet de la taille maximale des gravillons sur la déformabilité.

La figure (4.8) indique que la taille maximale des gravillons n'a pas d'effet significatif sur la stabilité. En effet, une légère diminution de la stabilité a été observée avec l'augmentation de la taille maximale des gravillons. À titre d'exemple, lorsque on augmente cette dernière de 10 à 25 mm, l'indice de ségrégation s'accroît de 12.24 % seulement.

Ceci s'explique par le fait que les grains de gravillons les plus gros ont tendance à se tasser sous leurs poids propres au fond du mélange, bien que les forces de frottements entre ceux-ci et le mortier soient plus grandes.

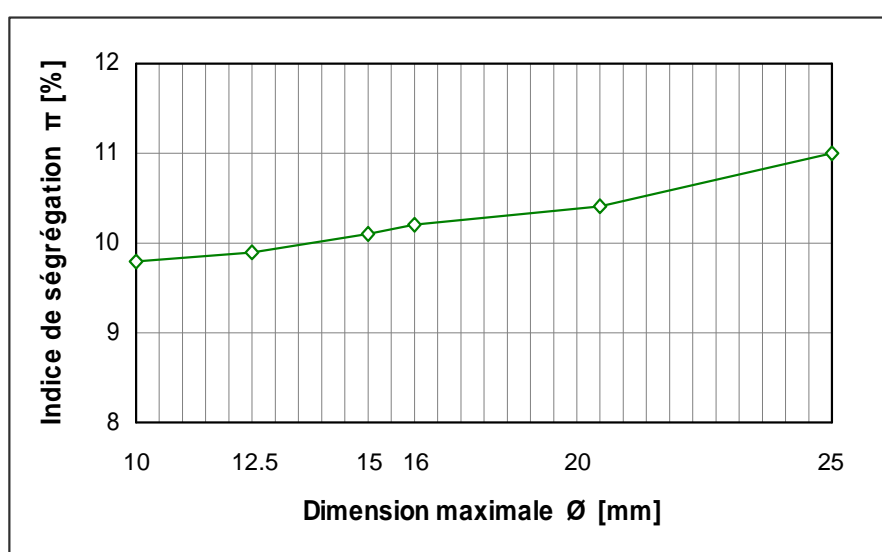


Figure 4.8 : Effet de la taille maximale des gravillons sur la stabilité.

Concernant la résistance à la compression, la figure (4.9) démontre un effet pondéré de la taille maximale des gravillons sur cette propriété. En effet, il est possible de constater une légère évolution de la résistance en fonction de la taille maximale des gravillons. À titre d'exemple, on peut bénéficier 4 MPa de résistance à la compression si la taille maximale des gravillons passe de 10 à 25 mm. Cette amélioration de la résistance est due à la compacité la plus élevée des gravillons de grande taille ainsi que leur faible surface à mouiller. En conséquence, celles-ci peuvent diminuer la demande en eau du béton.

Ce comportement a été établi avec certitude par A.M. Neville [42] lorsque la taille maximale des granulats ne dépasse pas 38.1 mm. M. Vénuat [42] lui aussi a également démontré que, à dosage en ciment égal, plus le diamètre maximum des granulats est élevé, plus la résistance en compression est forte.

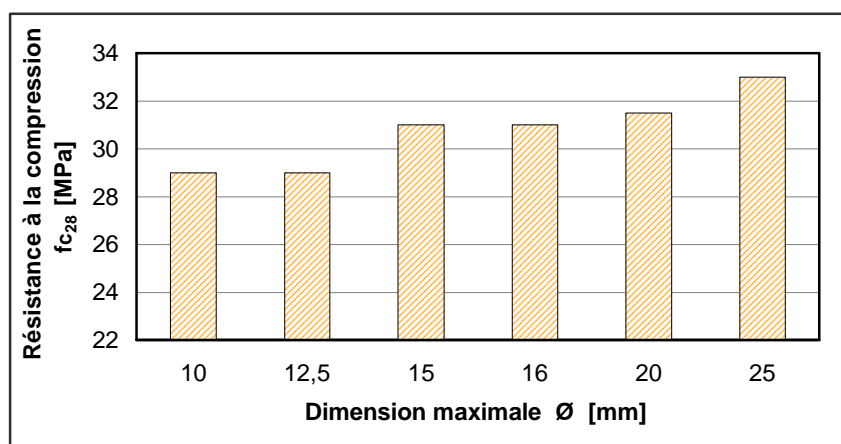


Figure 4.9 : Effet de la taille maximale des gravillons sur la résistance de la compression.

D'après les résultats obtenus dans cette étape, on peut conclure que les mélanges du béton contenant les gravillons de tailles maximales de 15 et 16 mm ont favorisé la meilleure fluidité et ils possèdent de bonnes déformabilité et stabilité ainsi que des résistances à la compression élevées. Cependant, pour faciliter la formulation, on adopte seulement la taille maximale des gravillons de 15 mm pour les étapes subséquentes.

b. Sélection de la combinaison granulaire

Durant cette étape, nous visons à optimiser la combinaison massique des gravillons choisis (7/15) par la correction de la distribution granulométrique des proportions des grains de mêmes dimensions. Pour cet objectif, quinze mélanges du béton ont été établis possédant tous les mêmes dosages de constituants (*tableau 4.3*) et se différencient uniquement par la combinaison granulaire des gravillons. Nous avons donc varié la granulométrie des gravillons en combinant la classe granulométrique principale de (7/15) avec d'autres secondaires de (7/12.5) ou (17/10). Chaque classe secondaire a été introduite en proportions variables de 0 à 70 % de la masse totale des gravillons, par pas de 10 %.

Tableau 4.3 : Mélanges destinés à l'optimisation de la combinaison granulaire des gravillons.

Compositions	Gravillons	Sable	Ciment	E	SP
Volumes [l]	320	312.5	158	199.5	7.48
Dosages [kg]	838	794	498	199.5	8
S/P = 0.85			E/C = 0.4		

Résultats et discussions

La mesure de la compacité pour les quinze combinaisons granulaires des gravillons est présentée dans *la figure (4.10)*. Il est possible de remarquer l'évolution de la compacité avec l'augmentation des proportions des classes secondaires jusqu'à atteindre des valeurs maximales de 55.68 % pour la combinaison composée de 40 % de (7/10), et 54.84 % pour celle composée de 50 % de (7/12.5). Au-delà, la compacité a tendance à diminuer avec l'excès de ces proportions secondaires et elle peut prendre des valeurs inférieures à la compacité de la classe granulométrique principale (7/15). Par ailleurs, il est important de signaler que les combinaisons granulaires de (7/10) ont favorisé les meilleures compacités comparées à celles des combinaisons de (7/12.5). En fait, lors de la combinaison de deux classes granulométriques différentes, les plus petits grains des gravillons peuvent se placer entre les plus gros, ce qui diminue par conséquent le volume des vides intergranulaires (augmentations de la compacité). Néanmoins, avec un excès de ces grains de petites dimensions, il est facile que le surplus de ces grains est expulsé hors de la combinaison granulaire et il forme donc entre eux d'autres volumes des vides.

La technique de combiner des gravillons de classes granulométriques différentes a été recommandée par plusieurs recherches afin d'augmenter la compacité. K.H. Khayat [33] par exemple a trouvé la compacité maximale en combinant trois classes de gravillons (11 % de 5/10, 62 % de 5/14 et 27 % de 5/20), mais cette combinaison n'a pas donné les meilleures propriétés rhéologiques des BAP.

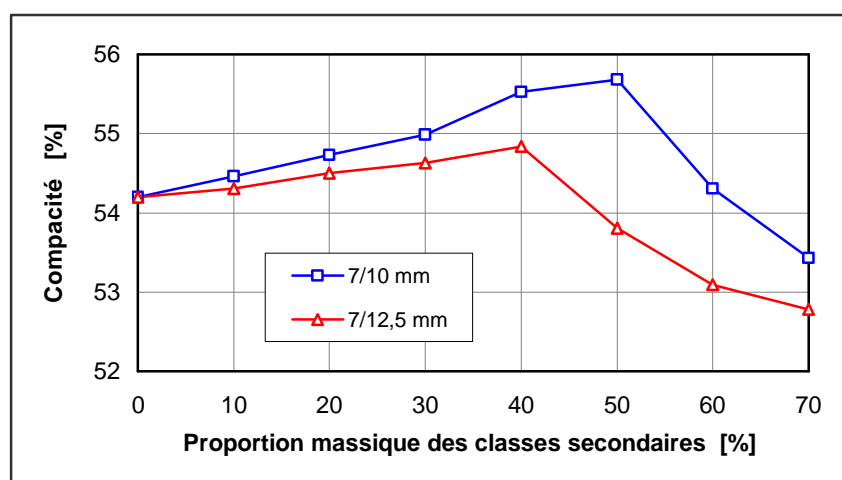


Figure 4.10 : Mesure de la compacité en fonction des combinaisons granulaires des gravillons.

La figure (4.11) illustre l'influence de la combinaison granulaire des gravillons sur la fluidité. En premier lieu, on observe que les bétons constituant des combinaisons de (7/10) étalent généralement beaucoup plus que ceux comportant des combinaisons de (7/12.5). L'écart de fluidité entre les deux combinaisons est plus évident dans les proportions massiques de 30 et 60 % ; il est de 4 cm. Ces résultats s'expliquent tout simplement par la compacité la plus élevée de la combinaison de (7/10) comparée à celle de (7/12.5), quel que soit la proportion massique introduite. De plus, on constate une légère amélioration de la fluidité de l'ordre de 9.68 et 6.45 %, par rapport à celle de la classe principale (7/15), si les proportions de (7/10) et (7/12.5) augmentent de 0 à 30 % et 0 à 40 % respectivement. Au-delà de ces proportions, la fluidité est abaissée et peut prendre des valeurs inférieures à la fluidité de la classe principale (7/15). Ceci est dû à la diminution de la compacité qui entraîne une augmentation du volume de pâte nécessaire pour combler les vides intergranulaires.

Par ailleurs, bien que les combinaisons massiques des gravillons de 40 et 50 % de (7/10) possèdent les compacités maximales, elles n'offrent pas les meilleurs étalements parce que la forte densité de ces combinaisons crée des frictions entre les grains des gravillons, ce qui limite donc l'étalement du béton. Ces résultats confirment d'autres déjà trouvés par K.H. Khayat [33] qui a adopté, pour ses BAP, une combinaison massique de gravillons de (70 % de 5/14 et 30 % de 5/20). Cette combinaison n'a pas donné la compacité maximale mais elle a favorisé la meilleure fluidité.

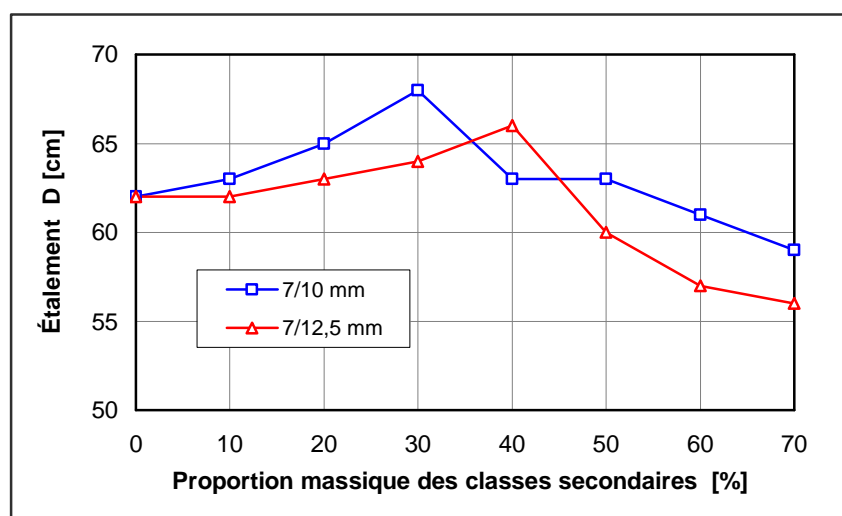


Figure 4.11 : Effet de la combinaison granulaire des gravillons sur la fluidité.

La figure (4.12) montre l'effet positif de la combinaison granulaire des gravillons sur la déformabilité. En effet, on observe que le taux de remplissage est une fonction croissante de la proportion massique des classes secondaires. Cette évolution est de l'ordre de 17.91 % lorsque la proportion massique de (7/10) passe de 0 à 70 %, tandis qu'elle est de 11.94 % seulement si la proportion massique de l'autre classe (7/12.5) varie dans la même fourchette. Cependant, il semble que cette évolution n'est pas régulière car elle commence par 13.43 et 8.96 %, pour les classes (7/10) et (7/12.5) respectivement, si la proportion massique passe de 0 à 30 %, alors qu'elle est de 3.95 et 2.74 % seulement, pour les classes (7/10) et (7/12.5) respectivement, si la proportion massique varie de 30 à 70 %. Ces résultats s'avèrent logiques en se basant sur la sensibilité de la capacité de remplissage à l'augmentation de la taille maximale des gravillons.

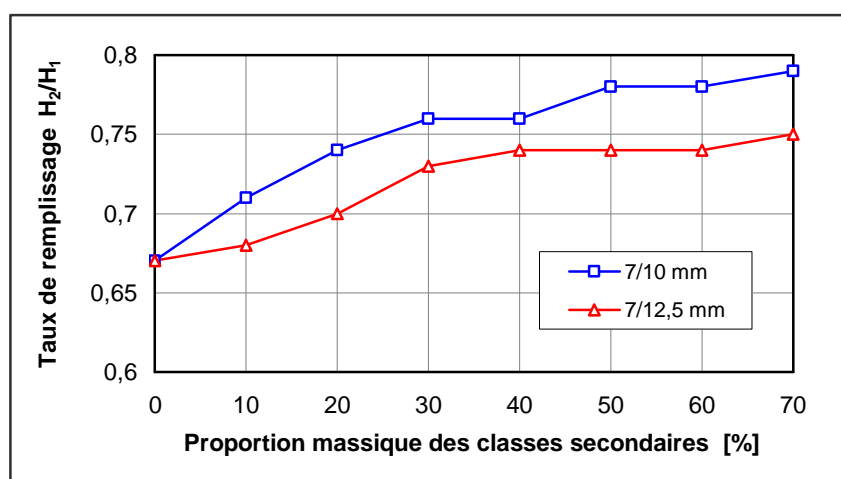


Figure 4.12 : Effet de la combinaison granulaire des gravillons sur la déformabilité.

L'influence de la combinaison granulaire des gravillons sur la stabilité est donnée dans la figure (4.13). L'analyse de ce graphique montre que la courbe de l'indice de ségrégation en fonction des proportions massiques prend presque la même allure pour les deux classes secondaires (7/10) et (7/12.5). On peut dire donc que la variation de la classe secondaire n'a pas d'effet sur la stabilité. Aussi, il s'avère que l'effet des proportions massiques introduites sur la stabilité est négligeable car l'augmentation de ces proportions de 0 à 70 % engendre une légère diminution de l'indice de ségrégation de 7.3 % environ, pour les deux classes secondaires. Ces résultats s'expliquent par le fait que l'ajout des gravillons de même dimension dans une classe granulométrique donnée peut ne pas suffire à modifier la tendance des grains à se déplacer ou se compacter dans le mélange.

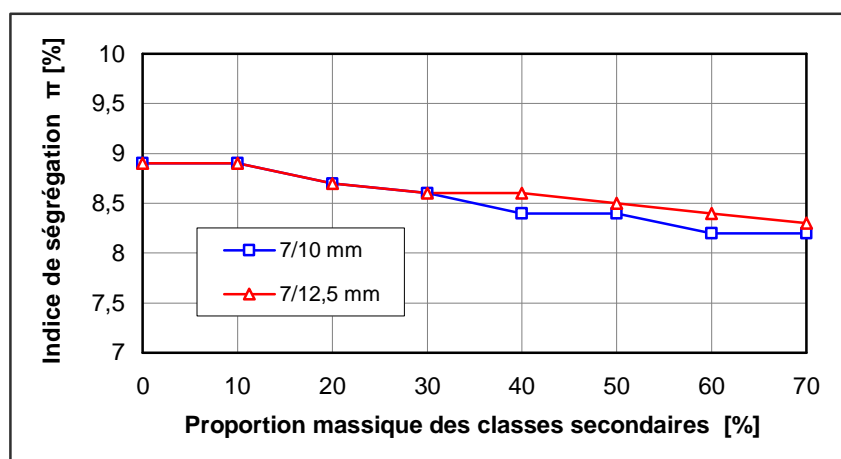


Figure 4.13 : Effet de la combinaison granulaire des gravillons sur la stabilité.

La figure (4.14) démontre l'effet négligeable de la combinaison granulaire des gravillons sur la résistance à la compression. En effet, on observe une stabilisation de la résistance pour les deux classes secondaires si la proportion massique ne dépasse pas 30 %. Au-delà de cette valeur, la résistance est abaissée légèrement. Cette diminution est de l'ordre de 4.05 et 2.7 %, pour les classes secondaires (7/10) et (7/12.5) respectivement, lorsque la proportions massique passe de 0 à 70 %. Aussi, la variation de la classe secondaire de (7/10) à (7/12.5) peut améliorer la résistance de 0.5 MPa, mais dans la plage de proportion massique de 30 à 70 % seulement. Ces résultats ne permettent pas de dire que l'introduction de proportion massique de même dimension dans une classe granulométrique donnée peut affecter la résistance mécanique, bien que des modifications soient obtenues de la compacité et la distribution granulométrique.

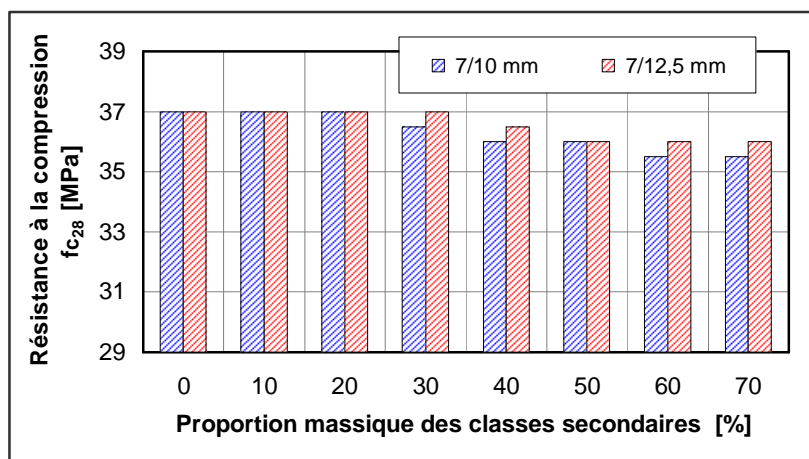


Figure 4.14 : Effet de la combinaison granulaire des gravillons sur la résistance à la compression.

À travers les résultats obtenus durant cette étape, on optimise la combinaison granulaire des gravillons contenant (30 % de 7/10 et 70 % de 7/15). Cette combinaison semble être efficace pour l'amélioration des propriétés rhéologiques tout en préservant une bonne résistance à la compression.

4.5.1.3 Optimisation du volume des gravillons

Cette phase consiste essentiellement à examiner l'effet du volume de gravillons sur la maniabilité et la résistance à la compression afin de déterminer un volume optimal qui améliore ces paramètres. Nous avons alors fabriqué seize éprouvettes dosées à des teneurs croissantes en gravillons de 250 à 400 l par pas de 10 l. Ajoutons que tous les mélanges possèdent de mêmes rapports S/P de 0.8 et E/C de 0.4 ainsi que un SP % égale 1.5.

Le tableau (4.4) présente le dosage des constituants de tous les bétons réalisés lors de cette phase.

Tableau 4.4 : Compositions des bétons destinés à l'optimisation du volume des gravillons.

N°	Gravillons		Sable	Ciment	E	SP
	[l/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
1	250	655	846.7	566.8	226.7	8.50
2	260	681.2	835.4	559.1	223.6	8.39
3	270	707.4	824.1	551.3	220.5	8.27
4	280	733.6	812.8	543.6	217.4	8.15
5	290	759.8	801.5	535.8	214.3	8.04
6	300	786	790.2	528.1	211.2	7.92
7	310	812.2	778.9	520.4	208.1	7.81
8	320	838.4	767.6	512.6	205	7.69
9	330	864.6	756.4	504.9	201.9	7.57
10	340	890.8	745.1	497.1	198.8	7.46
11	350	917	733.8	489.4	195.8	7.34
12	360	943.2	722.5	481.6	192.7	7.22
13	370	969.4	711.2	473.9	189.6	7.11
14	380	995.6	699.9	466.2	186.5	6.99
15	390	1022	688.6	458.4	183.4	6.88
16	400	1048	677.3	450.7	180.3	6.76
S/P = 0.8				E/C = 0.4		

Résultats et discussions

L'évolution de la fluidité en fonction du volume des gravillons est illustrée dans la figure (4.15). Il est possible de constater que plus l'étalement est élevé, plus le volume des gravillons doit être faible. La réduction de l'étalement peut atteindre 62.66 % lorsque ce volume augmente de 250 à 400 l. Cependant, cette diminution est plus évidente si on travaille avec des volumes de gravillons de plus en plus grands. À titre d'exemple, entre 250 et 290 l, la réduction de l'étalement est de 9,46 % seulement, tandis qu'elle est de 17,91 % et 21.15 % si le volume passe de 290 à 330 l et de 330 à 370 l respectivement.

On peut penser que ce comportement est associé directement à l'insuffisance de la teneur en pâte de ciment engendrée par l'augmentation du volume des gravillons. Dans ce cas, les grains des gravillons ont tendance à venir en contact les uns avec les autres, ce qui augmente les forces de frottement entre eux dans la masse du béton et limite donc l'étalement.

Les résultats obtenus sont éprouvés par de nombreuses études qui ont déjà été effectuées sur les BAP [1] [33] [55] [64].

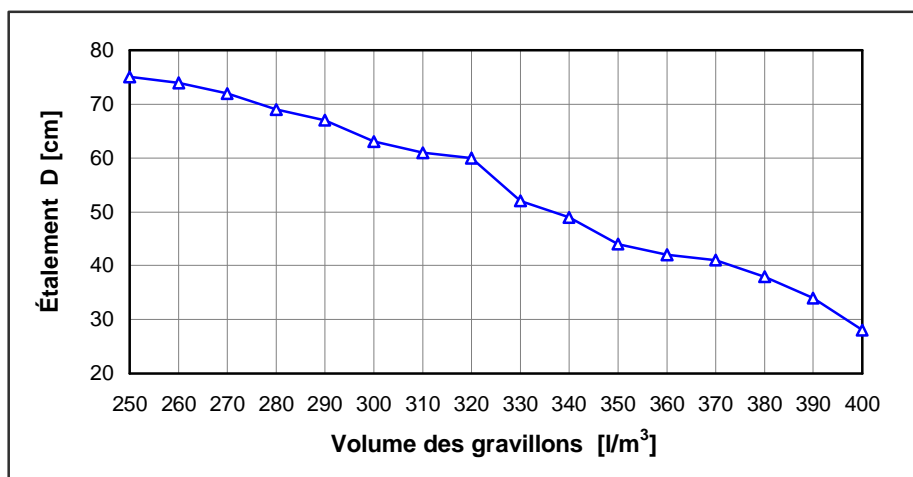


Figure 4.15 : Effet du volume des gravillons sur la fluidité.

La figure (4.16) montre clairement l'effet négatif du volume des gravillons sur la déformabilité. En effet, on s'aperçoit, sur ce graphique, que l'évolution successive de la teneur en gravillons peut détruire complètement la capacité de remplissage des bétons. À titre d'exemple, le taux de remplissage est abaissé de cinq fois moins lorsque le volume des gravillons s'accroît de 250 à 400 l.

Ce résultat nous amène à l'obligation de limiter ce volume dans la formulation des BAP. Généralement, les gravillons étant la cause principale du blocage du béton en milieu confiné lors de l'écoulement. Leurs grains cisailent le mortier et viennent en contact entre eux, ce qui engendre la formation des amas contre les armatures.

À titre comparatif, on constate que nos résultats sont très proches à ceux de M. Sonebi [55] et M. Yurugi et coll [64].

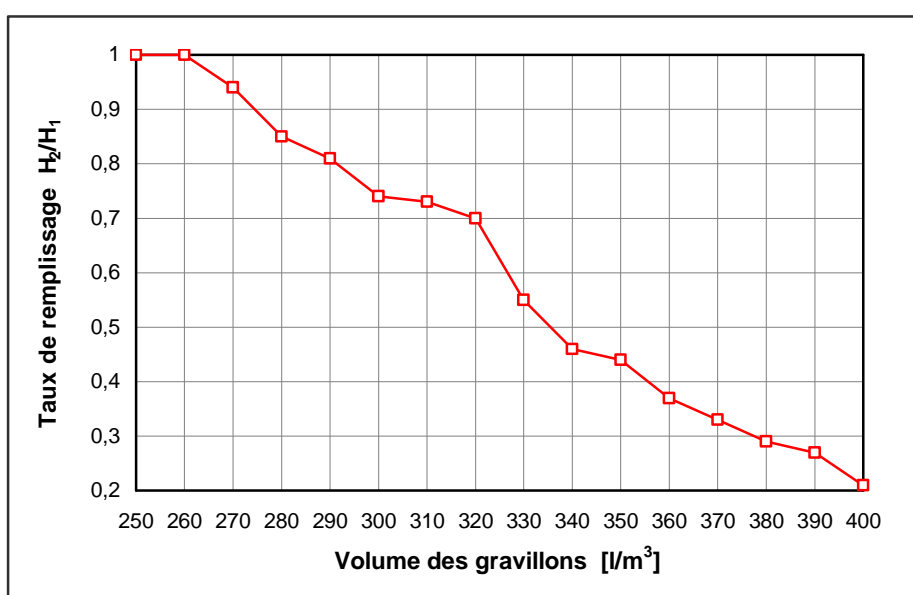


Figure 4.16 : Effet du volume des gravillons sur la déformabilité.

L'effet du volume des gravillons sur la stabilité est bien illustré sur la figure (4.17). L'examen de ce graphique démontre que l'addition du volume des gravillons peut améliorer ou affecter la stabilité des mélanges. En effet, lorsque ce volume s'accroît de 250 à 290 l, on remarque une diminution graduelle de l'indice de ségrégation de 43,5 % alors que, entre 290 et 400 l, cet indice augmente de 164 %.

Les raisons de ce comportement sont expliquées par l'influence plus importante de la pâte de ciment sur la ségrégation. En premier lieu, la réduction du volume de pâte, qui s'accompagne avec l'augmentation de teneur en gravillons, conduit à une limitation de la quantité de laitance engendrée par la séparation des constituants de pâte elle-même, mais, par la suite, la quantité insuffisante de pâte ne peut plus contrebalancer le mouvement descendant de tous les grains des gravillons.

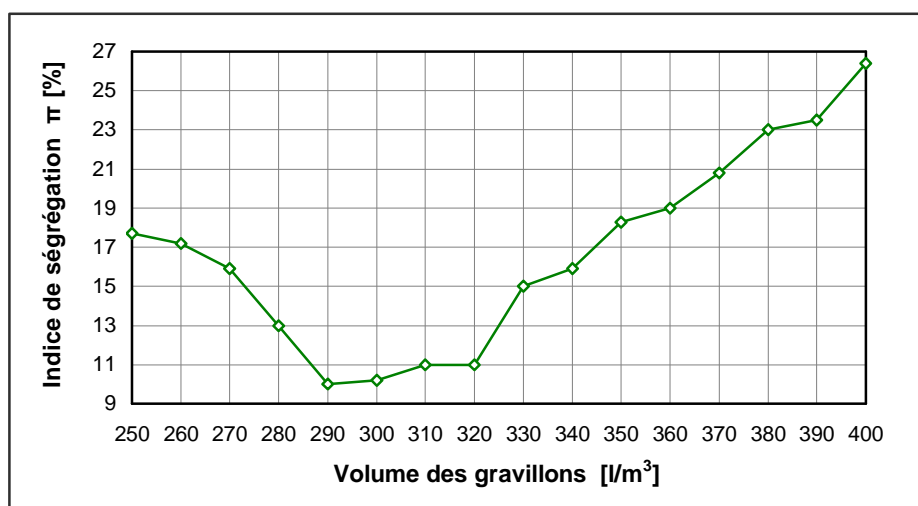


Figure 4.17 : Effet du volume des gravillons sur la stabilité.

La figure (4.18) présente l'effet du volume des gravillons sur la résistance à la compression. L'analyse de ce graphique démontre que les mélanges confectionnés acquièrent des résistances à la compression décroissantes en fonction du volume des gravillons. Ces résistances peuvent diminuer de l'ordre de 36.84 % lorsqu'on augmente la teneur en gravillons de 290 à 400 l.

Ce résultat n'est pas en concordance avec celui de A.M. Neville [42] qui a affirmé que lorsque le rapport massique de (granulats/ciment) s'accroissait, il y avait une amélioration de résistance, mais il a ajouté que les raisons de ce comportement n'étaient pas bien connues.

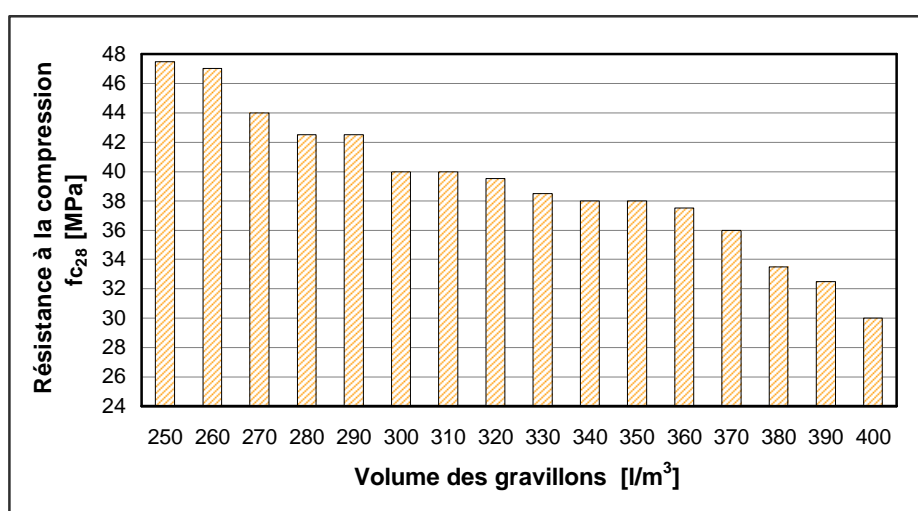


Figure 4.18 : Effet du volume des gravillons sur la résistance de la compression.

Selon les résultats obtenus, on peut signaler que, parmi tous les bétons établis jusqu'à cette phase, Il y a seulement deux mélanges qui sont effectivement autoplaçants, c'est-à-dire qu'ils sont capables de répondre à tous les exigences proposés par l'AFGC [14] ($D \geq 60$ cm, $H_2/H_1 > 0.8$ et $\pi \leq 15$ %), tout en préservant de bonnes résistances à la compression. Ces mélanges sont ceux qui contiennent 280 et 290 l de gravillons.

Pour la formulation de nos BAP, on adopte un volume de gravillons de 290 l, car il permet de minimiser la quantité de mortier utilisé et, par conséquent, réduire le coût des BAP. Ce volume est très proche de 300 l, le volume choisi par plusieurs chercheurs [16] [33] [50] [55] [64].

4.5.1.4 Optimisation des rapports S/P et E/C

Après avoir déterminé les paramètres optimales des gravillons, nous avons étudié durant cette phase l'influence du rapport volumique S/P et le rapport massique E/C sur les propriétés rhéologiques et mécaniques.

Cette phase permet également de déterminer le volume de pâte qui satisfait les critères de la maniabilité ainsi que les quantités de ciment et d'eau qui offrent la meilleure résistance à la compression.

Nous avons alors préparé au total vingt-quatre mélanges avec différents rapports S/P de (0.55, 0.65, 0.75, 0.85, 0.95 et 1.05). Nous avons varié aussi, pour chaque rapport S/P utilisé, le rapport E/C de 0.25 à 0.55, par pas de 1. Dans tous les éprouvettes, le volume des gravillons de 290 l et le SP % égale 1.5 ont été maintenus constants.

Le tableau (4.5) englobe le dosage des constituants de chaque mélange confectionné dans cette étape.

Tableau 4.5 : Compositions des bétons destinés à l'optimisation des rapports S/P et E/C.

N°	S/P	E/C	Sable [kg/m ³]	Ciment [kg/m ³]	E [kg/m ³]	SP [kg/m ³]
1	0.55	0.25	639.9	789.6	197.4	11.84
2		0.35	639.9	671.3	235	10.07
3		0.45	639.9	583.8	262.7	8.76
4		0.55	639.9	516.5	284.1	7.75
5	0.65	0.25	710.4	740.7	185.2	11.11
6		0.35	710.4	629.7	220.4	9.45
7		0.45	710.4	547.7	246.4	8.21
8		0.55	710.4	484.5	266.5	7.27
9	0.75	0.25	772.9	697.3	174.3	10.46
10		0.35	772.9	592.9	207.5	8.89
11		0.45	772.9	515.6	232	7.73
12		0.55	772.9	456.2	250.9	6.84
13	0.85	0.25	828.6	658.7	164.7	9.88
14		0.35	828.6	560	196	8.40
15		0.45	828.6	487	219.2	7.31
16		0.55	828.6	430.9	237	6.46
17	0.95	0.25	878.6	624	156	9.36
18		0.35	878.6	530.5	185.7	7.96
19		0.45	878.6	461.4	207.6	6.92
20		0.55	878.6	408.2	224.5	6.12
20	1.05	0.25	923.7	592.7	148.2	8.89
22		0.35	923.7	503.9	176.4	7.56
23		0.45	923.7	438.3	197.2	6.57
24		0.55	923.7	387.7	213.3	5.82
Dosage des gravillons = 759.8 kg/m ³						

Résultats et discussions

L'évolution de la fluidité en fonction des deux paramètres S/P et E/C est illustrée dans la figure (4.19). En premier lieu, on constate que, à rapport E/C égal, plus le rapport S/P est élevé, plus l'étalement est faible. Néanmoins, l'effet de la variation du S/P semble être plus évident dans le cas des mélanges préparés avec des rapports E/C faibles du fait que leur influence sur la fluidité est la plus prépondérante. À titre d'exemple, l'augmentation du S/P de 0.55 à 1.05 engendre une réduction de l'étalement de 7.5 % seulement lorsque le rapport E/C égale 0.55, tandis que la même augmentation du S/P affecte grandement cet étalement de l'ordre de 31.02 % si le rapport E/C est de 0.25.

En effet, l'accroissement du rapport S/P se fait au détriment du volume de pâte de ciment, laquelle est supposée la composante visqueuse du béton. Dans la formulation des BAP, cette pâte doit non seulement combler les vides intergranulaires, mais il faut en plus prévoir un volume excédentaire afin d'écarter suffisamment les granulats et assurer un bon étalement. Pour cela, les BAP doivent renfermer donc un rapport S/P limité.

Ce résultat est en accord avec ceux de plusieurs études [1] [33] [55] [64]. M. Sonebi [55], par exemple, a trouvé que l'étalement de BAP est amélioré de 59 à 62 cm quand le rapport S/P passe de 0.6 à 0.7, avec E/C de 0.41 et un volume des gravillons de 330 l.

Par ailleurs, on peut remarquer que, pour tous les S/P utilisés, l'augmentation du rapport E/C améliore systématiquement la fluidité. En effet, les mélanges confectionnés avec S/P de 0.55 et 1.05 acquièrent une grande amélioration de l'étalement de 95,12 % et 196 % respectivement lorsque le rapport E/C passe de 0.25 à 0.55.

Ceci s'explique tout simplement par l'excès de la quantité d'eau qui est sans aucun doute le principal paramètre influençant la fluidité du béton. En fait, l'addition de l'eau peut diminuer les contraintes de cisaillement dues à la cohésion et au frottement interne dans le béton, ce qui rend par conséquent sa viscosité plus faible.

Cependant, ce résultat n'a pas confirmé celui de M. Sonebi [55] qui a démontré que, pour tous les rapports S/P considérés et avec des volume des gravillons de 300 et 330 l, le rapport E/C de 0.41 favorisait les meilleurs étalements comparés à ceux de rapport E/C de 0.47. M. Sonebi [55] n'a pas fourni les raisons de ce comportement bien qu'il n'a pas utilisé le même dosage en SP dans tous les mélanges.

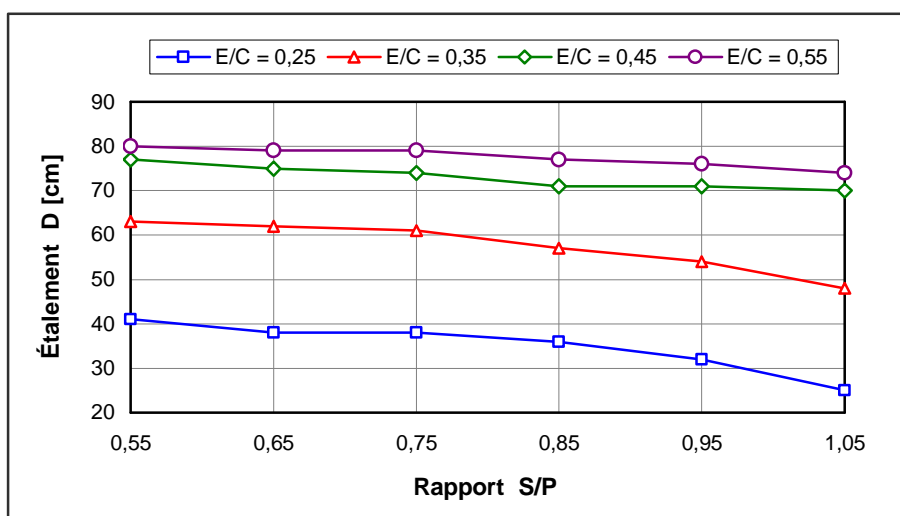


Figure 4.19 : Effet des rapports S/P et E/C sur la fluidité.

La figure (4.20) met en évidence l'effet des rapports S/P et E/C sur la déformabilité. L'analyse de ce graphique démontre que les mélanges confectionnés acquièrent des taux de remplissage décroissants en fonction du S/P. En effet, l'accroissement de ce rapport de 0,5 à 1,05 cause une perte de la déformabilité de 0,31 % environ pour tous les rapports E/C. Il est important alors que le volume de la pâte de ciment soit ajusté de façon que les BAP puissent facilement traverser les coffrages très ferrailés.

Ce résultat est en accord avec d'autres déjà trouvés par M. Sonebi [55] et M. Yurugi et coll [64].

Par ailleurs, il est possible d'observer que, avec un S/P donné, l'augmentation du rapport E/C de 0,25 à 0,45 contribue à améliorer la déformabilité. Le taux de remplissage peut atteindre le pic avec un E/C de 0,45 et S/P de 0,55 ou .65. Par contre, ce taux de remplissage devient nul dans le cas des bétons qui possèdent des rapports E/C de 0,25 et S/P de 0,95 ou 1,05. De plus, on constate une perte de la déformabilité si le rapport E/C s'accroît de 0,45 à 0,55 du fait que l'ajout d'un excès d'eau provoque la ségrégation des mélanges. Dans ce cas, la pâte de ciment peut se séparer des granulats et se déplacer vers l'extérieur alors que les granulats ne bougent pas, ce qui suspend donc l'écoulement.

Ce résultat a été bien constaté par M. Sonebi [55] qui a affirmé que, pour tous les rapports S/P considérés et avec des volumes des gravillons de 300 et 330 l, la meilleure déformabilité est obtenue avec un rapport E/C égale 0,41 et non pas avec celui de 0,47.

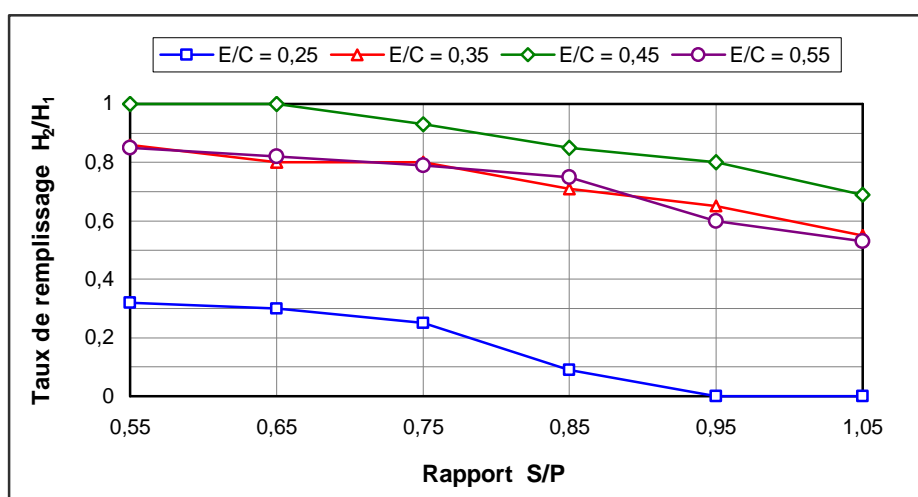


Figure 4.20 : Effet des rapports S/P et E/C sur la déformabilité.

La figure (4.21) présente les courbes de l'influence des rapports S/P et E/C sur la stabilité. De prime abord, on voit bien que, pour les différents S/P considérés, les mélanges confectionnés avec un rapport E/C de 0.25 offrent la meilleure stabilité qui est estimée par un indice de ségrégation quasi-nul. De plus, il est évident que la croissance du rapport E/C affecte considérablement la stabilité, quelque soit le S/P utilisé. L'indice de ségrégation peut atteindre des valeurs très importantes avec des rapports E/C élevés et les mélanges devenant donc instables. À titre d'exemple, pour les bétons contenant un rapport S/P de 0.55 et 1.05, cet indice augmente respectivement de 82.5 et 89.41 % quand on varie le rapport E/C de 0.35 à 0.55. Généralement, à faible rapport E/C, la pâte de ciment est tellement visqueuse qu'il est difficile de dissocier les petits grains de sable et de ciment les uns des autres. À cause de cette cohésion, la sédimentation du béton se fait en un seul bloc, alors que, pour des rapports très élevés, les particules fines se dissocient plus facilement, ce qui provoque la ségrégation. De même qu'une partie de l'eau remonte à la surface du béton et forme alors le ressuage et la laitance.

Par ailleurs, on remarque que les bétons de faibles rapports S/P sont moins sujets à la ségrégation. L'indice de ségrégation augmente pratiquement de la même façon avec le S/P, mais pas avec la même intensité. Par exemple, lorsque ce rapport passe de 0.55 à 1.05, cet indice s'accroît de 41.66, 33.77 et 50.47 % pour les bétons contenant un rapport E/C respectivement de 0.35, 0.45 et 0.55. Ce résultat s'explique par la perte de la viscosité et la cohésion engendrée par la diminution du volume de pâte de ciment, laquelle est considérée comme un véritable collant des granulats.

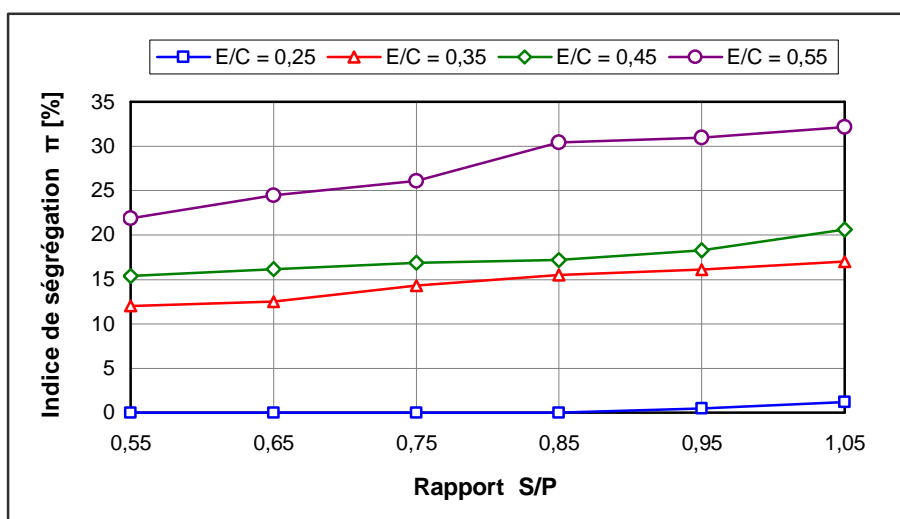


Figure 4.21 : Effet des rapports S/P et E/C sur la stabilité.

L'influence des rapports S/P et E/C sur la résistance à la compression a été démontrée sur la figure (4.22). Il est possible de constater d'abord que cette résistance décroît en même temps avec le rapport S/P. En effet, lorsqu'on augmente le S/P de 0.55 à 1.05, les mélanges confectionnés avec des rapports E/C de (0.25, 0.35, 0.45 et 0.55) acquièrent une perte de résistance respectivement de (37.93, 15.31, 11.9 et 19.7 %). On peut penser que ce comportement est dû à la diminution de la quantité de ciment, qui conduit systématiquement à une réduction du volume d'hydrates formés, d'où des résistances plus faibles.

Par ailleurs, On remarque au premier coup d'œil que la résistance à la compression ne demeure pas toujours une fonction inversement proportionnelle du rapport E/C, relation présentée comme soi-disant loi [42]. En effet, la résistance respecte cette loi, pour les différents S/P, dans une plage du rapport E/C de 0.35 à 0.55 seulement. La perte de la résistance par exemple dans cette plage est de 40.54 et 43.62 % pour les mélanges ayant un S/P respectivement de 0.55 et 1.05. Par contre, lorsque on diminue le rapport E/C de 0.35 à 0.25, la résistance à la compression est affectée grandement et elle atteint des valeurs très médiocres, ne dépassant guère 14.5 MPa. Ce résultat s'explique par le fait que le serrage de tels bétons sans vibration et l'insuffisance de la fluidité engendrent un volume très important de vides dans les éprouvettes, ce qui conduit par conséquent à la chute de la résistance. Il est à noter que, avec ces bétons de rapport E/C de 0.25, on ne peut pas couler dans les meilleures cas que les deux tiers de volume de béton nécessaire à remplir les moules cylindriques.

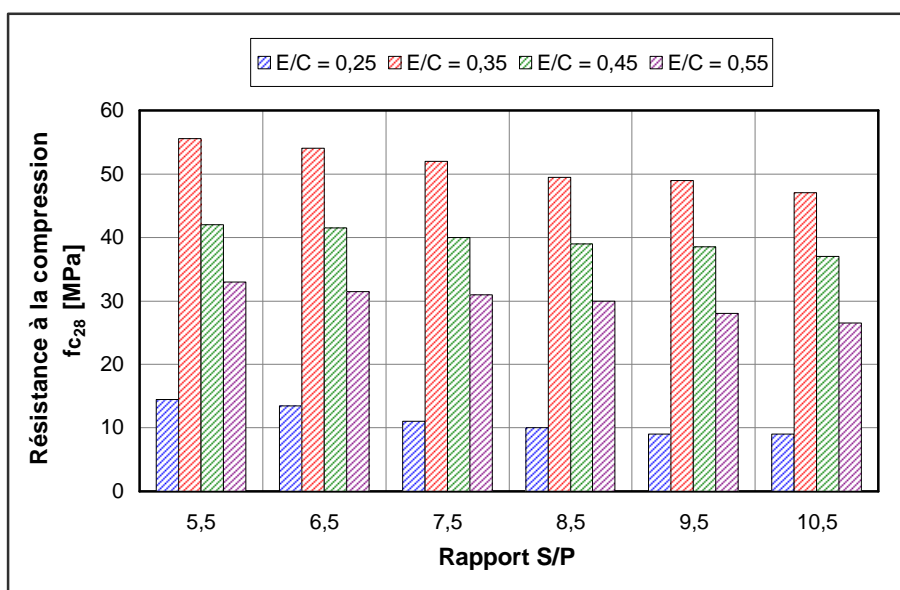


Figure 4.22 : Effet des rapports S/P et E/C sur la résistance à la compression.

D'après les résultats obtenus, il convient de dire que les propriétés des bétons étudiés à l'état frais et même durci sont affectées par l'augmentation du rapport S/P. En plus, l'évolution du rapport E/C permet en général d'améliorer la fluidité et la déformabilité mais elle affecte en même temps la stabilité et la résistance à la compression. Pour ces raisons, les BAP devraient comporter un rapport S/P faible ainsi qu'un E/C tout juste suffisant pour fluidifier les mélanges.

Par ailleurs, parmi les bétons réalisés durant cette phase, on obtient trois bétons qui répondent vraiment aux exigences de l'AFGC [14]. Les BAP obtenus possédant des rapports S/P de 0.55, 0.65 ou 0.75 et un rapport E/C égale 0.35. Pour les étapes suivantes, on adopte seulement un rapport S/P égale 0.75 puisqu'il présente le volume de pâte le plus faible et on choisit bien sûr un E/C de 0.35.

Ces résultats semblent divergents à ceux de M. Sonebi [55] et K.H. Khayat [33] qui ont optimisé pour ses BAP des rapports S/P de 0.6 et E/C de 0.41. M. Yurugi et coll [64] ont également trouvé ces rapports, mais ils ont démontré aussi que pour obtenir un BAP avec des rapports S/P égaux 0.65 et 0.75, le volume des gravillons ne doit pas dépasser respectivement 340 et 330 l.

4.5.1.5 Optimisation de la nature et du dosage d'additions minérales

Il est évident que notre BAP obtenu jusqu'à la phase précédente est très riche en quantité cimentaire estimée à 592.9 kg/m^3 . Par conséquent, la teneur importante du ciment provoque un accroissement de la température des BAP due à la chaleur d'hydratation et engendre en plus une augmentation de leur coût. Il est raisonnable donc de remplacer une partie du ciment par des additions minérales.

L'étude a été orientée, durant cette phase, de sorte à déterminer l'effet de la nature et du dosage d'additions minérales sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des BAP. Il s'agit également de trouver les proportions optimales de chaque type d'addition qui procurent de bonnes maniabilités tout en préservant une résistance acceptable.

Ajoutons que cette phase est divisée en deux étapes. La première consiste à examiner en ensemble les effets des fillers calcaires, des pouzzolanes naturelles et du laitier de haut fourneau. En suite, nous avons étudié l'effet de la fumée de silice uniquement, car elle nécessite un traitement un peu spécial.

a. Optimisation des fillers calcaires, pouzzolanes et laitier

Le principe de cette étape consiste à formuler seize BAP qui se différencient uniquement par la nature de leur liant. Ce liant comporte, en premier lieu, (ciment + fillers calcaires), en suite, (ciment + pouzzolanes) et finalement (ciment + laitier). Les additions minérales sont introduites en différentes proportions massiques de 0 à 50 % de liant, par pas de 10 %.

Rappelons que nos BAP comportent dans 1m^3 , un volume de gravillons de 290 l, un rapport S/P égal à 0.75 c'est-à-dire 304 l de sable et 406 l de pâte et un rapport E/L égal à 0.35. Tous les mélanges sont fluidifiés à une dose de SP % modérée de 1.3. *Le tableau (4.6) regroupe les compositions des BAP étudiés lors de cette étape.*

Tableau 4.6 : Compositions des BAP destinés à l'optimisation des FC, PZ et LT.

N°	Nature du liant [%]	Ciment [kg/m ³]	AM [kg/m ³]	E [kg/m ³]	SP [kg/m ³]	E/C
1	100 C	593.3	0	207.7	7.71	0.35
2	90 C + 10 FC	527.4	58.6	205.1	7.62	0.39
3	80 C + 20 FC	463.2	115.8	202.6	7.53	0.44
4	70 C + 30 FC	400.4	171.6	200.2	7.44	0.5
5	60 C + 40 FC	339.2	226.1	197.9	7.35	0.58
6	50 C + 50 FC	279.4	279.4	195.6	7.26	0.7
7	90 C + 10 PZ	530.1	58.9	206.1	7.66	0.39
8	80 C + 20 PZ	467.8	116.9	204.7	7.6	0.44
9	70 C + 30 PZ	406.4	174.2	203.2	7.55	0.5
10	60 C + 40 PZ	345.9	230.6	201.7	7.49	0.58
11	50 C + 10 PZ	286.2	286.2	200.3	7.44	0.7
12	90 C + 10 LT	530.1	58.9	206.1	7.66	0.39
13	80 C + 20 LT	467.8	116.9	204.7	7.60	0.44
14	70 C + 30 LT	406.4	174.2	203.2	7.55	0.5
15	60 C + 40 LT	345.9	230.6	201.7	7.49	0.58
16	50 C + 50 LT	286.2	286.2	200.3	7.44	0.7
Dosage des gravillons = 759.8 kg/m ³ Dosage du sable = 772.9 kg/m ³				S/P = 0.75 E/L = 0.35		

Résultats et discussions

La figure (4.23) met en évidence l'effet bénéfique des additions minérales sur la fluidité. Il est possible d'observer l'augmentation de l'étalement avec le dosage en additions minérales jusqu'aux proportions massiques de (30 % de FC, 30 % de PZ et 40 % de LT). Au-delà, une légère diminution de l'étalement a été enregistrée avec l'excès de ces additions. On peut remarquer aussi que les BAP confectionnés avec le FC présentent les meilleurs étalements, et ils sont suivis par les BAP des PZ. Généralement, l'incorporation de (30 % de FC, 30 % de PZ et 40 % de LT) dans le liant conduit à une amélioration de la fluidité respectivement de (20.97, 19.35 et 14.51 %) par comparaison au BAP de 100 % ciment.

Cette amélioration due à la présence des additions minérales est habituellement attribuée, d'un côté, à leurs particules les plus fines qui peuvent remplir les vides entre les grains grossiers du ciment et libérer l'eau captive entre eux, et d'un autre côté, à leur morphologie qui présente une faible adsorption d'eau et une faible hydratation. La grande finesse des FC ainsi que leur non réactivité lors de l'hydratation tendent à améliorer beaucoup plus la fluidité. En revanche, tout excès des additions minérales par rapport à la quantité nécessaire pour combler les vides intergranulaires peut affecter la fluidité.

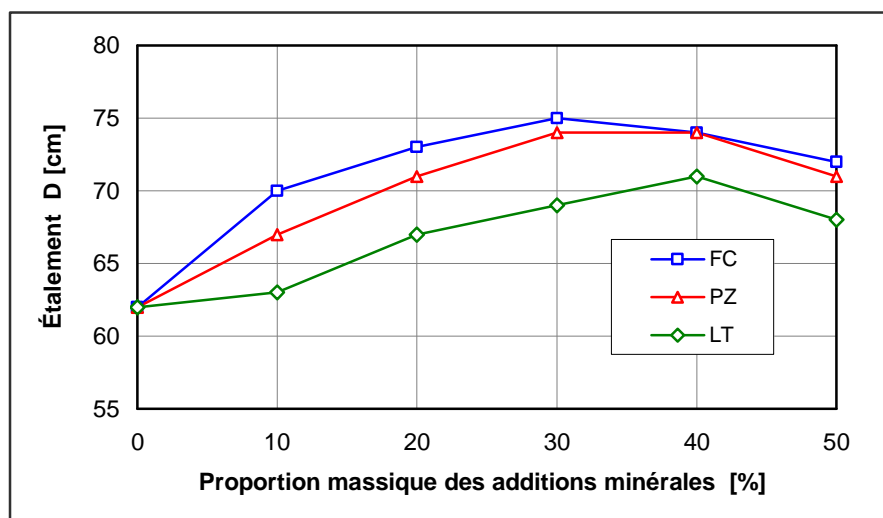


Figure 4.23 : Effet des additions minérales (FC, PZ et LT) sur la fluidité.

La figure (4.24) montre également l'influence positive des additions minérales sur la déformabilité. On remarque que l'introduction de ces additions à des proportions bien déterminées tend à améliorer le taux de remplissage. À titre d'exemple, l'augmentation des déformabilités due à l'incorporation de (30 % de FC, 40 % de PZ et 40 % de LT) dans le liant est respectivement de (27.03, 24.32 et 18.92 %) comparées à celle du BAP ne contenant que le ciment. Au-delà de ces dosages, la déformabilité a tendance à diminuer légèrement. La perte du taux de remplissage est de l'ordre de (4.26, 4.35 et 3.41 %) lorsqu'on augmente respectivement les dosages (des FC de 30 à 50 % et, les PZ et LT de 40 à 50 %).

Dans tous les cas présentés, le comportement de la déformabilité en fonction des additions minérales est associé directement à la fluidité des BAP.

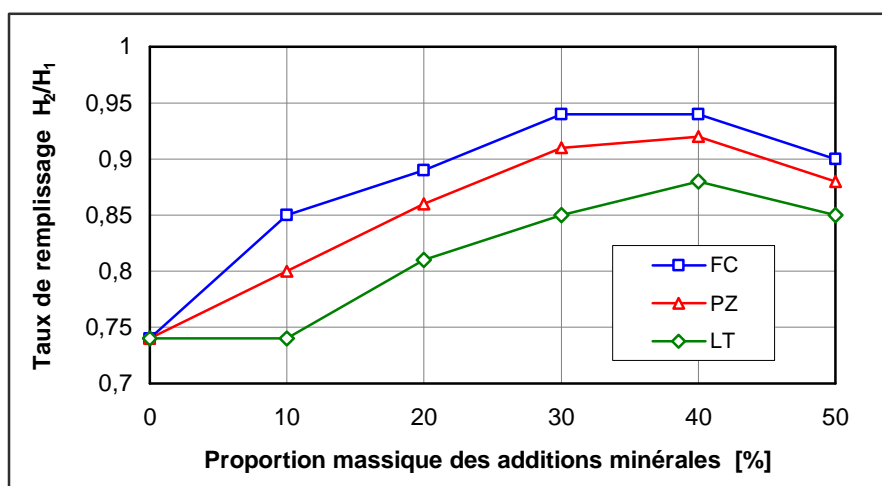


Figure 4.24 : Effet des additions minérales (FC, PZ et LT) sur la déformabilité.

L'évolution de la stabilité en fonction des additions minérales est bien illustrée sur la figure (4.25). Il apparaît que la stabilité des BAP est améliorée systématiquement avec l'introduction des additions minérales. On note également que la plus importante amélioration est obtenue avec l'utilisation des FC. En effet, pour chaque type d'additions minérales (FC, PZ et LT), la croissance de son dosage de 0 à 50 % résulte en une diminution de l'indice de ségrégation respectivement de (48.88, 33.33 et 27.41 %).

Ce résultat s'explique du fait que les grains des additions minérales améliorent la granulométrie et la compacité des BAP, ce qui peut donner une stabilité accrue [33]. Également, ces grains peuvent augmenter la cohésion et la viscosité des BAP, ce qui rend très difficile de dissocier les constituants les uns des autres.

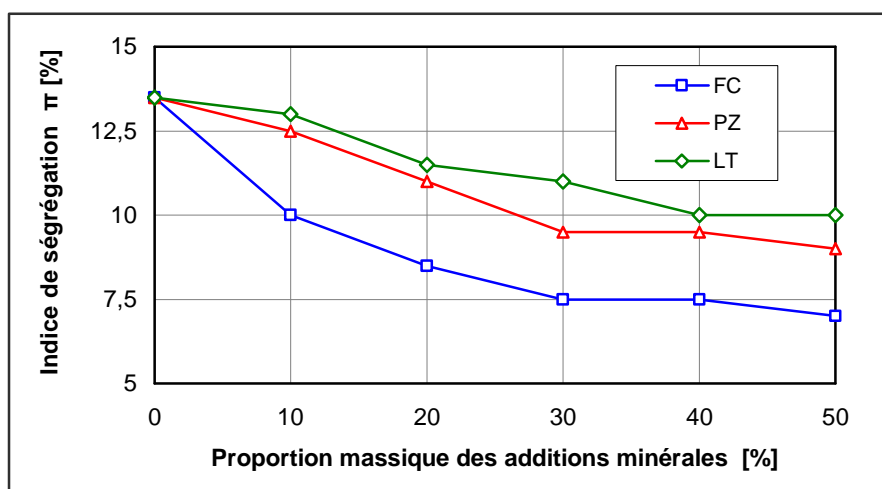


Figure 4.25 : Effet des additions minérales (FC, PZ et LT) sur la stabilité.

L'influence négative des additions minérales sur la résistance à la compression est démontrée à la figure (4.26). On s'aperçoit que la résistance s'avère inversement proportionnelle au dosage en additions minérales, quelque soit le type employé. En effet, les BAP confectionnés acquièrent une perte de la résistance de 35.92, 36.89 et 28.16 % due à l'augmentation des (FC, PZ et LT) respectivement de 0 à 50 %. Ce résultat s'explique par le fait que l'introduction d'une masse d'additions minérales plus grande est accompagnée par une diminution de la quantité de ciment et, par conséquent, conduit à un rapport E/C plus élevé. Cette modification se traduit également par une réduction de volume d'hydrates formés d'où des résistances plus faibles. Par ailleurs, on peut remarquer que les BAP à base de LT sont les plus résistants du fait que ce LT s'hydrate plus rapidement que les autres additions minérales. En outre, bien que le FC est considéré comme une addition inerte, ses BAP possèdent des résistances plus élevées que celles des BAP contenant les PZ. Ceci s'explique par une grande finesse des FC, qui peut améliorer beaucoup plus la compacité et l'adhérence de la pâte de ciment hydraté avec les granulats.

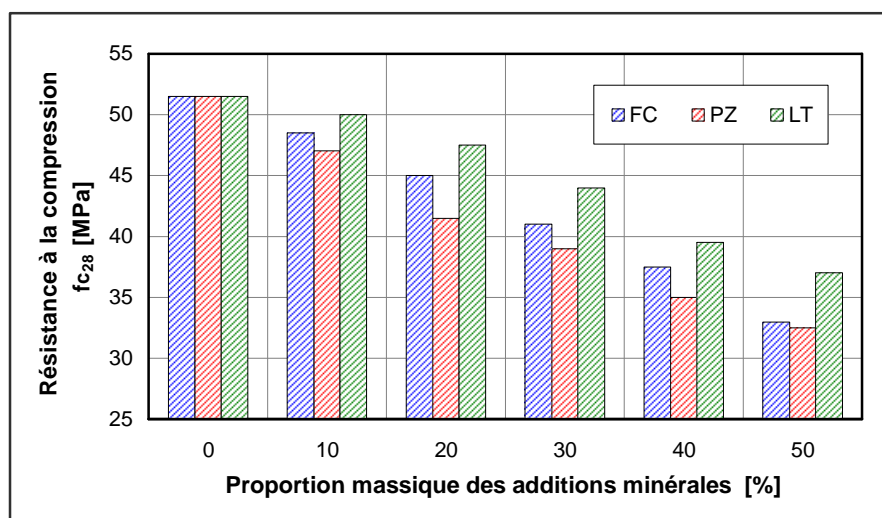


Figure 4.26 : Effet des additions minérales (FC, PZ et LT) sur la résistance à la compression.

Les résultats obtenus montrent que l'incorporation des additions minérales peut avoir un effet bénéfique sur les paramètres de la maniabilité. La résistance est variable en fonction du type d'addition utilisée, mais, globalement, toutes ces additions ont un effet de diminution de la résistance. En outre, il convient de dire que, sauf le mélange à base de ciment et ceux qui contiennent 10 % de LT ou PZ, tous les autres mélanges établis dans cette étape sont effectivement autoplaçants.

Les dosages en additions minérales optimisés pour notre formulation sont ; (30 % de FC, 30 % de PZ et 40 % de LT) par rapport à la masse totale du liant. Ces dosages offrent les meilleures propriétés rhéologiques tout en assurant des résistances ≥ 39 MPa.

Pratiquement, les chercheurs ont utilisé dans leurs BAP un dosage en FC de 30 à 40 % [33] [60] et un dosage en LT de 40 à 50 % [33] [50] [55]. Malheureusement, l'exploitation des PZ dans la confection des BAP n'a fait l'objet d'aucune étude.

b. Optimisation de la fumée de silice

À cette étape, il s'agit de confectionner douze BAP optimisés (290 l de gravillons, S/P = 0.75 et E/L = 0.35), en faisant varier le dosage en fumée de silice et en SP %. L'ajout de la fumée de silice au ciment se fait par des pourcentages massiques de 0 à 10 % de liant, par pas de 2 %. Pour chaque mélange formulé, nous avons introduit un SP % moyen de 1.3 et un autre plus élevé de 1.8. Les dosages de constituants de tous les bétons réalisés lors de cette phase sont détaillés au *tableau (4.7)*.

Tableau 4.7 : Compositions des bétons destinés à l'optimisation de la FS.

N°	Nature du liant [%]	SP %	SP [kg/m ³]	Ciment [kg/m ³]	FS [kg/m ³]	E [kg/m ³]	E/C																																																										
1	100 C	1.3	7.71	593.3	0	207.7	0.35																																																										
2		1.8	10.68					3	98 C + 2 FS	1.3	7.66	577.7	11.79	206.3	0.36	4	1.8	10.61	5	96 C + 4 FS	1.3	7.61	562.2	23.43	205	0.36	6	1.8	10.54	7	94 C + 6 FS	1.3	7.57	547	34.92	203.7	0.37	8	1.8	10.47	9	92 C + 8 FS	1.3	7.52	532	46.26	202.4	0.38	10	1.8	10.41	11	90 C + 10 FS	1.3	7.47	517.1	57.46	201.1	0.38	12	1.8	10.34	Dosage des gravillons = 759.8 kg/m ³ Dosage du sable = 772.9 kg/m ³		
3	98 C + 2 FS	1.3	7.66	577.7	11.79	206.3	0.36																																																										
4		1.8	10.61					5	96 C + 4 FS	1.3	7.61	562.2	23.43	205	0.36	6	1.8	10.54	7	94 C + 6 FS	1.3	7.57	547	34.92	203.7	0.37	8	1.8	10.47	9	92 C + 8 FS	1.3	7.52	532	46.26	202.4	0.38	10	1.8	10.41	11	90 C + 10 FS	1.3	7.47	517.1	57.46	201.1	0.38	12	1.8	10.34	Dosage des gravillons = 759.8 kg/m ³ Dosage du sable = 772.9 kg/m ³				S/P = 0.75 E/L = 0.35									
5	96 C + 4 FS	1.3	7.61	562.2	23.43	205	0.36																																																										
6		1.8	10.54					7	94 C + 6 FS	1.3	7.57	547	34.92	203.7	0.37	8	1.8	10.47	9	92 C + 8 FS	1.3	7.52	532	46.26	202.4	0.38	10	1.8	10.41	11	90 C + 10 FS	1.3	7.47	517.1	57.46	201.1	0.38	12	1.8	10.34	Dosage des gravillons = 759.8 kg/m ³ Dosage du sable = 772.9 kg/m ³				S/P = 0.75 E/L = 0.35																				
7	94 C + 6 FS	1.3	7.57	547	34.92	203.7	0.37																																																										
8		1.8	10.47					9	92 C + 8 FS	1.3	7.52	532	46.26	202.4	0.38	10	1.8	10.41	11	90 C + 10 FS	1.3	7.47	517.1	57.46	201.1	0.38	12	1.8	10.34	Dosage des gravillons = 759.8 kg/m ³ Dosage du sable = 772.9 kg/m ³				S/P = 0.75 E/L = 0.35																															
9	92 C + 8 FS	1.3	7.52	532	46.26	202.4	0.38																																																										
10		1.8	10.41					11	90 C + 10 FS	1.3	7.47	517.1	57.46	201.1	0.38	12	1.8	10.34	Dosage des gravillons = 759.8 kg/m ³ Dosage du sable = 772.9 kg/m ³				S/P = 0.75 E/L = 0.35																																										
11	90 C + 10 FS	1.3	7.47	517.1	57.46	201.1	0.38																																																										
12		1.8	10.34																																																														
Dosage des gravillons = 759.8 kg/m ³ Dosage du sable = 772.9 kg/m ³				S/P = 0.75 E/L = 0.35																																																													

Résultats et discussions

La variation de la fluidité des bétons contenant différents dosages en fumée de silice est présentée dans *la figure (4.27)*. En comparant son effet sur l'étalement des mélanges ayant des SP % moyen et élevé, on s'aperçoit que l'incorporation de la FS dans le liant peut améliorer ou affecter leur fluidité.

En effet, avec un SP % moyen de 1.3, il apparaît que l'ajout de la FS provoque une perte de fluidité. Cette perte est plus importante lorsque le dosage en FS dépasse 4 %. À titre d'exemple, on remarque une diminution de l'étalement de 6.45 % seulement si la proportion massique de FS augmente de 0 à 4 %, tandis qu'elle est de l'ordre de 20,69 et 17,39 % quand cette proportion varie respectivement de 4 à 8 % et de 8 à 10 %.

Par contre, lorsqu'on passe du SP % de 1.3 à un autre plus élevé de 1.8, en ajoutant plus de superplastifiant, on remarque que l'introduction de la FS jusqu'à un dosage de 8 % tend à augmenter la fluidité. L'utilisation de ce dosage est susceptible d'améliorer l'étalement de 23.19 % par rapport à celui de mélange ne contenant que le ciment. Néanmoins, au-delà de 8 %, la fluidité est abaissée de 5.88 % avec la croissance de dosage en FS à 10 %.

Il convient de noter que l'influence de la FS sur la fluidité dépend surtout du dosage en superplastifiant utilisé. Si le béton ne contient pas un SP % suffisant pour disperser totalement l'ensemble des grains de liant, l'ajout de la FS n'aide pas à améliorer la fluidité, au contraire, il entraîne une autre floculation à la suspension du liant et diminue, par conséquent, la fluidité.

Par contre, si le béton contient suffisamment de superplastifiant, alors la FS agit par son effet physique, elle s'incère dans les vides entre les particules du ciment et libère aisément l'eau captivée dans ces vides, ce qui améliore donc la fluidité.

Également, on peut dire que l'effet de la FS sur la fluidité dépend étroitement des pourcentages employés. Le dosage de 8 % semble plus efficace car il nécessite un SP % raisonnable. Néanmoins, des dosages en FS de plus de 8 % peuvent augmenter le besoin en superplastifiant pour fluidifier mieux les mélanges, ce qui augmente beaucoup plus le coût de nos formulations.

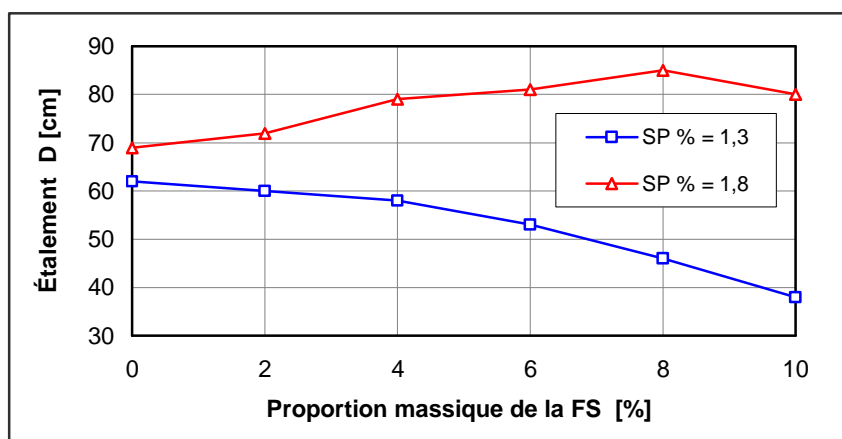


Figure 4.27 : Effet de la fumée de silice sur la fluidité.

La figure (4.28) donne des courbes qui présentent l'influence de la fumée de silice sur la déformabilité. L'analyse de ce graphique montre que l'introduction de cette addition dans le liant peut accroître ou diminuer la déformabilité des mélanges, selon le dosage en superplastifiant employé. En effet, avec un SP % moyen de 1.3, on remarque que plus le dosage en FS augmente, plus le taux de remplissage diminue. L'incorporation de 10 % de FS, par exemple, dans le liant tend à provoquer une perte de déformabilité de 63.51 % par rapport à celle du béton ne contenant que le ciment. Par contre, si le SP % passe de 1.3 à 1.8, on observe que l'ajout de la FS jusqu'à un dosage de 8 % est susceptible d'améliorer la déformabilité, qui peut être parfaite. Cette amélioration est de l'ordre de 20.48 % lorsque le dosage en FS augmente de 0 à 8 %. Au-delà, la déformabilité n'est plus influencée et reste maximale à un dosage de 10 %. On peut penser que ce comportement est lié directement à la fluidité des bétons.

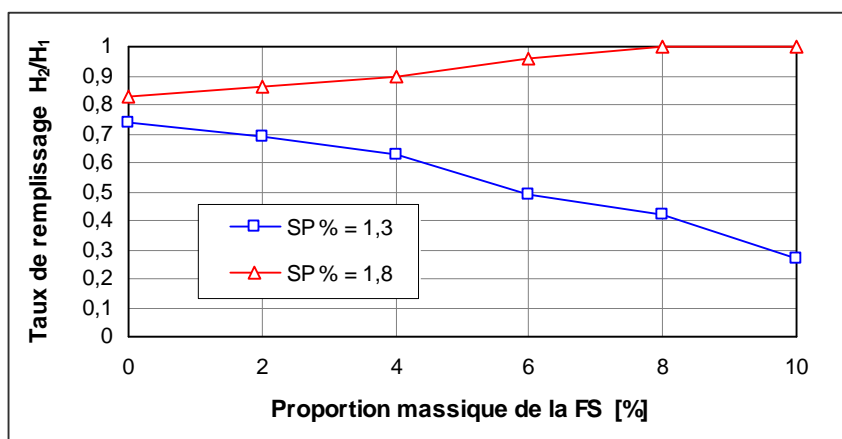


Figure 4.28 : Effet de la fumée de silice sur la déformabilité.

L'influence de la fumée de silice sur la stabilité est illustrée sur *la figure (4.29)*. On constate que l'introduction de cette addition dans le liant tend à améliorer la stabilité des mélanges. Cette amélioration est plus évidente dans le cas des mélanges contenant moins du superplastifiant. En effet, avec un SP % de 1.3, l'augmentation du dosage en FS de 0 à 10 % résulte à une réduction de l'indice de ségrégation de 78.03 %. Cependant, lorsque le SP % passe à 1.8, la même augmentation de la FS conduit à une légère diminution de l'indice de ségrégation de 36.88 %.

Généralement, grâce à leur extrême finesse, les grains de la FS ont la capacité de se fixer très peu aux granulats, ce qui augmente la cohésion du mélange et en même temps la stabilité. Mais, il reste à dire que cette augmentation dépend en grande partie de SP % employé, ou en d'autre terme de la fluidité initiale du mélange.

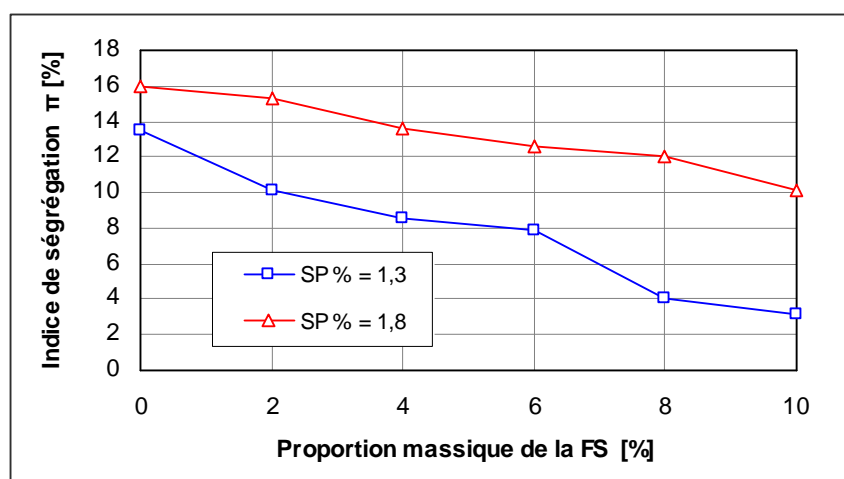


Figure 4.29 : Effet de la fumée de silice sur la stabilité.

L'effet de la fumée de silice sur la résistance à la compression est démontré dans *la figure (4.30)*. Il est possible de constater que cette résistance est une fonction croissante du dosage en FS, quelque soit la teneur de superplastifiant employée. En effet, pour les deux SP % de 1.3 et 1.8, il apparaît que l'incorporation de 10 % de FS porte une amélioration de la résistance de 25 % d'environ par rapport aux mélanges ne contenant que le ciment. Ce résultat s'explique du fait que les particules de FS peuvent améliorer le remplissage des vides intergranulaires, ainsi qu'elles agissent comme fillers et améliore l'adhérence de la pâte de ciment hydraté avec les granulats, plus particulièrement avec les gros, ce qui permet aux granulats de mieux participer à l'interface des contraintes [42].

Par ailleurs, on remarque généralement que les mélanges contenant un SP % de 1.3 possèdent des résistances légèrement supérieures à celles des mélanges confectionnés avec un SP % de 1.8. Ceci est dû principalement à la perte de stabilité provoquée par l'addition d'une quantité supplémentaire de superplastifiant aux mélanges.

Il convient de noter que l'ajout de 8 à 10 % de FS dans le liant nous offre des bétons à haute performance BHP (résistance à la compression supérieure à 60 MPa).

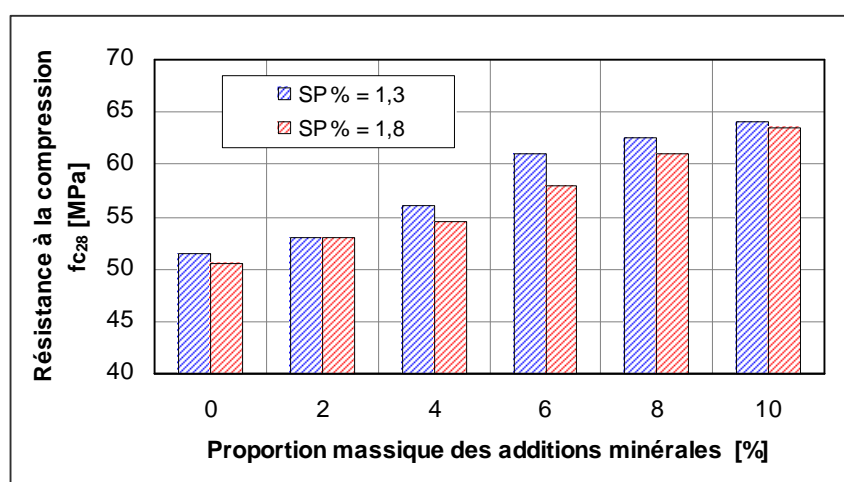


Figure 4.30 : Effet de la fumée de silice sur la résistance à la compression.

Les résultats obtenus démontrent que l'incorporation de la FS dans le liant peut avoir un effet bénéfique sur la fluidité et la déformabilité uniquement dans le cas où le SP % est élevé. Cette opération permet d'améliorer la stabilité et en plus la résistance à la compression quelque soit le SP % utilisé.

Il est à noter que, durant cette étape, on a pu confectionné quatre BAP seulement. Ce sont les mélanges qui comportent des dosages en FS par rapport à la masse du liant de (4, 6, 8, et 10 %), avec un SP % de 1.8.

On optimise, pour nos formulation, une proportion massique de FS égale 0.8 % et bien sûr avec un SP % de 1.8, car elle peut favoriser une résistance similaire à celle des bétons à haute performance.

Ce résultat semble très proche à celui de M. Sonebi [55] qui a choisi pour la formulation des BAP à hautes performances destinées aux travaux de réparation sous l'eau, un dosage en FS de 10 % du poids de ciment

4.5.1.6 Optimisation des dosages en superplastifiant et en agent colloïdal

Il est très évident que nous avons pu développer une certaine formulation des BAP sans utiliser d'agent colloïdal. Mais nous poursuivons l'étude afin de mieux comprendre l'effet du superplastifiant et de l'agent colloïdal sur les performances des BAP et améliorer beaucoup plus ses propriétés. À cet effet, nous visons chaque objectif dans une étape indépendante.

a. L'effet des SP et AC sur la maniabilité et la résistance à la compression

Afin d'examiner l'influence des dosages en SP et en AC sur les propriétés rhéologiques et la résistance, nous avons combiné le SP % et l'AC % à des dosages respectifs de (0.5 à 2.5, par pas de 0.5) et de (0 à 0.15, par pas 0.05). Les vingt combinaisons considérées sont introduites séparément, une à une, dans un béton ayant les mêmes dosages de compositions (*tableau 4.8*).

Tableau 4.8 : Bétons destinés à l'étude de l'effet du SP et AC sur la maniabilité et la résistance.

Compositions	Gravillons	Sable	Ciment	E	SP	AC
Volumes [l]	290	304.3	188.2	207.5	2.77 à 13.85 par pas de 2.77	0 à 1.778 par pas de 0.593
Dosages [kg]	759.8	772.9	592.9	207.5	2.96 à 14.82 par pas de 2.96	0 à 0.889 par pas de 0.296
SP = 0.75			E/C = 0.35			

Résultats et discussions

L'effet des dosages du SP et de l'AC sur la fluidité est présenté sur *la figure (4.31)*. En premier lieu, on voit bien que l'ajout du SP améliore significativement la fluidité. En effet, pour des AC % de 0, 0.05, 0.1, 0.15, la croissance de SP % de 0.5 à 2.5 résulte en une augmentation progressive de l'étalement de 174, 204, 160 et 105 % respectivement. Cette amélioration est due à l'action des molécules à longue chaîne du SP. Ces molécules peuvent s'enrouler autour des grains du ciment et de leur conférer une charge hautement négative, de sorte qu'ils se repoussent les uns des autres, conduisant à une défloculation

et à une dispersion des grains du ciment [42]. Cette action va libérer une quantité importante d'eau, d'où la fluidité sera accrue.

En outre, on remarque que, pour les mélanges sans AC, l'amélioration de la fluidité est limitée à un SP % de 2. Au-delà, la fluidité ne varie pratiquement plus. On peut penser donc que le SP % égal à 2 est le dosage maximum utilisable (point de saturation).

D'autre part, il semble que l'ajout d'un AC provoque une perte de la fluidité et notamment lorsque l'AC passe de 0.05 à 0.1 dans des mélanges considérés fluides ($SP \% \geq 1$). Par exemple, pour un SP de 1.5, le fait d'augmenter l'AC de 0.05 à 0.1, l'étalement diminue de 42.62 %. Cette diminution est due à l'action de l'AC qui peut augmenter la viscosité et le seuil de cisaillement des bétons, suivant plusieurs mécanismes [27].

Ces résultats semblent similaires à ceux de S. Tangtermsirikul et coll [57].

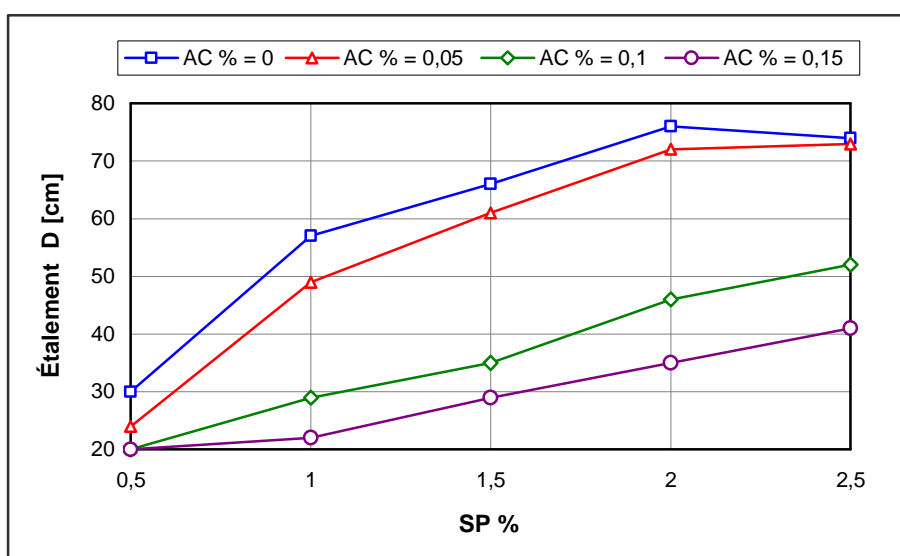


Figure 4.31 : Effet des dosages en SP et en AC sur la fluidité.

La figure (4.32) montre l'effet des dosages du SP et de l'AC sur la déformabilité. Il est possible d'observer que la variation du taux de remplissage en fonction des SP % et AC % prend presque les mêmes allures de la fluidité. On peut dire, dans ce cas, que la déformabilité dépend étroitement de la fluidité. Généralement, l'incorporation de l'AC provoque une diminution de la déformabilité qui peut être récupérée avec l'ajout du SP et notamment si l'AC % est de 0 et 1.

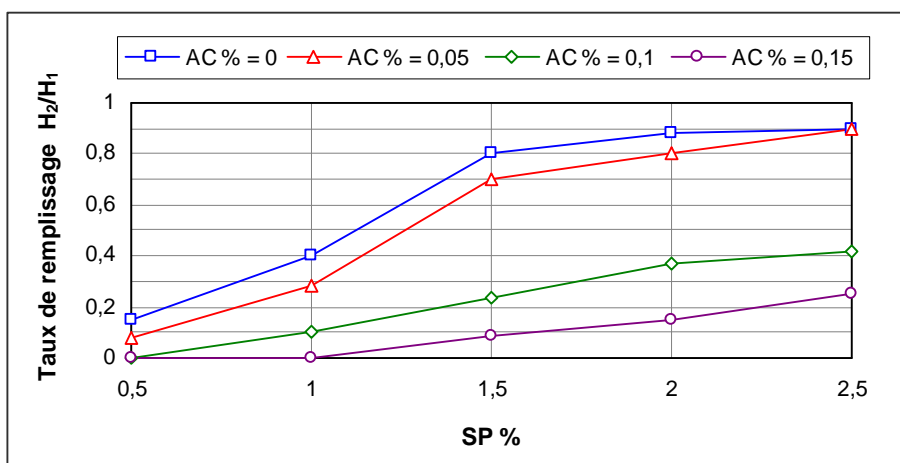


Figure 4.32 : Effet des dosages en SP et en AC sur la déformabilité.

La variation de la stabilité des bétons contenant différents dosages du SP et de l'AC est bien illustrée sur la figure (4.33). À prime abord, on observe que l'incorporation de l'AC conduit à une grande amélioration de la stabilité. En effet, il est évident que, pour les différents SP % considérés, les bétons établis avec des AC % de 0.1 et 0.15 offrant la meilleure stabilité, qui est estimée par un indice de ségrégation ne dépassant pas 4 %. Cette amélioration est due à l'augmentation de la viscosité des mélanges.

Par contre, on remarque que, pour des AC % de 0 et 0.05, l'augmentation du SP provoque une grande perte de stabilité. À titre d'exemple, pour des bétons sans AC, l'indice de ségrégation s'accroît progressivement de 277 % en fonction de l'augmentation du SP % de 0.5 à 0.25. Néanmoins, l'ajout du SP n'influe pas sur la stabilité si les AC % égalent 0.1 et 0.15, qui peuvent empêcher toute ségrégation.

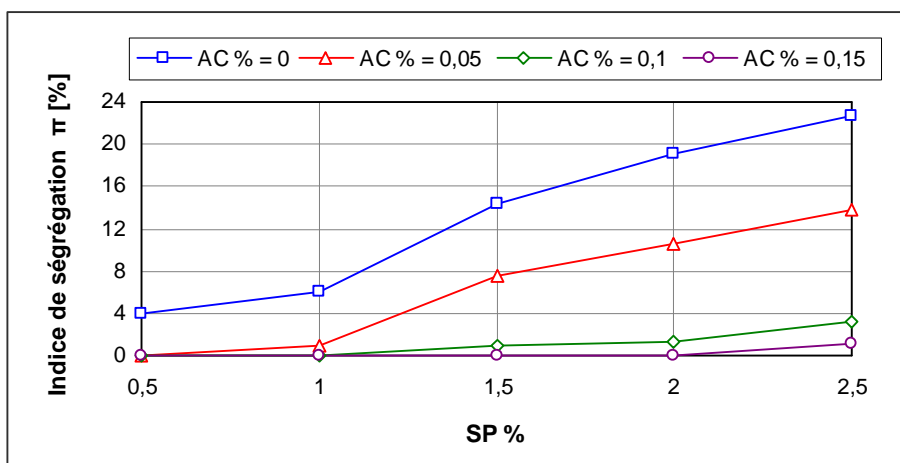


Figure 4.33 : Effet des dosages en SP et en AC sur la stabilité.

La figure (4.34) présente l'évolution de la résistance à la compression en fonction des dosages du SP et de l'AC. Tout d'abord, il est très évident que tous les mélanges de (SP % = 0.5) et ceux de (SP % = 0.1 avec un AC % = 0.1 ou 0.15) possèdent des résistances très faibles, ne dépassant pas 11.5 MPa. Ces résistances sont engendrées à cause de la présence du volume des vides très important dans les éprouvettes, ce qui est engendré par l'insuffisance de la fluidité et l'absence de vibration lors du coulage.

Au-delà de ces dosages inutilisables, l'ajout de l'AC contribue à l'amélioration de la résistance. En effet, les mélanges confectionnés avec SP % de 1.5, 2, 2.5 acquièrent une augmentation de la résistance respectivement de 9.62, 11.76 et 12.87 % lorsque le AC % s'accroît de 0 à 0.15.

Par contre, l'addition du SP provoque une légère diminution de la résistance qui peut être limitée avec un AC % de 0.1. On pense que l'augmentation ou la diminution de la résistance est liée directement à l'évolution de la stabilité.

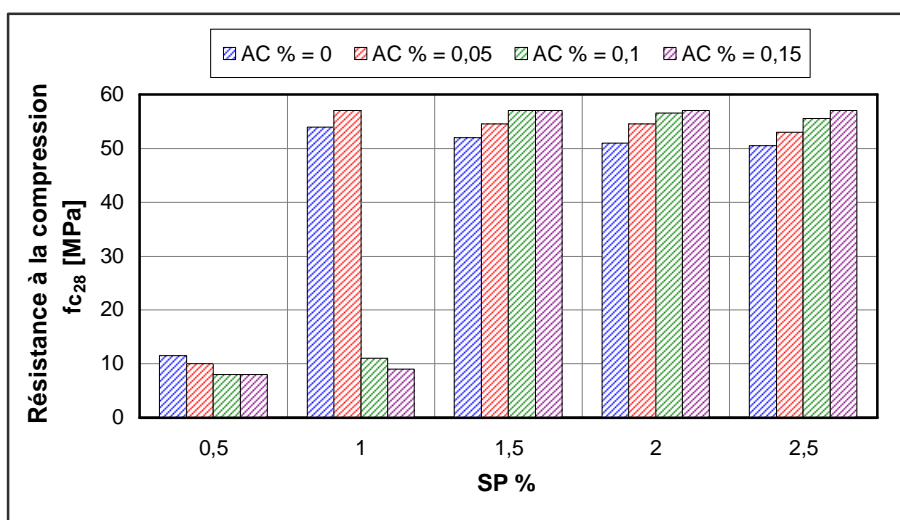


Figure 4.34 : Effet des dosages en SP et en AC sur la résistance à la compression.

Les résultats obtenus durant cette étape montre les effets contradictoires du SP et l'AC sur les propriétés du béton. En fait, l'incorporation du SP augmente la fluidité et la déformabilité, mais elle diminue la stabilité et légèrement la résistance. Par contre, l'ajout de l'AC agit tout à fait contrairement. La perte de la fluidité et de la déformabilité engendrée par l'ajout d'un AC peut être récupérée par l'addition d'un SP sans nuire à la stabilité et à la résistance des mélanges. Cependant, pour des AC % élevés, l'effet du SP est limité, ou en d'autre terme, il est lié principalement au AC % utilisé.

b. Sélection du dosage de combinaison (SP, AC)

Cette phase consiste à améliorer d'autant plus les performances des BAP par l'utilisation des combinaisons adéquates de (SP %, AC %). À cet effet, nous avons modifié le SP %, pour chaque AC % utilisé (0 à 0.05, par pas de 0.01), de façon à ajuster la fluidité à un étalement de 80 cm. Ensuite, nous avons mesuré les autres propriétés des BAP. Notons que les cinq combinaisons considérées sont introduites dans trois BAP optimisés ayant des dosages en additions minérales de (30 % FC, 30 % PZ et 40 % LT) par rapport au poids de liant (*section 4.5.1.5.a*).

Résultats et discussions

La figure (4.35) montre l'évolution du dosage en SP nécessaire pour atteindre un étalement de 80 cm en fonction du dosage en AC. Il est possible de constater que l'incorporation de l'AC dans les BAP nécessite plus de SP pour garantir une fluidité donnée. En effet, lorsque l'AC % augmente de 0 à 0.05, on doit ajouter une quantité supplémentaire de SP de 3.1, 3.42 et 3.96 kg/m³ dans les BAP respectifs de (30 % FC, 30 % PZ et 40 % LT). L'augmentation du dosage en SP est due à la perte de fluidité engendrée par l'ajout de l'AC.

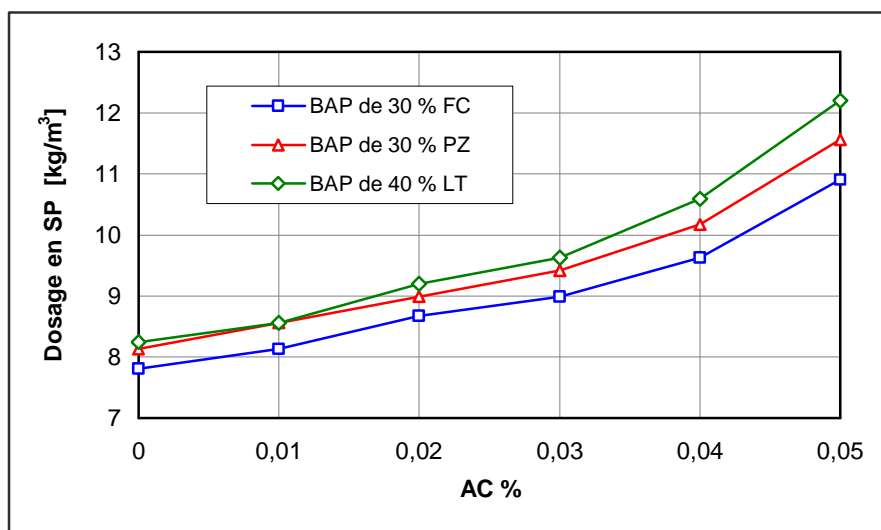


Figure 4.35 : Le dosage en SP nécessaire pour atteindre un étalement de 80 cm en fonction du dosage en AC.

La figure (4.36) présente l'effet de l'AC % sur la déformabilité des BAP ayant un étalement de 80 cm. On peut remarquer que, pour une fluidité constante garantie par l'addition du SP, l'augmentation de l'AC % permet d'améliorer la déformabilité. Le taux de remplissage de tous les BAP devient optimum avec un AC % de 0.03.

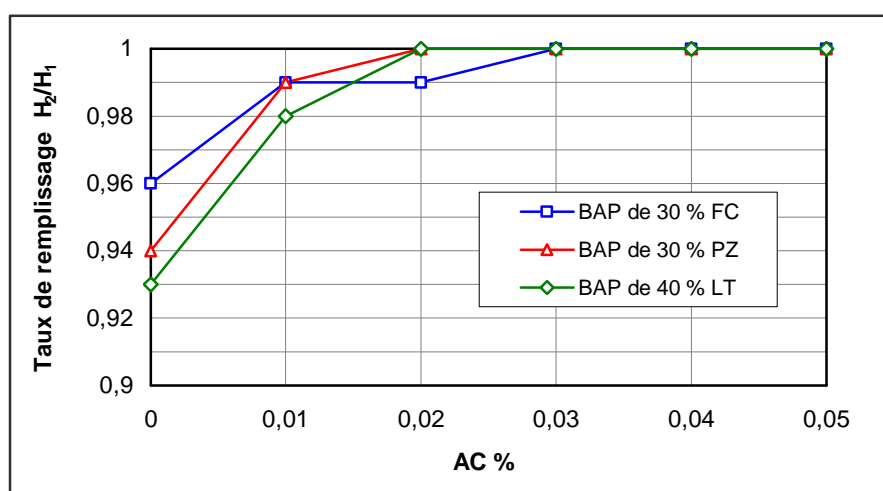


Figure 4.36 : Effet de l'AC sur la déformabilité des BAP ayant un étalement de 80 cm.

L'effet de l'AC sur la stabilité des BAP ayant un étalement de 80 cm est illustré sur la figure (4.37). On remarque aussi que, à une même fluidité, il est possible d'obtenir une stabilité accrue en ajoutant l'AC. L'augmentation de l'AC de 0 à 0.05 réduit l'indice de ségrégation de 90 % environ pour les trois BAP étudiés. Cependant, l'amélioration de la stabilité est d'autant plus significative lorsque l'AC ne dépasse pas 0.03.

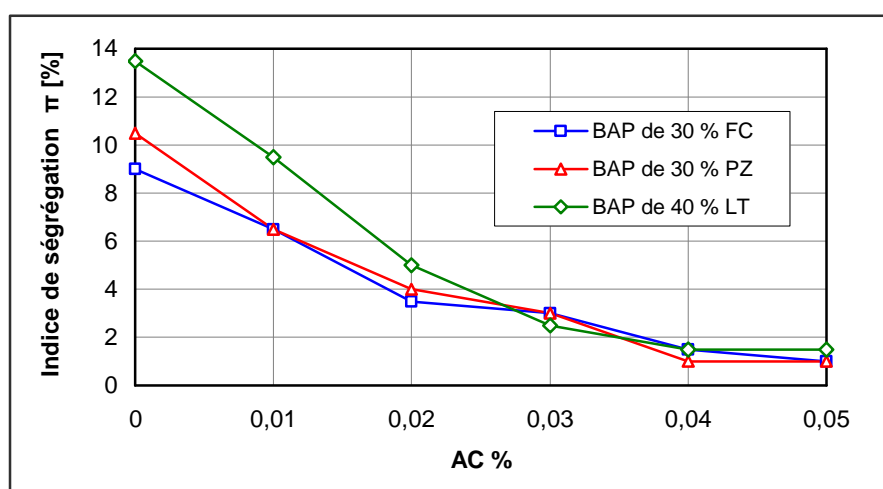


Figure 4.37 : Effet de l'AC sur la stabilité des BAP ayant un étalement de 80 cm.

L'évolution de la résistance à la compression des BAP ayant un étalement de 80 cm en fonction de l'AC est présentée sur la figure (3.38). Il est évident que, pour une fluidité égale, l'incorporation de l'AC améliore légèrement la résistance des BAP. Cependant, cette amélioration est limitée à un AC % de 0.03 du fait que la stabilité des BAP ne varie plus au-delà de ce dosage. Rappelons que l'AC augmente la résistance par l'amélioration de la stabilité.

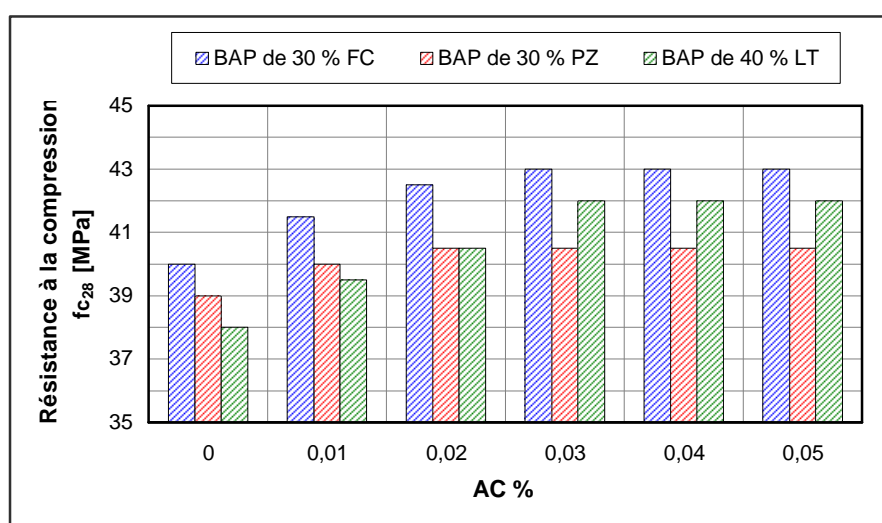


Figure 4.38 : Effet de l'AC sur la résistance à la compression des BAP ayant un étalement de 80 cm.

D'après les résultats obtenus, il convient de dire que le SP % adéquat pour garantir une fluidité donnée dépend essentiellement de l'AC % utilisé. En plus, l'incorporation de l'AC, pour une fluidité égale, permet d'améliorer beaucoup plus la maniabilité et la résistance à la compression des BAP.

Pour la formulation de nos BAP, on adopte un AC % égale 0.03, car il est suffisant pour assurer de meilleures propriétés ainsi qu'avec ce dosage, les BAP contenant (30 % FC, 30 % PZ et 40 % LT) nécessitent des SP % raisonnables de (1.57, 1.62, et 1.66) respectivement.

Ces résultats semblent divergents à ceux de K.H. Khayat [33] qui a optimisé pour ses BAP un AC % de 0.075. M. Sonebi [55] a également adopté un AC % de 0.07 pour des BAP destinées aux travaux de réparation sous l'eau.

4.5.2. Évaluation des propriétés mécanique des BAP optimisés

Après avoir développé certaines formulations des BAP, cette section porte sur la caractérisation de leurs performances à l'état durci telles que ; la résistance aux différents âges, la résistance à la traction, le module élastique et le retrait. Pratiquement, il serait logique de comparer ces propriétés avec celles des BO ayant une résistance très proche, car c'est souvent la première caractéristique d'un cahier de charge de chantier.

Au total, neuf bétons ont été testés, sept BAP optimisés et deux BO. *Le tableau (4.9)* regroupe leurs dosages de compositions ainsi que leurs résistances.

Il est à noter que la détermination du retrait se fait sur des mortiers dérivés de chaque béton, en éliminant le dosage des gravillons.

Tableau 4.9 : Compositions des BAP optimisés et des BO.

Désignation	Ciment [kg/m ³]	AM [kg/m ³]	E [kg/m ³]	SP [kg/m ³]	AC [g/m ³]	E/C	$f_{c_{28}}$ [MPa]
BAP (30 FC)	400.4	171.6	200.2	7.44	0	0.5	41
BAP (30 FC / 0.03 AC)	400.4	171.6	200.2	8.99	172	0.5	43
BAP (30 PZ)	406.4	174.2	203.2	7.55	0	0.5	39
BAP (30 PZ / 0.03 AC)	406.4	174.2	203.2	9.42	174	0.5	40.5
BAP (40 LT)	345.9	230.6	201.7	7.49	0	0.58	39.5
BAP (40 LT/0.03 AC)	345.9	230.6	201.7	9.63	173	0.58	42
BAP (8 FS)	532	46.26	202.4	10.41	0	0.38	61
Dosage des gravillons = 759.8 kg/m ³ Dosage du sable = 772.9 kg/m ³			S/P = 0.75 E/L = 0.35				
Désignation	Gravillons [kg/m ³]	Sable [kg/m ³]	Ciment [kg/m ³]	E [kg/m ³]	SP [kg/m ³]	E/C	$f_{c_{28}}$ MPa
BO 41	1150	634	380	171	1.9	0.45	41
BO 60	1118	621	500	150	5	0.3	60

4.5.2.1. La résistance à la compression aux différents ages

La figure (4.39) met en évidence la résistance à la compression des BAP optimisés et des BO à court et long terme. Concernant la résistance au bout de 7 j, on observe que tous les BAP optimisés, sauf ceux contenant le LT, développent des résistances plus élevées que les BO. À titre d'exemple, la résistance à 7 j de BAP (8 FS) et BAP (30 FC) est supérieure de 10.64 et 7.69 % respectivement à celle de BO correspondant. Les BAP à base de LT ne favorisent pas des résistances à 7 j similaires au BO car ils contiennent un dosage du ciment un peu faible. Ainsi, le LT n'a pas encore le temps pour pouvoir contribuer à l'augmentation de la résistance.

À long terme 90 j, on remarque que les BAP optimisés continuent à donner des résistances plus élevées que les BO et, cette fois, même avec les BAP contenant le LT, qui possèdent des résistances supérieures de 25 % environ à celle du BO 41. Cependant, le gain de la résistance n'est pas évident avec les BAP à base de FC, qui présentent des résistances à 90 j analogues au BO. Généralement, toutes les additions minérales, à part des FC (addition inerte), contribuent à l'hydratation et notamment à long terme par leur propriété pouzzolanique.

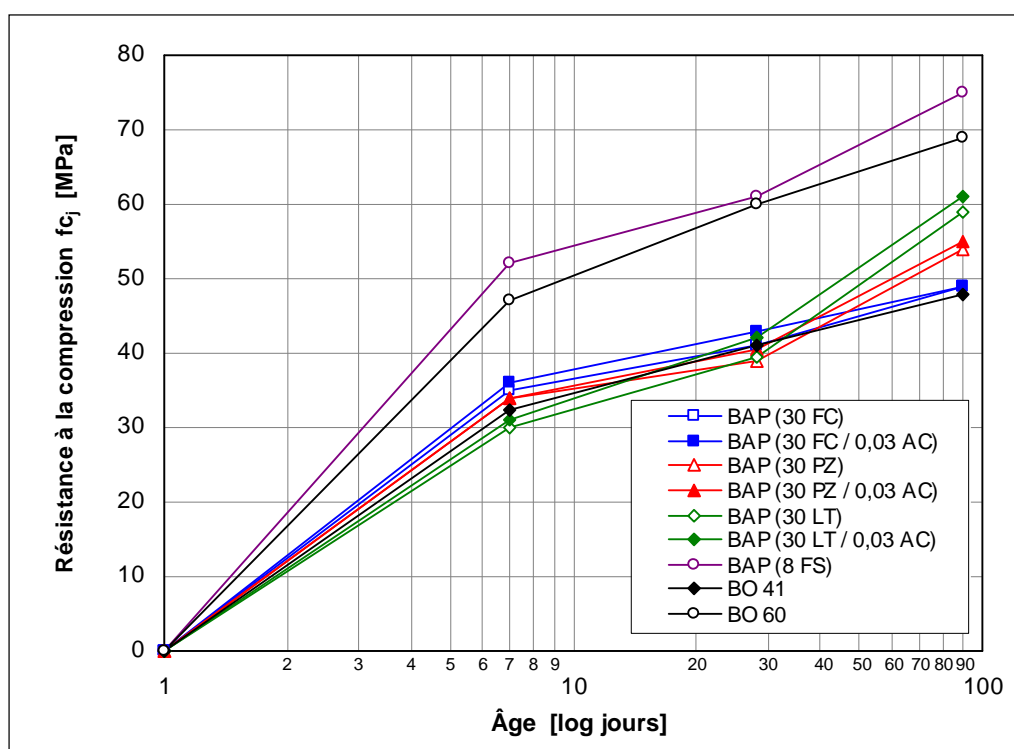


Figure 4.39 : Évolution de la résistance à la compression des BAP optimisés et des BO en fonction des jours.

4.5.2.2. La résistance à la traction

La figure (4.40) présente la résistance à la traction à 28 j des BAP optimisés et des BO. On voit très bien que tous les BAP développent des résistances à la traction légèrement supérieures à celle des BO. Le gain de résistance se situe entre 3.1 et 21.9 %. Le rapport entre les résistances à la traction et à la compression pour l'ensemble des BAP est de 0.086 tandis qu'il est de 0.079 pour les BO. Cette tendance s'explique par le fait que les BAP sont plus homogènes et caractérisés par une grande uniformités des propriétés.

Des études antérieures ont également montré le même résultat [13] [22].

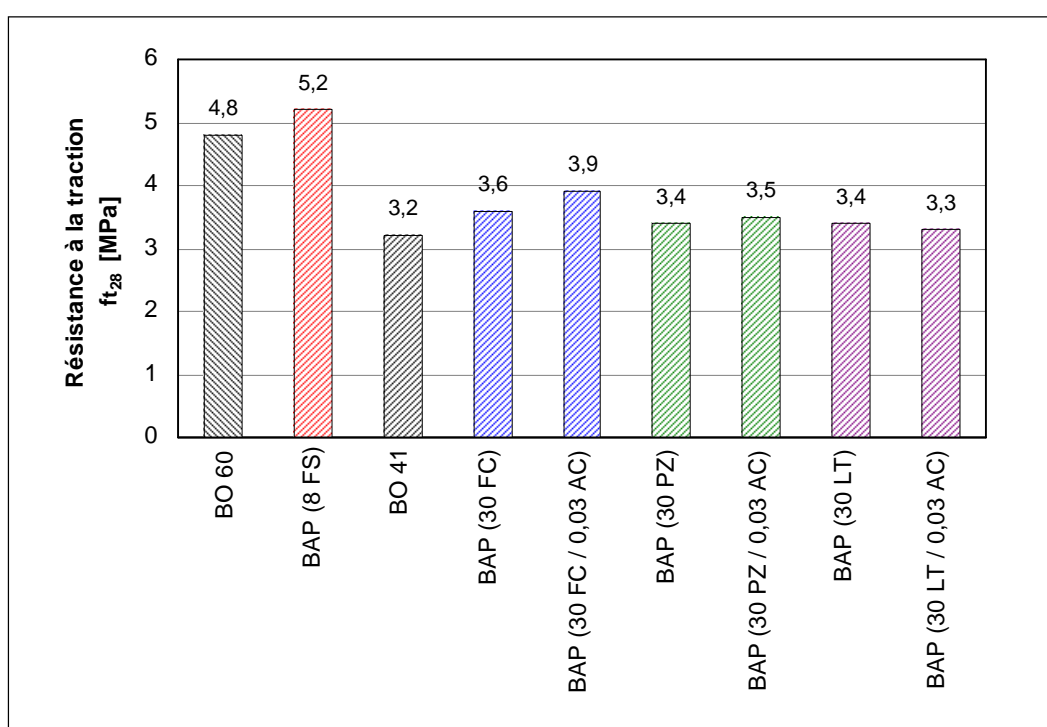


Figure 4.40 : Résistance à la traction à 28 j des BAP optimisés et des BO.

4.5.2.3. Le module élastique

La figure (4.41) donne le module élastique à 28 j des BAP optimisés et des BO. Il est possible de remarquer que le module élastique de tous les BAP est systématiquement inférieur à celui du BO correspondant. La différence n'est toutefois pas très importante, puisqu'elle se situe entre 9.1 et 18.2 %. Généralement, le module d'élasticité est principalement affecté par la rigidité et la teneur en gravillons, c'est pourquoi les BAP sont susceptibles d'être plus déformables que les BO.

D'autre part, on peut observer que, pour tous les BAP de même gamme de résistance 41 MPa, la variation du module élastique est limitée dans une petite plage de 27 à 30 GPa du fait que leur volume des gravillons est fixe.

Les résultats obtenus sont en accord avec ceux de plusieurs études [14] [33] [60].

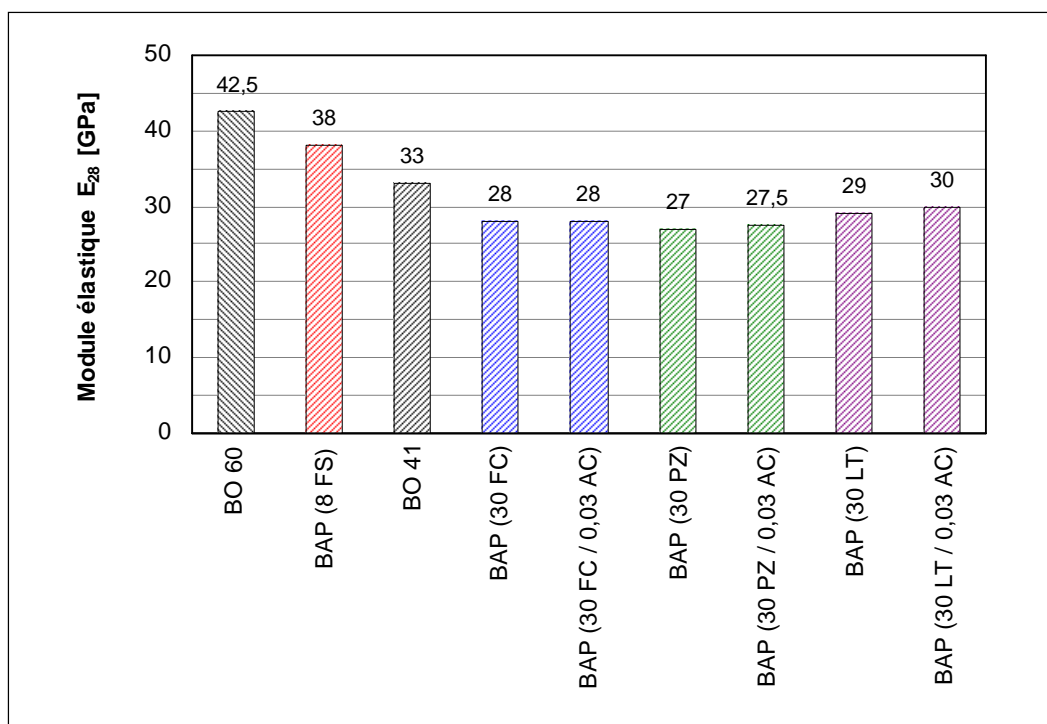


Figure 4.41 : Module élastique à 28 j des BAP optimisés et des BO.

4.5.2.4. Le retrait total

La figure (4.42) présente l'évolution du retrait des mortiers dérivés (BAP optimisés et BO) jusqu'à 90 j. On peut observer que, pour tous les jours, les BAP optimisés développent des retraits plus élevés que celui des BO. L'augmentation du retrait à 90 j des BAP de la gamme 41 MPa et le BAP (8 FS) est respectivement de 13.3 et 11.6 % par rapport au BO correspondant. Cette différence n'est pas donc très grande.

Puisque les granulats ne connaissent pas de retrait, on peut penser que le volume important de pâte dans les PAP est le principal paramètre qui va dans le sens d'une augmentation du retrait.

Plusieurs études ont également trouvé que le retrait est sensiblement supérieur dans le cas des BAP [2] [22] [37].

Il est à noter que tous les mortiers dérivés des BAP de même gamme de résistance 41 MPa possèdent la même évolution de retrait, c'est pourquoi on les présente dans une seule courbe sur le graphique.

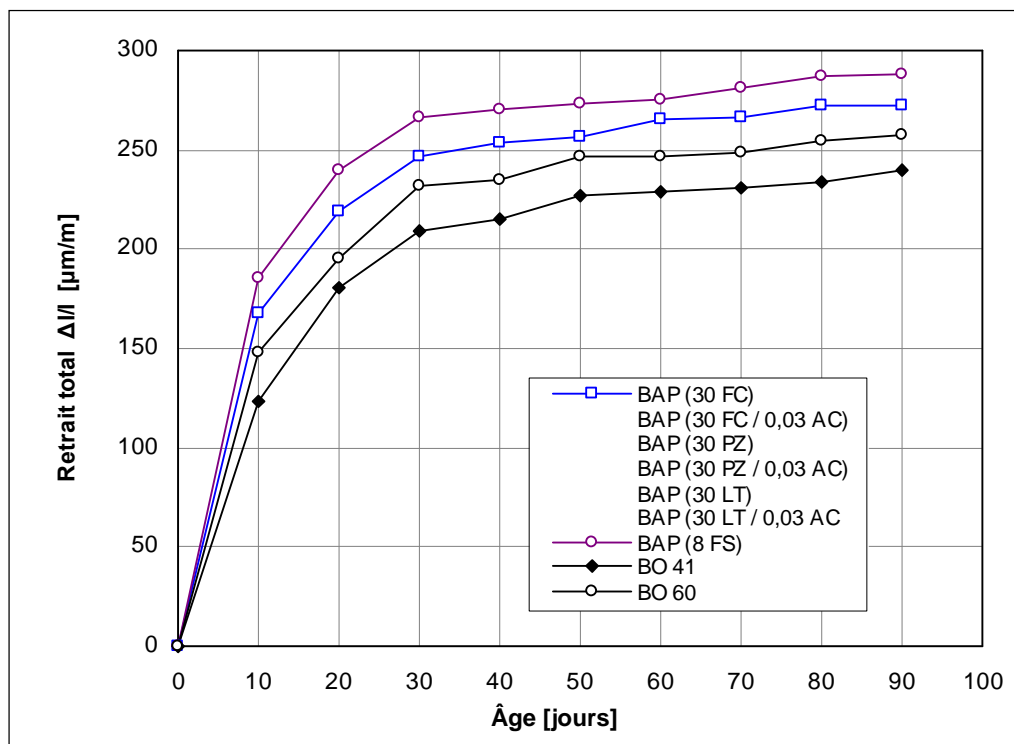


Figure 4.42 : Évolution du retrait total des mortiers dérivés (BAP optimisés et BO).

4.6. BILAN

L'objectif de ce programme expérimental était de développer un certain nombre de formulation des BAP se caractérisant par de meilleures performances rhéologiques et mécaniques. Ce programme a également fait le point sur l'effet des principaux paramètres de composition sur la maniabilité (fluidité, déformabilité et stabilité) ainsi que la résistance à la compression des BAP.

Les résultats obtenus nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- l'utilisation des gravillons roulés à la place de ceux concassés contribue à l'amélioration de la fluidité et la déformabilité, mais elle se fait au détriment de la résistance.
- L'augmentation de la taille maximale des gravillons peut augmenter la compacité et, par conséquent, la fluidité et la résistance. Malheureusement, cette augmentation détruit complètement la déformabilité et diminue légèrement la stabilité.
- La combinaison de deux classes granulométriques différentes de gravillons tend à accroître la compacité et, par conséquent, la fluidité. Elle améliore aussi la déformabilité et la stabilité. Son effet sur la résistance est considéré négligeable. La compacité maximale obtenue par cette combinaison ne favorise pas obligatoirement la meilleure fluidité.
- La granulométrie qui se caractérise par une taille maximale des gravillons de 15 mm et une combinaison massique de (30 % de 7/10 et 70 % de 7/15) semble être la plus efficace pour l'amélioration de la maniabilité tout en préservant une bonne résistance.
- Toute augmentation du volume des gravillons affecte significativement la fluidité et la déformabilité. Elle diminue aussi, au-delà de 209 l, la stabilité. De même, la résistance est abaissée avec cette augmentation.
- Il est possible de fabriquer un BAP en utilisant un faible volume des gravillons, estimé de 290 l.
- Tous les paramètres de la maniabilité et même la résistance sont affectés par l'accroissement du rapport S/P. Il est important alors qu'il soit abaissé de façon que nous puissions facilement confectionner des BAP.

- l'évolution du rapport E/C permet en général d'améliorer la fluidité et la déformabilité mais elle affecte en même temps la stabilité et la résistance à la compression. Néanmoins, à cause de l'insuffisance de la fluidité et l'absence de vibration lors du serrage, la résistance devient très médiocre avec un faible rapport E/C de 0.25. Pour ces raisons, les BAP devraient comporter un rapport E/C tout juste suffisant pour fluidifier les mélanges.
- L'utilisation des rapports S/P de 0.75 et E/C de 0.35 assure la formulation des BAP avec une bonne résistance. Ces rapports signifient un volume de pâte et une quantité cimentaire très importants.
- l'incorporation des additions minérales telles que (FC, PZ et LT) à des proportions bien déterminées peut avoir un effet bénéfique sur les paramètres de la maniabilité. Néanmoins, cette opération se fait au détriment de la résistance.
- Les dosages en additions de (30 % de FC, 30 % de PZ et 40 % de LT par rapport au poids de liant) offrent les meilleures propriétés rhéologiques tout en assurant des résistances ≥ 39 MPa.
- L'ajout de la FS augmente la fluidité et la déformabilité uniquement dans le cas où le SP % est élevé, mais cet ajout permet d'améliorer la stabilité et la résistance quelque soit le SP % utilisé.
- Avec un dosage de FS égale 0.8 % du poids de liant et un SP % de 1.8, il est possible de formuler un BAP de haute résistance (61 MPa).
- L'ajout du SP augmente la fluidité et la déformabilité, mais elle diminue la stabilité et légèrement la résistance. Par contre, l'ajout de l'AC agit tout à fait contrairement.
- Le SP % adéquat pour garantir une fluidité donnée dépend de l'AC % utilisé. En plus, l'incorporation de l'AC, pour une fluidité égale, permet d'améliorer beaucoup plus la déformabilité, la stabilité ainsi que la résistance.
- L'utilisation d'un AC % de 0.03 est suffisante pour assurer des meilleures propriétés et avec ce dosage, les BAP nécessitent des SP % raisonnables.
- Les BAP optimisés développent des résistances à la compression à court et à long terme (7 et 90 j) ainsi que des résistances à la traction à 28 j plus élevées que celles des BO de même résistance à la compression à 28 j. Cependant, nos BAP possèdent des modules élastiques à 28 j inférieurs à ceux des BO et des retraits plus élevés, mais la différence n'est pas très importante.

Au terme de cette étude, nous présentons les formulations des BAP développés ainsi que leurs performances à l'état frais et durci sur le tableau (4.10).

Tableau 4.10 : Les formulations des BAP développés et leurs propriétés rhéologique et mécaniques.

Constituants [kg/m ³]	BAP développés						
	1	2	3	4	5	6	7
Gravillons concassés (7/15)	531.8	531.8	531.8	531.8	531.8	531.8	531.8
Gravillons concassés (7/10)	228	228	228	228	228	228	228
Sable (0/5)	772.9	772.9	772.9	772.9	772.9	772.9	772.9
Ciment (CEM II/42.5 A)	400.4	400.4	406.4	406.4	345.9	345.9	532
Addition minérale	FC 171.6	FC 171.6	PZ 174.2	PZ 174.2	LT 230.6	LT 230.6	FS 46.26
Eau efficace	200.2	200.2	203.2	203.2	201.7	201.7	202.4
Superplastifiant	7.44	8.99	7.55	9.42	7.49	9.63	10.41
Agent colloïdal	0	0.172	0	0.174	0	0.173	0
Rapport massique E/C	0.5	0.5	0.5	0.5	0.58	0.58	0.38
Rapport massique E/L	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Rapport volumique S/P	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Étalement D [cm]	75	80	74	80	71	80	85
Taux de remplissage H ₂ /H ₁	0.94	1	0.91	1	0.88	1	1
Indice de ségrégation π [%]	7.5	3	9.5	3	10	2.5	12
Résistance à la compression à 7 j f_{c_7} [MPa]	35	36	34	34	30	31	52
Résistance à la compression à 28 j $f_{c_{28}}$ [MPa]	41	43	39	40.5	39.5	42	61
Résistance à la compression à 90 j $f_{c_{90}}$ [MPa]	49	49	54	55	59	61	75
Résistance à la traction à 7 j $f_{t_{28}}$ [MPa]	3.6	3.9	3.4	3.5	3.4	3.3	5.2
Module élastique à 28 j E_{28} [Gpa]	28	28	27.5	27.5	29	30	38
Retrait total à 90 j $\Delta l/l$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	272	272	272	272	272	272	288

CONCLUSION

Venant du Japon en milieu des années 1980, les BAP se vulgarisent petit à petit en séduisant le monde du bâtiment. Grâce à leur haute maniabilité, les BAP offrent à leurs utilisateurs une mise en œuvre sans aucune vibration et même dans des coffrages complexes et très encombrés. Cette maniabilité très élevée est le résultat de la conciliation entre des propriétés contradictoires ; une grande fluidité et déformabilité d'une part, et une haute stabilité, d'autre part. Pour satisfaire ces exigences rhéologiques, les BAP sont formulés différemment au BO : ils contiennent moins de gravillons, plus d'éléments fins et de superplastifiant et dans certains cas un agent colloïdal.

Les formulateurs se heurtent à deux difficultés lorsqu'ils s'intéressent aux BAP. En premier lieu, il n'existe pas d'essai normalisé pour s'assurer qu'un béton est effectivement "autoplaçant" et, deuxièmement, l'absence des méthodes de formulation généralisées permettant de choisir exactement les proportions des constituants en fonction des propriétés souhaitées. En fait, pratiquement tous les laboratoires ont 'bricolé' leur propre montage pour évaluer les différents paramètres de la maniabilité et les chercheurs ont, par tâtonnement, formulé les BAP par leur expérience acquise.

Il y'a dans la littérature des recommandations limitant la caractérisation de la maniabilité des BAP à trois essais (mesure d'étalement, essai de la boîte en «L» et l'essai de stabilité au tamis) [14]. Par ailleurs, les performances rhéologiques et mécaniques des BAP sont influencées principalement par cinq paramètres clés de mélange qui étaient ; la forme, granulométrie et volume des gravillons, rapports S/P et E/L, nature et dosage d'additions minérales et la concentration en superplastifiant et en agent colloïdal. L'optimisation de la formulation des BAP nécessite donc un réglage minutieux de ces paramètres.

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans la problématique générale d'amélioration et de maîtrise des propriétés des BAP. En effet, nous avons visé dans le programme expérimental à développer une série de BAP destinée aux ouvrages complexes et fortement armés, suivant une optimisation poussée de leurs paramètres clés de composition. Nous avons apporté également une meilleure compréhension de l'effet de ces paramètres sur la fluidité, la déformabilité, la stabilité ainsi que la résistance des BAP.

Cette étude nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les BAP contenant des gravillons roulés possèdent une maniabilité plus élevée et une résistance plus faible que celles des BAP contenant des gravillons concassés.
- Les BAP doivent avoir une taille maximale et un volume des gravillons faibles de 15 mm et 290 l afin d'assurer leur déformabilité, car l'augmentation de ces paramètres peut détruire complètement cette propriété.
- Afin d'améliorer beaucoup plus la maniabilité des BAP, il est recommandé d'augmenter la compacité des gravillons par la combinaison de deux classes granulométriques différentes (30 % 7/10 et 70 % 7/15).
- Il est possible de fabriquer un BAP de bonne résistance avec les mêmes composants de base qu'un BO en utilisant de faibles rapports S/P et E/C de 0.75 et 0.35 respectivement. Cependant, avec ces valeurs, les BAP acquièrent un volume de pâte et une quantité cimentaire très importants.
- Afin de réduire la chaleur d'hydratation et leur coût, les BAP doivent comporter au moins une addition minérales telles que (FC, PZ ou LT). Les proportions optimisées, qui améliorent la maniabilité tout en préservant de bonnes résistances, sont : (30 % de FC, 30 % de PZ et 40 % de LT par rapport du poids de liant).
- avec un SP % de 1.8, l'ajout de la FS à un dosage de 0.8 % du poids de liant offre des BAP de haute résistance (61 MPa).
- Il est possible de développer une variété de formulations de BAP possédant de bonnes performances rhéologiques et mécanique sans l'utilisation de l'AC.
- La combinaison de l'AC % de 0.03 avec un SP % suffisant pour garder la fluidité à un étalement de 80 cm, tend à améliorer beaucoup plus la déformabilité, la stabilité ainsi que la résistance des BAP.

- Les BAP optimisés développent des résistances à la compression à court et à long terme (7 et 90 j) ainsi que des résistance à la traction à 28 j plus élevées que celles des BO de même résistance à la compression à 28 j. Cependant, nos BAP possèdent des modules élastiques à 28 j inférieurs à ceux des BO et des retraits plus élevés, mais la déférence n'est pas très importante.

Nos résultats sont le fruit d'étude sur des bétons particuliers. Leur généralisation n'est pas immédiate. Ce sont néanmoins des résultats obtenus dans un cadre national. D'autres études sont bien sûr nécessaires pour confirmer les résultats et augmenter la base de données sur ces nouveaux bétons.

Les recherches sur les BAP peuvent se poursuivre sur plusieurs niveaux :

- Étude des paramètres rhéologiques fondamentaux, à savoir le seuil de cisaillement et la viscosité plastique et leur relation avec les autres paramètres de la maniabilité.
- Développement d'autres essais de caractérisation à l'état frais permettant d'évaluer à la fois la fluidité et la déformabilité.
- Étude de la pompabilité, qui est un sujet présentant un grand intérêt industriel.
- Étude de la durabilité et notamment dans un milieu agressif.
- Développement des méthodes de formulation précises et générales.
- Développement des BAP à hautes performances.
- Développement des BAP avec fibres.
- Caractérisation et formulation des BAP dans un climat chaud.
- L'industrialisation des procédés de fabrication des BAP.

Bibliographie

- [1] **Z. ABIB, F. KHARCHI & H. GAHER:** «*Bétons autoplaçants : optimisation de la composition*». 1^{er} Congrès International sur la Technologie et la Durabilité du Béton. Université Houari Boumediene. Alger, pp 1-8. 24-26 Mai 2004.
- [2] **J. AMBROISE, J. PERA & S. ROLS:** «*Les bétons autonivelants*». Annales du Bâtiment et des Travaux Publics. V 1, pp 37-41. 1997.
- [3] **M. BAALBAKI:** «*Influence des interactions du couple ciment/adjuvant dispersant sur les propriétés des béton : Importance du mode d'interaction des adjuvants*». Thèse de Doctorat. Université de Sherbrooke, Québec. Septembre 1998.
- [4] **D. BEAUPRÉ:** «*Rheology of high performance shotcrete*». Ph D Thesis. University of British Columbia. 1994.
- [5] **V.K. BUI & D. MONTGOMERY:** «*Drying shrinkage of self-compacting concrete containing milled limestone*». Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. Stockholm. 13-15 September 1999.
- [6] **R. CHIKAMATSER, N. MIURA, S. AOKI & S. SOGO:** «*Evaluation of flowability of self-placing concrete by o-funnel testing*». Proceedings of JCI Symposium on Concrete Production Systems. 1992.
- [7] **D. CHOPIN, O. FRANCY, S. LEBOURGEOIS & P. ROUGEAU:** «*Creep and shrinkage of heat-cured self-compacting concrete*». Proceedings of the Third International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. 2003.
- [8] **F. DE LARRARD, F. BOSC, C. CATHERINE & F. DE FLORENNE:** «*La nouvelle méthode des coulis de l'AFREM pour la formulation des bétons à hautes performances*». Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. N° 202, pp 61-69. Mars-Avril 1996.
- [9] **G. DREUX & J. FESTA :** «*Nouveau guide du béton et de ses constituants*». 8^{ème} Édition. Eyrolles. Mai 1998.
- [10] **R. DUPAIN, R. LANCHON & J.C. SAINT-ARROMAN:** «*Granulats, sols, ciments et bétons : Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire*». Édition Casteilla. 1995.
- [11] **R.J. FLATT, N. MARTYS & L. BERGSTRÖM :** «*La rhéologie des matériaux cimentaires*». Journal Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux. N° 867, pp 48-55. Juin-Juillet 2004.
- [12] **T. FUKUTE, A. MORIWAKE, K. SANO & K. HAMASAKI:** «*Development of superworkable concrete for multi-functional port structures*». 2nd International Symposium of CANMET/ACI. Las Vegas, pp.335-336. 1995.
- [13] **J.C. GIBBS & W. ZHU:** «*Strength of hardened of self-compacting concrete*». Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. Stockholm. 13-15 September 1999.

- [14] **Groupe de travail «BAP»:** «*Bétons auto-plaçants : Recommandations provisoires*». Association Française de Génie Civil. Juillet 2000.
- [15] **A. GUETTALA:** «*Béton de terre stabilisé : Amélioration de sa durabilité à l'eau*». Thèse de Doctorat. Université Mohamed Khider. Biskra. 15 Septembre 2003.
- [16] **M.S. HADRICHE:** «*Modélisation du comportement du béton autoplaçant : Effet de la composition*». Mémoire de Maîtrise ès Sciences Appliquées. Université de Sherbrooke. Décembre 1998.
- [17] **N. HASAN, E. FAERMAN & D. BERNER:** «*Advances in underwater concreting : St-Lucie Plant intake velocity cap rehabilitation*». High Performance Concrete. ACI SP 140-9, pp 187-213. 1992.
- [18] **M. HAYAKAWA, Y. MATSUOKA & T. SHINDOH:** «*Development and application of super workable concrete*». Special Concretes : Workability and Mixing. RILEM Proceedings. N° 24. 1994.
- [19] **G. HEIMAN & L. VANDEWALLE:** «*The influence of fillers on the properties of self-compacting concrete in fresh and hardened state*». Proceedings of the Third International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. 2003.
- [20] **Holcim:** «*Le béton autocompactant*». Recommandation étudiée par la société Holcim. Suisse. 26 Novembre 2004.
- [21] **C. HU:** «*Rhéologie des bétons fluides*». Rapport d'études et de recherche. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris, p 202. 1995.
- [22] **C. HU & B. BARBIERI:** «*Comparaison des retraits des ban et d'un béton fluide traditionnel*». Science des matériaux et propriétés des bétons - Premières Rencontres Internationales. INSA. 1998.
- [23] **C. JOLICOEUR:** «*Superplasticizers: Chemistry, mode of action and performance criteria*». Béton Canada. Université de Sherbrooke. 1995.
- [24] **T. KAWAI:** «*Non dispersible underwater concrete using polymers*». 5th International Congress on Polymers in Concrete. Brighton, pp 5-6. September 1987.
- [25] **M. KAWAKAMI, W.S. WADI & K. SUZUKAWA:** «*Effects of chemical admixtures colloidal underwater concrete*». ACI SP 119-26. Ottawa Conference, pp 492-516. 1989.
- [26] **K.H. KHAYAT:** «*In-situ properties of concrete piles repaired under water*». Concrete International. V 14, N° 3, pp 42-49. Marsh 1992.
- [27] **K.H. KHAYAT:** «*Effects of antiwashout admixtures on fresh concrete properties*». ACI Materials Journal. V 92, N° 2, p 8. Marsh-April 1995.
- [28] **K.H. KHAYAT:** «*Colloque sur les bétons autonivelants*». Comptes rendus. Département de Génie Civil. Université de Sherbrooke. 1996.
- [29] **K.H. KHAYAT:** «*Effect of antiwashout admixtures on properties of hardened concrete*». ACI Materials Journal. V 93, N° 2, p 28. 1996.
- [30] **K.H. KHAYAT:** «*Technologie du béton*». GCI-340 (note de cours). Département de Génie Civil. Université de Sherbrooke. 1996.
- [31] **K.H. KHAYAT:** «*Testing a performance of self compacting concrete*». Technology Transfer Day the Specifications and Use of HPC. University of Toronto. October 1997.

- [32] **K.H. KHAYAT:** «*Use of viscosity modifying admixtures to reduce top-bar effect of anchored bars cast with fluid concrete*». ACI Materials Journal. N° 95. March-April 1998.
- [33] **K.H. KHAYAT:** «*Optimisation et caractérisation des bétons autoplaçants pour coffrage fortement armés*». Rapport de CRIB. Sherbrooke - Laval. 4 Août 2004.
- [34] **K.H. KHAYAT, A. GHEZAL & M. HADRICHE:** «*Factorial design models for proportioning self-consolidating concrete*». RILEM Materials and Structures. 1999.
- [35] **K.H. KHAYAT & Z. GUIZANI:** «*Use of viscosity modifying admixtures to enhance stability of highly fluid concrete*». ACI Materials Journal. N° 94. 1994.
- [36] **K.H. KHAYAT, K. MANAI & A. TRUDEL:** «*In-situ mechanical properties of wall elements cast using self-compacting concrete*». ACI Materials Journals, V 94, N° 6, pp 491-500. November-December 1997.
- [37] **Y. KLUG & K. HOLSCHMACHER:** «*Comparison of the hardened properties of self-compacting and normal vibrated concrete*». Proceedings of the Third International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. 2003.
- [38] **S. KUROIWA, Y. MATSUOKA, M. HAYAKAWA & T. SHINDOH:** «*Application of super workable concrete to construction of a 20-story building*». American Concrete Institute SP140 (High Performance Concrete in Severe Environments). Detroit, Michigan, pp 147-161. 1993.
- [39] **MEYER:** «*Experiences in the use of superplasticizers in Germany*». Superplasticizers in Concrete. ACI SP-62, pp 21-36. Detroit, Michigan. 1979.
- [40] **S. NAGATAKI:** «*Antiwashout admixtures for underwater concrete*». RILEM Committee. TC84-AAC, p 8. May 1989.
- [41] **B.D. NEELLY & J. WCKERSHAM:** «*Repair of red rock dam*». Concrete International. V 11, N° 10, pp 36-39. October 1989.
- [42] **A.M. NEVILLE:** «*Propriétés des bétons*». Version française traduit par CRIB. Eyrolles. 2000.
- [43] **OGAWA, K. SAKATA & S. TANAKA:** «*A study on reducing shrinkage of highly-flowable concrete*». Proceedings ACI SP 154. Las Vegas, pp 55-72. 1995.
- [44] **H. OKAMURA & K. OZAWA:** «*Self compacting high performance concrete in Japan*». 2nd ACI/CANMET International Conference. Las Vegas. 1995.
- [45] **H. OKAMURA, K. OZAWA & M. OUCHI:** «*Self-compacting concrete*». Structural Concrete. N° 1, pp 3-17. March 2000.
- [46] **K. OZAWA, K. MAEKAWA, M. KUNISHIMA & H. OKAMURA:** «*Development of high performance concrete based on the durability design of concrete structures*». Proceedings of the 2nd East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2). Chiangmai. V 1, pp 445-450. January 1989.
- [47] **K. OZAWA, S. TAGTERMSIRIKUL & K. MAEKAWA:** «*Role of materials on the filling capacity of fresh concrete*». Proceedings of the 4th CANMET & ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. Istanbul, pp 121-137. May 1992.

- [48] **B. PERSSON:** «*Creep, shrinkage and elastic modulus of self-compacting*». Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. Stockholm. 13-15 September 1999.
- [49] **E. PROUST:** «*Retraits et fluages des bétons autoplaçants : vers une meilleure compréhension des comportements différés*». Thèse de l'INSA de Toulouse. 2002.
- [50] **Y. ROUSSEL:** «*Bétons autoplaçants avec fibres comme matériau de réparation du béton*». Mémoire de Maîtrise ès Sciences Appliquées. Université de Sherbrooke. Janvier 2000.
- [51] **C. SANDRINE:** «*Durabilité à long terme de matériaux cimentaires, avec ou sans fillers calcaires, en contact avec des solutions salines*». Thèse de Doctorat. Université de Laval. 2000.
- [52] **M. SARIC-CORIC:** «*Contribution des agents colloïdaux à l'hydratation du ciment*». Mémoire de Maîtrise ès Sciences Appliquées. Université de Sherbrooke. Novembre 1997.
- [53] **T. SEDRAN:** «*Les bétons autonivelants (BAN) : Synthèse bibliographique*». Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. N° 196, pp 53-60. Mars-Avril 1995.
- [54] **T. SHINDOH, Y. MATSUOKA, S. TANGTERMSIRIKUL & J. SAKAMOTO:** «*Effect of variation of material quality on properties of super workable concrete*». Transactions of Japan Concrete Institute. V 14, pp 71-78. 1992.
- [55] **M. SONEBI:** «*Développement des bétons autonivelants à haute performance pour des travaux de réparation sous l'eau*». Thèse de Doctorat. Université de Sherbrooke. Septembre 1997.
- [56] **A. TAGNIT-HAMOU:** «*Microstructure et physico-chimie des ciments et des bétons*». Notes de cours. Université de Sherbrooke. GCI-712. 1995.
- [57] **S. TANGTERMSIRIKUL, J. SAKAMOTO, T. SHINDOH & Y.H. MATSUOKA:** «*Evaluation of resistance to segregation of super workable concrete and role of a new type of viscosity agent*». Taisei Technical Research Report. N° 24, pp 369-376. December 1991.
- [58] **G.H. TATTERSALL & P.F.G. BANFILL:** «*The rheology of fresh concrete*». Pitman. London, p 365. 1983.
- [59] **G.H. TATTERSALL:** «*Workability and quality control of concrete*». Chapman & Hall, p 262. 1991.
- [60] **P. TURCRY:** «*Retrait et fissuration des bétons autoplaçants : Influence de la formulation*». Thèse de Doctorat. Ecole Doctorale Mécanique, Thermique et Génie Civil (Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes). Février 2004.
- [61] **M. VENUAT:** «*Adjuvants et traitements des mortiers et bétons*». 1^{ère} Édition. Publiée par l'auteur. Paris, p 429. 1971.
- [62] **M. VENUAT:** «*La pratique des ciments, mortiers et bétons*». 2^{ème} Édition. Moniteur. V 1. 1989.
- [63] **O.H. WALLEVIK & O.E. GJORV:** «*Modification of the two-point workability apparatus*». Magazine of Concrete Research. V 42, N° 152, pp 135-142. September 1990.
- [64] **M. YURUGI, N. SAKATA, M. IWAI & G. SAKAI:** «*Mix proportion for highly workable concrete*». Conference Concrete 2000. Dundee. 7-9 September 1993.

ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES ET MÉCANIQUES DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS

Résumé

Il semble que le béton autoplaçant soit l'un des meilleurs bétons actuels sur lequel on doit y compter en face des défis existants dans le monde de la construction ; et ceci, relativement à ses caractéristiques rhéologiques (une grande fluidité, une haute déformabilité tout en étant stable) avec de bonnes propriétés mécaniques. Pour parvenir à ces données intéressantes, le BAP doit comporter un peu de gravillons, beaucoup d'additions minérales, un dosage élevé de superplastifiant et assez souvent un agent colloïdal. Cependant, il n'existe pas à l'heure actuelle de méthodologie précise permettant de formuler ce type de bétons.

À cet effet, le présent mémoire porte sur le développement d'une série optimale des BAP, suivant un plan d'expérience bien déterminé. Cette étude permet également de mettre en évidence l'effet de principaux facteurs de composition sur le comportement rhéologique et mécanique des BAP, tels que (la forme, la granulométrie et le volume de gravillons), (le rapport volumique S/P et le rapport massique E/L), (la nature et le dosage d'additions minérales) et (la concentration en superplastifiant et en agent colloïdal).

Mots clés : bétons autoplaçants / propriétés rhéologiques / propriétés mécaniques / gravillons / additions minérales / superplastifiant / agent colloïdal.

تبدو الخرسانة ذاتية القوية (خ ذ ق) واحدة من أفضل الخرسانات الموجودة حالياً، حيث يمكن الإعتماد عليها في مواجهة التحديات الراهنة في عالم البناء، و هذا بفضل مميزاتها الريولوجية (سيولة كبيرة، قدرة نشوه عالية مع الحفاظ على الإستقرار)، بالإضافة إلى امتلاكها لخصائص ميكانيكية جيدة. و من أجل الحصول على هذه المعطيات الهامة، يجب أن تحوي الـ (خ ذ ق) على قليل من الحصى، كثير من الإضافات المعدنية، تركيز مرتفع من الملدن المتفوق و ربما أيضا على مساعد اللزوجة، غير أنه لا توجد لحد الساعة طريقة محددة تسمح بتشكيل هذا النوع من الخرسانة.

لهذا السبب، يهدف موضوع هذه المذكرة إلى إنشاء مجموعة مثالية من الـ (خ ذ ق)، و هذا وفق منهج واضح المعالم. هذه الدراسة توضح أيضا تأثير أهم عوامل التشكيلة على السلوك الريولوجي و الميكانيكي لـ (خ ذ ق) مثل (شكل، تدرج حبيبي و حجم الحصى)، (النسبة الحجمية رمل/العجينة و النسبة الكتلية ماء/إسمنت)، (طبيعة و تركيز الإضافات المعدنية) و (تركيز الملدن المتفوق و مساعد اللزوجة).

كلمات مفتاحية : خرسانة ذاتية القوية / خواص ريولوجية / خواص ميكانيكية / حصى / إضافات معدنية / ملدن متفوق / مساعد اللزوجة.