

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

HOUARI BOUMEDIENE

USTHB / ALGER

FACULTE DE GENIE CIVIL

MEMOIRE

Présentée pour l'obtention du diplôme de
MAGISTER en : **GÉNIE CIVIL**

Spécialité : Construction

Par

M. ABIB Zine Eddine

SUJET

FORMULATIONS ET CARACTÉRISATION DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS

Soutenu le : 06 / 07 / 2004 , devant le jury composé de:

M. M.CHEMROUK	Professeur à l'USTHB	Président
M. S.KENNAI	Professeur à l'USTB	Examineur
M ^{me} F.KHARCHI	Professeur à l'USTHB	Directrice de thèse
M. A.BEN YAHIA	Maître de conférence à l'USTHB	Examineur
M. N.OUDJIT	Chargé de cours à l'USTHB	Examineur

Remerciement

Remerciement

Je tiens à remercier en premier lieu DIEU Miséricordieux qui m'a donné la force et la volonté d'achever ce modeste travail.

Mes sincères remerciements vont à M^{me} F.KHARCHI qui a bien voulu diriger les travaux de ce mémoire. Sa gentillesse, ses précieux conseils, et son aide inestimable. Qu'elle trouve ici l'expression de mon respect.

Je voudrais remercier M^r M. CHEMROUK, professeur à l'USTHB, qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury, qu'il trouve ici l'expression de mon profond respect

Mes remerciement vont à M^r S. KENAI professeur à l'Université de Saïd DAHLEB, M^r A. BEN YAHIA maître de conférence à l'USTHB et M^r N. OUDJIT chargé de cours à l'USTHB; qui ont bien voulu faire partie du jury et d'apporter leur vive contribution à l'enrichissement de ce travail.

Mes vifs remerciements à M^r Madjid MEDDAHI, le Président Directeur Général de la société GRANITEX-NP, pour son aide inestimable, et sa compréhension. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde admiration.

Également, je tiens à remercier tout le personnel de la société GRANITEX-NP en particulier M^r M. MADANI et M^{elle} N. MEZIANE.

Ma gratitude va également au personnel du laboratoire de COSIDER Métro, en particulier M^r S.SI TAYEB.

Un amical remerciement est également adressé à M^r S. SAKHRAOUI du CNERIB et M^r B. SASSI de la société SONATRO.

Je remercie tout ceux et toutes celles qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

À tous ceux que j'aime et qui m'aiment

Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
------------------------------	----------

PARTIE 1 : ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITÉ SUR LE BÉTON

1.1. Historique	6
1.2. Constituant du béton	7
1.2.1. Ciment	7
Caractéristiques physico-chimiques des ciments portlands	8
1.2.2. Les ajouts minéraux	11
1.2.2.1. Fumée de silice	11
1.2.2.2. Propriétés physico-chimiques des fumées de silice	11
1.2.2.3. Mécanisme d'action de la fumée de silice dans le béton	12
1.2.2.4. Influence des fumées de silice sur les propriétés des bétons	13
1.2.3. Granulats	14
1.2.4. Eau	14
1.2.5. Adjuvants	14

CHAPITRE 2 : LE BÉTON AUTOPLAÇANT

2.1. Définition du béton autoplaçant	17
2.2. Historique des bétons autoplaçants	17
2.3. Spécificité de la composition des BAP	19
2.4. Matière premières utilisées dans les BAP	20
2.4.1. Liants et granulats	20
2.4.2. Adjuvants des bétons	21
2.4.2.1. Superplastifiant	22
2.4.2.2. Agent de viscosité	25
2.5. Propriétés recherchées des bétons autoplaçants	27
2.6. Propriétés des bétons autoplaçants	27
2.6.1. Notion de déformabilité et de capacité de remplissage	27

2.6.2. Fluidité.....	30
2.7.2.1. Essai d'étalement	30
2.6.2.2. Vitesse d'écoulement	31
2.6.2.3. Essai de la table de fluidité	31
2.6.2.4. Essai de la boîte en L	31
2.6.2.5. Essai du Box	32
2.6.3. La stabilité	33
2.6.3.1. Essai de l'entonnoir en forme de V	33
2.6.3.2. Essai de tassement	33
2.6.4. Ségrégation dynamique	34
2.6.4.1. Essai du tube en U	34
2.6.4.2. Essai du caisson	35
2.6.4.3. Essai de stabilité au tamis	36
2.6.5. Ségrégation statique	37
2.6.5.1. Essai à la bille	37
2.7. Optimisation des bétons autoplaçants	38
2.7.1. Optimisation de la teneur en gros granulats	38
2.7.2. Optimisation des teneurs en ajouts minéraux	40
2.7.3. Optimisation des teneurs en ajouts chimiques	42
2.8. Méthodes de formulation	45
2.8.1. Approche du laboratoire central des ponts et chaussées	45
2.8.2. L'approche Japonaise	47
2.9. Exemples de formulations	48
2.10. Fabrication des BAP	50
2.11. Transport et mise en place des BAP	51
2.12. Caractéristiques des BAP à l'état durci	52
2.12.1. Propriétés mécaniques des BAP	52
2.12.2. Retrait	53
2.12.3. Fluage	55
2.12.4. Résistance des BAP à la migration d'éléments extérieurs	55
2.12.4.1. Migration des chlorures	55
2.12.4.2. Carbonatation	55
2.12.5. Module instantané des BAP	56
2.13. Conclusion	57

PARTIE 2 : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

CHAPITRE 3 : MÉTHODES D'ESSAIS & CARACTÉRISTIQUES

3.1. Introduction	60
3.2. Méthode d'essais	60
3.2.1. Essais sur granulats	60
3.2.1.1. Essai d'équivalent de sable	60
3.2.1.2. Module de finesse	60
3.2.1.3. Masse volumique	60
3.2.1.4. Taux d'absorption des granulats	61
3.2.1.5. Essai Los Angeles	61
3.2.2. Essai sur liant	61
3.2.2.1. Mesure du temps d'écoulement au cône Marsh	61
3.2.3. Essais sur béton frais	62
3.2.3.1. Mesure de l'affaissement	62
3.2.3.2. Masse volumique	63
3.2.3.3. Mesure de l'étalement	63
3.2.3.4. Essai de stabilité au tamis	63
3.2.4. Essais sur béton durci	64
3.2.4.1. Mesure des masses volumiques	64
3.2.4.2. Essai de compression	64
3.2.4.3. Essai de traction par fendage	64
3.2.4.4. Essai de retrait	65
3.2.4.5. Porosité totale	66
3.2.4.6. Absorption capillaire	66
3.2.4.7. Auscultation dynamique	67
3.3. Caractérisation des matériaux	69
3.3.1. Granulats	69
3.3.1.1. Sable	69
3.3.1.2. Gravier	69
3.3.2. Ciment	71
3.3.3. Fumée de silice	71

3.3.4. Superplastifiant	72
3.3.5. L'agent de viscosité	72
3.3.6. L'eau de gâchage.....	72
3.4. Confection des éprouvettes	72
3.5. Démoulage et conservation des éprouvettes	74
3.6. Surfaçage des éprouvettes	74

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS & INTERPRÉTATIONS

4.1. Composition d'un béton ordinaire	76
4.1.1. Méthode Dreux-Gorisse	76
4.1.2. Méthode expérimentale	78
4.2. Composition d'un BAP	79
4.2.1. Principe de formulation	79
4.2.2. Formulation préliminaire d'un BAP	80
4.2.3. Optimisation de la pâte liante	81
4.2.4. Optimisation des teneurs en gros granulats, sable et liant	83
4.2.5. Effet de la variation du rapport sable/pâte sur la stabilité des BAP	86
4.2.6. Effet de la variation du rapport E/L sur la maniabilité des BAP	88
4.2.7. Effet de la variation de la teneur en superplastifiant sur la maniabilité des BAP	91
4.2.8. Effet de la variation de la teneur en agent colloïdal sur la maniabilité et la stabilité des BAP	92
4.3. Formulations sélectionnées.....	94
4.3.1. Introduction	94
4.3.2. Caractéristiques du béton autoplaçant	94
4.3.2.1. Première catégorie de BAP	94
4.3.2.2. Deuxième catégorie de BAP	95
4.3.2.3. Troisième catégorie de BAP	96
4.3.3. Caractéristiques du béton ordinaire	97
4.3.4. Résistance en compression	100
4.3.5. Résistance à la traction par fendage	102
4.4. Porosité totale et absorption capillaire	103
4.5. Auscultation dynamique	104

4.6. Retrait	105
4.7. Étude économique.....	108
CONCLUSION GÉNÉRALE	110
RECOMMANDATIONS	112
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	114

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Défloculation des grains de ciment en présence d'un superplastifiant ...	23
Figure 2.2 : Comportement rhéologique de coulis à faibles rapports E/C en présence d'un superplastifiant	24
Figure 2.3 : Essai de la boîte, capacité de remplissage	28
Figure 2.4 : Variation du volume de béton passant en fonction de l'affaissement	28
Figure 2.5 : Capacité de remplissage ou déformabilité maximale	29
Figure 2.6 : Variation de la demande en sable en fonction du rapport E/L	30
Figure 2.7 : Essai de la boîte en L	32
Figure 2.8 : Essai du Box	32
Figure 2.9 : Essai de l'entonnoir en forme de V	33
Figure 2.10 : Essai du tassement	34
Figure 2.11 : Essai du tube en U	35
Figure 2.12 : Essai du caisson	36
Figure 2.13 : Essai à la bille	37
Figure 2.14 : Courbe de référence d'un béton autoplaçant	40
Figure 2.15 : Mode de mise en place du BAP sur chantier	52
Figure 2.16 : Variation des résistances mécaniques en compression de BAP en fonction de la composition du liant	53
Figure 2.17 : Comparaison des retraits endogènes d'un béton ordinaire et de cinq BAP	54
Figure 2.18 : Comparaison des retraits de séchage d'un béton ordinaire et de cinq BAP	54
Figure 3.1 : Essai au cône Marsh	62
Figure 3.2 : Essai de fendage	65
Figure 3.3 : Essai de retrait	66
Figure 3.4 : Analyse granulométrique des granulats	70
Figure 3.5 : Confection du béton autoplaçant	73
Figure 3.6 : Essai d'étalement	73
Figure 3.7 : Essai de stabilité au tamis	73

Figure 4.1 : Courbe de référence du béton ordinaire	77
Figure 4.2 : Variation du temps d'écoulement d'un coulis sans fumée de silice en fonction du dosage en superplastifiant	81
Figure 4.3 : Variation du temps d'écoulement d'un coulis avec 10% de fumée de silice en fonction du dosage en superplastifiant	81
Figure 4.4 : Effet de la teneur en gros granulats et du rapport sable / pâte sur le diamètre d'étalement du béton	84
Figure 4.5 : Effet de la variation du rapport sable/pâte sur la résistance à la ségrégation	87
Figure 4.6 : Effet de la variation du rapport E/L sur le diamètre d'étalement	88
Figure 4.7 : Effet de la variation du rapport E/L sur la résistance à la compression au 7 ^{ème} jours d'âge	89
Figure 4.8 : Variation du diamètre d'étalement d'un BAP en fonction de la teneur en superplastifiant	91
Figure 4.9 : Effet de la variation de l'agent colloïdale sur le diamètre d'étalement d'un BAP	92
Figure 4.10 : Effet de la variation de la teneur en agent colloïdal sur la résistance à la ségrégation	93
Figure 4.11 : Courbe granulométrique des BAP confectionnés	98
Figure 4.12 : Comparaison entre les valeurs d'étalement des trois formulations de BAP	99
Figure 4.13 : Comparaison entre les valeurs du temps d'écoulement des trois formulations de BAP	99
Figure 4.14 : Évolution de la résistance à la compression en fonction du temps	100
Figure 4.15 : Évolution de la résistance à la traction par fendage en fonction du temps	102
Figure 4.16 : Évolution du poids d'eau absorbée en fonction du temps	103
Figure 4.17 : Évolution du retrait endogène du béton ordinaire et celui du BAP HP	105
Figure 4.18 : Évolution du retrait de séchage du béton ordinaire et celui du BAP HP	105
Figure 4.19 : Évolution du retrait total du béton ordinaire et celui du BAP HP	106
Figure 4.20 : Évolution de la perte d'eau du béton ordinaire et celui du BAP HP ...	106
Figure 4.21 : Comparaison entre les prix de revient d'un mètre cube de chaque béton avec les hypothèses des prix unitaires	108

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Résistances mécaniques des ciments courants	8
Tableau 1.2 : Résultat de la compilation de l'analyse chimique de la fumée de silice produite à l'usine SKW, Canada	12
Tableau 2.1 : Corrélation entre le Slump flow et le Flow table sans choc	31
Tableau 2.2 : Différentes formulations de BAP	48
Tableau 2.3 : Formulation de BAP et bétons ordinaires vibrés	49
Tableau 2.4 : Exemple de formulation des BAP fabriqués en France	49
Tableau 2.5 : Essais de carbonatation accélérée sur un BAP et un béton ordinaire ...	55
Tableau 3.1 : Propriétés des granulats	69
Tableau 3.2 : Composition chimique et minéralogique du ciment	71
Tableau 3.3 : Résultat de l'analyse chimique de la fumée de silice	71
Tableau 4.1 : Pourcentage du squelette granulaire (méthode Dreux-Gorisse)	76
Tableau 4.2 : Composition préliminaire du béton ordinaire	78
Tableau 4.3 : Composition volumique du béton ordinaire	78
Tableau 4.4 : Composition massique finale du béton ordinaire	79
Tableau 4.5 : Formulation préliminaire du béton autoplaçant	80
Tableau 4.6 : Dosage de saturation et temps d'écoulement correspondant en fonction du rapport E/L et du dosage en fumée de silice	82
Tableau 4.7 : Effet de la teneur en gros granulats et du rapport sable/pâte sur le diamètre d'étalement du béton	84
Tableau 4.8 : Effet de la variation du rapport sable/pâte sur la résistance à la ségrégation	87
Tableau 4.9 : Effet de la variation de la teneur en eau sur la maniabilité et la résistance à la compression des BAP confectionnés	88
Tableau 4.10 : Effet de la variation de la teneur en superplastifiant sur les caractéristiques du béton à l'état frais et la résistance à la compression	91
Tableau 4.11 : Effet de la variation de la teneur en agent colloïdal sur les caractéristiques des BAP à l'état frais	92
Tableau 4.12 : Composition massique du béton ordinaire	94
Tableau 4.13 : Caractéristiques à l'état frais du BO	95
Tableau 4.14 : Caractéristiques à l'état durci du BO	95

Tableau 4.15 : Composition massique d'un béton autoplaçant de la 1 ^{ère} catégorie (BAP 1)	95
Tableau 4.16 : Caractéristiques à l'état frais du BAP 1	96
Tableau 4.17 : Caractéristiques à l'état durci du BAP 1	96
Tableau 4.18 : Composition massique d'un béton autoplaçant de la 2 ^{ème} catégorie (BAP 2)	96
Tableau 4.19 : Caractéristiques à l'état frais du BAP 2	97
Tableau 4.20 : Caractéristiques à l'état durci du BAP 2	97
Tableau 4.21 : Composition massique d'un béton autoplaçant de la 3 ^{ème} catégorie (BAP HP)	97
Tableau 4.22 : Caractéristiques à l'état frais du BAP HP	97
Tableau 4.23 : Caractéristiques à l'état durci du BAP HP	98
Tableau 4.24 : Comparaison des valeurs d'absorption capillaire et de porosité totale d'un BAP HP avec celles d'un BO	103
Tableau 4.25 : Module d'élasticité dynamique par l'ultrason	104

NOTATIONS ET SYMBOLES

A	Air occlus
A.G	Absorption des granulats
BAP	Béton autoplaçant
BAP HP	Béton autoplaçant à haute performance
BO	Béton ordinaire
C	Ciment
CV	Cendre volante
CPA-CEM I 42.5 ou 52.5	Ciment portland artificiel d'une résistance nominale à la compression de 42.5 ou 52.5 MPa
CPJ-CEM II	Ciment portland composé
C-S-H	Silicate de calcium hydraté
E	Eau totale dans le mélange
E_{ij}	Module d'élasticité instantané
E_{dyn}	Module d'élasticité dynamique
E_g	Eau retenue par les granulats
E_l	Eau libre
E_p	Eau retenue par le liant
E.S	Équivalent de sable
F	Filler calcaire
FS	Fumée de silice
f_{cj}	Résistance à la compression à l'âge (j)
f_{tj}	Résistance à la traction à l'âge (j)
G	Gravier
H₁	Hauteur du sédiment
H₂	Hauteur du sédiment + flocculant
L	Liant
LA	Coefficient Los Angeles
LHF	Laitier de haut fourneau
M_{ybf}	Masse volumique du béton frais
P	Volume de la pâte

R_m	Viscosité du mortier
Γ_m	Fluidité du mortier
r₀	Diamètre inférieur du cône
r₁, r₂	Diamètres d'étalement selon deux médianes
S	Volume du sable
SP	Superplastifiant
t	Temps d'écoulement à l'entonnoir exprimé en secondes
T₅₀	Temps d'écoulement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 50 cm
T (%)	Tassement relatif
T_h	Valeur maximale du tassement
σ	Contrainte de compression

RÉSUMÉ

Un béton autoplaçant (BAP) est un béton fluide, très déformable, homogène et stable qui se met en place par gravitation et sans l'utilisation d'un moyen de vibration, il épouse parfaitement les formes des coffrages les plus complexes, il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique.

L'objectif de cette recherche est de développer un certain nombre de formulations de bétons autoplaçants se caractérisant par une ouvrabilité élevée et une bonne stabilité, ainsi d'étudier le comportement d'un béton autoplaçant à haute performance vis-à-vis de la compression, la traction, l'absorption capillaire et le retrait, et de les comparer à ceux d'un béton ordinaire vibré.

Les résultats de cette recherche ont montré que le béton autoplaçant présente des caractéristiques physiques et mécaniques très améliorées par rapport au béton ordinaire.

SYNOPSIS

A self compacting concrete is a fluid, homogenous and stable concrete, which spread readily into place under gravity, without any vibration. This concrete must have a good resistance to segregation, and the some qualities as an ordinary concrete.

Such concrete has a very good deformability, and it facilitates the casting of congested or restricted areas with complex shapes.

This study has been carried in order to develop some formulations of self compacting concrete, with right workability and good stability, and then study its behaviour to wands compression, traction, capillary adsorption and shrinkage, then compare it to the behaviour of an ordinary concrete.

This results of this study has shown that the physical and mechanical characteristics of self compacting concrete are better than ordinary concrete characteristics.

ملخص

تعتبر الخرسانة المرصوصة ذاتيا من بين التقنيا الجديدة التي تسمح بالتأقلم مع التطور الحالي الذي يعرفه قطاع البناء من حيث فهي تتأقلم مع مختلف أشكال الفرم بطريقة جيدة مع البناءات الحديثة التي تتميز بأشكالها المعقدة و المختلفة و كذا بكثافة تسليحها المحافظة على الاستقرار و ضمان منشآت مستديمة ومقاومة

يتميز هذا النوع الجديد من الخرسانة بقابلية تشغيل عالية و سهولة تشوهه جدمعتبرة تمكنها من التوضع في الفرم خاضعة لقوة ثقلها مما يحقق إقتصاد أكيد فقط دون الحاجة إلى عملية الرج و بالتالي تحقيق سعة معتبرة دون الحاجة إلى يد عاملة مختصة و مؤهلة في التكاليف المادية و البشرية

في هذهالمذكورة سوف نستعرض أهم النتائج المتوصل إليها حول خصائص هذه الخرسانة من حيث التركيبية الملائمة، قيمة التمدد، الناتج عن التجفيف للخرسانة بمقاومة الإنعزال و المقاومة للإنضغاط و الشد و كذلك نتائج دراسة التقلص الداخلي المنشأ و التقلص بفضل هذا البحث إستطعنا أن نؤكد على إمكانية إنتاج خرسانات لدنة و بخصوصيات ريولوجية و ميكانيكية جيدة المدروسة مقارنة بالخرسانات العادية

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les structures actuelles se caractérisent par la complexité de leurs modèles telles que les formes variables et les courbures multiples, ainsi que par leur forte concentration en armatures, ce qui rend l'application des bétons ordinaires à ce types d'ouvrages très difficile avec des défaillances structurales très probables. Toutefois, pour construire des structures 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.

La durabilité d'une structure en béton dépend étroitement des différentes étapes de sa réalisation et de la méthode de sa conception. Jusqu'à la mise en service de la structure, le béton mis en place traverse trois étapes importantes où certaines exigences doivent être satisfaites. On distingue : l'état frais, l'état à jeune âge et l'état durci.

- **À l'état frais** : On doit s'assurer d'une bonne mise en place dans les coffrages, en ayant un béton uniforme et homogène qui remplit parfaitement les différentes zones même celles où l'accès est difficile à cause d'une forte concentration en armatures.
- **À jeune âge** : On doit assurer une résistance suffisante du béton à la traction, afin d'éviter les fissures causées par le retrait plastique et le dégagement excessif de chaleur. De bonnes conditions de mûrissement et une génération modérée de température sont alors recommandées.
- **À l'état durci** : On s'intéresse à des performances mécaniques appropriées et à de faibles valeurs de perméabilité. Ces facteurs combinés contribuent à garantir une durée de service prolongée de la structure.

Des trois états présentés ci-dessus, l'état frais du béton constitue, l'étape la plus importante et la plus délicate.

En effet, même si l'on arrive à produire en laboratoire un béton conforme aux exigences en matière de performances mécaniques, il se peut que ces objectifs ne soient pas atteints au niveau de la structure si la mise en place est imparfaite ; une présence de nids d'abeille et des signes de ségrégation après le décoffrage peuvent être constatés s'il y a une insuffisance ou un excès d'énergie de vibration durant la mise en place.

Ceci est le résultat d'une main-d'œuvre peu qualifiée, et un manque de surveillance et de coordination sur chantier entre l'ingénieur concepteur et l'ingénieur chargé de l'exécution des travaux.

Afin d'assurer des structures uniformes et éviter de telles erreurs de mise en place du béton, surtout dans le cas où le niveau de congestionnement est élevé, l'idée de produire des bétons fluides qui s'étalent dans les coffrages sans effort de vibration, est une solution intéressante. C'est ainsi que le concept du béton autoplaçant est né.

Les bétons autoplaçants BAP (angl. Self Compacting Concrete SCC) constituent une nouvelle génération de béton qui s'adapte bien à l'état actuel du développement des structures face à une main d'œuvre de moins en moins qualifiée, cette gamme de béton se caractérise par une grande ouvrabilité et une grande déformabilité tout en étant stable et donne des structures résistantes et durables.

Ces bétons peuvent être mis en place sans vibration, seulement sous l'effet de la gravité, tout en développant une bonne compacité sans exiger une main d'œuvre spécialisée durant la consolidation. Ces propriétés contribuent à assurer un béton durable et de qualité. Selon la densité du ferrailage et la complexité des éléments structuraux, le besoin de vibration peut diminuer considérablement et même être éliminé, ce qui représente une économie de main d'œuvre considérable et réduit de façon très importante les nuisances sonores.

Les bétons autoplaçants se caractérisent en général, par une formulation contenant au moins un adjuvant chimique et un ajout minéral en proportions bien précises pour satisfaire les exigences du cahier des charges en matière de maniabilité et de stabilité.

Le travail que nous présentons dans ce mémoire a quatre objectifs principaux :

- 1) Optimisation des bétons autoplaçants (teneurs en gros granulats, sable et liant) ;
- 2) Développement des formulations de béton autoplaçant qui répondent à certains critères rhéologiques, tel qu'une bonne déformabilité, tout en assurant une meilleure résistance au ressuage, à la sédimentation et à la ségrégation ;
- 3) Caractérisation des bétons autoplaçants à l'état frais et à l'état durci ;
- 4) Comparaison entre le comportement d'un béton autoplaçant et celui d'un béton ordinaire vis-à-vis les résistances mécaniques, le retrait, et l'absorption capillaire.

Le présent mémoire se compose de quatre chapitres présentés comme suit :

Les deux premiers chapitres feront l'objet d'une analyse bibliographique:

Afin d'initier le lecteur à mieux comprendre certains termes relatifs à la technologie des béons, nous avons jugé nécessaire d'entamer notre travail par des généralités. Ce premier chapitre présente également les diverses caractéristiques physico-chimiques de la pâte liante.

Le second chapitre présente des notions fondamentales relatives aux caractéristiques rhéologiques des bétons autoplacants et les résultats donnés dans la littérature, qui sont relatifs aux diverses expériences de laboratoire sur l'optimisation des teneurs en gros granulats, sable, liant, ajouts chimiques et minéraux; et la caractérisation mécanique des bétons autoplacants.

Les deux derniers chapitres seront consacrés à l'étude expérimentale :

Nous présentons au troisième chapitre l'ensemble des essais effectués au laboratoire des matériaux de construction à la faculté de génie civil, en donnant à chaque fois le principe de base de l'essai et en décrivant le mode opératoire.

Les résultats des essais d'identification des matériaux utilisés et les essais effectués sur le béton frais et durci, ainsi que leurs interprétations sont regroupés au quatrième chapitre. À la fin de ce chapitre, nous présentons les résultats d'une étude économique comparative entre le prix de revient d'un BAP et celui d'un béton classique vibré.

Les principaux résultats et la conclusion de ce travail sont présentés dans une conclusion générale. Quelques recommandations ainsi que d'éventuels travaux de recherches futures sont proposées.

Première Partie

ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉ SUR LE BÉTON

1.1. HISTORIQUE :

Le béton est un composite hétérogène qui résulte du mélange intime de ciment, de granulats, d'eau, et parfois d'ajouts minéraux, et de faibles quantités d'adjuvants, ces constituants sont dosés de manière à obtenir après le durcissement, un produit solide dont les capacités de résistances dépassent celles des meilleures roches naturelles. Cette roche artificielle résiste bien à la compression et mal à la traction, c'est pourquoi son utilisation comme matériau de construction qui remonte aux romains, ne s'est véritablement développée qu'avec l'invention du béton armé, ce qui a permis de compenser son insuffisante résistance à la traction.

L'invention du béton armé est attribuée à Joseph LAMBOT, qui en 1848 fait flotter une barque en ciment armé, et à Joseph MONIER, qui construisit grâce à ce matériau des bacs à fleurs en 1819. L'utilisation du béton armé dans la construction s'étend rapidement en France sous l'impulsion de Joseph MONIER, COIGNET, François HENNEBIQUE et de Gabriel ARMAND.

En France, en 1906, une circulaire ministérielle fixe des instructions relatives à l'emploi du béton armé, codifiant ainsi la conception et le calcul des ponts et des bâtiments avec ce matériau.

En 1930, un pas conceptuel important est alors franchi avec l'invention du béton précontraint par Eugène FREYSSINET. L'utilisation de la précontrainte autorise la maîtrise de la distribution des contraintes dans la matière. Elle permet d'obtenir une grande résistance à la compression du béton tout en évitant les inconvénients dus à sa faible résistance à la traction.

La reconstruction qui suit la deuxième guerre mondiale voit la généralisation de l'emploi du béton précontraint pour la réalisation des ouvrages d'art en France. Pierre LEHELLE et Yves GUYON précisent alors les principes de calcul des structures précontraintes et mettent à la disposition des ingénieurs les méthodes nécessaires à leur conception.

Ensuite la Société Technique pour l'Utilisation de la Précontrainte (STUP) met en œuvre les idées novatrices et les brevets d'Eugène FREYSSINET et donne une forte impulsion au développement de l'emploi du béton précontraint dans le monde.

Des recherches menées depuis 1970 sur le béton, et particulièrement sur ses constituants actifs conduisent à un nouveau bond qualitatif et quantitatif de ses propriétés.

À Partir de 1980, on fabrique et on met en place des bétons à hautes performances dont la résistance à la compression atteinte 100 MPa, et même 140 MPa (BTHP) dans un immeuble à Seattle aux États-Unis.

Par la suite des bétons de poudres réactives (BPR) ont été développés par Pierre RICHARD (RICHARD et CHEYREZY 1994) et utilisés pour la première fois lors de la construction de la passerelle de Sherbrooke.

Des chercheurs de l'université de Sherbrooke à leur tête P.C.AITCIN fabriquent des bétons de 400 MPa, en utilisant des traitements thermiques et mécaniques appropriés et simples.

Pierre RICHARD, de son côté, a pu fabriquer un béton de 800 MPa en utilisant une poudre métallique.

En 1986, des chercheurs Japonais ont essayé pour la première fois de fabriquer un béton fluide qui se met en place sous l'effet gravitaire et sans vibration et qui résiste bien à la ségrégation et au ressuage, ce type de béton est appelé béton autoplaçant ou béton autonivelant.

1.2. CONSTITUANTS DU BÉTON :

1.2.1. CIMENT :

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence d'eau ; il forme une pâte faisant prise qui durci progressivement Grâce à ses caractéristiques, cet élément permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide.

Les principaux constituants du ciment portland sont :

Le silicate tricalcique (C ₃ S)	3CaOSiO ₂
Le silicate bicalcique (C ₂ S)	2CaOSiO ₂
L'aluminate tricalcique (C ₃ A):.....	3CaOAl ₂ O ₃
Le ferroaluminate tetracalcique (C ₄ AF)	4CaOAl ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃

Les ciments courants sont classés en fonction de leurs résistances mécaniques à la compression exprimées en MPa à 28 jours.

La norme EN 196-1 spécifie une limite inférieure et une limite supérieure dont les valeurs sont les suivantes :

Classe des ciments	Résistance à 2 jours (MPa)	Résistance minimale à 28 jours (MPa)	Résistance maximale à 28 jours (MPa)
32.5	/	≥ 32.5	≤ 52.5
32.5R	≥ 13.5	≥ 32.5	≤ 52.5
42.5	≥ 12.5	≥ 42.5	≤ 62.5
42.5R	≥ 20	≥ 42.5	≤ 62.5
52.5	≥ 20	≥ 52.5	/
52.5R	≥ 30	≥ 52.5	/

Tableau 1.1 : Résistances mécaniques des ciments courants. [1]

Les classes " R ", rapides, présentent aux jeunes âges des caractéristiques mécaniques plus élevées et trouvent leurs intérêt particulièrement dans certaines circonstances telles que bétonnage par temps froid, décoffrage rapide, préfabrication...etc.

Caractéristiques physico-chimiques des ciments portlands :

1) Hydratation du ciment :

Une fois la poudre de ciment mélangée à l'eau, des réactions d'hydratation se développent, il se produit alors une cristallisation qui aboutit à un nouveau système de constituants hydratés stables avec formation de cristaux en aiguilles plus au moins enchevêtrées produisant la prise.

La réaction d'hydratation peut se développer en 4 périodes principales :

a) Période initiale :

Au cours de la quelle le silicate tricalcique se dissout superficiellement pour former un monosilicate de calcium hydraté et l'ettringite.

b) Période dormante :

Au cours de la quelle la pâte reste fluide, les réactions précédentes se poursuivent moins rapidement pendant une durée de 2 à 3 heures.

c) Période de prise :

Au cours de la quelle la pâte acquiert une certaine consistance due à l'interpénétration des cristaux.

Le phénomène de prise est lié à de nombreux paramètres qui sont les suivantes :

- ✓ **Le type de ciment :** certains d'entre eux ayant des temps de prise beaucoup plus courts que d'autres dans les mêmes conditions d'ambiance ;

- ✓ **La finesse de mouture** : le début de prise étant d'autant plus rapide que la finesse de mouture est grande.
- ✓ **La température ambiante** : la prise étant stoppée à 0°C, alors qu'elle est très accélérée dès que la température dépasse 30°C.
- ✓ **L'excès d'eau de gâchage** : qui agit alors comme retardateur de prise

La norme NF P 15-301 spécifie, suivant les ciments, un temps de prise minimal de :

1 h : 30 mn pour les ciments des classes 32.5 et 32.5R.

1 h pour les ciments des classes 42.5 - 42.5R - 52.5 - 52.5R.

D'une façon générale les temps de prise sont supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2 h : 30mn à 3 h : 30mn pour la grande majorité des ciments, ces valeurs s'étendant pour une température ambiante de 20°C.

d) Période de durcissement :

Une fois la prise amorcée, le phénomène d'hydratation se poursuit, c'est la période de durcissement qui se développe environ 8 heures après le début de l'hydratation et qui se poursuit pendant des mois voire des années avec une vitesse de plus en plus lente au cours desquelles les résistances mécaniques continuent à croître.

Il faut noter que la quantité d'eau nécessaire pour un gâchage correct du béton est supérieure à celle nécessaire aux seules réactions chimiques, car il faut distinguer :

- L'eau de cristallisation ou d'hydratation fixée chimiquement dans les nouveaux constituants hydratés, son pourcentage étant en général de l'ordre de 20 à 25% du poids de ciment ;
- L'eau adsorbée aux surfaces des granulats,
- L'eau libre dans les fins réseaux capillaires, qui s'élimine plus ou moins par séchage et qui est nécessaire pour obtenir la plasticité et la maniabilité indispensables au gâchage et à la mise en place des bétons.

2) Chaleur d'hydratation :

La dissolution des différents constituants est exothermique et selon leurs pourcentages relatifs, le dégagement de chaleur est donc plus ou moins important, c'est le cas par exemple des ciments riches en C₃A que l'on cherchera à utiliser par temps froid ou en préfabrication, alors qu'on aura intérêt à les éviter par temps chaud, cette chaleur à 12 heures, est de l'ordre de 300 j/g pour certains CPA-CEM I.

3) Finesse de mouture :

La finesse de mouture, également appelée surface Blaine, exprimée en cm^2/g , représente la surface spécifique ou la surface développée d'une masse de 1 g de ciment, elle est d'une façon générale, comprise entre 3000 et 3500 cm^2/g

Plus la finesse est grande plus les résistances sont précoces et élevées, mais par contre, plus les risques de retrait et par conséquent de fissuration sont accrus.

4) Retrait :

C'est la diminution du volume apparent de la matière. On le mesure sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 16 cm de longueur et d'une section droite de $4 \times 4 \text{ cm}^2$, conservées dans l'air à une température de 20°C et une hygrométrie de 50%.

La norme NF P 15-433 impose les valeurs limites, à 28 jours, de

- 800 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour les ciments portlands CPA-CEM I et CPJ-CEM II de classe 32.5 ;
- 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour des types de ciment identiques mais de classes 32.5R, 42.5 et 42.5R.

5) Expansion :

Les causes possibles de l'expansion proviennent de l'hydratation des oxydes de calcium ou de magnésium que peuvent contenir certains ciments sous forme de chaux ou de magnésie libre.

Les ciments doivent être stables, car les risques d'expansion dans le temps peuvent provoquer des désordres importants par dislocation des maçonneries.

La stabilité se détermine par l'essai Le Chatelier, qui consiste à mesurer l'écartement de deux aiguilles solidaires d'un moule rempli par la pâte de ciment à tester, et conservé dans l'eau bouillante. La valeur de l'expansion mesurée doit être inférieure à 10 mm pour tous les types de ciments courants.

Le pourcentage maximal de magnésie est limité ; sa valeur spécifiée par la norme, doit être au plus égale à 5% pour les CPA-CEM I ainsi que pour les clinkers des ciments courants.

6) Gonflement :

Bien que non normalisé, il est utile de rappeler qu'alors qu'il se rétracte dans l'air, le ciment augmente de volume lorsqu'il est immergé dans l'eau, ses variations dimensionnelles étant environ 10% de celles constatées dans l'air.

1.2.2. LES AJOUTS :

Ce sont des particules de très faibles dimensions qui sont incorporées dans le béton pour améliorer ses caractéristiques physico-chimiques. Exemple : Fumée de silice, Cendres volantes, Laitiers de haut fourneau, Pouzzolanes et Fillers calcaires.

1.2.2.1. Fumée de silice :

L'idée de l'utilisation des fumées de silice dans le béton est née dans le but de minimiser la pollution de l'environnement.

Afin de limiter les déchets polluants de l'industrie du silicium et de ses alliages, les pays scandinaves ont utilisé les fumées de silice comme un ajout dans le béton. Cependant, le développement de la technologie des adjuvants et surtout les superplastifiants haut réducteurs d'eau a facilité l'incorporation des fumées de silice, et à contribuer dans l'amélioration des caractéristiques du béton que ce soit à l'état frais ou à l'état durci.

La fumée de silice est un sous produit de la fabrication du silicium métallique ou des différents ferro-alliages contenant du silicium comme le (FeSi, CaSi). Les fumées de silice proviennent de la condensation de vapeurs de SiO qui sont produites dans un four à arc électrique à une température de 2000°C où le quartz est réduit à l'état de silicium. Dès que ces vapeurs de SiO entrent en contact avec l'air dans les parties les plus froides du four, elles s'oxydent et se condensent sous forme de microsphères de silice.

1.2.2.2. Propriétés physico-chimiques des fumées de silice :

Les fumées de silice ont une structure vitreuse, ayant un diamètre moyen de l'ordre de 0.1 μm , elles sont donc 100 fois plus fines que les grains de ciment et contiennent en général plus de 90% de silice.

Les fumées de silices ont une composition chimique très constante, le laboratoire de la société canadienne SKW qui produit des fumées de silice provenant de la fabrication de silicium ou de ferro-silicium a publié les résultats de la compilation de l'analyse chimique de 32 échantillons de fumées de silice prélevés quotidiennement.

Teneur (%)	Moyenne	Écart-type	Valeur la plus élevée	Valeur la plus faible
SiO ₂	92.1	1.3	94.9	89.1
Al ₂ O ₃	0.25	0.12	0.70	0.16
Fe ₂ O ₃	0.79	0.70	3.1	0.22
Na ₂ O	0.17	0.04	0.11	1.1
K ₂ O	0.96	0.22	1.44	0.56
SO ₃	0.36	0.1	0.57	0.16
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	93.1	1.44	95.7	90.3

Tableau 1.2 : Résultat de la compilation de l'analyse chimique de la fumée de silice produite à l'usine SKW, Canada. [2]

1.2.2.3. Mécanisme d'action de la fumée de silice dans le béton :

Grâce à ses caractéristiques physico-chimique, telles que la très grandes finesse et la teneur en silice (plus de 92%) ainsi que sa structure vitreuse, les fumées de silice peuvent agir selon trois mécanismes d'action :

a) Effet pouzzolanique :

Grâce à leurs finesse, les fumées de silice réagissent très vite avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment pour former du C-S-H, et on peut observer des gains de résistance en compression à jeune âge (7 jours) contrairement à la pouzzolane naturelle ou artificielle où il faut attendre plus de 28 jours pour observer des gains de résistance en compression.

b) Effet physico-chimique :

L'utilisation de la fumée de silice a pour effet de rendre le béton plus compacte et imperméable. Grâce à sa réaction pouzzolanique avec la chaux dégagée par le clinker lors de l'hydratation du ciment, on observe après 7 jours que les pores ayant un diamètre de 0.1 µm commencent à se boucher en parallèle avec la diminution du diamètre des pores les plus fins, ce phénomène se poursuit au fur et à mesure que le béton vieillit.

c) Effet physique :

Les particules de fumée de silice étant vitreuse et fines, elles permettent de remplir les pores les plus fins de l'empilement des grains de ciment.

D'après P-C.AITCIN, la fumée de silice peut plastifier les bétons à faible rapport E/L, en chassant l'eau qui se trouve entre les particules de ciment. [2]

L'utilisation de la fumée de silice exige inévitablement l'introduction d'un superplastifiant lors du malaxage du béton pour défloculer les grains de ciment et les particules de fumée de silice d'une part, et garder la même maniabilité que les bétons ordinaires d'autre part, car l'utilisation de la fumée de silice a pour effet d'augmenter la demande en eau, à cause de l'ancrage de ses particules entre elles.

1.2.2.4. Influence des fumées de silice sur les propriétés des bétons :

Par leurs caractéristiques morphologiques et minéralogiques, les fumées de silice peuvent influencer sur les propriétés des bétons à l'état frais ou à l'état durci :

- **À l'état frais :**

L'utilisation des fumées de silice, permet :

- ❖ D'augmenter le volume des particules fines dans le béton, ce qui permet de réduire les risques de ségrégation et d'éliminer pratiquement le ressuage, dans le cas des bétons autoplaçants ;
- ❖ De faciliter les conditions de transport et de mise en place du béton par pompage.

- **À l'état durci :**

- ❖ Augmenter considérablement la résistance en compression et l'imperméabilité du béton (Les bétons contenant 10% de fumée de silice deviennent pratiquement Imperméables);
- ❖ Remplacer une certaine quantité de ciment et obtenir la même résistance compression à 28 jours (d'après P.C.AITCIN, avec un dosage de 7 à 12% de la masse de ciment, 1 kg de fumée de silice peut remplacer de 3 à 4 kg de ciment); [2]
- ❖ Réduire considérablement la quantité de chaleur qui se développe dans un béton, grâce à la réduction du dosage en ciment.

1.2.3. GRANULATS :

On définit les granulats comme l'ensemble des grains inerte compris entre 0 et 40 mm (Sable, graviers, cailloux) dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant de recyclage.

On distingue les granulats roulés extraits de ballastières naturelles ou de rivière, et les granulats concassés, obtenus à partir des roches exploitées en carrières.

Les granulats sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent.

La courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage, des poids des matériaux passants dans des tamis de dimensions normalisées.

1.2.4. EAU :

L'eau de gâchage doit être propre, elle ne doit pas contenir de matière en suspension au delà des tolérances réglementaires suivantes : [1]

- 2 g/l pour les bétons à haute résistance
- 5 g/l pour les bétons à faible résistance

L'eau de gâchage ne doit pas contenir des sels dissous au delà de :

- 15 g/l pour les bétons à hautes résistances.
- 30 g/l pour les bétons à faibles résistances.

1.2.5. ADJUVANTS :

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés au béton frais en faibles quantités, afin d'en améliorer certaines propriétés, les principaux adjuvants sont :

- ^ **Les superplastifiants** : ils permettent d'obtenir des bétons maniables et ouvrables par défloculation des grains de ciment. À une consistance donnée ils offrent la possibilité de réduire la quantité d'eau nécessaire à la fabrication et la mise en place du béton, et par conséquent augmenter les caractéristiques mécaniques du béton.
- ^ **Les retardateurs de prise** : ils trouvent leur utilisation dans le transport du béton sur de grandes distances, en particulier par temps chaud. Ils sont aussi utilisés pour éviter toute discontinuité lors de reprise de bétonnage.
- ^ **Les accélérateurs de prise** : ils trouvent leur utilisation dans la réalisation de Scellement ou d'étanchement

- ♣ **Les accélérateurs de durcissement** : ils permettent d'obtenir de bonnes caractéristiques mécaniques à jeune âge afin de décoffrer rapidement et augmenter par conséquent la cadence de travail, en particulier en temps froid.
- ♣ **Les entraîneurs d'air** : ils favorisent la formation de microbulles d'air (agrégats fictifs) de façon homogène afin d'augmenter la résistance du béton aux cycles gel-dégel.
- ♣ **Les hydrofuges de masse** : ils permettent d'étanchéifier le béton, en colmatant les pores capillaires, ils trouvent leur utilisation dans la réalisation des réservoirs d'eau, piscines, bache à eau.

CHAPITRE 2

LE BÉTON AUTOPLAÇANT

2.1. DÉFINITION DU BÉTON AUTOPLAÇANT :

De nombreux termes définissent ce béton : béton autonivelant, béton autocompactant (SCC en anglais), ou béton hyperfluide. Cependant, l'appellation la plus utilisée aujourd'hui dans le domaine de construction est béton autoplaçant, terme utilisé dans cette thèse.

Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons très fluide, homogène et stable. La caractéristique principale de ces bétons réside dans le fait qu'ils se mettent en place sans vibration. Ils sont très déformables et épousent parfaitement les formes des coffrages les plus complexes, grâce à leur bonne uniformité une fois mis en place, ils donnent des structures résistantes et durables.

Quelques fois, on parle de béton autonivelant (BAN) pour les dalles et toutes les parois horizontales et de béton autoplaçant (BAP) pour les murs et toutes les parois verticales.

Les principes de formulations des bétons autoplaçants se distinguent par le fait qu'ils présentent un volume de pâte (ciment + sables + eau + adjuvants + fines) plus élevé que les bétons ordinaires, ils se caractérisent aussi par une quantité de fines élevée et l'emploi d'adjuvants appelés superplastifiants.

Une nouvelle famille d'adjuvants, appelés rétenteurs d'eau ou agents viscosifiants, entre également parfois dans leur formulation. Ces derniers vont donner de la viscosité à la pâte, pour lui conférer un certain nombre de propriétés qui visent à limiter la ségrégation.

La dernière caractéristique des BAP qu'ils contiennent une faible proportion de granulats de l'ordre de 20 à 25 millimètres . Pour ces bétons, on essaie le plus possible de travailler avec des granulats de 16 mm de taille maximale, voire dans la mesure du possible moins.

Ce sont ses propriétés à l'état frais qui distinguent essentiellement le béton autoplaçant du béton ordinaire, le BAP s'écoule sous son propre poids avec un débit suffisant sans qu'il soit nécessaire de faire appel à des moyens de vibration ou de serrage. Le BAP doit pouvoir ainsi s'écouler sans vibration dans des zones confinées ou très ferraiillées, tout en possédant une fluidité élevée, et une bonne résistance à la ségrégation.

2.2. HISTORIQUE DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS :

L'idée de produire des bétons autoplaçants est apparue pour la première fois au Japon en 1986, le Japon fut le pionnier dans le développement de cette nouvelle technique.

Ces bétons très fluides étaient en même temps stables et présentaient une bonne résistance à la ségrégation et au ressuage.

Afin de satisfaire les conditions habituellement contradictoires (déformabilité et résistance à la ségrégation), on a fait appel à la technique des bétons coulés sous l'eau ; en effet, la première génération des bétons autoplaçants est formulée de la même manière que les bétons destinés aux structures submergées, mais avec une viscosité plus faible et donc une maniabilité plus élevée. Ces bétons contiennent souvent des agents de viscosité ou agents colloïdaux afin de résister à la ségrégation des gros granulats et au phénomène de ressuage. L'utilisation de cette nouvelle gamme de béton est en train de devenir de plus en plus répandue partout dans le monde. En effet depuis son développement, le nombre d'ouvrages réalisés avec les bétons autoplaçants ne cesse d'augmenter surtout au Japon où l'utilisation de ce nouveau matériau est répandue dans le domaine de la construction.

Les bétons autoplaçants offrent un grand nombre de possibilités très intéressantes dans de nombreux domaines : constructions, renforcement et réparation d'ouvrage d'art (application de couches minces dans des endroits difficiles d'accès), construction d'éléments préfabriqués à haute résistance, moulage et mise au point de béton pour toute utilisation (bétons coulés sous l'eau pour des réparations, bétons confinés, pieux,.....etc.).

À titre d'exemple nous citerons quelques réalisations Japonaises :

- ♦ Le pont Kiba park. où 650 m³ de bétons autoplaçants ont été utilisés avec une résistance à la compression à 28 jours de 60 MPa [3] ;
- ♦ Le pont Akashi Kaikyo, le plus long pont suspendu au monde (3910 m) où 390 000 m³ de béton autoplaçant ont été versés dans les coffrages des fondations et des piliers très congestionnés sans vibration (OKAMURA et coll. 1994) [4] ;
- ♦ Le bâtiment Landmark Tower où un béton autoplaçant d'excellente déformabilité a été mis en place avec succès dans 66 colonnes de 40 m de hauteur chacune (HAYAKAWA et coll. 1995) [5].
- ♦ Le stade de Fukuoka où 10 000 m³ de béton autoplaçant ont été utilisés pour des sections très ferrillées et de formes compliquées (IZUMI et coll. 1995) [6]

D'autre part, plusieurs autres structures (réservoirs, murs de soutènement, poteaux, etc.) ont été construites totalement ou partiellement avec des bétons autoplaçants.

2.3. SPÉCIFICITÉ DE LA COMPOSITION DES BAP :

Les approches de composition des BAP, sont basées sur les critères suivants :

a) Une quantité de fines importante :

Les compositions des bétons autoplaçants comportent une importante quantité de fines, (environ 500 kg/m^3 de diamètre inférieur à $80 \mu\text{m}$) pour assurer la maniabilité et limiter les risques de ressuage et de ségrégation. Le liant utilisé est fréquemment un mélange de deux ou trois constituants, afin éviter l'élévation de température du béton lors de la prise du béton.

b) Un volume de pâte élevé :

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

c) Utilisation des superplastifiants :

La maniabilité des BAP est obtenue en ajoutant des superplastifiants. Cet ajout ne doit pas être très élevé (proche du dosage de saturation) sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de ségrégation et du ressuage.

d) Utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau (agent de viscosité):

Ce sont généralement des dérivés celluloses, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales, qui augmentent la viscosité de l'eau. Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse.

Ces adjuvants semblent utiles pour des bétons ayant des rapports eau/liant élevés, mais leur utilisation ne se justifie pas pour des BAP ayant des rapports E/L faible.

Les agents de viscosité ont la réputation de rendre les bétons autoplaçants moins sensible à des variations de la teneur en eau, ils peuvent en parallèle conduire à des entraînement d'air excessifs et à une diminution de la maniabilité.

e) Un faible volume de gravillon :

Les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec l'augmentation des teneurs en gros granulats. Les BAP peuvent être réalisés avec des granulats roulés ou concassés, le diamètre maximal des gravillons dans un BAP étant compris entre 10 et 20 mm. Le rapport gravillon/sable pour les BAP est voisin de 1. [7]

2.4. MATIÈRES PREMIÈRES UTILISÉES DANS LES BAP :

2.4.1. LIANTS ET GRANULATS :

Les BAP peuvent être réalisés avec la plupart des ciments. Cependant, compte tenu des exigences de démoulage aux jeunes âges, les BAP utilisés dans l'industrie du béton contiennent presque toujours du ciment CPA-CEM I 52.5 ou 42.5.

Le liant est constitué de ciment au quel on ajoute des particules fines minérales qui correspondent à des additions normalisées ou non, ce sont principalement :

- Des fillers calcaires (calcite, dolomite,...) ;
- Des fillers siliceux ; des laitiers de haut fourneau ;
- Des cendres volantes ;
- Des fumées de silice

Le développement durable du béton permet entre autre de réduire l'émission des gaz à effet de serre. La production d'une tonne de ciment libère environ la même quantité de CO₂ dans l'atmosphère, le remplacement d'une partie de ciment par des ajouts cimentaires permettra de diminuer de façon systématique la quantité de CO₂ émise.

Le remplacement d'une fraction de ciment par des cendres volantes ou de laitier permet d'obtenir un maintien d'ouvrabilité plus long. Les fillers calcaires ont un effet inverse, ils constituent des sites de nucléation pour la formulation des hydrates et favorisent ainsi la prise du matériau.

Fumée de silice lorsqu'elle est introduite dans le BAP (CLERGUE et MONACHON, 1998), conduit à des propriétés semblables à celles obtenues pour les bétons à hautes performances à savoir une augmentation de la compacité et donc des résistances mécaniques plus élevées.

Dans les BAP, la proportion des gravillons par rapport au sable est plus faible qu'avec un béton ordinaire afin de permettre l'écoulement du matériau dans les zones confinées. Le rapport massique G/S est de l'ordre de 1. Les BAP sont réalisés avec des granulats roulés et concassés. Néanmoins, comme dans le cas des bétons traditionnels, la forme des granulats a une influence sur la rhéologie des BAP. Les coefficients de frottements sont plus faibles entre les granulats roulés qu'entre les granulats concassés.

2.4.2. ADJUVANTS DES BÉTONS :

L'usage des adjuvants a besoin d'être bien contrôlé, parce que toutes les combinaisons ne sont pas toujours compatibles et bénéfiques pour les propriétés du béton.

Quelques-uns de ces produits réagissent les uns avec les autres, avec des phases du ciment ou les produits d'hydratation.

L'utilisation des superplastifiants en combinaison avec les ajouts cimentaires ont ouvert plusieurs voies technologiques intéressantes tels que : les bétons à hautes performances, les bétons autoplaçants et les bétons à poudres réactives.

Les agents réducteurs d'eau ordinaires tel que les lignosulfonates sont utilisés dans des bétons ayant un rapport eau/ciment de 0,40 ou plus. Quand une réduction d'eau plus élevée est exigée, l'usage de superplastifiants est recommandé.

Les polymères synthétiques sont les plus effectifs pour ce but. Les produits à base de polynaphtalène sulfonate et de poly-mélatamine sulfonate sont les plus utilisés depuis plusieurs années. Ils peuvent accomplir jusqu'à 30% de réduction d'eau. [8]

Une nouvelle génération de superplastifiants à base de polyacrylates a été développée récemment et peut accomplir la même réduction de l'eau que les superplastifiants antérieurs pour un dosage qui est beaucoup plus inférieure. Quelques ajustements sont faits pour diminuer les effets secondaires de ces produits; tel que l'entraînement excessif d'air ou un retard excessif de la prise du ciment.

D'autres adjuvants chimiques tels que les agents colloïdaux (ou modificateur de la viscosité) permettent la production de béton autoplaçant. Les bétons autoplaçants nécessitent un usage simultané de superplastifiant et d'agent colloïdal. Quelques-uns de ces produits sont à base de gomme de polysaccharide et d'autres à base d'hydroxyde propyle méthyle cellulose (HMPC). Ces produits augmentent la viscosité et la stabilité des bétons autoplaçants qui ont besoin d'un dosage élevé en superplastifiants pour obtenir une bonne fluidité.

Les agents de viscosité diminuent la ségrégation et le ressuage du béton dû à un haut dosage en superplastifiant. La sélection et le dosage de ces deux adjuvants devraient être bien contrôlés et leur compatibilité bien étudiée avant d'utiliser leur effet synergique pour optimiser les propriétés du béton autoplaçant. [8]

2.4.2.1. Superplastifiant :

Pour ajuster la fluidité d'un BAP en fonction des contraintes de mise en place et des résistances mécaniques désirées, il est nécessaire d'utiliser un superplastifiant.

Les superplastifiants utilisés pour les BAP sont les mêmes que ceux employés pour les autres types de bétons.

Les principaux superplastifiants sont à base de :

- ✓ Copolymère formaldéhyde naphthalène sulfonate (PNS).
- ✓ Copolymère formaldéhyde mélamine sulfonate (PMS).
- ✓ Polymère avec fonction acrylate (PA).
- ✓ Polymère avec des fonctions carboxylate (PC).
- ✓ Monomère avec les fonctions phosphonate et/ou carboxylate (MPC).

Les superplastifiants interagissent avec les particules de ciment et éventuellement avec les additions en s'adsorbant à leur surface ce qui permet d'éviter le phénomène de floculation au contact de l'eau. Les particules sont ainsi dispersées par combinaison d'effet électrostatique et stérique et la proportion d'eau libre est plus importante. Pour une composition granulairé donnée, la capacité de remplissage d'un BAP dépend fortement du dosage en superplastifiant. Elle croit avec le dosage en superplastifiant jusqu'à un maximum au delà duquel apparaissent les phénomènes de ségrégation des constituants (TANGTERMSIRIKUL et al. 1988). [8]

Pour mettre en évidence la tendance qu'ont les grains de ciment à flocculer lorsqu'on les met dans l'eau, P.C.AITCIN [9] a réalisé un simple essai, il s'agit d'introduire 50 gr de ciment dans un vase gradué de 1 litre, d'agiter le tout et de laisser les grains de ciment sédimenter. Avant le début de la sédimentation, les grains de ciment forment une suspension homogène, mais très vite on voit les plus gros grains de ciment se déposer au fond du vase gradué. Après quelques dizaines de minutes à 1 ou 2 heures, on voit assez subitement l'eau de la partie supérieure du vase devenir claire alors que l'on voit tous les grains de ciment se graduer et occuper un volume nettement plus élevé que le volume occupé par 50 gr de ciment sec au fond du vase comme le montre la figure 2.1.

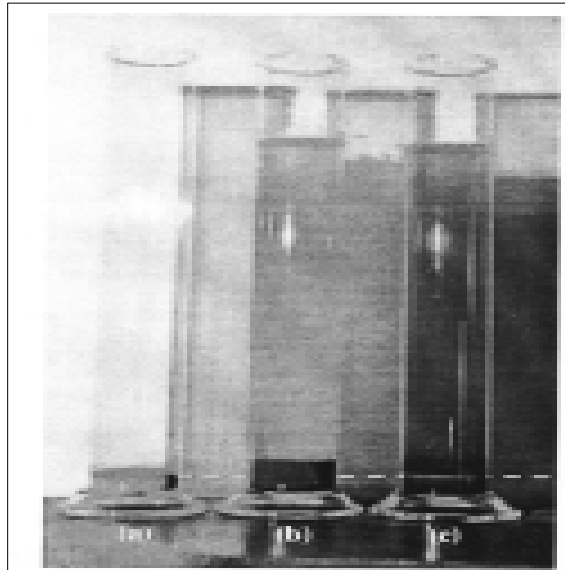


Figure 2.1 : Défloculation des grains de ciment en présence d'un superplastifiant [9]

- (a) Volume occupé par 50 gr de ciment au fond du vase gradué.
- (b) Volume occupé après 24 heures par 50 gr de ciment mis en suspension.
- (c) Volume occupé après 24 heures par 50 gr de ciment mis en suspension où l'on a remplacé 10 cm^3 d'eau par 10 cm^3 de superplastifiant.

Si l'on répète la même expérience mais cette fois-ci en remplaçant 10 cm^3 d'eau par 10 cm^3 d'un superplastifiant de type polynaphtalène sulfonate (PNS), on commence encore par voir se déposer les gros grains de ciment au fond du vase gradué, mais on ne voit plus les grains de ciment se déposer en bloc au fond du vase. On voit plutôt les particules de ciment continuent à se sédimenter régulièrement pour finalement, après 24 ou 48 heures, ne former au fond du vase qu'une couche de la même épaisseur que 50 gr de ciment sec.

- ***La compatibilité ciment-superplastifiant :***

Avec le développement de la technologie des bétons à haute performance et les bétons autoplaçants, on a vu apparaître de plus en plus fréquemment des phénomènes d'incompatibilité ciment-superplastifiant. Ces phénomènes d'incompatibilité sont liés à une interaction entre le superplastifiant et le sulfate de calcium présent dans le ciment.

En plus de leur action dispersante, les superplastifiants peuvent réagir avec le C_3A (Aluminates tricalcique), bloquer la formation d'ettringite et même retarder ou bloquer plus ou moins la mise en solution de la plupart des différentes formes de sulfate de calcium que l'on retrouve dans le ciment.

On peut facilement illustrer de tels comportements en étudiant le comportement de coulis fabriqués à partir de certains ciments. Lorsqu'on étudie le comportement rhéologique des coulis ayant un faible rapport E/C ou E/L en mesurant le temps d'écoulement au cône Marsh, on peut se retrouver d'une façon systématique, face à quatre situations. LESSARD, GENDREAU, BAALBAKI et PIGEON ont illustré ces situations lorsqu'on fait varier le dosage en superplastifiant : Figures : 2.2 (a), (b), (c) et (d) établies.

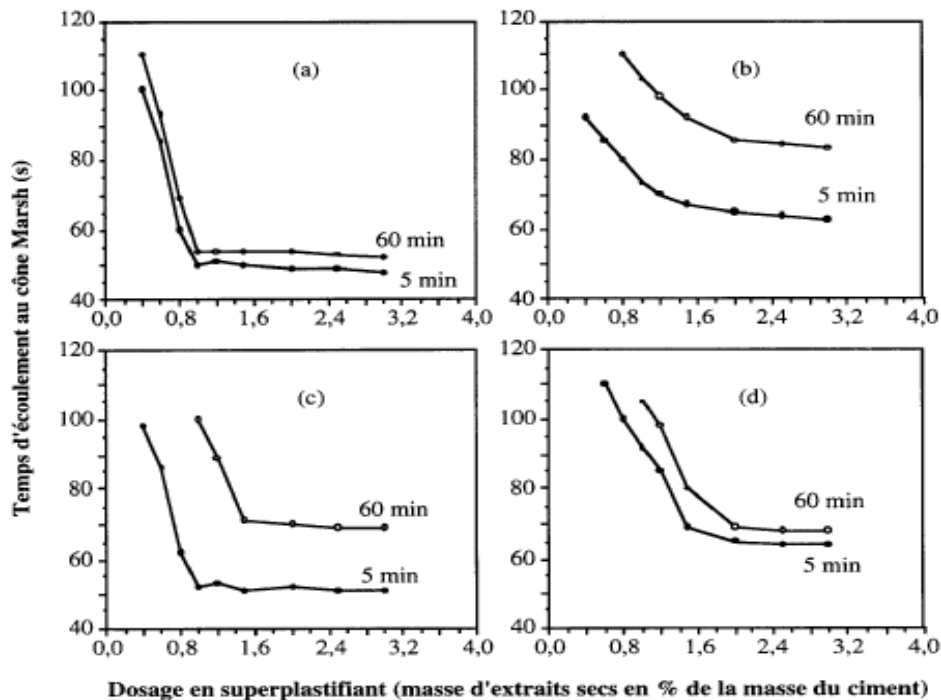


Figure 2.2 : Comportement rhéologique de coulis à faibles rapports E/C en présence d'un superplastifiant. [9]

Les figures 2.2 (c) et (d) représentent des situations intermédiaires. À la figure (c), la courbe à 5 minutes ressemble à celle de la figure (a) tandis que la courbe à 60 minutes ressemble à celle de la figure (b). Dans le cas de la figure (d) c'est le contraire qui se produit ; la courbe d'écoulement à 5 minutes ressemble à celle de la figure (b), tandis que la courbe d'écoulement à 60 minutes ressemble à celle de la figure (a). Même s'il n'a pas une bonne fluidité initiale, le coulis de la figure (d) ne voit pas sa rhéologie se détériorer dans le temps.

On peut améliorer le comportement rhéologique de coulis correspondant au cas des figures (b), (c) et (d) en ajoutant une quantité appropriée de retardateur de prise de façon à se retrouver avec des coulis dont le comportement est similaire à celui représenté à la figure (a). Malheureusement, ce n'est pas toujours aussi facile à faire qu'à dire et il n'est pas toujours possible d'en arriver à une solution aussi simple d'où il vaut mieux alors changer de ciment.

2.4.2.2. Agent de viscosité:

L'ajout d'un superplastifiant dans un béton augmente son ouvrabilité mais réduit sa viscosité. De ce fait, le matériau devient moins stable du point de vue de la ségrégation et du ressuage.

Pour minimiser cet effet, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Si la formule ne contient pas d'agent de viscosité, il est nécessaire d'avoir une plus grande quantité de liant pour assurer un écoulement sans ségrégation. Les agents de viscosité peuvent être de différentes natures :

- ♦ Polysaccharide obtenu par fermentation microbiologique du type gomme welan ou gomme de xanthane ;
- ♦ Dérivés cellulosiques à base de méthyle cellulose, d'hydroxy-éthyl cellulose ;
- ♦ Colloïde naturel ;
- ♦ Suspension des particules siliceuses.

L'agent de viscosité est un polymère qui interagit avec l'eau et rend la pâte du béton plus visqueuse. Une meilleure cohésion de la pâte permet de maintenir une distance entre les granulats, ce qui réduit leurs interactions de friction et de collision lors de l'écoulement du matériau et évite le phénomène de blocage au droit d'un obstacle.

Il permet de conserver une répartition homogène des différents constituants, l'action de l'agent de viscosité étant d'une certaine façon opposée à celle du superplastifiant, l'optimisation de la fluidité et de la résistance à la ségrégation d'un BAP requiert la sélection d'un couple compatible de superplastifiant et d'agent de viscosité et l'ajustement de leur dosage.

En général, pour une ouvrabilité donnée, la quantité de superplastifiant croît avec celle de l'agent de viscosité. Un dosage en agent de viscosité trop important empêche la pâte de se déformer et entraîne une perte de fluidité. Notons également qu'une très forte quantité d'agent de viscosité peut conduire à un entraînement d'air excessif.

Les agents de viscosité permettent un maintien de la fluidité et de la capacité de remplissage au cours du temps, sur une durée de l'ordre d'une heure.

Parmi les différents types d'agent de viscosité, ceux à base de polysaccharide et plus particulièrement la gomme welan semblent se différencier par la variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse. Une solution de gomme welan présente un seuil de cisaillement élevé et une faible viscosité pour des contraintes de cisaillement élevées.

De ce fait, un béton contenant de la gomme welan possède une forte déformabilité lorsqu'il s'écoule et celle-ci devient faible dès que le mouvement du matériau cesse.

Les BAP ont ainsi de meilleures résistances à la ségrégation dynamique et statique. Notons également les essais réalisés par ROLS et al (1999) [5] qui ont utilisé comme agents de viscosité de l'amidon et une suspension de particules siliceuses.

Les mesures effectuées sur bétons frais et sur béton durci montrent que la suspension de particules siliceuses, et dans une moindre mesure l'amidon peuvent se substituer à la gomme de welan.

Concernant l'adsorption d'une partie des polymères à la surface des grains de ciment, celle-ci varie selon la nature des polymères et les caractéristiques du ciment. La quantité de polymère adsorbée est d'autant plus élevée que la finesse du ciment est grande. Cependant, deux ciments de finesse identique peuvent retenir des quantités de polymères différentes.

Les caractéristiques minéralogiques des grains de ciment sont autant de paramètres déterminants. Selon BURGE (1999), la quantité de polymère adsorbée par un ciment donné dépend du caractère ionique plus ou moins prononcé de l'adjuvant et de son poids moléculaire.

L'adsorption est d'autant plus forte que le polymère est fortement ionique et de poids moléculaire faible. BURGE (1999) montre que les polymères peu ioniques permettent d'obtenir une meilleure fluidification des bétons autoplaçants.

Jusqu'à présent, il n'est pas encore possible de fabriquer des superplastifiants qui soient efficaces avec n'importe quel ciment, pour n'importe quel E/C, parce que la vitesse de dissolution des différentes formes de sulfates de calcium que l'on retrouve dans les ciments modernes varie beaucoup trop. Cependant, lorsqu'on fabrique un ciment portland, si on prend en considération l'influence du sulfate de calcium sur la rhéologie des bétons à faible rapport E/L, il est possible d'ajuster la composition du ciment portland pour qu'il devient parfaitement compatible avec tous superplastifiants que l'on retrouve sur le marché.

Il faut reconnaître que les superplastifiants, quand ils sont bien utilisés, sont des constituants essentiels des bétons durables tout autant que le ciment. Grâce aux propriétés dispersantes très efficaces des superplastifiants, il est maintenant possible de fabriquer des bétons fluides à des rapports E/L très faibles de l'ordre de 0.32 ou même moins.

2.5. PROPRIÉTÉS RECHERCHÉES DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS :

La rhéologie des bétons frais est autant reliée à la composition de la pâte de ciment qu'à celle du mélange de béton lui-même. Un des avantages des bétons autoplaçants est d'améliorer la déformabilité du mélange afin qu'ils puissent remplir facilement les coffrages sans utiliser un moyen de vibration (l'étalement du béton et sa mise en place se font seulement sous l'effet de la gravité). En plus d'une ouvrabilité élevée on cherche aussi à améliorer la stabilité volumétrique des bétons autoplaçants.

En général, le critère de fluidité - stabilité est assez difficile à rencontrer, mais, au moyen d'agents colloïdaux (agent de viscosité), des teneurs élevées en ajouts minéraux ou des teneurs appropriées en sable et en gros granulats, la stabilité et la déformabilité sont assurées. On entend par stabilité, la résistance à la ségrégation, à la sédimentation et au ressuage du béton.

La fluidité et la stabilité constituent les deux paramètres qui permettent de donner une appréciation sur les caractéristiques du béton à l'état frais.

2.6. PROPRIÉTÉS DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS :

La fluidité et la stabilité constituent les deux paramètres qui permettent de donner une appréciation sur les caractéristiques du béton à l'état frais.

2.6.1, NOTION DE DÉFORMABILITÉ ET DE CAPACITÉ DE REMPLISSAGE :

Le béton doit se déformer dans les coffrages pour contourner les obstacles qu'il peut rencontrer durant son écoulement. Cette déformation doit se faire sans qu'il y ait un risque de séparation de ses différents constituants. La capacité de remplissage d'un béton est un indice d'ouvrabilité qui nous renseigne sur la déformabilité, la cohésion et la résistance à la ségrégation d'un béton durant son écoulement (OZAWA et coll. 1992).[10]

En plus de la qualité du béton (composition et teneur en liant, rapport E/L, teneur en ajout chimique,...etc.). La capacité de remplissage est affectée par la forme des coffrages, l'espacement des armatures et la méthode de mise en place du béton.

Une étude expérimentale a été réalisée par OZAWA et coll. (1992) [10] pour évaluer la capacité de remplissage d'un BAP sous des conditions sévères.

L'essai comme le montre la figure 2.3 consiste à déverser 30 litres de béton autoplaçant dans un contenant cubique dont le fond contient un grillage ayant un maillage de 50 mm. Le maillage est supposé simuler une zone fortement congestionnée d'un coffrage.

Une trappe empêche le béton de s'écouler avant le moment de l'essai, on applique une pression uniforme de 0.1 kg/cm^2 sur toute la surface du béton et on ouvre la trappe. Lorsque l'écoulement cesse, on mesure la quantité du béton ayant traversée le grillage.

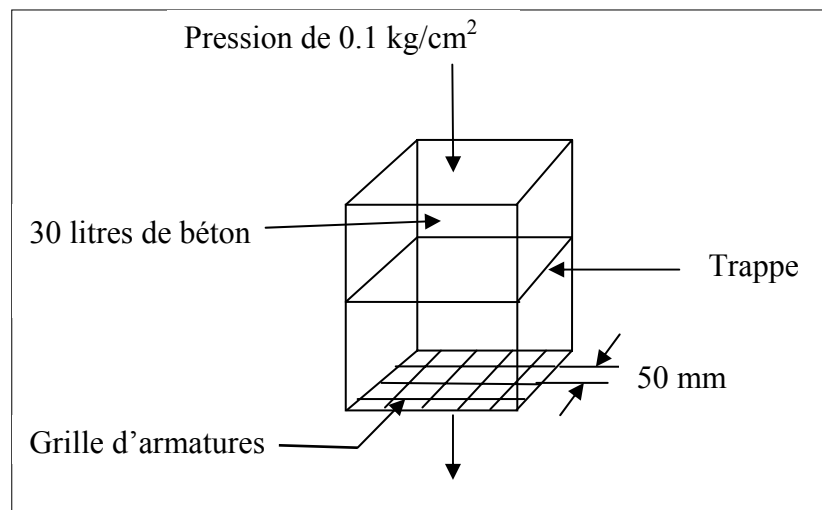


Figure 2.3 : Essai de la boîte, capacité de remplissage (OZAWA et coll. 1992). [10]

La relation entre le volume du béton passant à travers le grillage et l'affaissement est présenté par le graphe de la figure 2.4 :

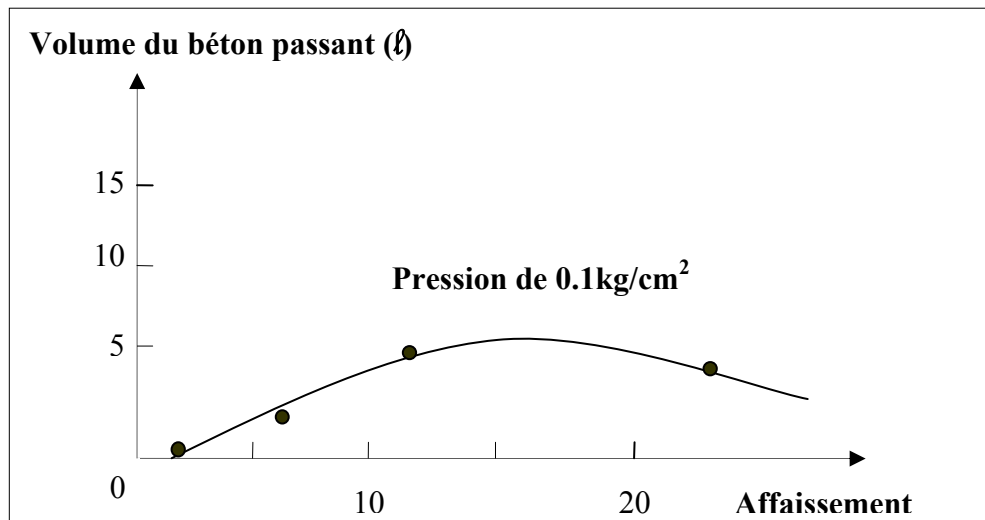


Figure 2.4 : Variation du volume de béton passant en fonction de l'affaissement (Essai de la boîte, OZAWA et coll. 1992). [10]

Cette relation n'est en fait pas linéaire, mais elle possède plutôt un optimum pour les bétons à faible affaissement, il y a une difficulté d'écoulement à cause d'un manque de déformabilité.

Par contre, dans le cas des affaissements élevés, on assiste à un phénomène de ségrégation. Le béton possède une très faible viscosité et les granulats se séparent du mortier pour former des arches et bloquent l'écoulement.

La capacité de remplissage maximale correspond à un affaissement où la courbe de la déformabilité et celle de la résistance à la ségrégation se coupent (cf. figure 2.5) :

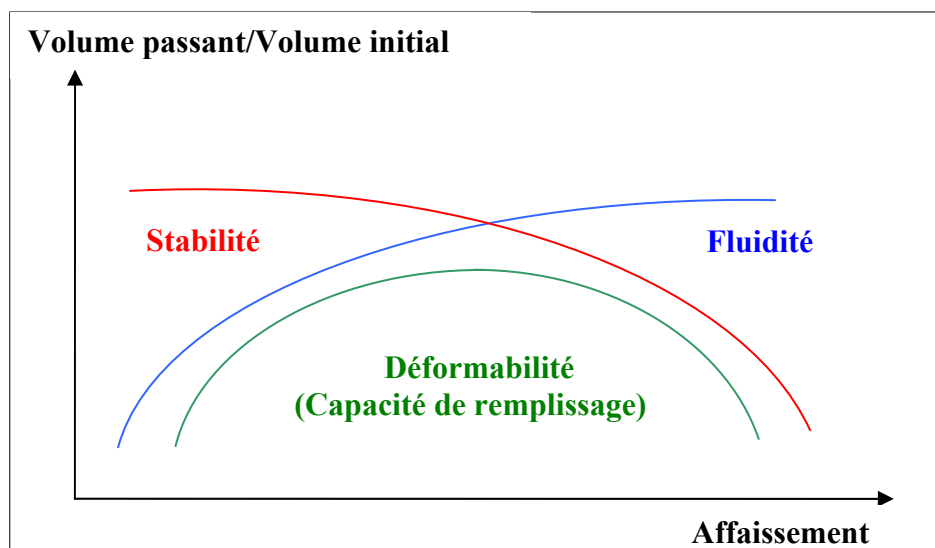


Figure 2.5 : Capacité de remplissage ou déformabilité maximale (OZAWA et coll. 1992). [10]

La capacité de remplissage est contrôlée principalement par la déformabilité du béton à faible affaissement et par la résistance à la ségrégation à affaissement élevé. L'eau libre est l'un des facteurs qui définissent la déformabilité, la cohésion et la résistance à la ségrégation. Il s'agit de la fraction d'eau de malaxage qui n'est pas retenue, physiquement ou chimiquement, par les granulats et le liant. Cette eau est responsable de l'amélioration de l'ouvrabilité du béton, et elle est calculée de la manière suivante :

$$E_l = E - (E_g + E_p) \dots\dots\dots (1)$$

Avec :

- E_l : **Eau libre** ;
- E : Eau totale dans le mélange ;
- E_g : Eau retenue par les granulats ;
- E_p : Eau retenue par le liant.

OZAWA et coll. (1992) [10] ont montré que la déformabilité est uniquement fonction de l'eau libre. En effet, ils mesurent le volume de sable maximal que peut contenir un mortier de rapport E/L donné pour que toute la quantité de mortier passe à travers un cylindre percé de trous ayant un diamètre égal à l'espacement entre les gros granulats dans un béton.

On constate que, plus le rapport E/L augmente, plus on peut mettre du sable pour une quantité fixe de pâte (cf. figure 2.6). Cependant cet essai montre la présence d'un rapport E/L optimal au-dessus duquel un excès de la quantité de sable ajoutée provoque un arrêt d'écoulement par blocage des grains de sable au droit des trous. C'est la ségrégation au niveau du mortier.

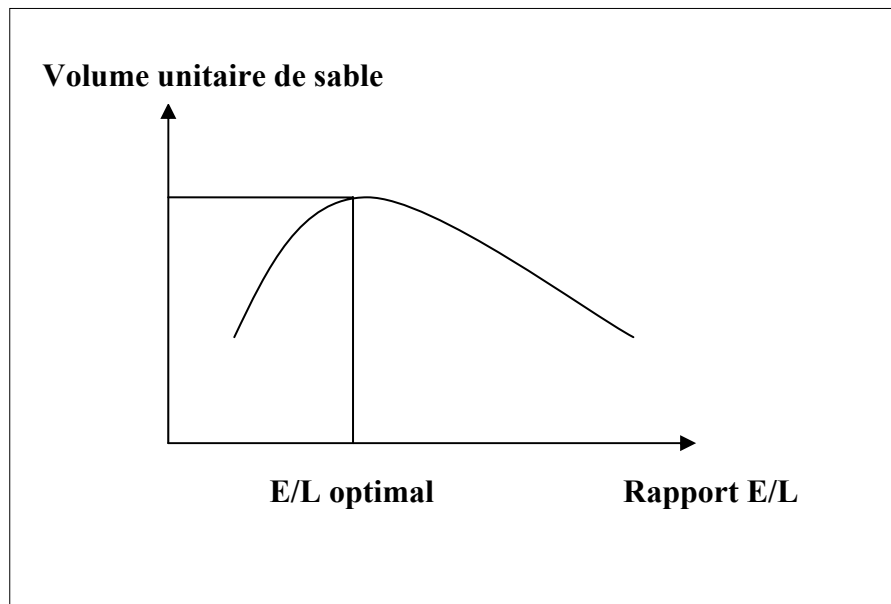


Figure 2.6 : Variation de la demande en sable en fonction du rapport E/L. [3]

2.6.2. FLUIDITÉ :

Les essais développés dans cette partie s'apparentent beaucoup plus à des essais technologiques qui dépendent certes des propriétés rhéologiques du béton mais ne permettent pas de déterminer un seuil de cisaillement ou une viscosité plastique, paramètres fondamentaux de la rhéologie des fluides d'une manière générale.

2.6.2.1 Essai d'étalement :

C'est l'essai le plus courant, il s'effectue sur une plaque métallique plane de plus de 90 cm de côté et à l'aide du cône d'Abrams ou du cône DIN de la table à choc.

À l'essai au cône d'Abrams, le BAP, du fait de sa fluidité s'étale et forme une galette dont on mesure le diamètre, qui dépasse souvent les 500 mm. La notion traditionnelle d'affaissement au cône d'Abrams n'a plus aucun sens avec ce genre de béton.

Dans le cas du cône d'Abrams l'étalement est noté Slump flow et il est appelé Flow table dans l'essai au cône DIN.

La valeur du Slump flow d'un BAP est comprise entre 540 et 700 mm. Il existe une corrélation entre le Slump flow et le Flow table.

À titre indicatif, quelques valeurs sont données dans le tableau 2.1

Slump Flow (mm)	540	600	700
Flow tableau (mm)	430	500	680

Tableau 2.1 : Corrélation entre le Slump flow et le Flow table sans choc

2.6.2.2. Vitesse d'écoulement :

On mesure le temps d'écoulement que met le béton au cours de l'essai d'étalement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 50 cm. Ceci donne une idée moyenne sur la viscosité qui est une propriété rhéologique importante.

La valeur typique de la vitesse d'écoulement est de 6.25 à 2.5 cm/s ; ceci correspond à un temps d'écoulement T_{50} variant entre 4 à 10 secondes.

2.6.2.3. Essai de la table de fluidité :

L'essai d'affaissement est exécuté sur un plateau circulaire de 670 mm de diamètre avec un bord élevé de 20 mm. Sur ce plateau, on impose des mouvements de montée et de descente de vitesse égale à 12.5 mm/s introduits par une manivelle.

Le nombre d'amplitudes qui correspondent à l'arrivée du béton au bord du plateau, au contact avec le demi périmètre et au contact total avec le plateau sont ainsi mesurés (KASAI et coll. 1991). Cet essai est aussi semblable à l'essai d'étalement " DIN1048 Flow table ". [3]

2.6.2.4. Essai de la boîte en L :

On remplit la partie verticale du L de béton (cf. figure 2.7), et on mesure la différence de la hauteur dans les parties verticales et horizontales. Pour un BAP, cette dernière doit être la plus faible possible.

Notons que les distances entre les barres d'acier représentent un ferrailage standard pour des ouvrages de génie civil très ferrailés. Pour des applications moins ferrailées, il est possible d'alléger la grille de ferrailage en ne plaçant que deux barres avec un espace libre de 58 mm. En cas de blocage des gravillons, il convient de diminuer le volume la teneur en granulats d'une part, et d'augmenter le volume de pâte en maintenant le rapport Eau/Liant constant.

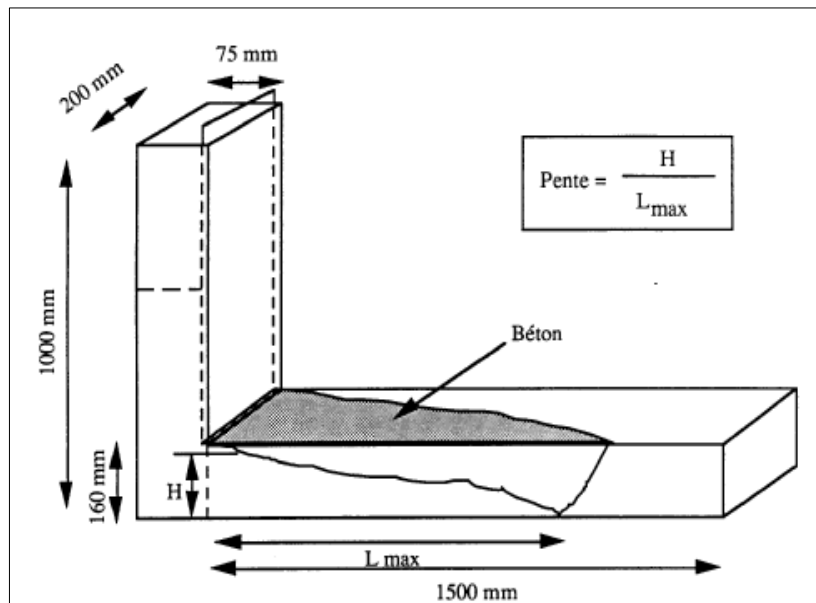


Figure 2.7 : Essai de la boîte en L, d'après l'Université de Sherbrooke. [3]

2.6.2.5. Essai du Box :

L'échantillon de béton est mis dans un des deux compartiments d'une boîte en Plexiglas de $150 \times 150 \times 400$ mm. Quand la porte de séparation des deux compartiments est levée, on mesure la dénivellation de hauteur du béton entre les deux compartiments. Cet essai permet d'évaluer la déformabilité du mélange qui sera excellente dans le cas où la dénivellation est négligeable (KASAI et coll. 1999).

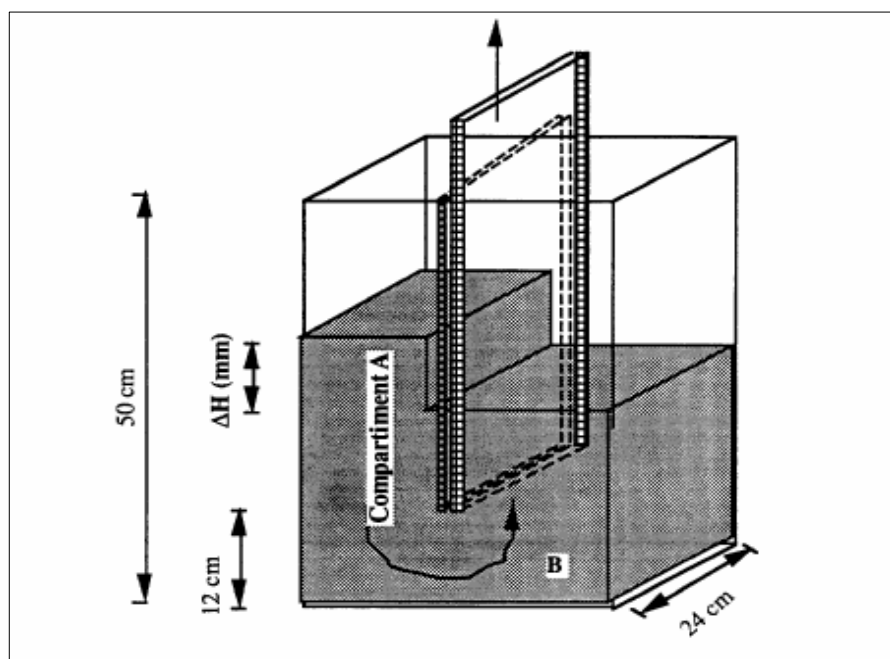


Figure 2.8 : Essai du Box

2.6.3. LA STABILITÉ :

2.6.3.1. Essai de l'entonnoir en forme de V :

L'essai consiste à mesurer le temps d'écoulement du béton dans un espace limité. Une section rectangulaire a été choisie pour imposer un écoulement du même type que celui qui est imposé entre deux armatures parallèles. Cet essai permet aussi d'évaluer la stabilité du béton lors de l'écoulement.

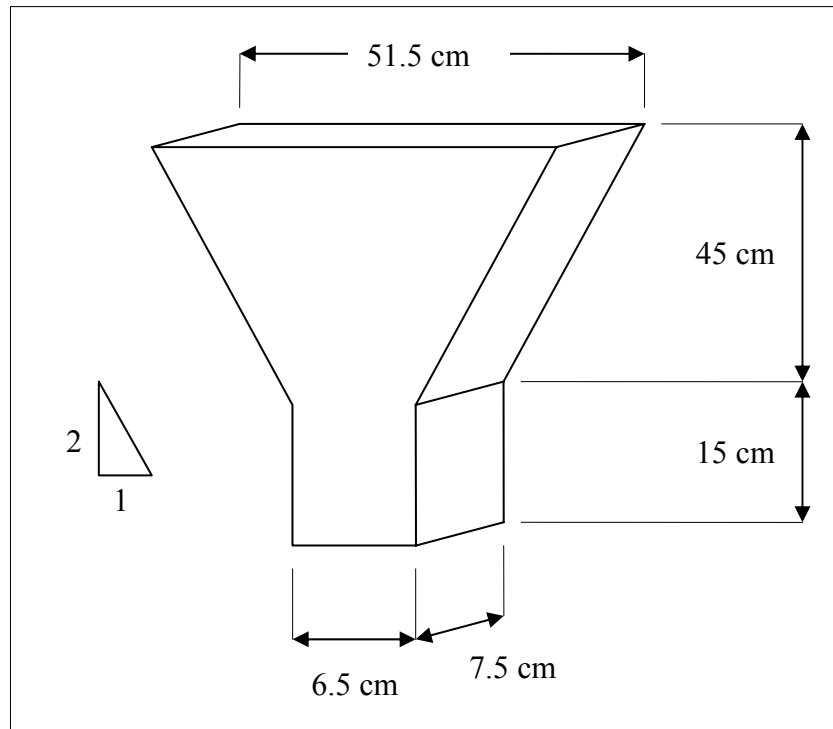


Figure 2.9 : Essai de l'entonnoir en forme de V, d'après SAKATA et al, (1996). [8]

2.6.3.2. Essai de tassement :

Cet essai est réalisé sur des colonnes de béton de 70 cm ou de 150 cm de hauteur (MANAI, 1995). Il s'agit de fixer une plaque circulaire en Plexiglas de 150 mm de diamètre et de 4 mm d'épaisseur ancrée dans le béton à l'aide de 4 boulons de 35 mm de longueur chacun, sur la surface du béton frais. On met au contact de la plaque en Plexiglas l'aiguille de 24 mm de longueur d'un comparateur de détection de déplacement qui est caractérisée par une précision de 0.2 μm . On note la variation du tassement au cours du temps jusqu'à la stabilisation du mouvement (prise de béton).

On détermine ainsi le tassement relatif T (%) par division de la valeur maximale du tassement (T_h) sur la hauteur de la colonne (h).

$$T(\%) = \frac{T_h}{h} \times 100 \quad \dots\dots\dots (2)$$

Cet essai, nous permet également mesurer le volume d'eau de ressuage externe apparue à la surface supérieure du béton.

Une fois durcies, les colonnes de béton peuvent être sciées verticalement afin d'évaluer la répartition des gros granulats. Ceci nous donne une idée sur la résistance à la ségrégation du béton.

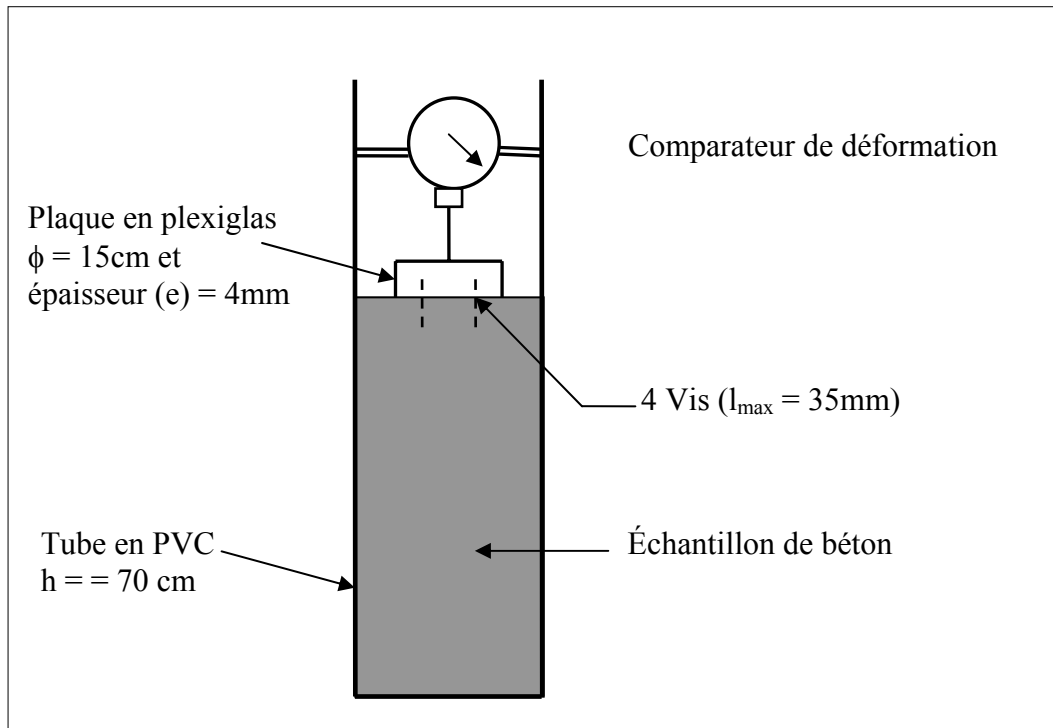


Figure 2.10 : Essai du tassement (MANAI, 1995). [11]

2.6.4. SÉGRÉGATION DYNAMIQUE :

Pour la ségrégation dynamique, comme pour la ségrégation statique, il n'existe pas d'essais conventionnels. De ce fait, plusieurs systèmes ont été développés.

Les essais pour caractériser la résistance à la ségrégation dynamique ont pour but d'évaluer la capacité du béton à s'écouler dans une zone confinée. Ils peuvent par exemple mettre en évidence des phénomènes de blocage de l'écoulement par formation de voûtes avec les granulats.

2.6.4.1. Essai du tube en U :

On remplit la partie R1 de béton puis on ouvre la trappe. Après écoulement du béton, on mesure la hauteur de remplissage dans la partie R2. Pour un BAP, elle est souvent supérieure à 30 cm.

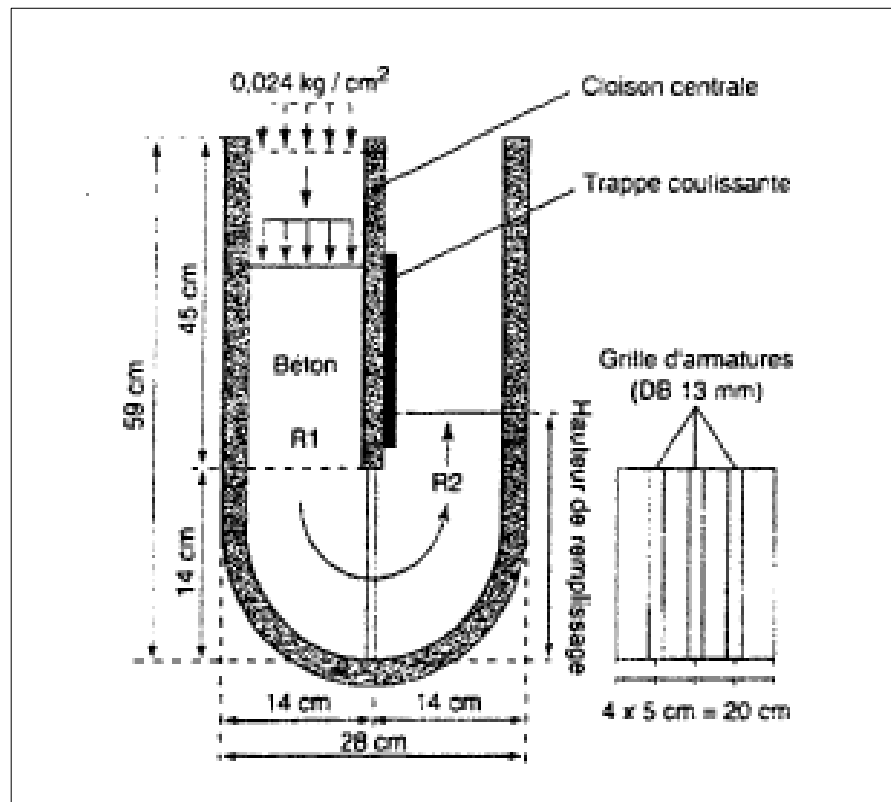


Figure 2.11 : Essai du tube en U (MITSUKA et al). [3]

2.6.4.2. Essai de la capacité de remplissage (Essai du caisson) :

Il s'agit de remplir à débit constant le caisson jusqu'à ce que la partie Ω atteigne 22 cm et on estime l'aptitude de remplissage du béton par le rapport $A / (A+B)$ (%). Avec **A** : rempli par le béton et **B** : non rempli par le béton. Un béton peut être considéré comme autoplaçant si le rapport est supérieur à 60%. Le volume de béton autoplaçant nécessaire pour réaliser cet essai de l'ordre de 35 litres.

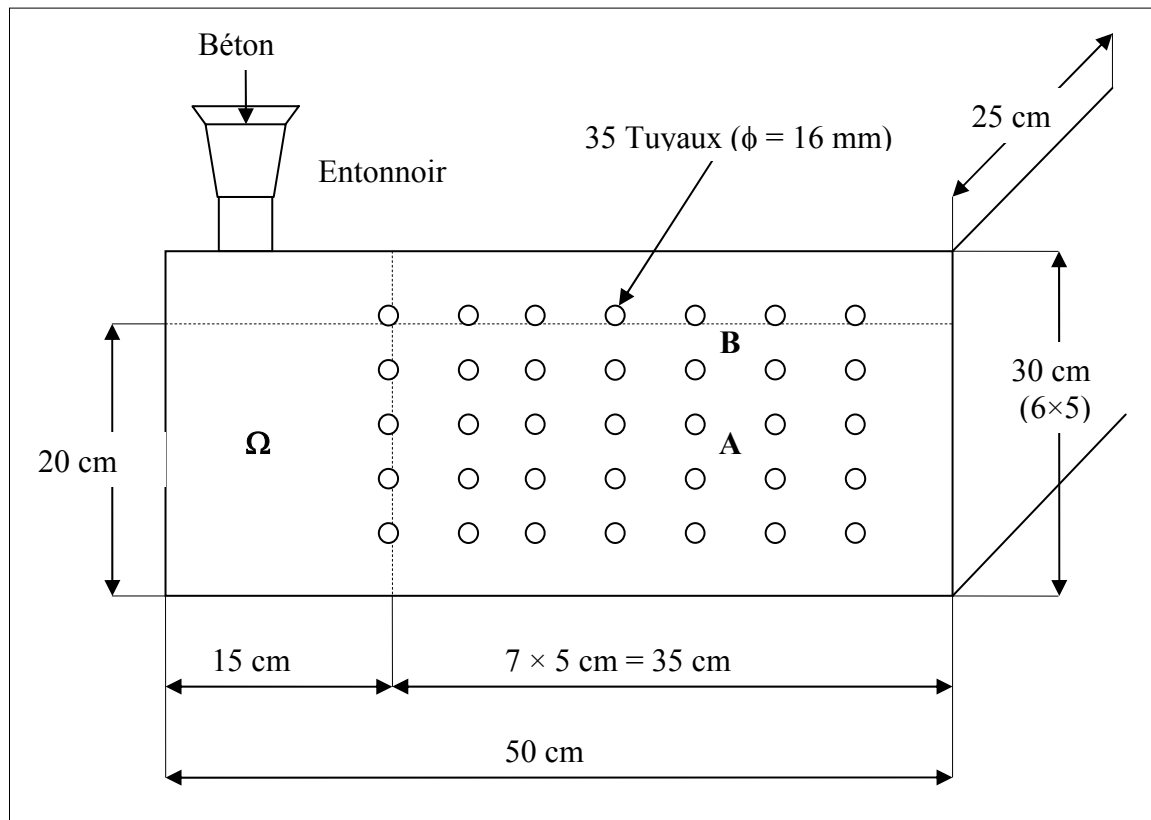


Figure 2.12 : Essai du caisson, d'après YURUGI et al (1993). [8]

2.6.4.3. Essai de stabilité au tamis :

Cet essai vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier.

L'essai consiste à verser 10 litres de béton dans un sceau juste après le malaxage. Il faut couvrir le sceau pour protéger le béton de la dessiccation ; après 15 minutes, on verse au centre d'un tamis de 5 mm d'ouverture un poids de béton égal à $4.8 \text{ kg} \pm 0.2 \text{ kg}$, avec une hauteur de chute du béton de $50 \pm 5 \text{ cm}$; après 2 minutes, on calcule le poids de la laitance passée au tamis, ce qui nous permet de qualifier les BAP vis-à-vis des risques de ségrégation et de ressuage.

2.6.5. SÉGRÉGATION STATIQUE :

Il est important d'évaluer la capacité du béton à rester homogène une fois mis en place, c'est à dire la résistance à la ségrégation statique des granulats qui ont une répartition hétérogène.

Les caractéristiques du béton telles que la résistance mécanique, le retrait et la qualité du parement peuvent être considérablement réduites dans un béton autoplaçant possédant une bonne résistance à la ségrégation.

2.6.5.1. Essai à la bille :

On mesure l'enfoncement d'une bille simulant un granulat de diamètre de 20 mm dans un cylindre de béton 16 × 32 cm. La bille est reliée au balancier par une tige rigide et sa densité est ajustée par un contre poids..

La bille est initialement enfoncée de sa hauteur dans le béton puis lâchée. Plus le temps nécessaire pour que la bille s'enfonce dans le béton (de 6 cm pour les études du LCPC) est faible, plus la tendance à la ségrégation du matériau est élevée.

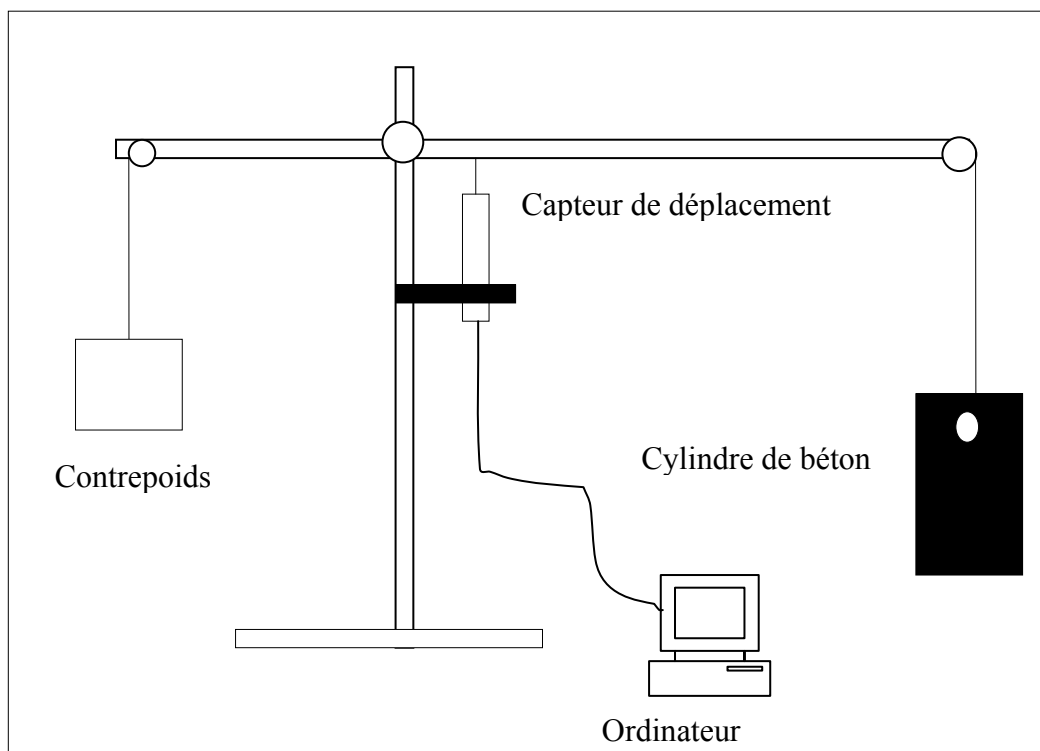


Figure 2.13 : Essai à la bille. [8]

2.7. OPTIMISATION DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS :

L'optimisation des performances d'un béton consiste à minimiser la teneur en eau tout en gardant une maniabilité suffisante à l'état frais afin de faciliter sa mise en place.

La diminution de la teneur en eau conduit généralement à de bonnes caractéristiques mécaniques telles que des résistances plus élevées, un retrait et un fluage plus faible et une durabilité accrue.

Pour confectionner un béton autoplaçant, on utilise souvent des adjuvants chimiques (superplastifiants, réducteurs d'eau, agents colloïdaux et agent entraîneur d'air) et des ajouts minéraux (fumée de silice, laitier, cendre volante et filler calcaire). Ce type de béton se caractérise par la diversité des matériaux cimentaires qu'il contient par rapport aux bétons ordinaires. Le béton autoplaçant contient également des proportions bien précises de gros granulats pour faciliter la déformabilité de la matrice.

L'étude de l'influence des différents adjuvants chimiques et ajouts minéraux et des dosages de gros granulats sur les propriétés des bétons fluides à l'état frais et durci a attiré l'attention de plusieurs chercheurs. Dans la partie suivante nous exposons les résultats de quelques recherches sur l'optimisation et le développement de formulation de bétons autoplaçants du point de vue de la teneur en granulats et en ajouts chimiques et minéraux.

Les objectifs principaux de ces recherches étaient l'amélioration de la rhéologie, des performances mécaniques et de la durabilité des bétons fluides.

2.7.1. OPTIMISATION DE LA TENEUR EN GROS GRANULATS :

Plusieurs études ont été réalisées afin de déterminer les quantités et la taille optimales des gros granulats capables de donner un maximum d'ouvrabilité au béton. Ces études ont analysé l'impact de cette optimisation du béton à l'état frais sur les propriétés des bétons durcis.

Selon YURUGI et coll. (1989) [12], le volume de gros granulats dans le béton est le facteur le plus important pour le contrôle de la maniabilité et de la capacité de remplissage (plus la teneur en gros granulats augmente, plus la capacité de remplissage diminue).

Ayant comme critère de base qu'un béton autoplaçant devrait avoir un diamètre d'étalement compris entre 600 et 700 mm et plus de 60% de capacité de remplissage, ils ont en effet réalisé des formulations de béton autoplaçant qui contenaient 30 à 40% du filler calcaire, un agent colloïdal à base de naphthalène (dosage de 2.6 à 4% de la masse du liant), des granulats concassés ayant un diamètre maximum de 20 mm et un rapport $E/L = 0.3$ à 0.35 . Le diamètre d'étalement obtenu variait de 560 à 730 mm

Les résultats montrent que, pour une proportion volumique G_{vol} de gros granulats par m^3 variant de 31% à 34%, il est recommandé un rapport volumique sable sur pâte (S/P) de 65% afin d'obtenir un béton ayant une fluidité comprise entre 600 et 700 mm d'étalement. D'autre part, pour une proportion (G_{vol}) inférieure à 33%. On recommande un rapport $S/P = 75\%$. Ces bétons fluides ayant les quantités optimales en gros granulats ont développé de bonnes résistances aux cycles de gel-dégel (4% d'air entraîné).

OKAMURA et coll.(1994) [13], mentionnent que le premier point dont il faut tenir compte lors de la formulation d'un béton autoplaçant est de limiter la teneur en gros granulats, car les bétons frais à faibles dosages en granulats se caractérisent généralement par une haute résistance à la ségrégation. Ils rapportent que les collisions et les frictions entre les gros granulats augmentent près des obstacles et l'énergie requise pour l'écoulement est consommée par les contraintes internes. Ceci provoque le blocage. Ils ont montré que la probabilité de blocage devient négligeable pour des volumes de gros granulats inférieurs à 50% du volume des solides.

KHAYAT et coll. (1994) [3] ont déterminé les quantités optimales en gros granulats et en sable capables d'améliorer la fluidité des mélanges de béton en présence d'un agent colloïdal et de superplastifiant. La quantité des granulats était de l'ordre de $300 l/m^3$ avec une teneur de 70% de granulats de diamètre 14 mm et 30% de granulats de diamètre maximum 20 mm, quant à la quantité du sable, elle correspondait à un rapport volumique sable/pâte de 0.6.

Christophe CHUCHE du MBT (Master Building of Technologie) [14] a développé des bétons autoplaçants de 640 ± 40 mm d'étalement avec un rapport E/L de 0.34 à 0.5 et un rapport G/S de 0.7 à 1.05, dont le volume des granulats de la fraction 3/8 représente $65 \pm 4\%$ du volume des gros granulats.

Ces bétons contiennent une grande teneur en fines (éléments inférieurs à 315 μm) jusqu'à 700 kg/m^3 composées essentiellement de 500 kg/m^3 de liant.

Il a également utilisé un superplastifiant à base de polymère carboxylate avec des dosages variant de 1.1 à 2.4% de la masse du liant.

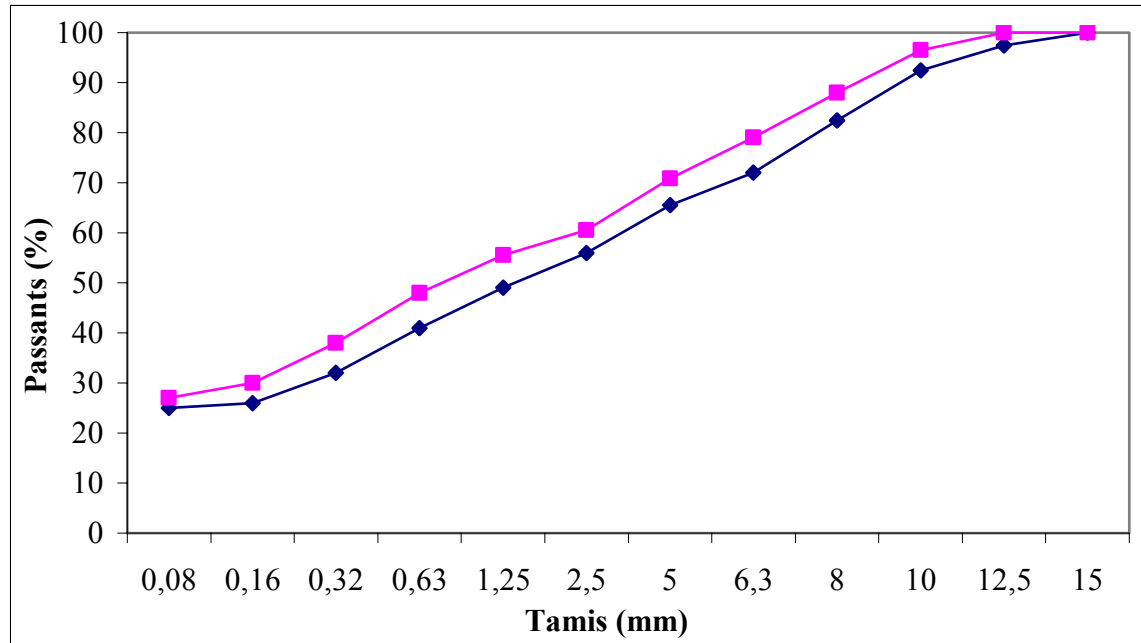


Figure 2.14 : Courbe de référence d'un béton autoplaçant, d'après MBT France. [14]

2.7.2. OPTIMISATION DES TENEURS EN AJOUTS MINÉRAUX :

L'utilisation des ajouts minéraux est intéressante sur le plan rhéologique, car ils sont d'une part moins réactifs à court terme que le ciment, ce qui permet d'avoir un temps prolongé d'ouvrabilité et d'autre part, la combinaison de plusieurs matériaux cimentaires ayant des granulométries différentes permet aussi d'améliorer la granulométrie totale des particules fines ainsi que celle du mélange de béton. Ceci favorise l'augmentation de la stabilité et l'accroissement de la déformabilité du béton, d'autre part, le grand volume de liant utilisé dans les bétons autoplaçants pour remplacer une partie de ciment contribue à la réduction de la chaleur d'hydratation et du retrait du béton.

NETO et coll. (1990) [3], rapportent que le filler calcaire réduit la demande en eau pour une maniabilité fixe, s'il est pur et finement broyé, tandis que GJORV (1991) [3], a montré que pour des dosages en ciment de 200, 300 et 400 kg/m^3 , on peut ajouter jusqu'à 6% de fumée de silice sans augmenter le seuil de rigidité du béton avec une amélioration de la viscosité plastique. Des dosages supérieurs inversent le phénomène par augmentation des frictions entre les fines, et le béton devient très collant et très cohésif.

KHAYAT et GUIZANI, (1994) [15] indiquent qu'une matière pouzzolanique telle que la cendre volante (particules sphériques et lisses) améliore la déformabilité du béton.

Le laitier est supposé améliorer la maniabilité (particules vitreuses). La fumée de silice augmente la résistance à la séparation des constituants du béton et réduit significativement les phénomènes de ressuage et de ségrégation.

MIURA et coll. (1994) [16] ont étudié l'influence des ajouts cimentaires sur la maniabilité du béton en réalisant des formulations où la teneur en eau et la nature de l'ajout sont les principaux paramètres à analyser. Leurs résultats ont confirmé l'importance des remplacements en ajouts sur l'ouvrabilité et la déformabilité des bétons. À titre d'exemple, des hautes teneurs en laitier (50%) ou en cendre volante (30%) ont permis d'améliorer beaucoup la fluidité des bétons contenant 140 l/m^3 de liant, 160 l/m^3 d'eau et un rapport volumique sable/granulats de 51.5%. La teneur en superplastifiant (naphtalène) est maintenue constante à 2.1% de la masse du liant.

Dans le même cadre de cette étude, on a fait varier la teneur en masse cimentaire de 130 à 175 l/m^3 et on a mesuré la vitesse d'écoulement par un essai d'écoulement en L renforcé avec des armatures. On a constaté une tendance à la ségrégation pour des teneurs en liant de 130 l/m^3 (étalement de 550 mm), à partir d'une teneur de 145 l/m^3 les problèmes de ségrégation commencent à disparaître et la vitesse d'écoulement s'accroît.

OZAWA et coll. (1995) [3] ont développé des formulations de bétons fluides (étalement de $650 \pm 30 \text{ mm}$) qui présentaient de faibles pertes d'étalement au cours du temps (maximum 30 mm après 60 min). Ces bétons de rapport $E/C = 0.55 \pm 0.05$ contiennent du filler calcaire, un volume de pâte supérieur à 300 l/m^3 , des granulats concassés de diamètre maximum 20 mm , un rapport volumique sable/granulats de $51 \pm 1\%$, 8 kg/m^3 de superplastifiant (naphtalène) et 3 kg/m^3 d'agent colloïdal à base de polyacrylate.

Les résultats de ces essais ont montré que pour un remplacement de 20% du volume des granulats par le filler calcaire, on obtient la meilleure fluidité, de même qu'ils ont obtenu de bonnes résistances à la ségrégation et au ressuage.

Les mêmes bétons ont été étudiés vis-à-vis du retrait à une température de 20°C et une humidité relative de 60%. On constate que les bétons contenant des agents expansifs, des réducteurs de retrait et du filler calcaire présentent une réduction très significative du retrait (inférieur à 400 $\mu\text{m}/\text{m}$) et moins de fissurations aux surfaces.

Sur le plan mécanique, MITSUTAKA et coll. (1993) [3] trouvent que les résistances à la compression de certains BAP (étalement de 650 ± 50 mm) sont en général supérieures à 40 MPa après 28 jours parce que ces bétons contiennent une grande teneur en fines ($500 \text{ kg}/\text{m}^3$) composées essentiellement de ciment portland (200 à $350 \text{ kg}/\text{m}^3$), (100 à $200 \text{ kg}/\text{m}^3$) de laitier et (50 à $100 \text{ kg}/\text{m}^3$) de cendre volante.

La résistance est aussi élevée grâce aux rapports E/C relativement bas (0.35 et 0.40). Il est à noter que ces bétons contiennent $9.6 \text{ kg}/\text{m}^3$ de superplastifiant (naphtalène) et $1 \text{ kg}/\text{m}^3$ d'agent colloïdal (polysaccharide). La résistance à la compression à jeune âge est plus faible avec les hautes teneurs de remplacement en pouzzolanes ($200 \text{ kg}/\text{m}^3$ de laitier et $100 \text{ kg}/\text{m}^3$ de cendre volante) qui réagissent lentement. Toutefois, les mélanges qui présentent une teneur élevée en ciment ($350 \text{ kg}/\text{m}^3$) ont eu des résistances plus élevées.

AWAD et coll. (1995) [17] ont développé des bétons BAP de 650 mm d'étalement (E/L = 0.22 à 0.37) qui ont atteint une résistance à la compression de 25 MPa à 24 heures et 90 MPa à 28 jours. Ces bétons contiennent différents dosages en pouzzolanes comme la fumée de silice (de 10 à $45 \text{ kg}/\text{m}^3$), de la cendre volante (de 44 à $121 \text{ kg}/\text{m}^3$) et du laitier (de 48 à $157 \text{ kg}/\text{m}^3$), ils ont également utilisé un superplastifiant à base de naphtalène avec des dosages variant de 1.07 à 1.43% de la masse du liant, et des combinaisons de granulats concassés de diamètre maximum de 10 mm (dosage : 360 à $455 \text{ kg}/\text{m}^3$) et 20 mm (dosage : 530 à $670 \text{ kg}/\text{m}^3$).

2.7.3. OPTIMISATION DES TENEURS EN AJOUTS CHIMIQUES :

L'utilisation des superplastifiants et des agents colloïdaux permet aussi d'améliorer la déformabilité et la stabilité des BAP. Les superplastifiants permettent de réduire la teneur en eau et par conséquent, améliorent la stabilité, les propriétés mécaniques et la stabilité du béton autoplaçant.

Les superplastifiants agissent par adsorption à l'interface solide-eau, ce qui permet aux grains de ciment d'acquérir des charges identiques et de créer ainsi un phénomène de dispersion des particules par répulsion électrostatique. Ceci permet de libérer une partie de l'eau piégée par les grains de ciment flocculés et diminue ainsi les frictions intergranulaires. On assistera alors à une amélioration de l'ouvrabilité du béton.

Les agents colloïdaux améliorent la viscosité et diminuent la ségrégation et le ressuage dans les bétons ; par contre, ils augmentent la demande en eau du mélange et leur utilisation nécessite la présence de superplastifiants. Les agents colloïdaux maintiennent aussi l'uniformité du béton au cours de sa déformation en évitant l'accroissement local des contraintes dû au rapprochement des gros granulats.

OZAWA et coll. (1990) [18] démontrent que l'agent colloïdal ajouté en faible quantité permet de diminuer la résistance au cisaillement de la pâte jusqu'à l'obtention d'un minimum au delà duquel tout ajout d'agent colloïdal a pour effet d'augmenter cette résistance. En effet, pour une teneur appropriée d'agent colloïdal, la pâte agit comme un liquide visqueux où la résistance au cisaillement devient indépendante de l'effort normalement appliqué. On assiste à une bonne déformabilité combinée à une résistance à la ségrégation.

Au niveau de la stabilité, les bétons contenant des superplastifiants et des agents colloïdaux présentent moins de ressuage. Par exemple, KASAI et coll. (1991) ont développé des BAP d'étalement de 500 à 600 mm de rapport E/C de 0.60 et contenant 30% de remplacement massique du ciment par du laitier avec différents dosages de mélanges (A et B) de superplastifiant et d'agent colloïdal combinés (4.62% de type A et 4.62% de type B de la masse des liants). Ils ont enregistré un ressuage de 0.3 ml/cm² (essai réalisé sur un cylindre de diamètre 15 cm et de hauteur 30 cm, le moyen de mesure n'est pas déterminé). ceci est inférieur à la spécification de la norme JASSS (0.5 ml/cm²).

KHAYAT et GUIANI (1996) [3] ont montré aussi que la stabilité du béton s'accroît avec l'augmentation de la teneur en agent colloïdal. On assiste à une diminution du taux de ressuage externe et du tassement à l'état frais du béton.

Les agents colloïdaux permettent aux bétons d'avoir un excellent comportement au lessivage par adsorption de certaines molécules d'agents colloïdaux sur les grains de ciment, ce qui évite le mélange de l'eau avec le béton frais.

KASAI (1987) et KHAYAT (1991) rapportent que l'écoulement visqueux permet de réduire la vitesse à l'interface eau- béton et on assiste donc à une amélioration significative de la résistance au lessivage.

Une étude faite par YURUGI et coll. (1989) [12] sur un mortier avec différents dosages en agent colloïdal à base de glucose (dosage variant de 0 à 0.05% du volume de l'eau) et de superplastifiant (dosage variant de 1.2 à 3% de la masse de liant) a relevé que le ressuage était nul quand la teneur en agent colloïdal dépasse 0.03% (les caractéristiques du mortier n'ont pas été spécifiées).

FUKUTE et coll. (1995) [19] ont développé un BAP ($E/C = 0.48$) fait avec un ciment à base de laitier et ont utilisé un agent colloïdal fait avec de la cellulose (dosage de 0.3% de la masse de l'eau; un superplastifiant à base de polycarboxilique (dosage de 3% de la masse de ciment) et un agent entraîneur d'air (dosage de 5.8 kg/m^3). Les gros granulats ont un diamètre maximum de 20 mm. Ils ont trouvé les résultats suivants : un diamètre d'étalement de 650 ± 50 mm, une vitesse d'étalement horizontal inférieure à 3.3 cm/s et une différence de hauteur dans le « Box test » de 2 cm. L'étude de la résistance à la ségrégation pour le cas d'étalement a montré que le béton développé est uniforme même après un étalement de 7.2 m dans un coffrage de dimensions $2 \times 1.1 \times 7.2$ m. Ceci est attribué à la combinaison de l'agent colloïdal et du superplastifiant qui améliorent respectivement la déformabilité et la résistance à la ségrégation du béton.

Le temps de prise initial et final ont été prolongés de 2 à 3.5 heures par rapport au béton témoin ordinaire ($E/C = 0.55$; prise initiale à 6 heures). Ceci est dû à la présence de l'agent colloïdal et du superplastifiant.

2.8. MÉTHODES DE FORMULATION :

2.8.1. APPROCHE DU LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉE :

Au LCPC, T.SEDRAN et F.DE.LARRARD ont développé un modèle mathématique à partir d'un modèle de suspension solide. Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire sec avec une précision inférieure à 1% à partir des caractéristiques des constituants ci-après :

- Les distributions granulaires
- Les proportions du mélange
- La compacité propre
- la densité apparente.

Ce modèle permet également de prendre en compte quantitativement l'effet de confinement qu'exercent les armatures et le coffrage sur la compacité du squelette d'un béton et donc l'ouvrabilité de ce béton. Ce modèle a été utilisé avec succès pour prévoir l'évolution de l'ouvrabilité de différents bétons, (tels que les bétons à hautes performances, béton compacté au rouleau) en fonction de leur composition. [20]

Ce modèle mathématique est particulièrement intéressant pour :

- ♦ Comprendre et évaluer l'influence des différents constituants sur les propriétés des bétons ;
- ♦ Choisir le meilleur parti des matériaux pour les propriétés des bétons que ce soit à l'état frais telle que l'ouvrabilité et la résistance à la ségrégation ou à l'état durci telle que les résistances à la compression et à la traction, retrait, fluage ;
- ♦ Prendre en compte la spécificité et la nature d'un projet lors de la formulation de béton (béton pompé, coulage en zone très ferraillée).

Les auteurs proposent la démarche suivante à partir d'un cahier des charges, pour la formulation des bétons autoplaçants sans agents de viscosité.

Le cahier des charges exige les critères suivants :

- ♦ Étalement au Flow test compris entre 600 et 700 mm ;
- ♦ La viscosité plastique doit être d'une part inférieure à 200 Pa.s, permettant d'avoir un coulage rapide sur chantier et d'autre part supérieure à 100 Pa.s pour éviter la ségrégation.

Pour tout projet deux paramètres sont toujours nécessaires à connaître :

1. La résistance à la compression à 28 jours.
2. L'environnement de bétonnage traduisant un confinement potentiel. Pour cela il faut tenir compte de l'effet de paroi (espacement des armatures par exemple).

Le choix des matériaux sur la base des ressources locales devra être réalisé et les caractéristiques suivantes devraient être connues :

- ❖ La compatibilité ciment–superplastifiant.
- ❖ La compatibilité du superplastifiant avec un agent retardateur.
- ❖ La nature des additions minérales (filler calcaire, cendres volantes, laitiers, fumée de silice,...) nécessaires pour limiter la quantité du liant.

La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante :

- 1) Une proportion de liant est fixée à priori (par exemple 70% de liant et 30% de filler). Le choix des fillers sera en fonction des matériaux locaux disponibles.
- 2) Détermination du dosage en saturation du superplastifiant
- 3) Détermination du besoin en eau de ce mélange en présence de superplastifiant. Cette grandeur donne une mesure indirecte de la compacité, valeur nécessaire pour entrer dans le programme du modèle de suspension solide.
- 4) Les calculs sont effectués avec un logiciel en tenant compte du confinement (effet de paroi). La viscosité est fixée d'une manière arbitraire à $5 \cdot 10^4$ Pa.s (valeur correspondante aux bétons autoplaçants selon l'expérience du LCPC). La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant filler est maintenue constante. Les proportions granulats / pâte liante sont optimisées.
- 5) Le béton est fabriqué (10 à 15 ℓ) et sa teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée.
- 6) Le dosage en superplastifiant est ajusté afin d'obtenir la valeur d'étalement souhaitée, ceci n'a pas d'influence sur la viscosité plastique. À ce niveau le béton obtenu répond aux critères rhéologiques de contrainte de cisaillement et de viscosité plastique.
- 7) Enfin, l'évolution du comportement rhéologique doit être étudiée, l'ajout d'un retardateur de prise s'impose dans le cas d'un raidissement du béton.

Malgré le travail considérable effectué au LCPC sur les problèmes de rhéomètre des bétons de consistance plastique à fluide, il est encore nécessaire d'étendre les modèles reliant la composition des mélanges et leur comportement rhéologique

Par ailleurs les formulations proposés doivent être confrontées à des expérimentations en vrai grandeur afin d'appréhender les problèmes de ségrégation.

2.8.2. L'APPROCHE JAPONAISE :

La méthode de formulation des bétons autoplaçants est la suivante :

La teneur volumique en gravillons du béton est fixée à 50% du volume de solide. Selon les auteurs [20], ce pourcentage permet de prévenir le risque de blocage si le mortier est correctement formulé.

Pour assurer une bonne ouvrabilité, le volume de sable est fixé à 40% du volume total du mortier. L'estimation de la pâte s'effectue sur un mortier dont la teneur volumique en sable est égale à 40%. Ces mortiers sont caractérisés par deux essais :

- ✧ Un essai d'étalement au cône
- ✧ Un essai d'écoulement à l'entonnoir

Les auteurs en tirent deux grandeurs :

Avec :

$$1. \text{ L'étalement relatif : } \Gamma_m = \frac{r_1 r_2 - r_0^2}{r_0^2} \dots\dots\dots (3)$$

$$2. \text{ La vitesse relative d'écoulement : } R_m = \frac{10}{t} \dots\dots\dots (4)$$

- ✧ r_1 et r_2 : les diamètres d'étalement selon deux médianes et r_0 le diamètre inférieur du cône
- ✧ t : est le temps d'écoulement à l'entonnoir exprimé en secondes.
- ✧ Γ_m : représente la fluidité du mortier, (plus Γ_m est grand, plus le mortier est fluide)
- ✧ R_m : représente la viscosité du mortier (plus R_m est faible, plus la viscosité est élevée). [20]

D'après l'expérience des auteurs, il faut avoir simultanément $\Gamma_m = 5$ et $R_m = 1$ pour obtenir un béton autoplaçant acceptable.

Les auteurs ont montré que pour un dosage en superplastifiant donné et pour différents rapports volumiques eau/poudre (V_w/V_p), il y a une relation de linéarité entre R_m et Γ_m .

2.9. EXEMPLES DE FORMULATIONS :

Des exemples de formulations de BAP sont présentés dans les tableaux suivants :

	BAP 1	BAP 2	BAP 3	BAP 4	BAP 5
Ciment (C)	155	331	155	270	350
Eau (E)	160	175	159	196	170
Filler calcaire (F)	/	216	/	/	/
Laitier (LHF)	150	/	171	210	/
Cendre volante (CV)	200	/	202	210	/
Sable (S) 0/5	/	710	760	/	828
Gravillon (G) 5/16	/	875	874	/	877
Superplastifiant (L)	1.7	2.6	1.2	2.7	1.1
Agent de viscosité (L)	1	0.5	0.012	/	/
Entraîneur d'air (L)	/	/	/	0.05	/
Liant (L)	500	547	528	690	440
G/S	/	1.23	1.15	1.1	
E/L	0.32	0.32	0.30	0.41	0.39
Étalement au cône d'Abrams (mm)	680	600	570	700	600
Air occlus (%)	4.2	4	2	5.4	/

Tableau 2.2 : Différentes formulations de BAP.[8]

Liant = C + F + LHF + CV + autres additions en poudre.

Les dosages sont exprimés en (kg/m³), excepté pour les adjuvants.

	BÉTON AUTOPLAÇANT				BÉTON ORDINAIRE			
	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BT1	BT2	BT3	BT4
Ciment (C)	500	400	340	260	389	360	285	250
Eau (E)	133	153	170	207	126	137	142	200
Fumée de silice (FS)	50	/	/	/	/	/	/	/
Filler siliceux (F)	50	145	165	185	106	68	33	/
Sable 0/8 mm	880	790	840	1000	694	780	860	1000
Gravillon quartzite 8/11 mm (G)	600	305	285	395	135	270	330	300
Gravillon quartzite 11/16 mm (G)	800	620	525	270	660	560	420	600
Superplastifiant avec agent de viscosité	5	2	1.2	1	/	/	/	/
Superplastifiant sans agent de viscosité	/	/	/	7	3.6	2.6	.93	/
Réducteur d'eau	/	/	/	/	1.7	0.9	1.1	/
Entraîneur d'air	/	/	0.024	/	0.05	0.045	0.027	/
Liant (L)*	600	545	505	445	495	428	318	250
G/S	0.98	1.17	0.96	0.67	1.15	1.06	0.87	0.9
E/L	0.22	0.28	0.34	0.47	0.25	0.32	0.45	0.8
Air occlus	1.3	1.4	3.5	1.9	12	12	13	1.2

Tableau 2.3 : Formulation de BAP et bétons ordinaires vibrés, réalisés et caractérisés par PERSSON. [20]

Les dosages y compris ceux des adjuvants sont exprimés en (kg/m³).

(L)* = C + FS + F

CONSTITUANTS	FORMULATIONS (kg/m ³)			
	BAP 1	BAP 2	BAP 3	BAP 4
Ciment CPA 52.5	350	452	372	430
Sable 0/5	860	544	891	750
Gravillon 5/12	790	290	306	860
Gravillon 12/20	/	554	585	
Fumée de silice	/	36	30	15
Filler calcaire	140	/	/	/
Superplastifiant	8	10	16	10
Eau totale	200	180	169	175
f _{c28} (MPa)	37	57.3	64.8	65

Tableau 2.4 : Exemple de formulation des BAP fabriqués en France. [7]

2.10. FABRICATION DES BAP :

Les formules de BAP sont en général plus « pointues » que celles des bétons ordinaires.

Les précautions et contrôles particuliers à mettre en place portent sur la maîtrise des constituants, le niveau d'équipement de la centrale, et les procédures de la fabrication des BAP doit intégrer les dispositions visant à maîtriser la teneur en eau du béton, la séquence de malaxage (ordre d'introduction, temps de malaxage), la fourchette d'étalement acceptable les variations de dosage en eau correspondantes, ainsi que les contrôles sur béton frais.

Il est nécessaire d'appréhender au stade de l'étude de formulation la sensibilité des BAP aux écarts de composition et principalement aux variations de teneur en eau. La plage d'étalement du dosage en eau acceptable peut être obtenue en mesurant la résistance à la ségrégation du béton, les valeurs d'étalement, les taux de remplissage, et les densités en fonction du dosage en eau.

La formule possédant le plus fort dosage en eau doit présenter une stabilité satisfaisante. Celle contenant le dosage en eau le plus faible doit conduire à un temps de remplissage correct sans induire de ségrégation de la densité par manque de compactage gravitaire. Les écarts admissibles sont en général de l'ordre de (+5) l/m³. [8]

Le malaxage d'un béton autoplaçant ne nécessite pas de matériel particulier ; il s'agit juste d'un malaxeur étanche dont le temps de malaxage est généralement plus long de 50 à 100% que celui d'un béton ordinaire car on doit assurer une homogénéité du squelette granulaire d'une part, et une bonne dispersion du liant et ajouts chimiques dont les proportions sont très faibles d'autre part.

Le temps de malaxage et l'ordre d'introduction des adjuvants sont importants. Dans le cas où l'agent de viscosité à base de polymères anioniques est introduit indépendamment du superplastifiant, il est préférable qu'il le soit après ce dernier, il peut en effet s'adsorber sur les particules de ciment et avoir moins d'interaction avec l'eau.

2.11. TRANSPORT ET MISE EN PLACE DES BAP :

Les BAP peuvent être transportés par les moyens conventionnels à condition que leur étanchéité soit assurée. Ils peuvent également être transportés du malaxeur jusqu'aux moules par pompage.

Les bétons autoplaçants peuvent être mis en place dans les moules par différentes méthodes :

- ☞ **La première méthode** : Traditionnelle et commune aux bétons ordinaires, consiste à mettre en place le béton par le biais d'une goulotte.
L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait qu'elle favorise les phénomènes de ségrégation. Selon le groupe **AFGC (Association Française de Génie Civil)** « **bétons autoplaçants** », il convient de limiter la hauteur de chute des BAP à une valeur maximale de 5 m. [8]
- ☞ **La deuxième méthode** : Permet d'éviter la chute du béton. Elle repose sur l'utilisation d'un tube plongeur, dans la partie basse du coffrage est immergée dans le béton frais.
- ☞ **La troisième méthode** : Consiste à mettre en place le BAP par le biais des moules par pompage. Cette méthode réduit les risques de bullage et favorise l'obtention de parements lisses.

Les précautions permettant d'assurer une bonne étanchéité des moules qui sont les mêmes que celles pratiquées actuellement pour les bétons fluides ordinaires. La pâte des BAP est très cohésive et limite les pertes de laitance.

L'intensité de la poussée des BAP sur les parois est un sujet qui fait encore l'objet de controverses. Le groupe AFGC préconise de considérer une pression au pied du moule correspondant à la poussée hydrostatique du béton frais.

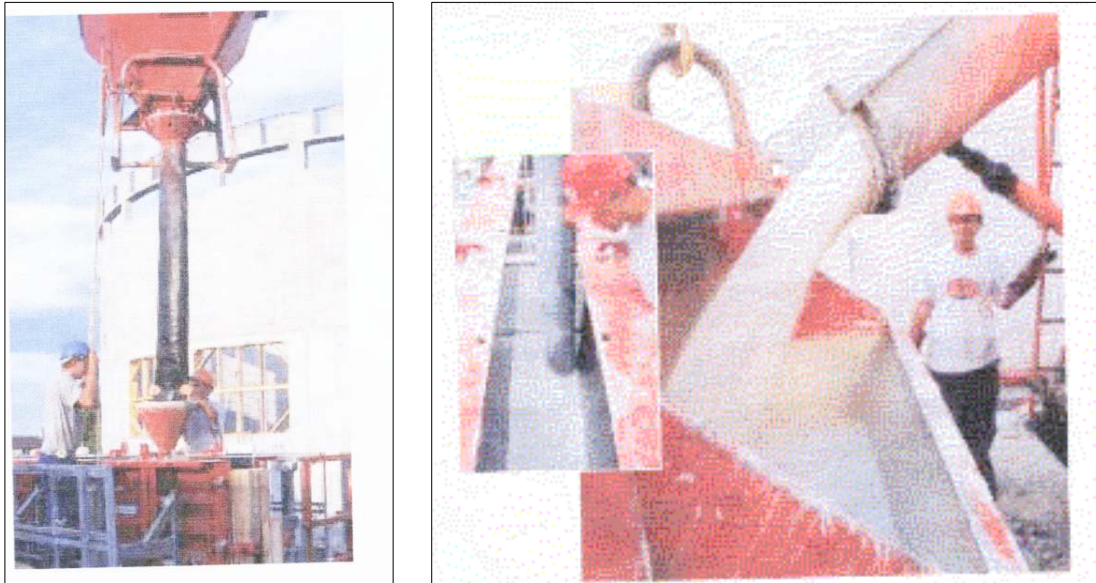


Figure 2.15 : Mode de mise en place du BAP sur chantier.

2.12. CARACTÉRISTIQUES DES BAP À L'ÉTAT DURCI :

2.12.1. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES BAP :

Les résistances mécaniques d'un BAP sont, comme pour la plupart des bétons directement liées à la qualité du squelette granulaire et au rapport eau efficace sur ciment, elles dépendent aussi de la composition du liant. L'optimisation de ces paramètres permet d'obtenir une large gamme de résistances jusqu'à des BAP à hautes performances (80 à 100 MPa au 28^{ème} jours).

L'évolution des résistances à la compression des BAP semble être voisine aux bétons ordinaires en raison de l'utilisation fréquente de fillers calcaires connus pour avoir un effet accélérateur sur l'hydratation des silicates de calcium. Aux très jeunes âges, les résistances des BAP peuvent être affectées lorsque ces bétons contiennent des quantités importantes de superplastifiants car un dosage trop élevé pouvant conduire à un retard de prise considérable.

Il est possible cependant d'atteindre des résistances mécaniques élevées au démoulage en optimisant le choix et le dosage en adjuvant. En fonction des propriétés pouzzolaniques des additions, les résistances mécaniques des BAP peuvent continuer à croître au-delà de 28 jours.

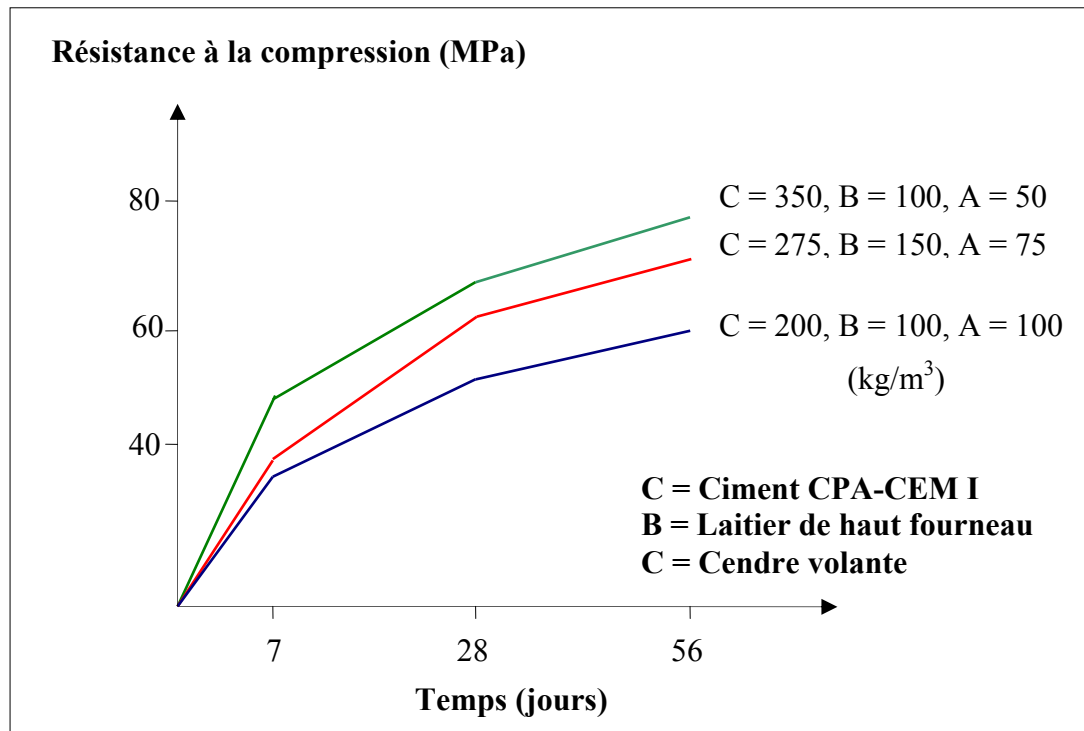


Figure 2.16 : Variation des résistances mécaniques en compression de BAP en fonction de la composition du liant, d'après HAYAKAWA et al (1993). [8]

2.12.2. RETRAIT:

À la vue du volume de pâte plus important, les BAP sont susceptibles d'être plus déformables que les bétons ordinaires. Les données de la littérature dans ce domaine montrent bien une tendance d'un retrait total plus important pour les BAP.

Comme leur retrait endogène varie entre 180 et 250 $\mu\text{m/m}$, il semble être inférieur ou égal à celui des bétons ordinaires, leur retrait de séchage est donc plus élevé (environ 800 $\mu\text{m/m}$). Ce retrait de séchage est d'autant plus important que le rapport E/C est grand mais paraît d'autant plus faible que le rapport G/S est élevé.

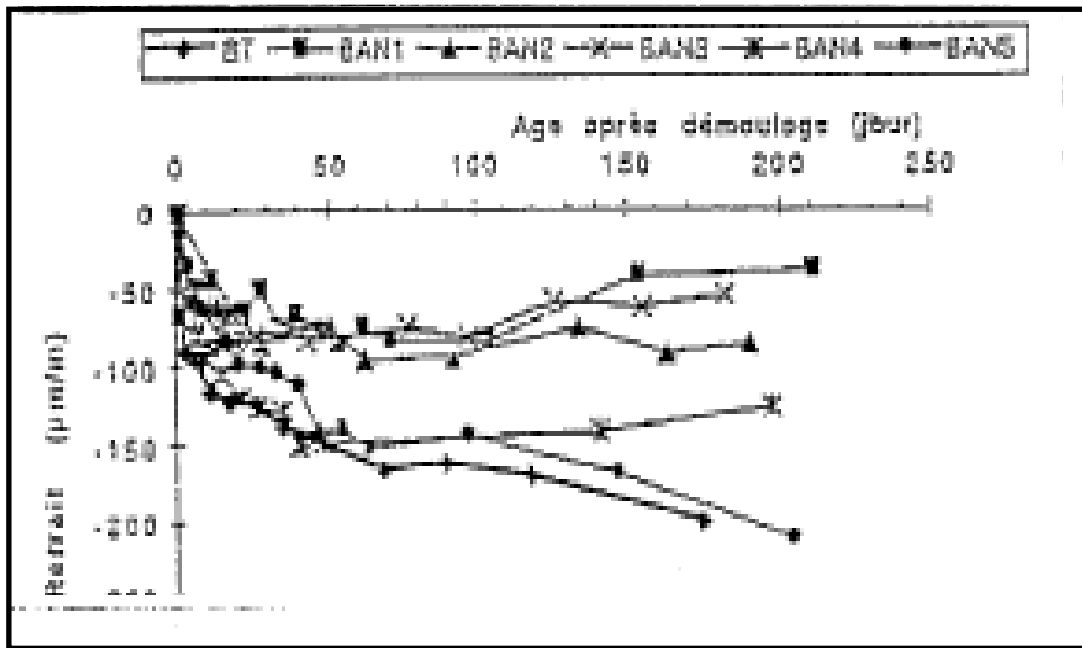


Figure 2.17 : Comparaison des retraits endogènes d'un béton ordinaire et de cinq BAP .[7]

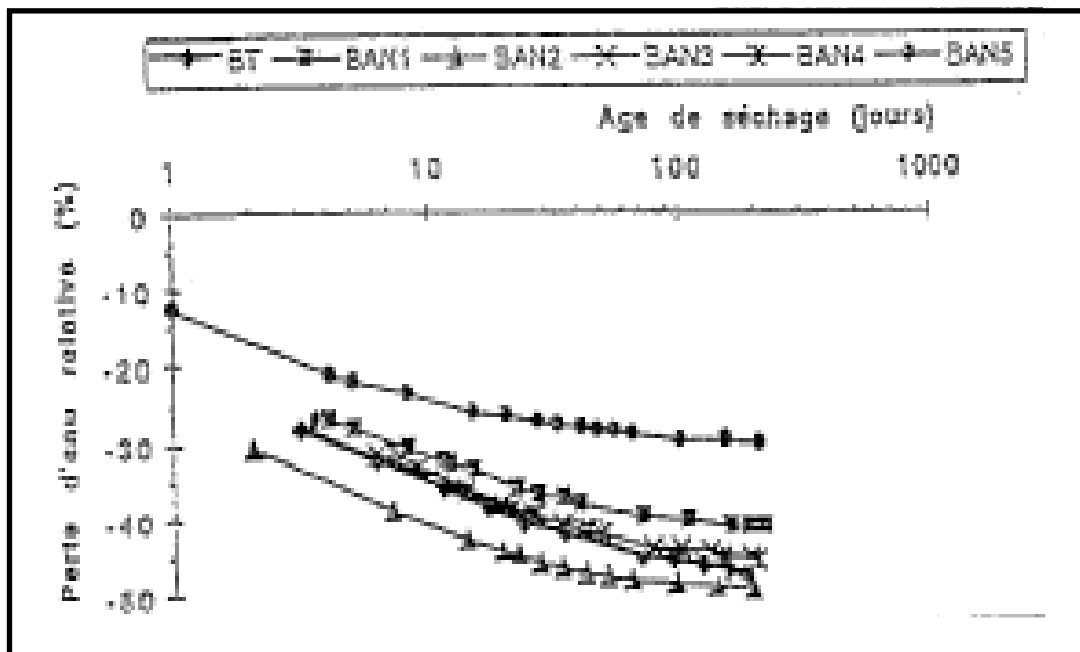


Figure 2.18 : Comparaison des retraits de séchage d'un béton ordinaire et de cinq BAP. [7]

2.12.3 FLUAGE :

Le fluage étant directement lié à la déformabilité de la matrice cimentaire, on peut s'attendre à ce que le volume de pâte des BAP, généralement supérieurs à ceux des bétons ordinaires, conduisent à des déformations de fluage importantes. En première approximation, on peut supposer que l'effet (à résistance égale) sera équivalent à celui obtenu sur le module instantané. Ce dernier étant communément admis comme indicateur du fluage (BPEL).

Selon PERSSON (1999) [8]. Le fluage des BAP augmente significativement lorsque les charges sont appliquées aux jeunes âges, et diminue lorsqu'il s'agit de BAP à hautes performances.

2.12.4. RÉSISTANCE DES BAP À LA MIGRATION D'ÉLÉMENTS EXTÉRIEURS :

2.12.4.1. Migration des chlorures :

Selon TANG et al (1999) [8], le béton autoplaçant est moins résistant à la migration des ions chlorure, ils ont trouvé que les coefficients de diffusion d'un BAP de E/C = 0.4 sont deux à trois fois supérieurs (31.4 à $56.1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) à ceux d'un béton ordinaire de E/C= 0.5 (15.1 à $18.4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$).

En réalité les BAP est plus résistants à la migration des ions chlorure, car ils sont plus compacts, mais dans ce cas, il s'agit un BAP poreux.

2.12.4.2. Carbonatation :

IWAI et al en 1996 [8], ont conclu que la profondeur de carbonatation d'un BAP est plus fortement influencée par le rapport E/C que celle d'un béton ordinaire (E/C = 0.45).

Ils ont trouvé que la profondeur de carbonatation naturelle d'un BAP (dont le dosage en ciment est 350 kg/m^3 ; laitier 90 kg/m^3 ; superplastifiant 1.1% par rapport au poids du liant un rapport G/S = 1.06 ; et E/L = 0.39) est d'environ 3 mm à 28 jours et de 5 mm à 50 jours.

MAKI en 1996 [8], a effectué des essais de carbonatation accélérée à une température de 40°C , une humidité de 40%, et une concentration en dioxyde de carbone de 10%. Ces essais ont montré que la profondeur de carbonatation d'un BAP (E/L=0.53) est plus faible que celle d'un béton ordinaire de 8 cm d'affaissement (cf. tableau 2.5).

		BÉTON ORDINAIRE	BÉTON AUTOPLAÇANT
Profondeur de carbonatation (mm)	4 semaines	14	9
	13 semaines	19	13
	36 semaines	22	16

Tableau 2.5 : Essais de carbonatation accélérée sur un BAP et un béton ordinaire (MAKI. 1996) [8]

2.12.5. Module instantané des BAP :

Les règlements BAEL et BPEL préconisent d'utiliser pour les structures en béton armé ou précontraint dont la résistance à la compression f_{c28} est comprise entre 40 et 80 MPa et ayant une proportion volumique en granulats au moins égale à 66%.

Plusieurs bétons autoplaçants par leur composition, ne sont pas couverts par ces règlements.

Le module instantané des bétons autoplaçants va être en moyenne plus faible que celui des bétons ordinaires du fait d'un volume de matrice plus élevé. Le module de la matrice cimentaire est compris entre 6 000 et 25 000 MPa, alors que celui des granulats se situe entre 60 000 et 100 000 MPa.

Des calculs ont été réalisés par le LCPC à partir d'un modèle d'homogénéisation développé par LE ROY en 1996 et DE LARRARD et LE ROY en 1992, afin de prendre en compte les proportions pâte / granulats dans la détermination du module instantané des BAP.

Ces résultats ont été comparés aux prévisions du BAEL basées sur la résistance mécanique:

$$E_{ij} = k \times \sqrt[3]{f_{cj}} \dots\dots\dots (5)$$

Avec $k = 11\,000$ pour les bétons ordinaires.

PONS et al (1999) [8] ont réalisé des mesures de module instantané sur quatre bétons autoplaçants. Les résultats confirment la tendance prévue par le modèle d'homogénéisation du LCPC. Les modules instantanés des BAP sont plus faibles, et le coefficient k de la relation (5) varie de 7 850 à 9 700 pour les quatre bétons autoplaçants.

2.13. CONCLUSION :

Dans le cas du béton autoplaçant on renonce à toute forme de compactage après le coulage du béton frais dans le coffrage. Ceci permet entre autre d'accroître la productivité, d'améliorer la situation sur le chantier, d'augmenter la durabilité et autorise également l'exécution du bétonnage dans des conditions spécifiques.

Les propriétés les plus importantes d'un BAP par rapport au béton ordinaire sont une fluidité très élevée, la résistance à la ségrégation et la capacité à combler intégralement l'espace entre les barres d'armatures.

Tandis que l'aptitude à la déformation et la résistance à la ségrégation dépendent des composants intervenant dans le béton et de la formulation, l'aptitude à envelopper intégralement l'armature dépend de la forme du coffrage, de la teneur et de la densité de l'armature. Pour atteindre cette propriété, il convient de tenir compte de la disposition de l'armature et de contrôler le volume et la taille maximale des grains des granulats.

Ceci est obtenu grâce à une optimisation spécifique, composée pour l'essentiel d'une teneur en liants suffisante, d'une composition des granulats équilibrée avec une teneur en fines accrues et d'un superplastifiant approprié.

Outre la formulation adéquate, il convient d'accorder une attention toute particulière à la fabrication, à la mise en oeuvre du béton frais et à la technique de coffrage.

La fluidité élevée de ce béton est obtenue par l'adjonction d'un superplastifiant. Il convient de tenir compte du fait qu'une fluidité extrême peut provoquer la ségrégation. Ce phénomène peut être combattu par l'adjonction d'un " adjuvant de contrôle de la viscosité ", généralement à base de cellulose méthylique ou par l'adjonction d'une grande quantité de matériaux poudreux comme, les cendres volantes, la farine calcaire, la fumée de silice ou les laitiers de hauts-fourneaux. L'adjonction d'un entraîneur d'air peut également avoir une influence positive sur la ségrégation et stabiliser le béton. L'emploi excessif d'agents épaississants à base de cellulose méthylique ou de poudre peut toutefois entraver la fluidité. Il est de ce fait indispensable de déterminer un équilibre optimal entre la fluidité et la ségrégation dans le cadre d'essais préliminaires.

Deuxième Partie

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

CHAPITRE 3

MÉTHODES D'ESSAIS ET CARACTÉRISTIQUES

3.1. INTRODUCTION :

L'objectif de ce programme de recherche est de développer des formulations de béton autoplaçant tout en se basant sur les résultats obtenus par les essais d'optimisations du squelette granulaire (sable, graviers) d'une part, et la pâte liante (ciment, eau, superplastifiant et fumée de silice) d'autre part.

Cette optimisation conjointe nous permet d'obtenir un béton autoplaçant de meilleures caractéristiques rhéologiques et mécaniques.

Dans notre recherche, nous avons utilisé les matériaux locaux, qui sont disponibles dans le laboratoire de la faculté de génie civil tels que les granulats et le sable et dans le marché Algérien tel que le ciment, la fumée de silice et les adjuvants.

3.2. MÉTHODE D'ESSAIS :

3.2.1. ESSAIS SUR GRANULATS :

3.2.1.1. Essai d'équivalent de sable : (NF P 18-598)

Cet essai consiste à plonger un poids défini de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution floculante ; après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment (H_1) et du sédiment + floculant (H_2).

L'équivalent de sable est donné par la relation suivante :

$$ES = \frac{H_1}{H_2} \times 100 \dots\dots\dots (6)$$

L'équivalent de sable est d'autant plus élevé que la teneur en argile est faible.

3.2.1.2. Module de finesse : (NF P 18-304)

Le module de finesse d'un sable est défini par le 1/100 de la somme des refus exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante : 0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 ; 5.

3.2.1.3. Masse volumique :

Il s'agit de mesurer le volume absolu, en vrac, et apparent du sable et de chaque fraction granulaire pour déterminer le squelette granulaire du béton.

3.2.1.4. Taux d'absorption des granulats :

Après déshydratation des échantillons à 105°C, on les pose dans un bac d'eau jusqu'à la saturation, et on mesure ensuite le taux d'absorption des granulats par la formule suivante :

$$AG(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad \dots\dots\dots (7)$$

Avec :

M_1 : Poids de l'échantillon déshydraté ;

M_2 : Poids de l'échantillon après saturation.

3.2.1.5. Essai Los Angeles : (NF P 18-573)

Cet essai consiste à mesurer la résistance des granulats à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements. Il se pratique sur les classes granulaires 4/6.3 ou 6.3/10 ou 10/16.

On place un échantillon de 5 kg de granulat et 7 à 11 boulets de 417 g dans un tambour ; après un nombre normalisé de tour du tambour, on récupère le passant P au tamis de 1.6 mm.

Le coefficient Los Angeles est calculé par la formule suivante :

$$LA = \frac{P \times 100}{5000} \quad \dots\dots\dots (8)$$

Les granulats sont qualifiés comme suit :

- LA < 15très bon ;
- 15 ≤ LA < 20bon à moyen ;
- 20 ≤ LA < 30moyen à faible ;
- LA ≥ 30médiocre.

3.2.2. ESSAI SUR LIANT :**3.2.2.1. Mesure du temps d'écoulement au cône Marsh :**

La confection des coulis consiste à utiliser un malaxeur de capacité de 5 litres à axe vertical et à trois vitesses, le principe de la confection consiste à :

1. Mettre dans le bol la quantité d'eau nécessaire pour effectuer l'essai, additionnée de la moitié du superplastifiant ;

2. Déverser graduellement la quantité de ciment (éventuellement avec un ajout minéral) ;
3. Malaxer ensuite le mélange pendant 2 minutes, avec une grande vitesse ;
4. Ajouter la moitié de la dose restante du superplastifiant, et malaxer pendant 1 minute à grande vitesse.

Juste après l'arrêt du malaxage, déverser la totalité du coulis dans le cône Marsh tout en fermant son ouverture inférieure, ensuite lancer l'écoulement du coulis dans l'éprouvette graduée et mettre le chronomètre en marche. Lorsque le volume du coulis atteint 1 litre dans l'éprouvette on note le temps correspondant.



Figure 3.1 : Essai au cône Marsh

3.2.3. ESSAIS SUR BÉTON FRAIS :

3.2.3.1. Mesure de l'affaissement : (NF P 18-415)

Cet essai est utilisé pour caractériser l'ouvrabilité du béton ordinaire confectionné.

Il consiste à mesurer l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son poids propre après le soulèvement du cône d'Abrams verticalement.

3.2.3.2. Masse volumique :

Cet essai consiste à :

- Remplir un récipient de volume V (litre) et de masse M (kg) d'un échantillon de béton frais en deux couches tassées par vibration de 30 secondes par couche ;
- Araser et lisser la surface du béton à l'aide d'une truelle ;
- Peser le récipient, soit de masse M_T en kg.

La masse volumique du béton frais sera alors :

3.2.3.3. Mesure de l'étalement :

Cet essai est utilisé pour caractériser la fluidité du béton, il consiste à mesurer le diamètre d'une galette de béton formée après le soulèvement du cône d'Abrams verticalement (cf. § 2.6.2.1.).

$$M_{vbf} = \frac{M_T - M}{V} \quad (\text{kg/l}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

3.2.3.4. Essai de stabilité au tamis :

L'objectif de cet essai est d'évaluer les bétons autoplaçants vis-à-vis les risques de ségrégation et de ressuage en calculant le poids de la laitance passé au tamis par la formule donnée ci après.

Le mode opératoire de cet essai est décrit dans le paragraphe 2.6.4.3.

$$P_{\text{laitance}} (\%) = \frac{\text{Poids de la laitance passée (kg)}}{4.8 \pm 0.2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

La calcul du pourcentage de laitance par rapport au poids de l'échantillon conduit à classer le béton autoplaçant de la façon suivante :

- $0\% \leq P_{\text{laitance}} (\%) \leq 15\%$ Stabilité satisfaisante.
- $15\% \leq P_{\text{laitance}} (\%) \leq 30\%$ Stabilité critique.
- $P_{\text{laitance}} (\%) > 30\%$ Stabilité très mauvaise (béton inutilisable).

3.2.4. ESSAIS SUR BÉTON DURCI :

3.2.4.1. Mesure des masses volumiques :

Il s'agit de déterminer la masse volumique apparente d'un béton âgé de 3, 7, 14, 28 et 91 jours à partir d'une éprouvette cylindrique (16 × 32) cm conservée dans l'eau.

3.2.4.2. Essai de compression : (NF P 18-406)

Les essais de résistance à la compression ont été effectués sur des éprouvettes cylindriques (16 × 32) cm, à l'aide d'une presse de capacité de 2000 KN. L'éprouvette est placée et centrée entre les deux plateaux de la presse puis chargée progressivement à jusqu'à la rupture.

La résistance à la compression est donnée par la formule suivante :

$$\sigma = \frac{P}{S} \dots\dots\dots (11)$$

Avec :

σ : Contrainte de rupture (MPa) ;

P : Charge de rupture (MN);

S : Section de l'éprouvette (2×10^{-2}) m².

La résistance à la compression correspond à la contrainte moyenne d'écrasement de trois éprouvettes à chaque âge d'essai.

3.2.4.3. Essai de traction par fendage : (NF P 18-408)

Cet essai, appelé aussi essai Brésilien, consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse, cet effort de compression induit des contraintes de traction dans le plan passant par ces deux génératrices.

Cet essai a été effectué sur des éprouvettes cylindriques (16 × 32) cm à l'aide de la même presse de l'essai de compression mené d'un dispositif spécifié (cf. figure 3.2).

La résistance à la traction f_{tj} est définie par la relation suivante :

Avec :

$$f_{tj} = \frac{2P}{\pi DL} \dots\dots\dots (12)$$

- P** : La charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en traction du plan diamétral vertical ;
- D** : Le diamètre du cylindre ;
- L** : La longueur du cylindre ;
- j** : Âge de béton au moment de l'écrasement (en jours).



Figure 3.2 : Essai de fendage

3.2.4.4. Essai de retrait :

Pour mesurer le retrait, des éprouvettes prismatiques ($7 \times 7 \times 28$) cm sont utilisées. On compare, à différents temps, la variation de longueur d'une éprouvette, par rapport à sa longueur initiale à un temps t_0 pris pour origine, le retrait sera mesuré par deux procédures, la première est le calcul du retrait endogène dû à la seule réaction d'hydratation en empêchant tout échange d'eau entre les éprouvettes et le milieu extérieur, pour cela, les éprouvettes sont enrobées d'une feuille d'aluminium autocollante, la deuxième procédure consiste à mesurer le retrait total libre dû à l'évaporation de l'eau contenue dans le béton, les éprouvettes sont conservées sans moyen de protection. Pour les deux procédures les éprouvettes sont placées dans une salle à température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité relative de $65 \pm 5\%$ et en absence de vent.

Le retrait de séchage est calculé ensuite en faisant la différence entre le retrait total et le retrait endogène.

Pour assurer un bon contact entre l'aiguille du comparateur et le béton, des plots ont été ancrés au centre de la surface de contact de l'éprouvette. Les éprouvettes de béton sont placées d'une manière à éviter tout risque d'instabilité à une température ambiante.



Figure 3.3 : Essai de retrait

3.2.4.5. Porosité totale :

Cet essai consiste à sécher à 105°C, un échantillon de débris de l'essai d'écrasement en compression d'une éprouvette à l'âge de 28 jours. On mesure ensuite la porosité totale de cet échantillon après sa saturation en eau.

La porosité totale P (%) est donnée par la formule suivante :

$$P(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \dots\dots\dots (13)$$

Avec :

M_1 : Masse de l'échantillon séché ;

M_2 : Masse de l'échantillon après saturation.

3.2.4.6. Absorption capillaire :

Pour l'absorption capillaire, les moules prismatique (7 × 7 × 28) cm sont stockées dans une salle à température ambiante pendant 24 heures. Après le démoulage des éprouvettes, elle subissent une déshydratation à l'étuve à 105°C, et doit être sciées sur une face puis

recouvertes d'une résine époxy sur les autres faces, pour empêcher toute évaporation d'eau, elles sont ensuite posées sur la face sciée dans un bac rempli de sable saturé d'eau.

On mesure en fonction du temps l'accroissement du poids de l'éprouvette dû à la montée capillaire de l'eau par la formule suivante :

$$AC = \frac{100 \times P}{S \sqrt{t}} \dots \dots \dots (14)$$

Avec :

P : Poids d'eau absorbée (g)

S : Surface sciée en contact avec l'eau en (cm²)

t : Temps en heures (72 heures).

3.2.4.7. Auscultation dynamique (Ultrason) : (NF P 18-418)

C'est un essai non destructif qui permet d'avoir une idée sur la compacité, donc la résistance à la compression et le module d'élasticité dynamique d'un béton.

Il consiste à mettre les deux sondes (émettrice et réceptrice) de l'ultrason entre les deux extrémités d'une éprouvette (16 × 32) cm âgée de 28 jours.

À partir du temps de propagation des ondes soniques à travers la masse de béton, on calcule la vitesse de propagation des ondes à partir de la formule suivante :

$$V = \frac{L}{t} \times 10^6 \dots \dots \dots (15)$$

Avec :

V : La vitesse de propagation des ondes en (m/s) ;

L : La distance entre les deux sondes en m (pour l'éprouvette testée L = 0.32 m) ;

t : Le temps de propagation des ondes (μ s).

À partir de cet essai, on peut calculer le module d'élasticité dynamique E_{dyn}, par la formule suivante

$$E_{\text{dyn}} = \rho V^2 \frac{(1+\nu).(1-2\nu)}{(1-\nu)} \dots\dots\dots (16)$$

Où :

E_{dyn} : Module d'élasticité dynamique

ρ : Masse volumique du béton

g : Accélération gravitationnelle

ν : Coefficient de poisson (on prend : $\nu = 0.2$ pour le BO et 0.22 pour le BAP HP). [21]

3.3. CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX :

3.3.1. GRANULATS :

3.3.1.1. Sable :

Le sable utilisé provient de la carrière JOBERT, il est concassé de couleur noir et de granulométrie 0/3.

Les caractéristiques principales requises pour un sable à béton sont la propreté, définie par l'essai d'équivalent de sable et la granularité déterminée par le module de finesse qui est déterminé par l'analyse granulométrique.

Pour les deux paramètres, les valeurs optimales sont respectivement :

Équivalent de sable > 70 (NF P 18-598)

Un module de finesse : $1.8 < M_F < 3.2$ (NF P 18-541)

3.3.1.2. Gravier :

Nous avons utilisé des granulats provenant d'un gisement de calcaire de la carrière JOBERT. Un essai Los Angeles a été effectué sur le gravier de la fraction 8/16, on a trouvé LA = 30%, ce qui nous permet de qualifier ces granulats de moyen à médiocre.

Le tableau ci-après présente les propriétés physico-chimiques des granulats utilisés pour la confection du béton autoplaçant et du béton ordinaire

	Sable 0/3	Gravillon 3/8	Gravier 8/16
Équivalent de sable (%)	78.5	/	/
Module de finesse	2.9		
Densité absolue	2.62	2.58	2.58
Densité apparente	/	1.32	2.33
Densité en vrac	1.47	1.67	0.98
Taux d'absorption (%)	/	1.8	1.5

Tableau 3.1 : Propriétés des granulats

Figure 3.4 : Analyse granulométrique des granulats.

3.3.2. Ciment :

Nous avons utilisé un ciment CPA-CEM I 42.5R fabriqué par la société LAFARGE ROMCIM S.A -MEDGIDIA PLANT- ROMANIA, et importé par l'entreprise EDIMCO de Blida.

Le ciment utilisé a une résistance réelle de 52.5 MPa. Ces caractéristiques physico-chimiques sont présentées comme suit :

Composition chimique (%)									
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PAF	RI
63.79	20.39	4.70	3.75	1.72	2.99	0.34	1.17	1.3	0.7
Composition minéralogique (%)									
C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A		C ₄ AF			
59.2		14.1		6.1		11.4			

Tableau 3.2 : Composition chimique et minéralogique du ciment [22].

Finesse du ciment :

La masse spécifique $\rho = 3.1 \text{ g/cm}^3$

Surface spécifique $\text{SSB} = 3348 \text{ cm}^2/\text{g}$ (valeur donnée par le fabricant).

Les temps de prise :

Début de prise $\text{DP} = 145 \text{ mn}$

Fin de prise $\text{FP} = 195 \text{ mn}$

3.3.3. Fumée de silice :

Dans notre recherche nous avons utilisé une fumée de silice fournie par la société Granitex-NP de Oued Smar, Alger, fabriquée par la société canadienne SKW.

Les différents oxydes constitutifs de la fumée de silice utilisée sont représentés dans le tableau suivant :

Composition chimique en %					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
92.1	0.25	0.79	0.17	0.96	0.36

Tableau 3.3 : Résultat de l'analyse chimique de la fumée de silice [2].

3.3.4. Superplastifiant :

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant réducteur d'eau fabriqué par la société Granitex-NP et commercialisé sous le nom de "MEDAPLAST SP 40", il est à base de copolymère formaldéhyde naphthalène sulfonaté (PNS), sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0.6% à 4% (en extrait sec) du poids de ciment [23].

Ses Caractéristiques sont :

- ✧ Forme liquide
- ✧ Couleur marron
- ✧ Extrait sec 40%
- ✧ Densité 1.21
- ✧ PH 8.2
- ✧ Teneur en chlore <1g/l

3.3.5. L'agent de viscosité :

Nous avons utilisé un agent colloïdal de type polysaccharide fabriqué par Granitex-NP.

Il s'agit d'une poudre ultrafine, lisse et de couleur blanche, son dosage dans le béton varie entre 0.01% et 0.05% du poids d'eau. [23]

3.3.6. L'eau de gâchage :

Nous avons utilisé l'eau potable du robinet sans passer par l'analyse chimique de cette eau.

3.4. CONFECTION DES ÉPROUVETTES :

La confection du béton consiste à verser dans l'ordre, dans un malaxeur de capacité de 0.64 m³, les fractions de graviers, de ciment (éventuellement avec fumée de silice), et la fraction de sable. On mélange l'ensemble à sec pendant une minute afin d'homogénéiser le mélange.

On introduit ensuite la première moitié de l'eau de gâchage accompagnée de la moitié de la quantité du superplastifiant ; et on continue à malaxer pendant une minute. Ensuite, on introduit la deuxième moitié d'eau accompagnée de la quantité de superplastifiant restante, et on malaxe une dernière fois pendant deux minutes.

Juste après l'arrêt du malaxage, on mesure l'affaissement du béton ordinaire ou le diamètre d'étalement et la vitesse d'écoulement du béton autoplaçant ainsi que sa masse volumique et sa résistance à la ségrégation par l'essai au tamis.

On déverse ensuite sans vibration bien sûr, le béton frais dans des éprouvettes métalliques dont les parois ont été déjà humidifiées par une huile de décoffrage.



Figure 3.5 : Confection du béton autoplaçant



Figure 3.6 : Essai d'étalement



Figure 3.7 : Essai de stabilité au tamis

3.5. DÉMOULAGE ET CONSERVATION DES ÉPROUVETTES :

On stocke les éprouvettes dans une salle en attendant de les démouler 24 heures après. Afin d'assurer un bon mûrissement du béton, on doit maintenir une humidité satisfaisante et une température favorable durant la période d'hydratation du ciment pour éviter l'évaporation rapide de l'eau de gâchage. Les éprouvettes sont immergées dans un bac d'eau à une température d'environ 20°C jusqu'à l'échéance de l'essai.

3.6. SURFACAGE DES ÉPROUVETTES : (NF P 18-416)

Le surfacage consiste à rendre les surfaces libres d'une éprouvette cylindrique planes et perpendiculaires aux génératrices de l'éprouvette, il permet aussi de diminuer l'effet de frottement qui provoque une réduction des contraintes tangentielles intervenant au contact éprouvette-plateaux de la presse, et réduire l'excentricité accidentelle lors de l'essai d'écrasement en compression.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

4.1. COMPOSITION D'UN BÉTON ORDINAIRE :

Afin d'obtenir une composition du béton qui développe des bonnes caractéristiques rhéologiques (ouvrabilité, maniabilité, résistance à la ségrégation) à l'état frais, et les meilleures caractéristiques à l'état durci (résistance à la compression et à la traction).

Nous avons opté pour une teneur en ciment de 400 kg/m^3 , avec un rapport E/C = 0.5 ;

L'optimisation du squelette granulaire permet de satisfaire au maximum les conditions à priori contradictoires telles qu'une bonne ouvrabilité à l'état frais, et des caractéristiques mécaniques à l'état durci acceptables.

Ce squelette granulaire a été optimisé en deux étapes, la première est théorique (méthode Dreux-Gorisse) et la deuxième est expérimentale.

4.1.1. METHODE DREUX-GORISSE :

Cette méthode consiste à optimiser le squelette granulaire à partir d'une courbe granulaire de référence, cette dernière est définie par les trois points suivants :

$P_1 (0,0)$; $P_2 (D_{\max}, 100\%)$ et un point de brisure P_3 dont les coordonnées sont :

$$P_3 \begin{cases} X = \frac{D_{\max}}{2} = 8 \text{ mm} \\ Y = 50 - \sqrt{D_{\max}} = 46\% \end{cases} \dots\dots\dots (17)$$

D'après la courbe de référence obtenue sur la figure 4.1, on peut tirer les pourcentages en volume absolu de chaque classe de granulats.

	Sable 0/3	Gravillon 3/8	Gravier 8/16
Pourcentage en volume absolu (%)	32	11	57

Tableau 4.1 : Pourcentage du squelette granulaire (méthode Dreux-Gorisse)

Figure 4.1 : Courbe de référence du béton ordinaire

✓ On a dans un mètre cube de béton le volume absolu des constituants comme suit :

$$\text{Gravier (G)} + \text{Sable (S)} + \text{Ciment (C)} + \text{Eau (E)} + \text{Air occlus (A)} = 1000 \text{ l}$$

✓ On suppose que le volume de l'air occlus Air occlus (A) = 5 l/m³

✓ Nous fixons le dosage en ciment à 400 kg/m³ ($\rho = 3.1 \text{ g/cm}^3$) et le rapport E/C à 0.5

$$\text{Donc on aura } E = 200 \text{ kg/m}^3$$

$$(G+S) = 1000 - (400/3.1) - 200 - 5 = 666 \text{ l/m}^3$$

	Sable 0/3	Gravillon 3/8	Gravier 8/16
Volume absolu du granulat (l/m³)	213	73	380
Masse des granulats (kg/m³)	558	189	980

Tableau 4.2 : Composition préliminaire du béton ordinaire

On remarque que cette méthode ne tient pas en compte la forme et la nature de surface des fractions de graviers, et on constate aussi que sa courbe granulaire est continue, malgré que les bétons à granularité discontinue puissent être plus compacts que les bétons à granularité continue.

4.1.2. METHODE EXPERIMENTALE :

L'optimisation du squelette granulaire par la méthode expérimentale consiste à chercher le rapport Gravier/Sable, qui développe les meilleures caractéristiques que ce soit à l'état frais ou à l'état durci.

Le principe de cette méthode expérimentale consiste à rechercher la composition optimale avec un rapport E/C = 0.5 et une teneur en ciment de l'ordre de 400 kg/m³ (CPA 42.5R), et qui permet de minimiser le volume de la pâte de ciment, tout en remplaçant soit une quantité de sable par une quantité de gravier de la fraction suivante (gravier 3/8) ou de remplacer une quantité de gravier de la fraction 3/8 par une quantité de gravier de la fraction 8/16, et ainsi de suite.

	Sable 0/3	Gravillon 3/8	Gravier 8/16	Ciment	Eau	E/C
Volume (l/m³)	240	101	330	129	200	0.5

Tableau 4.3 : Composition volumique finale du béton ordinaire

	Sable 0/3	Gravillon 3/8	Gravier 8/16	Ciment	Eau	E/C
Masse (kg/m ³)	630	261	851	400	200	0.5

Tableau 4.4 : Composition massique finale du béton ordinaire

4.2. COMPOSITION D'UN BAP :

4.2.1. PRINCIPES DE FORMULATION :

Les deux principales propriétés des BAP sont une grande fluidité et une grande résistance à la ségrégation. Ces deux propriétés sont à priori contradictoires pour un béton ordinaire; l'obtention de l'une faisant souvent au détriment de l'autre.

Pour réaliser un BAP, il faut obtenir une suspension fluide suffisamment dense de manière à éviter le tassement des plus gros constituants.

À résistance équivalente les BAP ne se différencient des bétons ordinaires que par une quantité supérieure de pâte, regroupant le ciment et les particules fines, par l'introduction d'un agent de viscosité et par l'utilisation d'un faible volume de gravillon. Dans les BAP, le volume de pâte (ciment, additions, eau efficace et air) est généralement compris entre 330 et 400 l/m³. Leur formulation requiert une étude précise notamment dans le choix des constituants, l'optimisation de la teneur en ajout chimique et de la quantité d'eau.

Les caractéristiques des BAP doivent permettre d'assurer :

- la mobilité des matériaux en milieu non confiné (appréhendée par l'essai d'étalement).
- la stabilité, c'est à dire la résistance à la ségrégation et au ressuage (appréhendée par l'essai de stabilité au tamis).

Les BAP ont une grande capacité de remplissage en zone confinée car leur fluidité et leur résistance à la ségrégation sont telles que le phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle est évité. Ce dernier dépend des propriétés et de la proportion de la pâte qui sont directement liées aux caractéristiques du liant et à la quantité d'eau libre, c'est-à-dire à la quantité d'eau non retenue par les différents constituants. Si le béton contient une forte quantité d'eau libre, une partie des gravillons se sépare facilement du mélange et les forces de collisions et de friction augmentent jusqu'à la formation de voûtes ce qui accentue la ségrégation des constituants.

4.2.2. FORMULATION PRÉLIMINAIRE D'UN BAP :

On a : Gravier (G) + Sable (S) + Ciment (C) + Eau (E) + Air occlus (A) = 1000 l

On fixe le dosage en ciment à 500 kg/m³ et on prend : C/E = 2 ⇒ E = 250 kg et:

$$A = 5 \text{ l/m}^3$$

La masse spécifique du ciment $\rho = 3.1 \text{ g/cm}^3$ donc on peut tirer le volume du sable et du gravier comme suit :

$$(G + S) = 1000 - 250 - (500/3.1) - 5 \approx 584 \text{ l/m}^3$$

Comme le rapport G/S du BAP varie entre 0.7 et 1.05, pour un essai préliminaire de formulation un rapport G/S = 0.93 sera pris pour calculer les proportions volumiques du sable et du gravier.

Donc on aura :

$$\begin{cases} (G+S) = 584 \text{ l/m}^3 \\ G/S = 0.93 \end{cases} \dots\dots\dots (18)$$

D'après la formule (18) on a G % = 48.19% et S % = 51.81%, d'où : G = 281 l/m³ et S = 303 l/m³

L'utilisation du superplastifiant SP40 à raison de 3% par rapport au poids de ciment permet de réduire la quantité d'eau de 20%, donc on aura une diminution du rapport E/C de 0.5 à 0.4, tout en gardant les mêmes proportions de gravier, sable et ciment.

Constituants	Sable 0/3	Gravier 3/16	Ciment	Eau	E/C	Superplastifiant
Volume (l/m ³)	303	281	161.3	200	0.4	12.5
Masse (kg/m ³)	794	725	500	200	0.4	15

Tableau 4.5 : Formulation préliminaire du béton autoplaçant

4.2.3. OPTIMISATION DE LA PÂTE LIANTE :

Nous avons abordé l'optimisation de la pâte liante par le biais de l'essai du cône Marsh pour vérifier la compatibilité ciment/superplastifiant (cf. § 3.2.2.).

Nous avons étudié la variation du temps d'écoulement d'un coulis sans fumée de silice et d'un autre avec 10% de fumée de silice en fonction du dosage en superplastifiant.

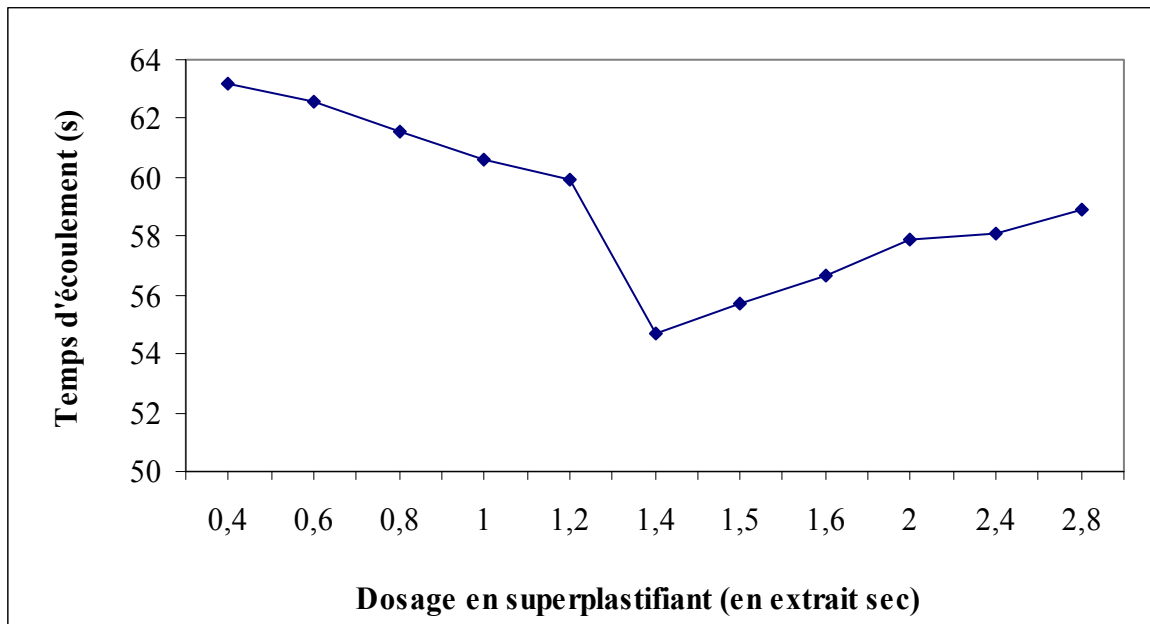


Figure 4.2 : Variation du temps d'écoulement d'un coulis sans fumée de silice en fonction du dosage en superplastifiant

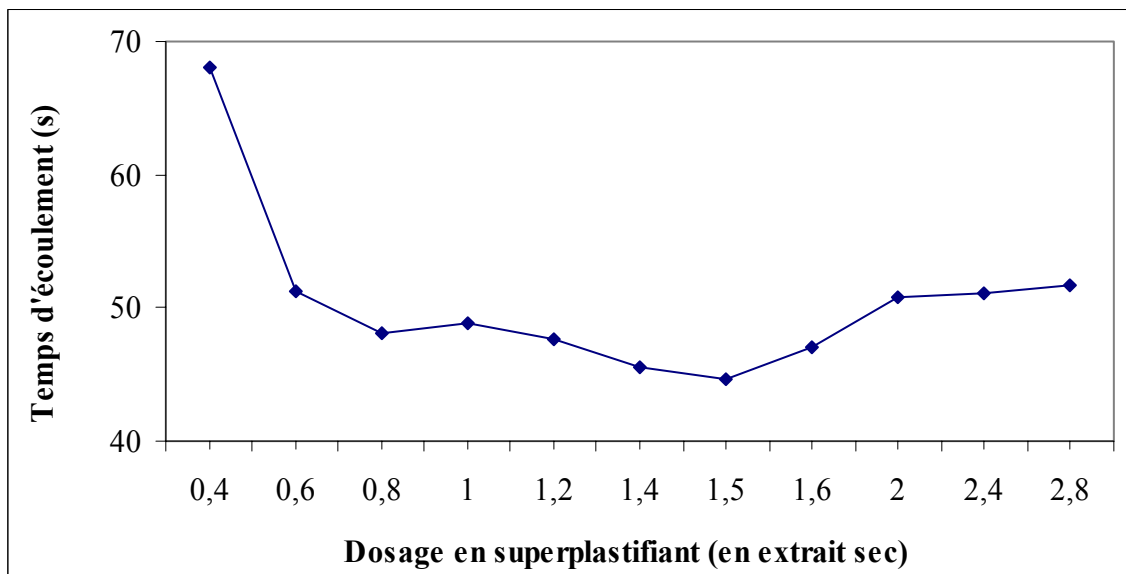


Figure 4.3 : Variation du temps d'écoulement d'un coulis avec 10% de fumée de silice en fonction du dosage en superplastifiant

Dosage en fumée de silice (%)	E/L	Dosage de saturation (%)	Temps d'écoulement (s)
0	0.45	/	54.00
0	0.35	1.4	54.69
10	0.35	1.5	44.62

Tableau 4.6 : Dosage de saturation et temps d'écoulement correspondant en fonction du rapport E/L et du dosage en fumée de silice

▪ **Interprétation et discussion :**

Les figures 4.2 et 4.3 montrent que le temps d'écoulement d'un coulis de ciment au cône Marsh diminue avec l'augmentation de la teneur en superplastifiant, jusqu'à un certain dosage où à partir duquel le temps d'écoulement du coulis reste constant ou augmente légèrement.

On appelle le point d'intersection des deux parties linéaires de la courbe *point de saturation*, c'est-à-dire le point à partir duquel, dans les conditions expérimentales de mesure, toute augmentation du dosage en superplastifiant n'a plus de répercussion sensible sur la rhéologie du coulis.

On constate que pour un coulis sans fumée de silice, le point de saturation est de 1.4% du poids de ciment (en extrait sec), par contre pour le coulis avec fumée de silice il est de l'ordre de 1.5% du poids de ciment (en extrait sec), avec une diminution de temps d'écoulement de 18.41% par rapport à celui du coulis sans fumée de silice (cf. tableau 4.6).

Les figures 4.2 et 4.3 montrent que pour un dosage en superplastifiant de 0.4% du poids de ciment, le temps d'écoulement d'un coulis sans fumée de silice est inférieur de 7.59% par rapport à celui du coulis avec 10% de fumée de silice ; ceci est dû principalement à l'insuffisance du dosage en superplastifiant qui ne permet pas de défloculer convenablement l'empilement des grains de ciment et les particules de fumée de silice. À cet effet, on peut dire que le dosage en superplastifiant augmente avec l'augmentation de la teneur en fumée de silice.

Dosage en fumée de silice (%)	E/L	Dosage de saturation (%)	Temps d'écoulement (s)
0	0.45	/	54.00
0	0.35	1.4	54.69
10	0.35	1.5	44.62

Tableau 4.6 : Dosage de saturation et temps d'écoulement correspondant en fonction du rapport E/L et du dosage en fumée de silice

▪ **Interprétation et discussion :**

Les figures 4.2 et 4.3 montrent que le temps d'écoulement d'un coulis de ciment au cône Marsh diminue avec l'augmentation de la teneur en superplastifiant, jusqu'à un certain dosage où à partir duquel le temps d'écoulement du coulis reste constant ou augmente légèrement.

On appelle le point d'intersection des deux parties linéaires de la courbe *point de saturation*, c'est-à-dire le point à partir duquel, dans les conditions expérimentales de mesure, toute augmentation du dosage en superplastifiant n'a plus de répercussion sensible sur la rhéologie du coulis.

On constate que pour un coulis sans fumée de silice, le point de saturation est de 1.4% du poids de ciment (en extrait sec), par contre pour le coulis avec fumée de silice il est de l'ordre de 1.5% du poids de ciment (en extrait sec), avec une diminution de temps d'écoulement de 18.41% par rapport à celui du coulis sans fumée de silice (cf. tableau 4.6).

Les figures 4.2 et 4.3 montrent que pour un dosage en superplastifiant de 1.4% du poids de ciment, le temps d'écoulement d'un coulis sans fumée de silice est inférieur de 7.59% par rapport à celui du coulis avec 10% de fumée de silice ; ceci est dû principalement à l'insuffisance du dosage en superplastifiant qui ne permet pas de défloculer convenablement l'empilement des grains de ciment et les particules de fumée de silice. À cet effet, on peut dire que le dosage en superplastifiant augmente avec l'augmentation de la teneur en fumée de silice.

L'utilisation d'un dosage en superplastifiant qui dépasse 1.4% du poids de ciment donne un béton autoplaçant avec un diamètre d'étalement important et facilite considérablement la mise en place du béton même dans le cas d'un ferrailage dense, ceci donne un prix de revient très coûteux pour le maître de l'ouvrage et retarde considérablement la prise du béton (40 à 50 heures) ce qui influe directement sur le processus d'hydratation de ciment, et provoque une diminution de la cadence du travail

Afin d'éviter les effets secondaires indésirables des superplastifiants, il est préférables de respecter les conseils et les limites de teneur en superplastifiant fixées par le producteur. Les résultats obtenus confirment ceux obtenus par P.C.AITCIN [24] et O.BOUKASSANI. [25]

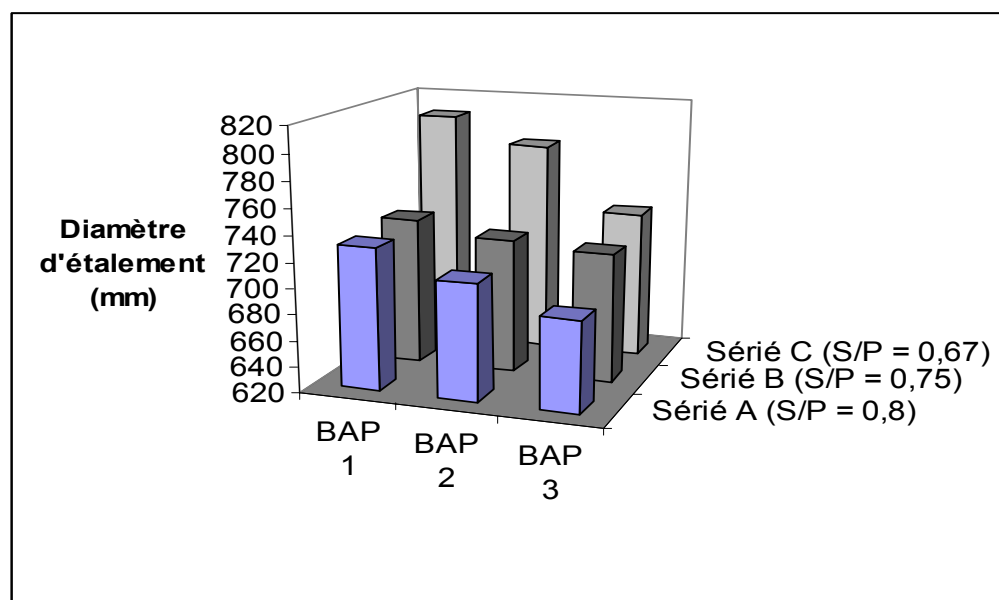
4.2.4. OPTIMISATION DES TENEURS EN GROS GRANULATS, SABLE ET LIANT :

Dans cette étape, on vise à optimiser la teneur et la combinaison des gros granulats ainsi que le rapport volumique sable/pâte qui donne les meilleures déformabilités pour des teneurs fixes en superplastifiant et en agent colloïdal.

Afin de sélectionner une combinaison adéquate de gros granulats qui améliore la maniabilité et la déformabilité du béton autoplaçant destiné aux coffrages à ferrailages serrés, trois proportions granulaires ont été considérées. Il s'agit d'une combinaison massique (1) de 67% de granulats de la fraction 3/8 et 33% de 8/16, une autre (2) qui présente une combinaison massique de 50% de 3/8 et 50% de 8/16 et enfin une combinaison massique (3) de 33% de 3/8 et 67% de 8/16.

	Série A (S/P = 0.8)			Série B (S/P = 0.75)			Série C (S/P = 0.67)		
	BAP A1	BAP A2	BAP A3	BAP B1	BAP B2	BAP B3	BAP C1	BAP C2	BAP C2
Sable 0/3	794	794	794	794	794	794	794	794	794
Gravillon 3/8	483	362.5	242	483	362.5	242	483	362.5	242
Gravier 8/16	242	362.5	483	242	362.5	483	242	362.5	283
Ciment	500	500	500	500	500	500	550	550	550
Eau	200	200	200	210	210	210	237.6	237.6	237.6
Superplastifiant	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Fumée de silice	/	/	/	25	25	25	44	44	44
E/L	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Étalement (mm)	730	710	690	735	725	720	805	785	735
f _{c7} (MPa)	34	31	27	36	29	37.5	20	34.5	35.6

Tableau 4.7 : Effet de la teneur en gros granulats et du rapport sable/pâte sur le diamètre d'étalement du béton, avec un rapport E/L = 0.4.



- Figure 4.4 : Effet de la teneur en gros granulats et du rapport sable / pâte sur le diamètre d'étalement du béton, avec un rapport E/L = 0.4.

▪ Interprétation et discussion :

D'après le tableau 4.7 et la figure 4.4, on trouve que la combinaison 1 (67% de 3/8 et 33% de 8/16) a favorisé les meilleures maniabilité et déformabilité par rapport aux deux autres combinaisons granulaires.

On constate que pour un rapport sable/pâte de 0.8, la combinaison 1 a une amélioration d'étalement de 2.82% et 5.8% par rapport à ceux des combinaisons 2 (50% de 3/8 et 50% de 8/16) et 3 (33% de 3/8 et 67% de 8/16) respectivement.

Cependant, pour un rapport S/P = 0.75, la combinaison 1 a une amélioration de 1.38% et 2.08% par rapport à ceux des combinaisons 2 et 3 respectivement.

Également pour un rapport S/P = 0.67, l'amélioration d'étalement de la combinaison 1 est de 2.55% et 9.52% par rapport à ceux des combinaisons granulaires 2 et 3 respectivement.

On observe que la réduction du volume de gros granulats et par conséquent l'augmentation du volume de mortier, contribue significativement à l'amélioration de la maniabilité.

Cette amélioration est due principalement à la réduction de la teneur des gros granulats de la classe 8/16, car l'augmentation du volume des gros granulats provoque un freinage surtout dans la cas des granulats concassés où le frottement entre les granulats est important.

Concernant l'effet de la variation du rapport S/P, sur la maniabilité des bétons autoplaçants, la figure 4.4 montre que les formulations de la série C (S/P = 0.67), ont favorisé les meilleures maniabilité et déformabilité par rapport aux formulations des séries A (S/P = 0.8) et B (S/P = 0.75).

On constate une amélioration de diamètre d'étalement du béton de la composition granulaire 1 de la série C de l'ordre de 9.52% et 10.27% par rapport à ceux des séries A et B respectivement.

Cependant, avec la combinaison granulaire (C2) a une amélioration de diamètre d'étalement de 8.28% et 10.56% par rapport à ceux des combinaisons granulaires (B2) et (A2) respectivement.

Sur la combinaison granulaire (C3) on a noté également une amélioration de diamètre d'étalement de 2.08% et 6.52% par rapport à ceux des combinaisons granulaires (B3) et (A3) respectivement.

L'effet de la variation du rapport volumique sable/pâte de 0.75 à 0.67 semble être plus efficace pour l'amélioration de la fluidité (diamètre d'étalement), dans le cas des faibles teneurs en gros granulats. Par contre, cet effet est très réduit si l'on travaille avec un volume de gros granulats.

Cette amélioration est due vraisemblablement à l'augmentation du volume de la pâte de ciment; pour la série C la matière cimentaire a augmenté de 13.14% et 18.8% par rapport à celles des séries B et A respectivement.

La réduction de la teneur en gros granulats et du rapport sable/pâte s'accompagne d'une augmentation du volume du mortier et de la pâte, et par conséquent la teneur en matière cimentaire.

Cette augmentation de la teneur en matière cimentaire conduit à l'élévation de la température du béton due à la chaleur d'hydratation, on a donc remplacé une partie de ciment par un ajout minéral (fumée de silice) pour pallier l'inconvénient de présence d'une importante teneur en matière cimentaire dans le béton.

Ces résultats semblent être comparables avec ceux trouvés par K.H.KHAYAT [3], qui a montré que l'augmentation du volume de mortier, contribue significativement à l'amélioration de la maniabilité et que l'effet de la variation du rapport volumique sable/pâte de 0.8 à 0.67 semble être plus efficace pour l'amélioration de la fluidité dans le cas des faibles teneur en gros granulats, par contre cet effet est très réduit si l'on travaille avec une teneur en gros granulats élevée.

4.2.5. EFFET DE LA VARIATION DU RAPPORT SABLE/PÂTE SUR LA STABILITÉ DES BAP :

Afin d'étudier l'effet de la variation du rapport sable/pâte sur la résistance à la ségrégation des bétons autoplaçants, nous avons effectués l'essai de stabilité au tamis [7], sur les trois bétons de la première combinaison (67% de 3/8 et 33% de 8/16) avec un rapport sable/pâte de (0.67 ; 0.75 ; 0.8).

Les résultats de cet essai sont regroupés dans le tableau suivant :

	Taux de ségrégation (%)	Critère d'acceptabilité
BAP avec S/P=0.67	2.41	Stabilité satisfaisante
BAP avec S/P=0.75	7.73	Stabilité satisfaisante
BAP avec S/P=0.8	23.17	Stabilité critique

Tableau 4.8 : Effet de la variation du rapport sable/pâte sur la résistance à la ségrégation.

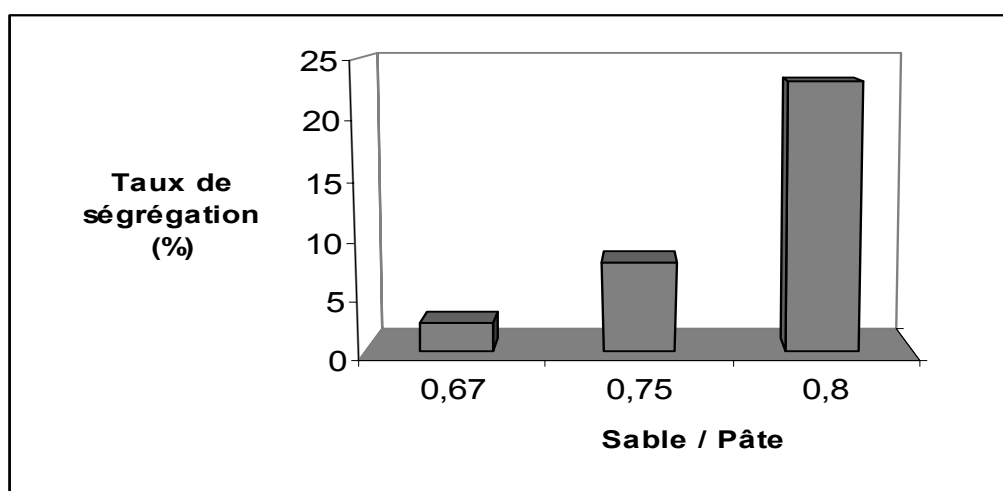


Figure 4.5 : Effet de la variation du rapport sable/pâte sur la résistance à la ségrégation.

▪ **Interprétation et discussion :**

On constate d'après la figure 4.5, que le BAP avec un rapport sable/pâte de 0.67 a favorisé la meilleure stabilité et résistance à la ségrégation (2.41%) par rapport à celles des deux autres BAP, et que le BAP avec un rapport S/P = 0.8 a développé une stabilité critique dont le taux de ségrégation a dépassé 15%. Cette ségrégation est due principalement à la diminution du volume de pâte par rapport à celui du sable.

On remarque que la stabilité de la pâte fraîche contenant des fumées de silices est accrue considérablement et que le ressuage est réduit d'une façon importante.

L'homogénéité et la stabilité d'un béton fluide sont assurées par la pâte de ciment et on peut dire que l'introduction de 10% de fumée de silice donne un béton stable et homogène.

4.2.6. EFFET DE LA VARIATION DU RAPPORT E/L SUR LA MANIABILITÉ DES BAP :

Pour étudier l'effet de la variation du rapport E/L sur la maniabilité et la résistance à la ségrégation du béton, nous avons choisit la première combinaison de la série B (67% de 3/8 et 33% de 8/16)

	BAP 1	BAP 2	BAP 3
Sable 0/3	794	794	794
Gravillon 3/8	483	483	483
Gravier 8/16	242	242	242
Ciment	500	500	500
Eau	210	189	168
E/L	0.4	0.36	0.32
Superplastifiant	15	15	15
Fumée de silice	25	25	25
Étalement (mm)	735	685	590
Taux se ségrégation (%)	7.41	4.35	0.5
f_{c7} (MPa)	36	40.7	42.5

Tableau 4.9 : Effet de la variation de la teneur en eau sur la maniabilité et la résistance à la compression

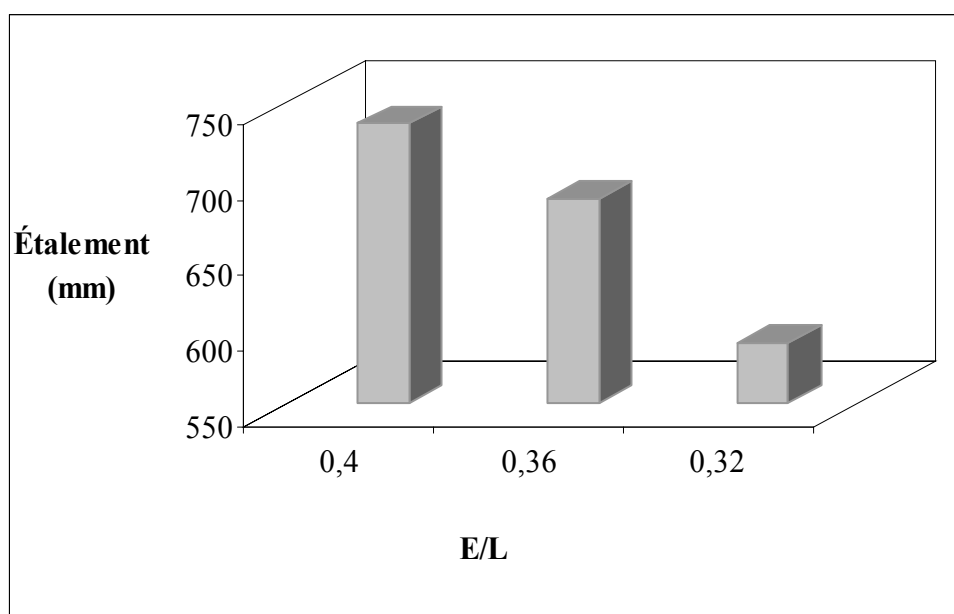


Figure 4.6 : Effet de la variation du rapport E/L sur le diamètre d'étalement

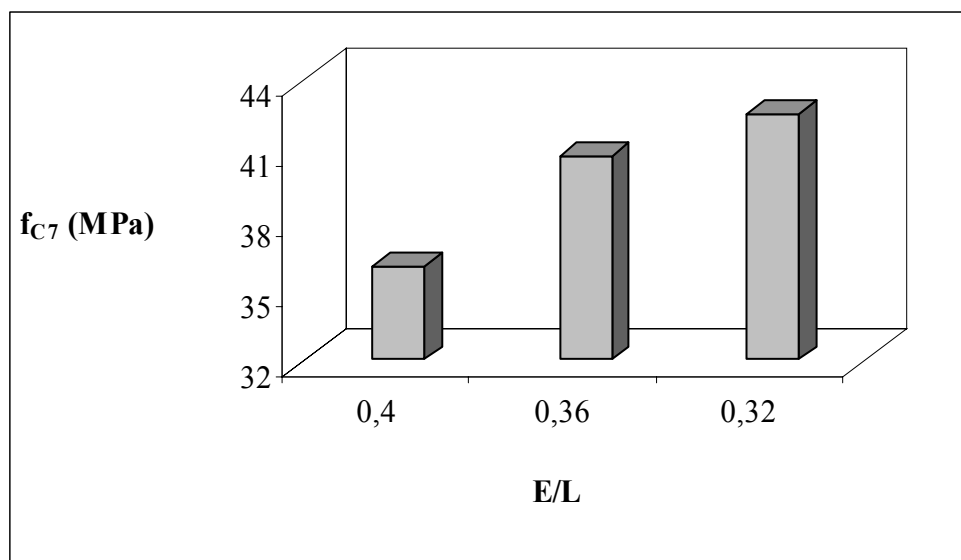


Figure 4.7 : Effet de la variation du rapport E/L sur la résistance à la compression au 7^{ème} jours d'âge

▪ **Interprétation et discussion :**

D'après le tableau 4.9 et les figures 4.6 et 4.7, on constate que la diminution du rapport E/L a influé directement sur les caractéristiques d'un BAP que ce soit à l'état frais ou à l'état durci.

À l'état frais, on observe pour un BAP de rapport E/L = 0.32, une diminution de diamètre d'étalement de 7.29% et 24.58% par rapport à ceux des BAP de E/L = 0.36 et 0.40 respectivement. Cette diminution est interprétée par la réduction de la quantité d'eau de gâchage incorporée lors du malaxage. Cette diminution a influé positivement sur la stabilité et la résistance à la ségrégation d'un BAP, dont le taux de ségrégation d'un BAP de rapport E/L = 0.32 est négligeable.

À l'état durci, la diminution du rapport E/L influe significativement sur la résistance à la compression, on constate pour un BAP de rapport E/L = 0.32 un gain de résistance à la compression de 4.42% et 18.06% par rapport à celles des BAP de rapport E/L de 0.36 et 0.40 respectivement.

Cette amélioration est due principalement à la diminution de la quantité d'eau de 11.11% et 20% par rapport à celles employée dans les BAP de rapport E/L de 0.36 et 0.40 respectivement.

Lors de l'hydratation du ciment, on constate un dégagement de chaleur, et par conséquent évaporation d'eau, ce qui provoque une diminution de compacité et de résistance à la compression.

Une partie d'eau introduite dans un béton sert à combler les vides entre les grains du squelette granulaire et du liant, seule la partie restante est susceptible de donner au béton sa maniabilité. Ainsi, l'augmentation de la compacité du squelette granulaire conduit à mettre moins d'eau pour une ouvrabilité donnée du béton ou à améliorer l'ouvrabilité pour une teneur en eau donnée.

On sait que la quantité d'eau qui correspond un rapport $E/C = 0.35$, représente à peu près la quantité d'eau nécessaire pour hydrater l'ensemble des grains de ciment, ce qui signifie qu'une quantité importante de ciment reste anhydre dans un BAP HP même à long terme.

On peut dire que le ciment joue un rôle granulaire comme granulats inerte ultrafin en plus de sa fonction liante.

4.2.7. EFFET DE LA VARIATION DE LA TENEUR EN SUPERPLASTIFIANT LA MANIABILITÉ DES BAP :

Pour étudier l'effet de la variation du dosage en superplastifiant dans les bétons autoplaçants, nous avons choisit la combinaison précédente avec un rapport E/L=0.36, (67 % de 3/8 et 33 % de 8/16).

Constituant (kg/m ³)	BAP 1	BAP 2	BAP 3
Sable 0/3	794	794	794
Gravillon 3/8	483	483	483
Gravier 8/16	242	242	242
Ciment	500	500	500
Eau	189	189	189
E/L	0.36	0.36	0.36
Superplastifiant	15 (3%)	10 (2%)	5 (1%)
Fumée de silice	25	25	25
Étalement (mm)	685	655	390
Taux de ségrégation (%)	4.35	3.22	0.1
f _{c7} (MPa)	40.7	43.5	40

Tableau 4.10 : Effet de la variation de la teneur en superplastifiant sur les caractéristiques du béton à l'état frais et la résistance à la compression.

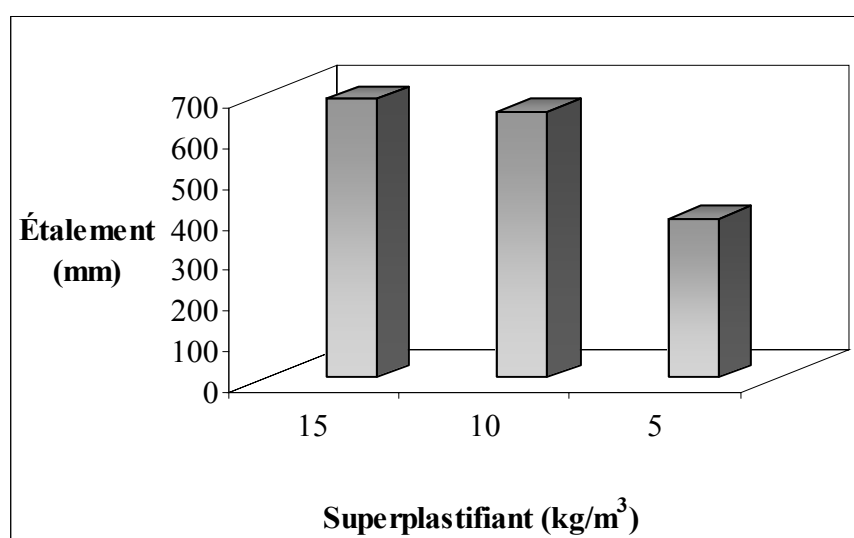


Figure 4.8 : Variation du diamètre d'étalement d'un BAP en fonction de la teneur en superplastifiant

• **Interprétation et discussion :**

La figure 4.8 montre que le diamètre d'étalement augmente avec l'augmentation de la teneur en superplastifiant.

On constate que pour un BAP avec un dosage en superplastifiant de 3% du poids de ciment, une amélioration du diamètre d'étalement de 75.64% et 4.58% par rapport à ceux des BAP avec un dosage en superplastifiant de 1% et 2% du poids de ciment respectivement.

À cet effet on constate que pour une teneur en superplastifiant de l'ordre de 1% du poids du ciment avec un rapport E/C de 0.36, la confection d'un BAP est quasiment impossible.

4.2.8. EFFET DE LA VARIATION DE LA TENEUR EN AGENT COLLOÏDAL SUR LA MANIABILITÉ ET LA STABILITÉ DES BAP :

Pour étudier l'effet de la variation de la teneur en agent colloïdal sur les propriétés des BAP à l'état frais (étalement au cône d'Abrams et résistance à la ségrégation), nous avons confectionné cinq bétons avec la formulation BAP 2; du tableau 4.10, tout en faisant varier la teneur en agent colloïdal de type polysaccharide.

Caractéristiques à l'état frais	Teneur en agent colloïdal (%) / eau				
	0	0.02	0.03	0.04	0.05
Étalement (mm)	680	655	645	630	580
Valeur T_{50} (s)	4	5.1	5.6	6	6.5
Taux de ségrégation (%)	1.15	0.9	0.72	0.56	0.02

Tableau 4.11 : Effet de la variation de la teneur en agent colloïdal sur les caractéristiques des BAP à l'état frais

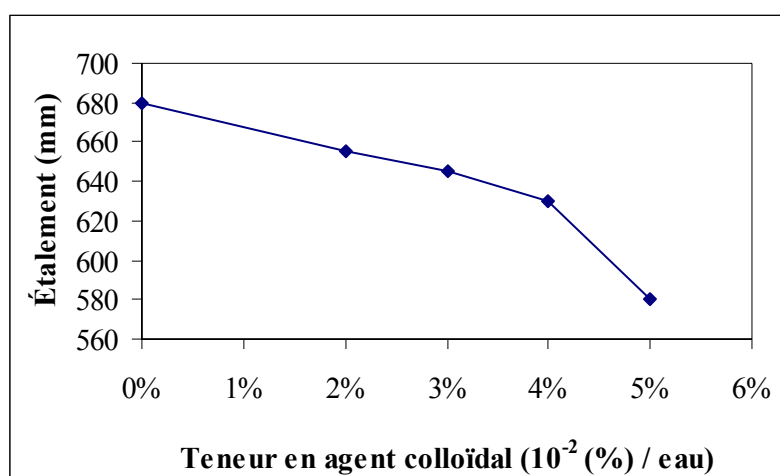


Figure 4.9 : Effet de la variation de l'agent colloïdale sur le diamètre d'étalement d'un BAP

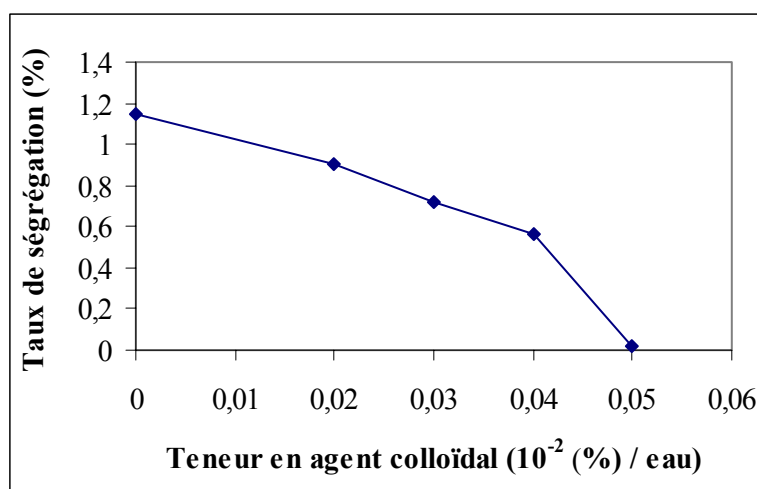


Figure 4.10 : Effet de la variation de la teneur en agent colloïdal sur la résistance à la ségrégation

• **Interprétation et discussion :**

D'après le tableau 4.11 et la figure 4.10, on constate que le diamètre d'étalement d'un BAP diminue avec l'augmentation de la teneur en agent colloïdal. Cette augmentation a influé positivement sur la stabilité de ce BAP, car on a remarqué une diminution du taux de ségrégation mesuré à l'aide de l'essai « stabilité au tamis ».

On a constaté que pour un BAP avec une teneur en agent colloïdal de 0.05% une diminution de diamètre d'étalement de 14.71% et une diminution de taux de ségrégation de 98.2% par rapport à ceux d'un BAP sans agent colloïdal.

L'ajout d'un superplastifiant dans un béton augmente son ouvrabilité mais réduit sa viscosité. De ce fait, le matériau devient moins stable du point de vue de la ségrégation et du ressuage.

Pour minimiser cet effet, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Si la formule ne contient pas d'agent de viscosité, il est nécessaire d'avoir une plus grande quantité de liant pour assurer un écoulement sans ségrégation.

L'utilisation d'un agent colloïdal, permet d'obtenir un béton plus visqueux et plus stable. Une meilleure cohésion de la pâte permet de maintenir une distance entre les granulats, ce qui réduit leurs interactions de friction et de collision lors de l'écoulement du matériau et évite le phénomène de blocage au droit d'un obstacle. Elle permet de conserver une répartition homogène des différents constituants. L'action de l'agent de viscosité étant d'une certaine façon opposée à celle du superplastifiant, l'optimisation de la fluidité et de la résistance à la ségrégation d'un BAP requiert la sélection d'un couple compatible de superplastifiant et agent de viscosité et l'ajustement de leur dosage.

4.3. FORMULATIONS SELECTIONNÉES:

4.3.1. INTRODUCTION :

À partir des analyses précédentes nous avons sélectionné trois formulations, que nous avons noté BAP 1, BAP 2 et BAP 3 avec la même combinaison granulaire de 67% de gravier de la fraction 3/8 et 33% de gravier de la fraction 8/16 avec un dosage en ciment de l'ordre de 500 kg/m^3 , ainsi qu'un rapport G/S = 0.9.

Dans ce que suit nous allons déterminer les propriétés principales de ces BAP à savoir :

- Les masses volumiques apparentes ;
- Le diamètre d'étalement ;
- Le temps d'écoulement T_{50} ;
- Le taux de ségrégation ;
- Les résistances à la compression ;
- Les résistances à la traction.

En minimisant le rapport E/L à 0,32, nous allons tenter d'arriver à un BAP à hautes performances que nous le noterons BAPHP.

4.3.2. CARACTÉRISTIQUES DU BÉTON AUTOPLAÇANT :

4.3.2.1. Première catégorie de BAP (BAP 1) :

Nous avons confectionné un béton autoplaçant de rapport E/C = 0.41, sans l'utilisation de fumée de silice, mais adjuvanté d'un superplastifiant de type MEDAPLAST AN 0.01 dosé à 1.5% du poids de ciment.

	Sable 0/3	Gravillon 3/8	Gravier 8/16	Ciment	Eau	Adjuvant	E/C
Masse (kg/m^3)	794	483	242	500	200	7.5	0.41

Tableau 4.12 : Composition massique d'un béton autoplaçant de la 1^{ère} catégorie (BAP 1)

- *À l'état frais :*

Caractéristiques rhéologiques	Résultats
Masse volumique apparente (t/m ³)	2.315
Étalement (mm)	685
Valeur T ₅₀ (s)	3
Taux de ségrégation (%)	1.35

Tableau 4.13 : Caractéristiques à l'état frais du BAP 1

- *À l'état durci :*

Âge (jours)	Masse volumique apparente (t/m ³)	Résistance en compression (MPa)	Résistance en traction (MPa)
3	2.305	28.3	3.08
7	2.320	35.75	3.61
14	2.341	43	4.1
28	2.356	45	4.72
91	2.371	49.5	4.98

Tableau 4.14 : Caractéristiques à l'état durci du BAP 1

4.3.2.2. Deuxième catégorie de BAP (BAP 2) :

Nous avons formulé un béton autoplaçant avec une teneur en fumée de silice de l'ordre de 5%, adjuvanté d'un superplastifiant de type MEDAPLAST SP40 dosé à 2% du poids de ciment avec un rapport E/L = 0.36.

	Sable 0/3	Gravillon 3/8	Gravier 8/16	Ciment	Eau	Fumée de silice	Adjuvant	E/L
Masse (kg/m ³)	794	483	242	500	189	25	10	0.36

Tableau 4.15 : Composition massique d'un béton autoplaçant de la 2^{ème} catégorie (BAP 2)

- *À l'état frais :*

Caractéristiques rhéologiques	Résultats
Masse volumique apparente (t/m ³)	2.330
Étalement (mm)	680
Valeur T ₅₀ (s)	5
Taux de ségrégation (%)	1.15

Tableau 4.16 : Caractéristiques à l'état frais du BAP 2

- *À l'état durci :*

Âge (jours)	Masse volumique apparente (t/m ³)	Résistance en compression (MPa)	Résistance en traction (MPa)
3	2.311	32.8	3.43
7	2.367	39.25	4.97
14	2.396	48.5	5.1
28	2.41	56.25	5.4
91	2.422	60.3	5.61

Tableau 4.17 : Caractéristiques à l'état durci du BAP 2

4.3.2.3. Troisième catégorie de BAP (BAPHP) :

Nous avons formulé un béton autoplaçant, à base de fumée de silice dosé à 10% du poids de ciment, adjuvanté d'un superplastifiant de type MEDAPLAST SP40 dosé à 2.5% du poids de ciment avec un rapport E/L = 0.32.

	Sable 0/3	Gravillon 3/8	Gravier 8/16	Ciment	Eau	Fumée de silice	Adjuvant	E/L
Masse (kg/m ³)	794	483	242	500	176	50	12.5	0.32

Tableau 4.18 : Composition massique d'un béton autoplaçant de la 3^{ème} catégorie (BAP HP)

- *À l'état frais :*

Caractéristiques rhéologiques	Résultats
Masse volumique apparente (t/m ³)	2.407
Étalement (mm)	560
Valeur T ₅₀ (s)	6.5
Taux de ségrégation (%)	0.25

Tableau 4.19 : Caractéristiques à l'état frais du BAP HP

- *À l'état durci :*

Âge (jours)	Masse volumique apparente (t/m ³)	Résistance en compression (MPa)	Résistance en traction (MPa)
3	2.419	35	4.72
7	2.342	52	5.22.
14	2.435	60	6.1
28	2.456	63.5	6.47
91	2.47	66	6.65

Tableau 4.20 : Caractéristiques à l'état durci du BAP HP

4.3.3. CARACTÉRISTIQUES DU BÉTON ORDINAIRE :

	Sable 0/3	Gravillon 3/8	Gravier 8/16	Ciment	Eau	E/C
Masse (kg/m ³)	630	261	851	400	200	0.5

Tableau 4.21 : Composition massique du béton ordinaire

- *À l'état frais :*

Caractéristiques rhéologiques	Résultats
Masse volumique apparente (t/m ³)	2.321
Affaissement (mm)	80

Tableau 4.22 : Caractéristiques à l'état frais du BO

• *À l'état durci :*

Âge (jours)	Masse volumique apparente (t/m ³)	Résistance en compression (MPa)	Résistance en traction (MPa)
3	2.319	14.3	2.11
7	2.338	18.25	2.42
14	2.351	24.75	2.86
28	2.379	36.50	3.171
91	2.382	40.2	3.43

Tableau 4.23 : Caractéristiques à l'état durci du BO

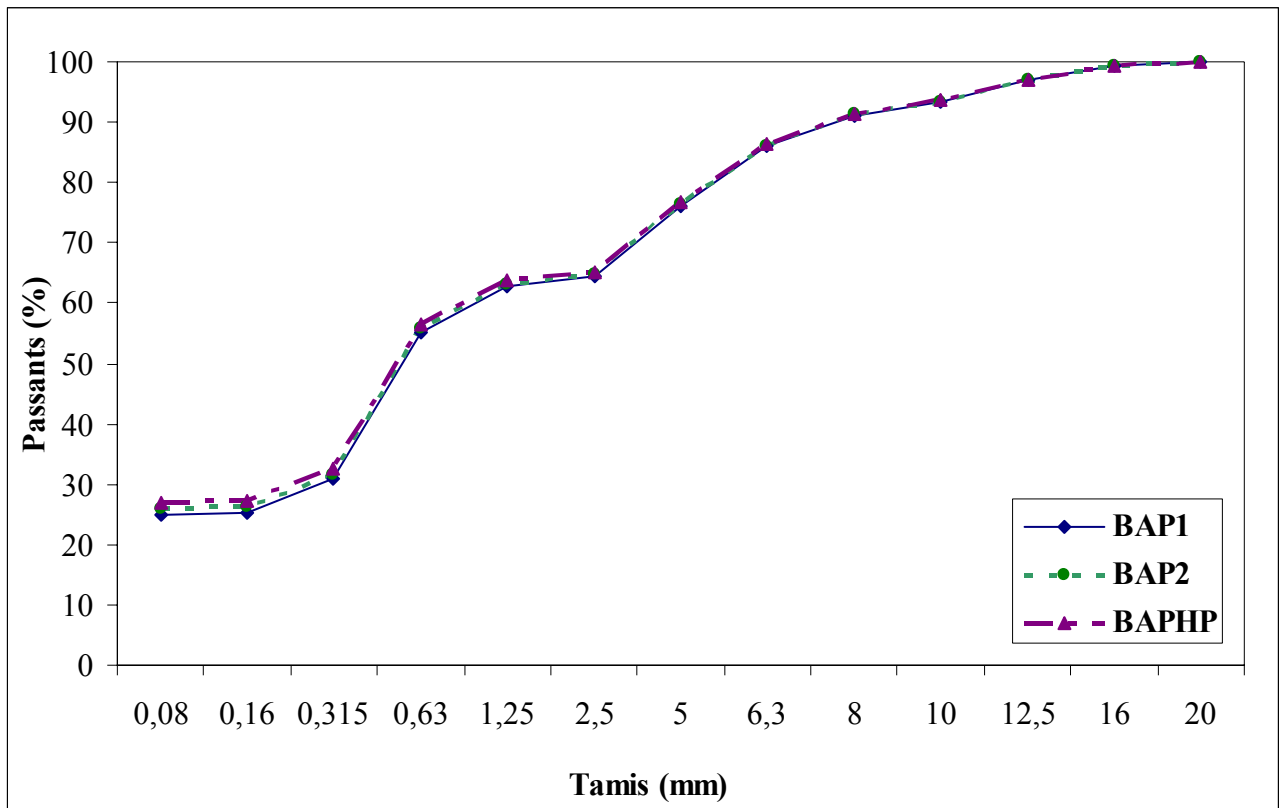


Figure 4.11 : Courbe granulométrique des BAP confectionnés

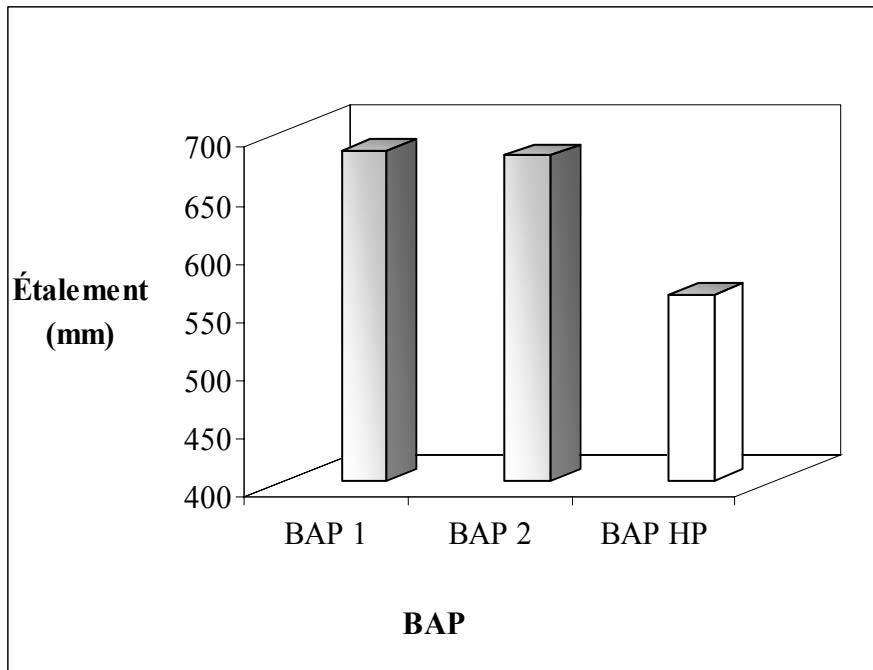


Figure 4.12 : Comparaison entre les valeurs d'étalement des trois formulations de BAP

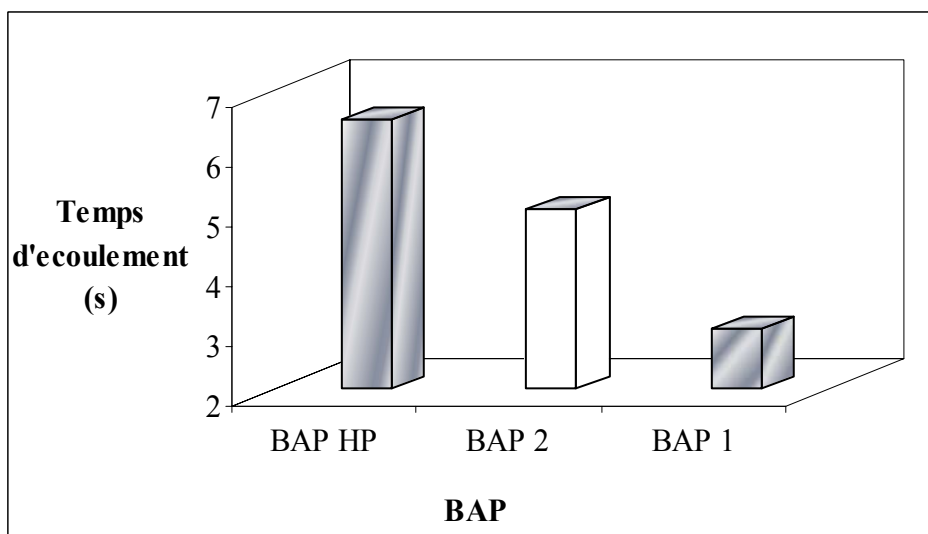


Figure 4.13 : Comparaison entre les valeurs du temps d'écoulement des trois formulations de BAP

▪ **Interprétation et discussion :**

Les mesures des masses volumiques obtenues montrent que la masse volumique d'un BAP HP est supérieure de 3.30% et 3.97% par rapport à celles du BAP 2 et BAP 1

respectivement. Ceci est dû principalement à la réduction du rapport E/L d'une part et l'utilisation des ultrafines, d'autre part.

D'après la figure 4.11 on remarque que les courbes de références des BAP formulés présentent une continuité acceptable du squelette granulaire.

Les résultats des résistances mécaniques de BAP3 (Tableau 4 .23), indiquent une résistance à la compression de 63,5MPa et une résistance à la traction de 6,47 MPa après 28 jours d'âge, ce qui nous permet de qualifier ce BAP comme béton à hautes performances.

Dans ce qui suit nous allons noter BAPHP.

4.3.4. RÉSISTANCE EN COMPRESSION :

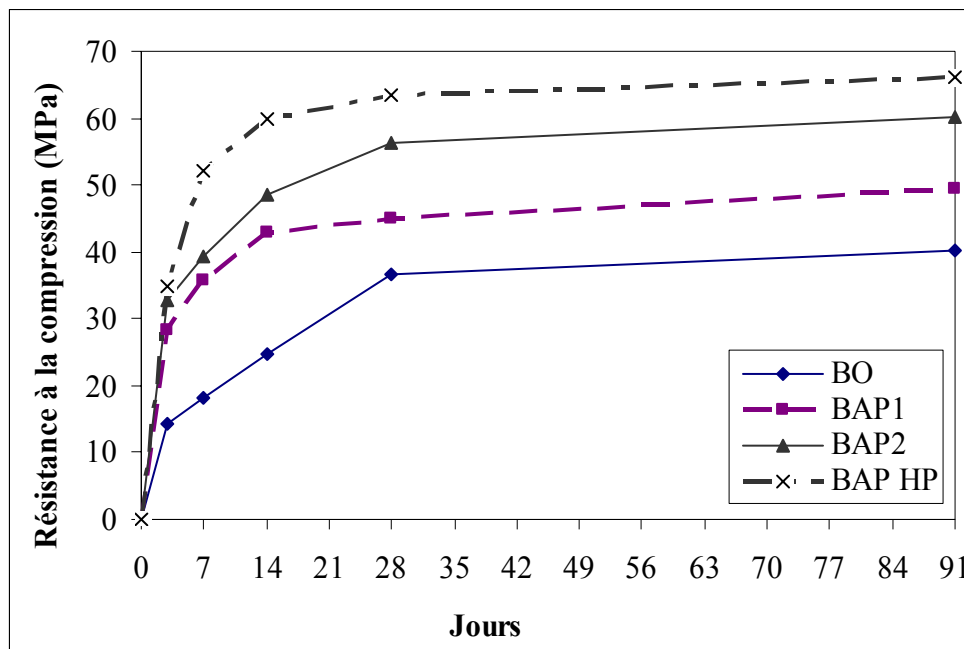


Figure 4.14 : Évolution de la résistance à la compression en fonction du temps

D'après la figure 4.14, on constate que l'évolution de la résistance à la compression du béton autoplaçant sans fumée de silice est plus rapide que celle du béton ordinaire, et que l'évolution de celle d'un BAP avec fumée de silice est plus rapide que celle d'un BAP sans fumée de silice.

A jeune âge, on a remarqué que la résistance à la compression d'un BAP HP après 3 jours ($f_{c3} = 35$ MPa) représente 87.06% de celle du béton ordinaire et 70.7% de celle du BAP sans fumée de silice, et 58.04% de celle d'un BAP avec 5% de fumée de silice âgés de 91 jours.

Après 7 jours, on remarqué une évolution de la résistance à la compression du BAP HP, car la résistance à 7 jours est de 78.49% par rapport à celle de l'âge de 91 jours.

Par contre, on a constaté une légère évolution de la résistance à la compression du béton ordinaire au même âge est de 45.4% de celle de l'âge de 91 jours. Ceci est dû principalement à l'utilisation conjointe de la fumée de silice et du superplastifiant.

Durant la deuxième semaine, on a remarqué une amélioration de la résistance à la compression, car on a trouvé que la résistance à la compression du BAP HP après 14 jours représente 90.56% de celle à l'âge de 91 jours.

Néanmoins ce résultat n'est pas étonnant si on prend en considération la contribution de la fumée de silice dans la cinétique de processus d'hydratation du ciment, grâce à sa réaction pouzzolanique avec la chaux dégagée par le clinker lors de l'hydratation du ciment. Cette réaction pouzzolanique permet de créer les silicates de calcium hydraté C-S-H d'une part et réduire la taille des pores capillaires d'autre part.

À partir de la troisième semaine, on a remarqué une très légère évolution de la résistance à la compression jusqu'à 91 jours, car on a constaté après 91 jours une augmentation de l'ordre de 4.33% et 10.42% par rapport à celles de 28 et 14 jours d'âge respectivement.

On a remarqué aussi que la prise d'un BAP HP est légèrement retardée par rapport aux bétons ordinaires, par contre le durcissement est très rapide.

Durant son mûrissement, le BAP HP doit faire l'objet d'une cure soignée. En effet l'absence de ressuage qui constitue normalement un apport d'eau à la surface libre du béton rend cette dernière sensible à l'évaporation d'eau et la fissuration de peau par retrait plastique.

4.3.5. RÉSISTANCE À LA TRACTION PAR FENDAGE :

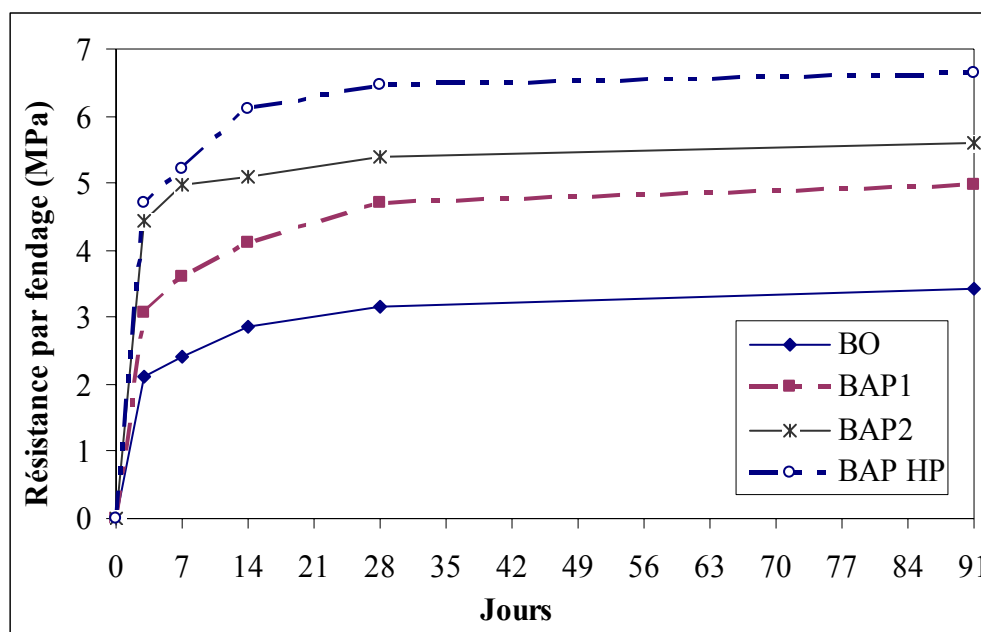


Figure 4.15 : Évolution de la résistance à la traction par fendage en fonction du temps

D'après la figure 4.15, on a constaté que l'évolution de la résistance à la traction d'un BAP HP est plus rapide que celle d'un béton ordinaire ou du BAP sans fumée de silice ou du BAP avec 5% de fumée de silice, car on a trouvé que la résistance à la traction d'un BAP HP après 3 jours (4.72 MPa) représente 70.98% de celle à l'âge de 91 jours. Tandis que, la résistance à la traction d'un béton ordinaire représente 61.51% de celle à l'âge de 91 jours. D'ailleurs on a remarqué une bonne amélioration de la résistance à la traction après 91 jours d'un BAP HP de 18.54%, 33.53% et 93.88% de celles du BAP 1, BAP 2 et le béton ordinaire en même âge, et que l'amélioration de la résistance à la traction d'un BAP HP après 3 jours d'âge est de 37.6% de celle d'un béton ordinaire âgé de 91 jours.

Ces bons résultats sont principalement obtenus grâce à l'homogénéité et la bonne répartition entre les granulats de la pâte liante.

Cette homogénéité est assurée par la présence du superplastifiant qui disperse l'empilement des grains de ciment et les particules de fumée de silice. Ceci nous permet de créer une liaison intime entre la pâte liante et les granulats, ce qui donne un béton avec des bonnes caractéristiques rhéologiques à l'état frais et des caractéristiques mécaniques à l'état durci améliorées.

4.4. POROSITÉ TOTALE ET ABSORPTION CAPILLAIRE :

	Béton ordinaire		BAP HP	
Âge (jours)	3	28	3	28
Porosité totale (%)	/	6.35	/	5.36
Absorption capillaire (%)	1.2	/	1.02	/

Tableau 4.24 : Comparaison des valeurs d'absorption capillaire et de porosité totale d'un BAP HP avec celles d'un BO

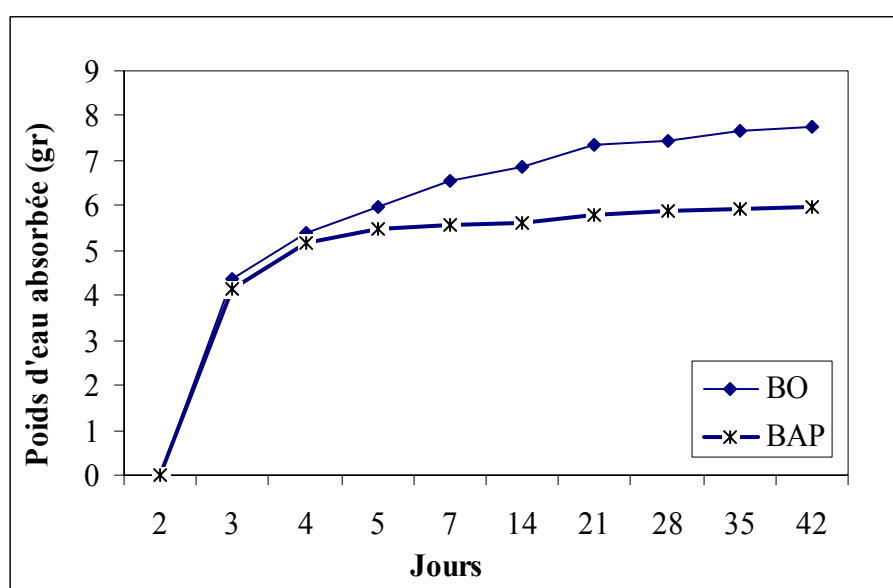


Figure 4.16 : Évolution du poids d'eau absorbée en fonction du temps

D'après le tableau 4.24 on remarque une diminution des valeurs de la porosité totale et d'absorption capillaire d'un BAP HP de 15.6% et 15% de celles du béton Ordinaire.

Ceci due principalement à la densification du BAP HP grâce à l'utilisation de la fumée de silice d'une part, et la réduction de la quantité d'eau de gâchage d'autre part.

La figure 4.23 montre que le poids d'eau absorbée évolue très rapidement à jeune âge puis il commence à se stabiliser

On constate qu'à partir du quatrième jour d'âge le poids d'eau absorbé d'un BAP HP évolue très légèrement, par rapport à l'évolution de celui d'un béton ordinaire, et que la diminution de la porosité d'un BAP HP est de l'ordre de 23.05% par rapport à celle d'un béton ordinaire.

Ceci est interprété par la réduction de la quantité d'eau de gâchage d'une part, et la densification du BAP HP grâce à l'utilisation de la fumée de silice qui a contribué et avec les grains de ciment anhydres à l'élimination des pores capillaires ou la diminution de leurs tailles, sans oublier le rôle pouzzolanique qui joue la fumée de silice dans la création des C-S-H. Cet effet est remarquable à partir de la fin de la première semaine d'âge, car on a constaté qu'à partir de cet âge le poids d'eau absorbé a commencé à se stabiliser.

4.5. AUSCULTATION DYNAMIQUE :

Pour la détermination du module d'élasticité dynamique, nous avons pris le coefficient de poisson égal à 0.2 pour le BAP HP et 0.22 pour le béton ordinaire.

	Type de béton	
	BO	BAP HP
Vitesse par auscultation dynamique (m/s)	4322	4463
Module d'élasticité (GPa)	40.77	44.88

Tableau 4.25 : Module d'élasticité dynamique par l'ultrason

- **Interprétation et discussion :**

D'après le tableau 4.25 on constate une augmentation de la vitesse de propagation du son dans un BAP HP de 3.26% par rapport à celle du béton ordinaire (BO) et par conséquent, une amélioration de 10.08% du module d'élasticité dynamique d'un BAP HP par rapport à celui d'un béton ordinaire.

Ceci est dû principalement à la différence de compacité qui existe entre les deux bétons, car les bétons autoplaçants à base de fumée de silice ont une très grande densité, c'est ce qui confirme les résultats obtenus par l'essai de porosité totale.

La bonne compacité des BAP HP est assurée essentiellement par la forte réduction de la quantité d'eau de gâchage et l'utilisation conjointe de la fumée de silice et du superplastifiant, ce qui permet de disperser les grains de ciment et les particules de fumée de silice, ces dernières permettent de remplir les micro pores capillaires qui existent dans un empilement de grains de ciment d'une part, et jouent un rôle pouzzolanique très important pendant le processus de durcissement du béton d'autre part.

4.6. RETRAIT :

Nous présentons ci-après, les résultats de l'étude comparative entre le comportement du béton autoplaçant à haute performance et celui d'un béton ordinaire vis-à-vis du retrait endogène, de séchage et total durant six mois.

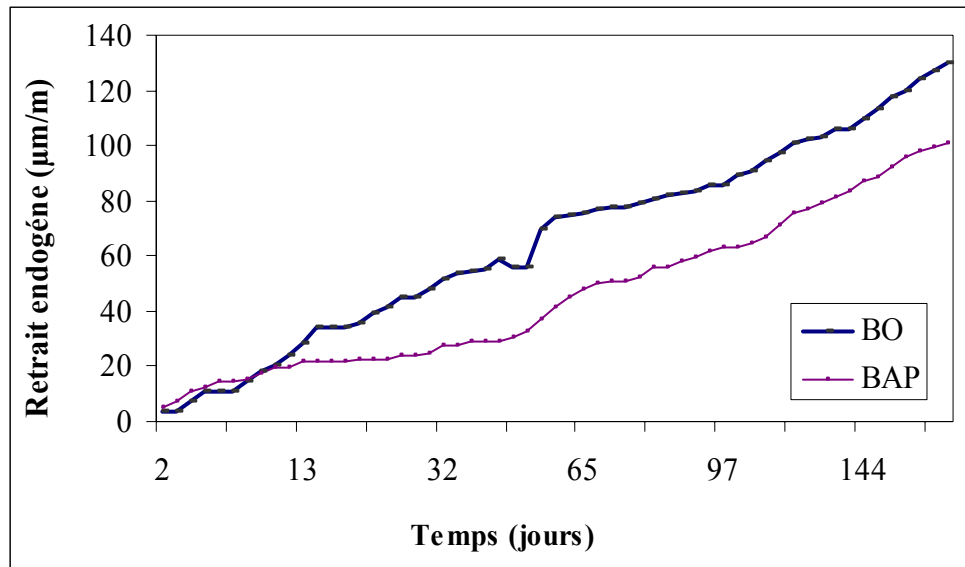


Figure 4.17 : Évolution du retrait endogène du béton ordinaire et celui du BAP HP

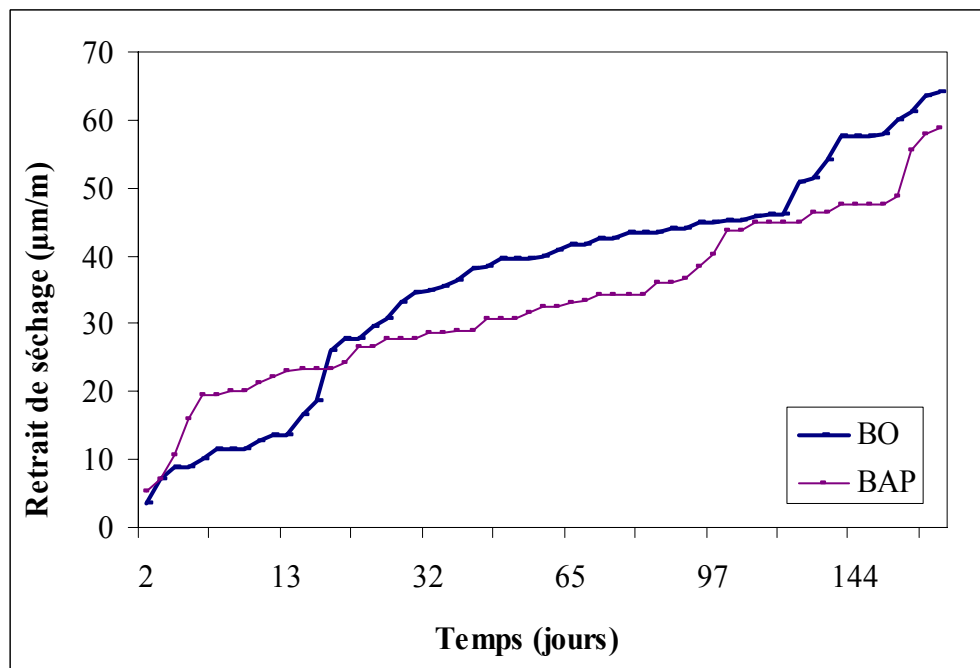


Figure 4.18 : Évolution du retrait de séchage du béton ordinaire et celui du BAP HP

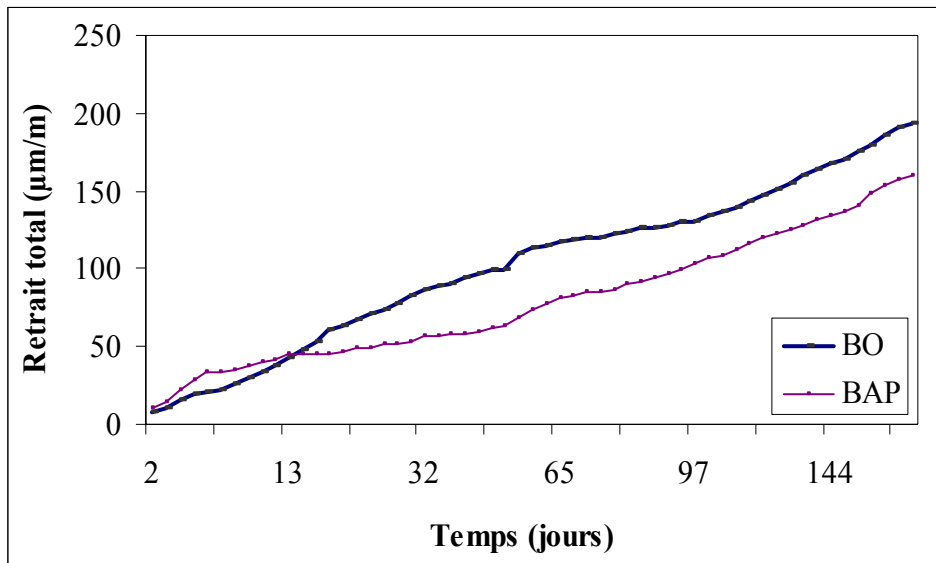


Figure 4.19 : Évolution du retrait total du béton ordinaire et celui du BAP HP

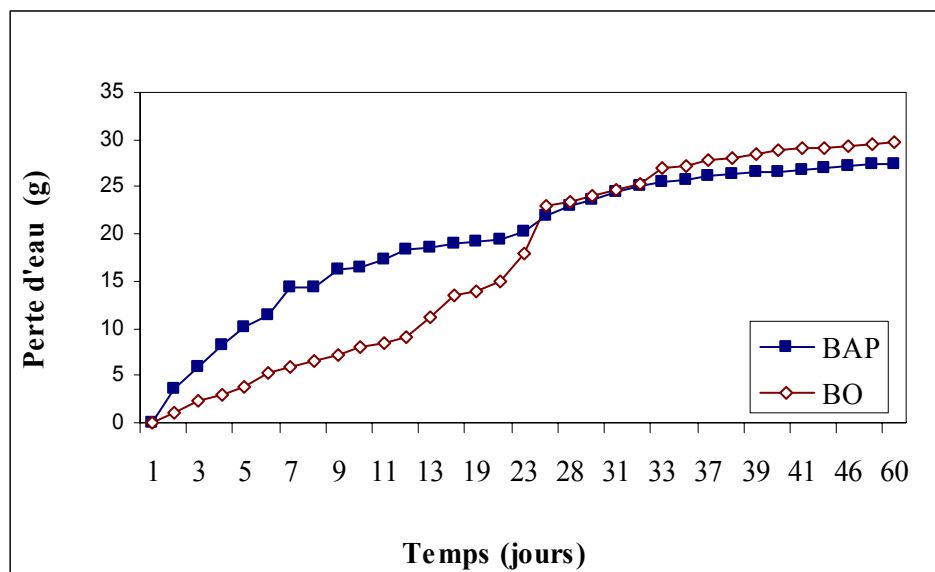


Figure 4.20 : Évolution de la perte d'eau du béton ordinaire et celui du BAP HP

D'après la figure 4.17, on constate que le retrait endogène d'un BAP HP se développe plus rapidement que celui d'un béton ordinaire, car on a remarqué une augmentation de 33.43% par rapport à celui d'un béton ordinaire après 7 jours d'âge.

Cette augmentation est interprétée par l'importance du volume de la pâte liante du BAP HP par rapport à celle d'un béton ordinaire (476 l à 333 l) qui rentre directement dans le processus d'hydratation d'une part, et par le durcissement rapide du BAP HP d'autre part.

La figure 4.18 montre que le retrait de séchage d'un BAP HP est un peu plus faible que celui d'un béton ordinaire, cette légère différence est due principalement à la réduction du rapport E/L de 0.5 à 0.32.

On constate que le retrait de séchage d'un béton ordinaire à 7 jours d'âge est plus important que celui du BAP HP, ceci est interprété par l'importance de la quantité d'eau qui s'évapore lors de l'hydratation de ciment pour un béton ordinaire qui contient une quantité d'eau plus importante par rapport à la teneur en matière cimentaire que celle d'un BAP HP.

Ce constat est confirmé par la figure 4.20, car on remarque une augmentation rapide du poids d'eau perdu d'un BAP HP durant les deux semaines premiers de l'ordre de 10.48% par rapport à celui d'un BO.

À partir du 18^{ème} jour, on constate une augmentation progressive du retrait endogène d'un béton ordinaire par rapport à ce d'un BAP HP (34.9% après 6 mois d'âge), ceci est le résultat d'un durcissement rapide du BAP HP grâce à la réduction de la teneur en eau (de 200 à 176 l/m³)

Néanmoins, le retrait total d'un BAP HP qui représente la somme des deux retraits est plus faible de 21.24% par rapport à ce d'un béton ordinaire (cf. figure 4.19).

Ces résultats sont qualifiés satisfaisantes d'après la norme.

4.7. ÉTUDE ÉCONOMIQUE :

Il est véritablement difficile d'établir une étude économique comparative entre les différents bétons autoplaçants et le béton ordinaire formulés avec les mêmes matériaux, car on doit prendre en compte non seulement la fourniture des produits utilisés dans la formulations de ces bétons, mais aussi les procédés et les conditions de la mise en place de ces produits ainsi que l'influence de ces conditions sur la santé et le rendement des travailleurs d'une part, et le coût de la main d'œuvre et l'énergie fournie d'autre part.

Les coûts unitaires pris en compte sont les suivants :

- ✓ Granulats et transport 1000 DA/m³ ;
- ✓ Ciment CPA 42.5 R 5600 DA/tonne ;
- ✓ Superplastifiant haut réducteur d'eau 75 DA/kg ;
- ✓ Fumée de silice 82 DA/kg ;
- ✓ Contrôle et qualité 300 DA/m³.

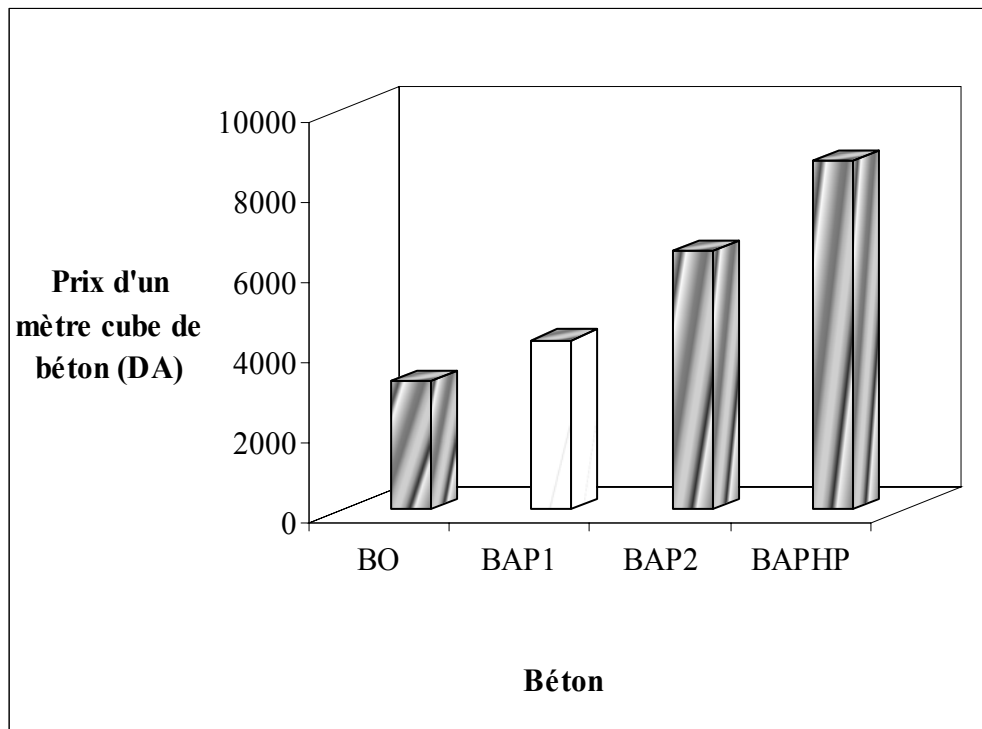


Figure 4.21 : Comparaison entre les prix de revient d'un mètre cube de chaque béton avec les hypothèses des prix unitaires

D'après la figure 4.21, on constate que le coût d'un mètre cube de béton autoplaçant varie entre, 4246.9 et 8721.9 DA selon les caractéristiques mécaniques désirées.

Le prix de revient d'un béton autoplaçant développant une résistance à la compression de l'ordre de 45 MPa à 28 jours d'âge, est 32.16% plus coûteux qu'un béton ordinaire développant une résistance à la compression de 36.5 MPa à 28 jours d'âge.

Dans la réalité, le prix de revient d'un mètre cube de béton autoplaçant est excessivement moins coûteux que celui du béton ordinaire si on prend en considération le coût de la mise en place du béton et la qualité du produit à l'état durci. Parmi les avantages qui remplacent la différences des prix d'un 1 m³ de BAP par rapport à celui d'un béton ordinaire on cite les suivants :

- ✧ Élimination de la nuisance sonore due à la vibration du béton ;
- ✧ Élimination des frais dus à l'énergie fournie lors de la vibration du béton ;
- ✧ Augmentation de la cadence de travail due à la faciliter de la mise en place du béton ;
- ✧ Obtention d'un béton de qualité avec un aspect final agréable.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les résultats expérimentaux montrent qu'il est tout à fait possible de fabriquer un béton autoplaçant présentant les meilleures caractéristiques rhéologiques et mécaniques dans les conditions Algériennes.

Nous avons commencé par l'optimisation de la pâte liante et la teneur en gros granulats, sable, et liant, en fixant le rapport E/L et la teneur en ajout chimique.

Nous avons par la suite étudié l'influence de la teneur en superplastifiant, en agent colloïdal et en ajout minéral sur la maniabilité, et la stabilité des bétons frais. Les mélanges optimisés, ayant développé les meilleures performances, ont été caractérisés pour certaines propriétés mécaniques (résistance à la compression, résistance à la traction), ensuite, nous avons étudié le comportement d'un béton autoplaçant à haute performance BAP HP vis-à-vis la résistance à la compression, la résistance à la traction, la porosité, l'absorption capillaire, l'auscultation dynamique, et le retrait, tout en comparant ce comportement à celui d'un béton ordinaire.

Les résultats permettent de mettre en évidence les bonnes performances développées avec les bétons autoplaçants.

- Le BAP est un béton très professionnel qui n'est pas facile à formuler. Il nécessite un contrôle rigoureux et important à la production comme lors de la mise en œuvre.
- À l'essai au cône d'Abrams, le BAP, du fait de sa fluidité s'étale et forme une galette dont on mesure le diamètre, qui dépasse souvent les 540 mm. La notion traditionnelle d'affaissement au cône d'Abrams n'a plus aucun sens avec ce genre de béton.
- L'obtention d'un béton autoplaçant à hautes performances, nécessite l'utilisation d'un superplastifiant haut réducteur d'eau, qui lui permettra de diminuer le rapport E/L au dessous de 0.33.
- La composition d'un béton autoplaçant nécessite un poids de particules fins d'environ 700 kg/m^3 , un rapport G/S variant entre 0.8 et 1.05, des granulats de diamètre maximal de 16 mm.
- Le diamètre d'étalement d'un BAP augmente lorsqu'on diminue le volume de gravier de la fraction 8/16.
- Le diamètre d'étalement d'un BAP augmente avec la diminution du rapport sable/pâte, car on constate une amélioration de diamètre d'étalement d'un BAP avec un rapport sable/pâte égal à 0.67 de 10.27% par rapport à un BAP avec un rapport sable/pâte de 0.8

- un rapport sable/pâte égal à 0.6 de 10.27% par rapport à un BAP avec un rapport sable/pâte de 0.8
- Les masses volumiques à l'état frais et durci du BAP HP est supérieures de 3.7% et 3.69% par rapport à celle du béton ordinaire après 91 jours d'âge, ceci est due à la réduction du rapport E/C ou E/L de (0.5 à 0.32).
- Le BAP HP a développé des résistances à la compression et la traction très élevées par rapport à celles d'un béton ordinaire.
- Une légère augmentation des résistances à la compression et à la traction du BAP HP à 91 jours 4.33% et 2.78% respectivement par rapport à celles de 28 jours d'âge.
- L'optimisation de la teneur en ajout chimique et minéral a montré que l'utilisation d'un superplastifiant est indispensable pour la réduction du rapport E/C ou E/L, ce qui permet d'améliorer les caractéristiques rhéologiques du béton à l'état frais telles que l'ouvrabilité et l'homogénéité, et les caractéristiques mécaniques à l'état durci telles que les résistances à la compression et la traction, retrait, porosité, absorption capillaire.
- L'introduction de la fumée de silice dans la composition d'un BAP permet d'améliorer la stabilité du béton à l'état frais (ressuage et taux de ségrégation très négligeables pour un béton autoplaçant avec un dosage de 10% de fumée de silice).
- L'essai de porosité totale a montré que le BAP HP a une amélioration de 15.59% par rapport au béton ordinaire.
- L'essai d'absorption capillaire montre que le BAP HP a une amélioration de 15 % par rapport au béton ordinaire.
- L'effet pouzzolanique de la fumée de silice ne débute qu'après la fin de la première semaine, car on a constaté que la résistance à la compression d'un BAP HP à 7 jours d'âge représente 81.9% de celle de 28 jours, contre seulement 55.12% à 3 jours d'âge.
- Les résultats obtenus à partir de l'essai non destructif (auscultation dynamique), confirment les résultats déjà obtenus à l'aide des essais destructifs.
- On a constaté un retrait d'autodessiccation plus important pour le BAP HP par rapport à celui d'un béton ordinaire, ceci est interprété aussi par l'importance de la cimentaire. Le retrait de séchage est faible par rapport à celui d'un béton ordinaire, ceci est dû vraisemblablement à la réduction du rapport E/L de 0.5 à 0.32.

RECOMMANDATIONS

Grâce à ce programme de recherche, nous avons démontré qu'il est possible de fabriquer des bétons autoplaçants ayant de bonnes caractéristiques rhéologiques et mécaniques, et afin de compléter cette recherche, nous suggérons les recommandations pratiques suivantes qui permettront d'ouvrir les portes sur une recherche plus approfondie concernant certains aspects techniques des bétons autoplaçants :

1. Utilisation d'un superplastifiant réducteur d'eau de haute qualité afin de diminuer le rapport E/L au dessous de 0.32.
2. L'introduction d'un agent colloïdal dans le cas d'un BAP très fluide (étalement supérieur à 800 mm) sans ajout minéral.
3. Confectionner des bétons autoplaçants selon les exigences techniques pour maîtriser le coût du produit.
4. L'utilisation d'un adjuvant retardateur de prise pour retarder l'ouvrabilité des BAP dans le cas d'un transport du béton ou bétonnage en temps chaud.
5. Étudier l'effet de la nature de ciment sur la maniabilité et le temps de prise des bétons autoplaçants.
6. Étudier l'effet de la nature d'agent colloïdal sur la stabilité et la maniabilité des bétons autoplaçants.
7. Développement des bétons autoplaçants à très hautes performances.
8. Développement des bétons autoplaçants avec fibre.

Le béton autoplaçant est une technique appelée à se développer sous réserve de prise en compte d'un certain nombre d'exigences :

- ✓ Une réorganisation des méthodes de chantiers (cadences, matériels).
- ✓ Une collaboration plus étroite des intervenants (entreprises, préfabricants, adjuvantières, béton prêt à l'emploi et cimentiers).
- ✓ Une maîtrise des coûts globaux (matériaux, mise en œuvre, productivité, maintenance,...)
- ✓ Amélioration de la qualité des coffrages.
- ✓ Industrialisation des procédés de fabrication des bétons autoplaçants.

Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons relativement récents, et leur application n'a pas encore été généralisée dans le monde de construction, sauf dans certains pays développés comme la France, le Canada et le Japon qui est considéré comme l'innovateur de ce nouveau matériau.

Les exigences auxquelles doit satisfaire un béton autoplaçant par rapport à un béton ordinaire sont sensiblement plus élevées pour ce qui concerne la qualité des composants du béton et du coffrage, la nature et la fréquence de contrôle du béton frais ainsi que la formation du personnel. Les différents facteurs sont:

- ✦ Lors du Design, il convient de veiller à avoir une teneur en liants suffisante, une composition équilibrée des granulats avec une teneur accrue en fines et à utiliser un superplastifiant approprié.
- ✦ Une substitution partielle du ciment par des cendres volantes ou des fumées de silice améliore le pouvoir de cohésion interne du mélange de béton frais, augmente sa résistance et sa durabilité.
- ✦ L'humidité de surface des granulats doit être déterminée régulièrement afin de pouvoir exclure toute influence négative sur le rapport E/C.
- ✦ On obtient un effet fluidifiant optimal du superplastifiant lorsque celui-ci n'est incorporé au mélange de béton qu'après y avoir ajouté la totalité de l'eau.
- ✦ Il convient de prendre des mesures spécifiques pour étancher le coffrage. Le respect des cotes du coffrage a également une grande importance.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] George Dreux, Jean FESTA, « *NOUVEAU GUIDE DU BETON* » 8^{ème} Édition ;
- [2] P. Claude AITCIN, « *Liant hydraulique, GCI 710* » Université de SHERBROOKE
Canada ;
- [3] K.H.KHAYAT, « *Colloques sur les bétons autonivelants* » Centre de Recherche
Interuniversitaire sur le béton (CRIB) Université de SHERBROOKE, Université
LAVAL Québec 1^{er} Novembre 1996 ;
- [4] OKAMURA. H. , OZAWA , K. (1994), “*Self compactable high performance concrete
in Japan*” ACI International Workshop on high Performance Concrete, Bangkok,
Thailand, d’après ;
- [5] HAYAKAWA , M., MATSUOKA, Y., YOKOTA, K. (1995).”*Application of super
workable concrete in the construction of 70_story building in Japan*” ACI SP 154,
Las Vegas, d’après ;
- [6] IZUMI, I., YONEZAWA, T ., IKEDA, Y., MUTA, A. (1995) “*Placing 10 000 m³
super workable concrete for guide track structure of retractable roof of Fukuoka Dome,
Supplementary*” Papers, 2nd CANMET \ ACI International Symposium on Advances In
Concrete Technology, Las Vegas, d’après;
- [7] GILLES Escadrilles, Responsable pédagogique, CARMEUSE France,
« *Formation continue actualisante* » – 17 et 18 Octobre 2001 ;
- [8] Projet national de recherche CERIB, « *béton autoplaçant BAP* », France,
Octobre 2001 ;
- [9] Pierre Claude AITCIN, « *La compatibilité ciment/superplastifiant* » ATILH.,
Paris, 8 Mars 1996 ;
- [10] OZAWA, K, MAEKAWA, K., OKAMURA, H. (1992, “*Development of high*

performance concrete” *Journal of the Faculty of Engineering*, Vol XLI, N°3,
University of Tokyo,

- [11] MANAI, K (1995), « *Étude de l’effet d’ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants* » Mémoire de Maîtrise, Université de Sherbrooke ;
- [12] YURUGI, M., SAKATA, M., IWAI, M., SAKAI, G. (1989) “*Mix proportion for highly workable concrete*” ;
- [13] OKAMURA, H ., OZAWA, K. (1994) “*Self compactable high performance concrete in Japan*” ACI International Workshop on High Performance Concrete, Bangkok, Thailand;
- [14] Dossier technique « Les bétons autoplaçants », Christophe CHUCHE, MBT France ;
- [15] KHAYAT, K. H. , GUIZANI, Z. (1994) “*Use of viscosity modifying admixtures to enhance stability of highly fluid concrete*” soumis à l’ACI Materials Journal;
- [16] MIURA, N., TAKEDA, N., CHIKAMATSU, R., SOGO, S (1994) “*Application of super workable concrete to reinforced concrete structure with difficult construction conditions*” ACI SP 140 ;
- [17] AWAD, K., AL YAFI, A. R. (1995) “*Self compacting and self levelling properties of high performance concrete with triple blended bindre in UAE*” Supplementary Papers, 2nd CANMET \ ACI International Symposium on Advances In Concrete Technology, Las Vegas ,d’après;
- [18] OZAWA, K., MAEKAWA, K ., OKAMURA, H. (1990) “*The high performance concrete with high filling capacity*” RILEM Symposium on Admixtures for Concrete;
- [19] FUKUTE, T., MORIWAKE, A., SANO, K., HAMASAKI, K. (1995) “*Development of super workable concrete for multi-functional port structures*” ACI SP 154, Las Vegas;
- [20] CEBTP, « *Bétons autoplaçants, rapport 98 004/98 006* » 1995, EYROLLES ;
- [21] ADAM M. NEVILLE, *Propriétés des bétons*, Édition Eyrolles 2000 ;

- [22] Fiche technique du *ciment CPA 42,5R*. ;
- [23] Dossier technique de *la société GRANITEX-NP*, BP 85, 16270 Oued Smar Alger.;
- [24] P.C.AITCIN « *Bétons haute performance* » Eyrolles, Janvier 2001 ;
- [25] Omar BOKASSANI, *Béton à haute performance avec fumée de silice*,
Thèse de magister, USTB – Blida ;
- [26] A.T-HAMOU, « *Microstructure et physico-chimie des ciments et des bétons* »
Université de SHERBROOKE, Québec, CANADA, Janvier 1995 ;
- [27] François de LARRARD, rapport de recherche LPC N 149, « *Formulation et propriétés des bétons à très hautes performance* » Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Mars 1998 ;
- [28] Kamel H. KHAYAT, « *Technologie avancée du béton* » GCI711 Université de Sherbrooke, octobre 1995 ;
- [29] R. DUPAIN, R. LANCHON, J.C.Saint, ARROMAN, « Granulats, sols, ciments bétons, *Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire* »
Édition CASTEILLA, PARIS, Mai 1995 :
- [30] Kedjour NASR-EDDINE « *propriétés et pathologie du béton* » Office des Publications Universitaires – Alger ;
- [31] Kamel H. KHAYAT, « *Optimisation des bétons autonivelants pour coffrage fortement armés* » Centre interuniversitaire sur le béton, Université de SHERBROOKE (Québec) Novembre 1996 :
- [32] Les normes *AFNOR, NF 18-358*, Juillet 1985 ;
- [33] Francis GORISSE, Ingénieur au CEBTP, « *Essais et contrôle des bétons* » Édition EYROLLES, Paris 1978,
- [34] OUDJIT Mohamed Nadjib, « *Réactivité des fumées de silice condensées en présence de chaux ou du ciment portland* », thèse de Doctorat ingénieur, soutenu le 13 / 01 / 1986, Institut National des Sciences appliquées de TOLOSE , France.