
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE POLYTECHNIQUE



DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
LABORATOIRE CONSTRUCTION ET ENVIRONNEMENT

MÉMOIRE DE MAGISTER

Présenté par :

BOUZOUALEGH Malik

Ingénieur d'État en Génie Civil de l'École Nationale Polytechnique

Thème

Élaboration et caractérisation d'un béton à base de sable de concassage

Soutenu le Mardi 07 juillet 2009.

Devant le jury composé de :

Président :	Mr. A.BALI	Professeur (ENSP)
Directeur du mémoire :	Mr. R. BOUTEMEUR	Chargé de cours (ENSP)
Examineurs :	Mme. R.KETTAB	Maître de conférences (ENSP)
	Mme. M.MORSLI	Maître de conférences (ENSP)
	Mme. A.CHIKH	Chargée de cours (ENSP)

Année universitaire 2008/2009

École Nationale Supérieure Polytechnique 10, Avenue Hassan Badi. El-Harrach. Alger

Dédicaces

A mes chers parents

A mes frères et sœurs

A mes grands-mères

A toute la famille

A mes amis

Je dédie ce travail.

Malik

Remerciements

J'aimerais remercier de tout mon cœur mes parents.

Je remercie tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

Mes sincères remerciements et ma profonde gratitude vont à Monsieur BOUTEMEUR Ramdane, directeur du mémoire, pour m'avoir proposé ce sujet. Ses qualités intellectuelles et sa modestie ont grandement contribué à l'aboutissement de ce mémoire.

Je souhaite ensuite remercier mes examinateurs de mémoire qui m'ont fait honneur d'accepter d'être membres de jury :

Monsieur Abderahim BALI, Professeur à l'École Nationale Supérieure Polytechnique, président de jury.

Madame KETTAB Ratiba, Maître de conférences à l'École Nationale Supérieure Polytechnique, examinatrice.

Madame MORSLI Meriem, Maître de conférences à l'École Nationale Supérieure Polytechnique, examinatrice.

Madame CHIKH Aïcha, Chargée de cours à l'École Nationale Supérieure Polytechnique, examinatrice.

Je remercie le chef et les techniciens du laboratoire national de l'habitat et la construction (LNHC) de Skikda pour l'aide qu'ils ont apporté pour la réalisation de ce mémoire.

Mes sincères remerciements et ma profonde gratitude vont également aux personnels de la bibliothèque de l'école nationale supérieure polytechnique.

Mes amis « Lyacia, Sidahmed, salim, Athmane »

Malik

ملخص :

خلال السنوات الأخيرة عرفت الجزائر ارتفاعا كبيرا في الطلب على المواد الحجرية وخاصة الرمل ، و مع إزدياد الطلب على الرمل بسبب المشاريع الكبرى (الطريق السيار , مليون سكن) وقلة هذا الأخير بعد منع إستعمال رمال الشواطئ و الأودية تم التوجه إلى إستعمال رمال المحاجر, لكن هذا الأخير يحتوي على نسبة عالية من المواد الناعمة (التي يقل قطرها عن $63\mu\text{m}$) والتي تفوق القيم المعمول بها في المواصفات التقنية . العديد من الدراسات أثبتت أنه من الممكن إستعمال رمال المحاجر المحلية في تصنيع الخرسانة مع إضافة المواد الناعمة بنسبة تصل إلى 15% بدون تأثير على الخصائص الميكانيكية.

الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير المواد الناعمة الموجودة في رمال المحاجر المستخرجة من محاجر شرق الجزائر (بن عزوز, الخروب) على الخرسانة من جهة ودراسة تأثير المواد الناعمة على الخرسانة ذاتية القولبة من جهة أخرى.

النتائج المتحصل عليها بينت أن تصنيع الخرسانة مرتبط بنوعية الرمل المستعمل والذي يتطلب دراسة خاصة . أما فيما يخص الخرسانة ذاتية القولبة فقد لاحظنا أن إضافة المواد الناعمة الكلسية (5%) ساهم في تحسين الخصائص الميكانيكية و الريولوجية للخرسانة ذاتية القولبة.

الكلمات المفتاحية: رمل المحاجر, مواد ناعمة كلسية, الخرسانة, مقاومة, الخرسانة ذاتية القولبة , مخفض الماء.

Résumé :

Durant ces dernières années, l'Algérie a connu une forte demande en granulats et particulièrement en sable. La situation est devenue encore plus alarmante voire inquiétante suite aux besoins importants, créés par les grands projets de développement (logements, Autoroute) mais aussi l'interdiction d'exploitation des sables de rivière et de plage. A cet effet, d'importants études et programmes de recherches sont menés sur l'utilisation des sables de concassage. Ces sables contiennent des taux de fines (éléments inférieurs à $63\mu\text{m}$), qui dépassent les exigences des normes en vigueur. Des études antérieures ont montré qu'il est possible de fabriquer un bon béton en utilisant un sable concassé contenant jusqu'à 15% de fines.

L'objectif de cette étude est d'analyser l'effet des fines calcaires contenues dans les sables de concassage produits par les carrières de l'Est Algérien (Ben Azzouz, El khroub) sur le béton ordinaire d'une part et d'analyser le comportement d'un béton autoplaçant confectionné avec des fines calcaires.

Les résultats obtenus ont montré que la confection des bétons à base de sable de concassage est dépendante de la qualité du sable utilisé et qu'il nécessite une meilleure caractérisation.

Concernant le béton autoplaçant, il a été montré que l'ajout des fines à faible quantité (5%) calcaires améliore les performances rhéologiques et mécaniques du béton autoplaçant

Mots clés : Sable de concassage, Fines calcaires, béton, Résistance, béton autoplaçant, Ouvrabilité superplastifiant

Abstract :

In the last years Algeria knew a strong demand of aggregates and particularly sand. The situation became even more alarming even worrying following the important needs, create by the great projects of development (residences, Expressway) but also the prohibition of exploitation of the beach and stream sands. For this purpose, important studies and research programs are carried out on the use of the crushed sands. These sands contains a high percentage of fines (elements lower than $63\mu\text{m}$), which exceed the requirements of the existing standards in use. Former studies showed that it is possible to manufacture a good concrete by using crushed sand containing up to 15% of fines.

The objective of this study is to analyze the effect of fines limestones contained in the crushed sands produced by the careers of the Algerian East (Ben Azzouz, El Khroub) on the ordinary concrete on the one hand and to analyze the behavior of a self-compacting concrete made with fines limestones.

The results obtained from this study showed that the industry of the concretes containing crushed sand dependant on the quality of sand used and requires a better characterization.

Concerning self-compacting concrete, it was shown that the addition of fine limestones (5%) improves the rheological and mechanical performances of the autoplaçant concrete

Key words: Crushed sand, Fines limestones, concrete, Resistance, Self-compacting concrete, Workability, Superplasticizer

Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	3
I.1. INTRODUCTION	3
I.2. L'INFLUENCE DES FINES CALCAIRES SUR LES BÉTONS ORDINAIRES	3
I.3. L'EFFET DES AJOUTS MINÉRAUX SUR LES BÉTONS AUTOPLAÇANTS	4
I.4. CONCLUSION	6
II. LE BÉTON AUTOPLAÇANT	7
II.1. INTRODUCTION.....	7
II.2. HISTORIQUE DU BÉTON AUTOPLAÇANT	7
II.3. DÉFINITION D'UN BÉTON AUTOPLAÇANT	8
II.4. DOMMAINE D'APPLICATION.....	9
II.5. MISE EN OEUVRE ET PRÉCAUTIONS D'EMPLOI DU BAP	9
II.6. PRESCRIPTION D'UN BÉTON AUTOPLAÇANT	10
II.7. CAHIER DES CHARGES D'UN BÉTON AUTOPLAÇANT	11
II.8. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS	11
II.8.1. Quantité de fines importante	12
II.8.2. Volume de pâte élevé	13
II.8.3. Emploi de superplastifiants	13
II.8.4. Utilisation d'un agent de viscosité (réteneur d'eau)	13
II.8.5. Faible volume de gravillon.....	15
II.9. CONSTITUANTS DU BÉTON AUTOPLAÇANT.....	16
II.9.1. Granulats	16
II.9.2. Ciment	16
II.9.3. Ajouts minéraux	16
II.9.3.1. Cendres volantes	17
II.9.3.2. Fumées de silice	17
II.9.3.3. Laitier de haut fourneau.....	17
II.9.3.4. Fillers	18
II.9.4. Eau de gâchage.....	18
II.9.5. Ajouts chimiques.....	18
II.9.5.1. Adjuvants modifiant l'ouvrabilité du béton	18
II.9.5.2. Adjuvants modifiant la prise et le durcissement	19
II.9.5.3. Adjuvants modifiant certaines propriétés du béton	19
II.10. RELATION ENTRE LES DIFFÉRENTES PROPRIÉTÉS D'UN BAP.....	19
II.11. CONCLUSION	20
III. FORMULATION DU BÉTON AUTOPLAÇANT	21
III.1. INTRODUCTION	21
III.2. PRINCIPES DE FORMULATION	21
III.3. FORMULATION DU BÉTON AUTOPLAÇANT	23
III.3.1. Optimisation du mortier	23
III.3.2. Optimisation de la quantité de pâte	24
III.3.3. Optimisation du squelette.....	25
III.3.4. Approche suédoise	27
III.3.5. Approche de la JSCE	27
III.3.6. Approche du laboratoire central des ponts et chaussées LCPC	28
III.3.6.1. Exigences du cahier des charges.....	28
III.3.6.2. Détermination des proportions des constituants	29
III.3.7. Méthode Rui Ferreira.....	29
III.3.8. Méthode basée sur un plan d'expérience	30
III.4. CONCLUSION	30

IV. CARACTERISATION DU BÉTON AUTOPLAÇANT	31
IV.1. INTRODUCTION	31
IV.2. CARACTÉRISTIQUES RHÉOLOGIQUES FONDAMENTALES DES BAP	31
IV.3. ESSAIS DE CARACTÉRISATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS	33
IV.3.1. Essai au cône d'Abrams	33
IV.3.2. Essai d'étalement modifié (J-Ring)	34
IV.3.3. Essai de la boîte en L	35
IV.3.4. Essai de la table de fluidité (par Kasai et coll1991)	35
IV.3.5. Mesure de la déformabilité, Essai du box (Kasai et coll. 1999)	36
IV.3.6. Essai de l'entonnoir en forme de V (V-funnel)	36
IV.3.7. Essai de tassement	36
IV.3.8. Essai de la stabilité au tamis	37
IV.3.9. Essai du tube en U	38
IV.3.10. Essai du caisson	39
IV.3.11. Ressuage	39
IV.3.12. Essai à la colonne	40
V. PARTIE EXPÉRIMENTALE	42
V.1. INTRODUCTION	42
V.2. IDENTIFICATION DES MATERIAUX	42
V.2.1. Granulats	42
V.2.2. Ciment	42
V.2.3. Eau de gâchage	42
V.2.4. Essais sur granulats	42
V.2.4.1. Échantillonnage des matériaux	42
V.2.4.2. Analyse granulométrique	43
V.2.4.3. Masses volumiques (absolue et apparente)	44
V.2.4.4. Propreté superficielle	45
V.2.4.5. Coefficient d'absorption	45
V.2.4.6. Coefficient d'aplatissement	45
V.2.4.7. Essai Los Angeles (Résistance à la fragmentation)	46
V.2.4.8. Essai d'usure Micro-Deval	46
V.2.4.9. Module de finesse	47
V.2.4.10. Équivalent de sable	47
V.2.4.11. Essai au bleu de méthylène	48
V.2.5. Caractéristiques du superplastifiant	48
V.2.6. Fines calcaires	48
V.3. ELABORATION DU BETON ORDINAIRE	49
V.3.1. Formulation du béton ordinaire (Méthode de Faury)	49
V.3.1.1. Calcul de Y	50
V.3.1.2. Détermination des pourcentages des granulats	53
V.3.1.3. Calcul de la quantité d'eau de gâchage	53
V.3.1.4. Calcul des proportions des granulats	53
V.3.2. Formulation avec Adjuvant	54
V.4. ELABORATION DU BÉTON AUTOPLAÇANT	55
V.4.1. Formulation du BAP sans fillers calcaires	55
V.4.2. Formulation du BAP avec les fillers calcaires	56
V.5. FABRICATION DES EPROUVETTES POUR ESSAIS	58
V.6. ESSAIS MÉCANIQUES	58
V.6.1. Essai de compression	58
V.6.2. Essai de traction par flexion	59
V.7. CONCLUSION	59
VI. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS	60
VI.1. INTRODUCTION	60
VI.2. BÉTON ORDINAIRE	60
VI.2.1. Formulation sans adjuvant	61
VI.2.1.1. Affaissement au cône d'Abrams	61
VI.2.1.2. Résistance à la compression	62
VI.2.1.3. Résistance à la traction par flexion	64

VI.2.2. Formulation avec adjuvant.....	65
VI.2.3. Conclusion	66
VI.3. BÉTON AUTOPLAÇANT.....	67
VI.3.1. Affaissement au cône d'Abrams	67
VI.3.2. Essai de la boîte en L	69
VI.3.3. Essai de la stabilité au tamis	70
VI.3.4. Essai de compression	71
VI.3.5. Essai de traction par flexion.....	74
VI.3.6. Conclusion	75
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	77
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	79

Liste des figures

Figure II.1: <i>Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton</i>	12
Figure II.2 : <i>Interaction entre l'eau et les polysaccharides</i>	14
Figure II.3 : <i>Optimisation du dosage agent de viscosité – superplastifiant</i>	14
Figure II.4 : <i>Comparaison entre une composition de BAP et celle d'un béton vibré</i>	15
Figure II.5 : <i>Variation de la capacité de remplissage en fonction de l'affaissement</i>	20
Figure IV.1 : <i>Exemples de comportements rhéologiques pour différents types de béton</i>	32
Figure IV.2 : <i>Rhéomètres développés pour les bétons, (a) BTRHEOM , (b) BML, (c) Two-point test</i>	33
Figure IV.3 : <i>Essai d'étalement</i>	33
Figure IV.4 : <i>Dispositif de l'essai d'étalement modifié (J-Ring)</i>	34
Figure IV.5 : <i>Boîte en L (L-Box)</i>	35
Figure IV.6 : <i>Essai de l'entonnoir en forme de V</i>	36
Figure IV.7 : <i>Essai du tassement</i>	37
Figure IV.8 : <i>Essai de la stabilité au tamis</i>	38
Figure IV.9 : <i>Essai du tube en U</i>	38
Figure IV.10 : <i>Essai du caisson</i>	39
Figure IV.11 : <i>Essai de ressuage à l'aéromètre</i>	40
Figure IV.12 : <i>Essai de stabilité à la colonne</i>	40
Figure V.1: <i>Courbes granulométriques des graviers</i>	43
Figure V.2: <i>Courbes granulométriques des sables</i>	44
Figure V.3: <i>Analyse granulométrique des fillers calcaires (ALCAL F50)</i>	49
Figure V.4 : <i>Courbe de référence FAURY (sable Ben Azzouz)</i>	51
Figure V.5 : <i>Courbe de référence FAURY (sable El Khroub)</i>	52
Figure V.6 : <i>Essai de compression</i>	59
Figure V.7 : <i>Essai de traction par flexion</i>	59
Figure VI.1: <i>Variation du rapport E/C en fonction des fines</i>	61
Figure VI.2 : <i>Variation de la résistance à la compression du béton ordinaire en fonction des fines (sable Ben Azzouz)</i>	63
Figure VI.3 : <i>Variation de la résistance à la compression du béton ordinaire en fonction des fines (sable El Khroub)</i>	63
Figure VI.4 : <i>Variation de la résistance à la traction en fonction des fines (sable Ben Azzouz)</i>	65
Figure VI.5 : <i>Variation de la résistance à la traction en fonction des fines (sable El Khroub)</i>	65
Figure VI.6 : <i>Essai d'étalement</i>	68
Figure VI.7 : <i>Essai de la boîte en L</i>	69
Figure VI.8 : <i>Essai de la stabilité au tamis</i>	70
Figure VI.9 : <i>Variation de la résistance à la compression des BAP (sable Ben Azzouz)</i>	72
Figure VI.10 : <i>Variation de la résistance à la compression des BAP (sable El Khroub)</i>	73
Figure VI.11 : <i>Variation de la résistance à la traction des BAP (Sable Ben Azzouz)</i>	75
Figure VI.12 : <i>Variation de la résistance à la traction des BAP (Sable El Khroub)</i>	75

Liste des tableaux

Tableau III.1 : <i>Cahier des charges du béton autoplaçant</i>	26
Tableau V.1: <i>Analyse granulométrique des graviers</i>	43
Tableau V.2: <i>Analyse granulométrique des sables</i>	44
Tableau V.3: <i>Densité apparente et absolue des granulats</i>	45
Tableau V.4: <i>Propreté superficielle des granulats</i>	45
Tableau V.5: <i>Coefficient d'absorption des granulats</i>	45
Tableau V.6: <i>Coefficient d'aplatissement</i>	46
Tableau V.7: <i>Résistance à la fragmentation (LA)</i>	46
Tableau V.8: <i>Résistance à l'usure (MDE)</i>	47
Tableau V.9: <i>Module de finesse des sables</i>	47
Tableau V.10: <i>Équivalent de sable (ES)</i>	47
Tableau V.11: <i>Bleu de méthylène des sables</i>	48
Tableau V.12 : <i>Caractéristiques physiques et chimiques de l'ALCAL F 50</i>	49
Tableau V.13: <i>Pourcentage des différentes fractions suivant la méthode de Faury</i>	53
Tableau V.14: <i>Composition du béton ordinaire (Sable Ben Azzouz)</i>	54
Tableau V.15: <i>Composition du béton ordinaire (Sable El Kroub)</i>	54
Tableau V.16: <i>Composition des bétons autoplaçants BBP 1 et BBP 2</i>	56
Tableau V.17: <i>Composition de béton autoplaçants BKP 1 et BKP 2</i>	56
Tableau V.18 : <i>Composition des BAP avec les fines calcaires</i>	58
Tableau VI.1 : <i>Rapport E/C en fonction des fines</i>	61
Tableau VI.2 : <i>Résistance à la compression du béton ordinaire (Sable Ben Azzouz)</i>	62
Tableau VI.3 : <i>Résistance à la compression du béton ordinaire (Sable El Khroub)</i>	62
Tableau VI.4 : <i>Résistance à la traction (Sable Ben Azzouz)</i>	64
Tableau VI.5 : <i>Résistance à la traction (Sable Ben Azzouz)</i>	64
Tableau VI.6 : <i>Variation des résistances mécaniques en fonction du pourcentage d'adjuvant</i>	66
Tableau VI.7 : <i>Résultats de l'essai au cône d'Abrams (sable Ben Azzouz)</i>	68
Tableau VI.8 : <i>Résultats de l'essai au cône d'Abrams (sable El Khroub)</i>	68
Tableau VI.9: <i>Essai de la boîte en L (sable Ben Azzouz)</i>	69
Tableau VI.10 : <i>Essai de la boîte en L (sable El Khroub)</i>	70
Tableau VI.11: <i>Résultats de l'essai de la stabilité au tamis (sable ben Azzouz)</i>	71
Tableau VI.12 : <i>Résultats de l'essai de la stabilité au tamis (sable El Khroub)</i>	71
Tableau VI.13 : <i>Résistance à la compression des BAP (Sable Ben Azzouz)</i>	72
Tableau VI.14 : <i>Résistance à la compression des BAP (Sable El Khroub)</i>	72
Tableau VI.15 : <i>Résistance à la traction des BAP (Sable Ben Azzouz)</i>	74
Tableau VI.16 : <i>Résistance à la traction des BAP (Sable El Khroub)</i>	74

Introduction générale



Introduction générale

L'approvisionnement en sable, matériau traditionnel pour la confection des bétons ne présentait pas de contraintes majeures en Algérie jusque dans les années 80. Durant les années 90, les besoins exprimés qui ont généré une très forte demande en croissance constante et l'absence des crues ont eu pour conséquence un épuisement rapide des sablières et ballastières.

Cette situation apparue dans une période relativement courte a posé le problème de disponibilité de sable.

L'exploitation sauvage des sables de mer qui s'en est suivie a causé des graves dommages à l'environnement.

En 1999, la situation devenant alarmante, il fut décidé d'interdire l'extraction du sable de mer à partir des plages générant un renforcement de l'extraction à partir des lits d'oueds et du pillage illicite du sable des rivages. [1,2].

Parallèlement à cette situation, les carrières de granulats, le plus souvent d'origine calcaire, produisent du sable résultant des opérations de concassage.

Ces sables qui contiennent un taux élevé de fines (éléments inférieurs à 63 μ m), sont utilisés par le secteur des travaux publics, la fabrication de certains composants de construction (carreaux granitos, bordures de trottoirs....) et non pas pour la confection des bétons.

Les normes internationales limitent le pourcentage des fines calcaires issues du sable de concassage de 3% à 22% selon la norme. [3,4]

Des études de valorisation des sables de concassage ont été menées dans plusieurs pays et ont été publiées (France, Espagne, Maroc, Algérie). [5]

Les résultats de ces études sont tous concordants [5] :

- Les sables de calcaires de concassage sont utilisables pour la confection des bétons sans danger,
- Les fines calcaires utilisées jusqu'à des taux de 20% améliorent les performances mécaniques des bétons sans nuire à leur durabilité.

En Algérie, plusieurs études sur l'utilisation du sable de concassage dans le béton ont été menées, mais la plus part des sables concassés utilisés dans ces projets de recherches proviennent des carrières du centre. Ces études ont montré qu'il est possible d'utiliser le sable de concassage contenant jusqu'à 15% de fines pour la fabrication du béton sans affecter ses performances mécaniques.[5]

Les fines calcaires sont aussi utilisés dans la fabrication (confection) des bétons autoplaçants, de ce fait plusieurs études ont été menées dont le but est de déterminer l'influence des fines calcaires sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons autoplaçants, en utilisant un sable de concassage.

Le présent travail a pour objectif d'étudier l'effet des fines calcaires contenus dans les sables produits par les carrières de l'Est Algérien (Ben Azzouz, El Khroub) sur le béton ordinaire d'une part et d'analyser le comportement d'un béton autoplaçant confectionné avec des fines calcaires.

Pour le béton ordinaire, plusieurs bétons ont été confectionnés avec les deux sables de concassage contenant des teneurs en fines calcaires de (0, 5, 10, 15, 20, 25 et 30%).

L'effet d'ajout de superplastifiant a été aussi étudié pour les bétons contenant des teneur en fines calcaires de 15, 20 et 25% en ajoutant 1 et 2% de superplastifiant.

Pour la formulation du béton autoplaçant et dont le but est d'étudier son autoplaçabilité nous avons choisi de faire varier quelques paramètres tels que le dosage en superplastifiant et en fines calcaires, pour les deux types de sable avec un dosage en ciment constant.

Ce mémoire comportera deux parties :

Une partie théorique : qui est une synthèse bibliographique de la littérature spécialisée. Elle englobe les différents travaux effectués sur l'influence des fines calcaires sur les bétons ordinaires ainsi que l'effet des ajouts minéraux sur le comportement des bétons autoplaçants.

Une large partie est consacrée au béton autoplaçant du fait de sa complexité et de son nouveauté. Les différentes méthodes de formulations et les différents essais de caractérisation de ce matériau sont rapportés.

Une partie expérimentale : qui présente l'ensemble des essais effectués au laboratoire, leur principe et leur mode opératoire. Un récapitulatif des méthodes de formulations adoptées dans cette recherche et des essais effectués sur bétons y est exposé.

Bien entendu les résultats des essais effectués au laboratoire sont présentés et suivis d'une interprétation et d'une conclusion générale.

Chapitre I

Synthèse bibliographique



Synthèse bibliographique

I.1. INTRODUCTION

Dans cette partie on résume quelques travaux et projets de recherches antérieurs effectués sur l'influence des fines calcaires des sables de concassage sur les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons ordinaires ainsi que l'influence des ajouts minéraux (fines calcaires) sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons autoplaçants.

I.2. L'INFLUENCE DES FINES CALCAIRES SUR LES BÉTONS ORDINAIRES

Plusieurs études ont montré que les fines ont une très grande influence sur les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons ordinaires et parmi ces études on peut citer :

- En Algérie les études menées par le CNERIB [6] à partir de 1995 avec la collaboration de l'Université de Blida, de l'École Nationale des Travaux Publics, plusieurs laboratoires et l'ENG ont montré que l'utilisation du sable calcaire présentant des taux de fines allant jusqu'à 25% est possible et sans conséquence préjudiciable sur les caractéristiques physico mécaniques finales des bétons élaborés.
- HABBOUCHE,A [7] a conclu après avoir effectué des essais sur des bétons confectionnés avec trois types de sables de concassage et deux types de ciments que la quantité d'eau nécessaire au gâchage augmente avec le pourcentage des fines calcaires incorporés dans les bétons (0, 10, 15 et 20%) et que la résistance à la compression des bétons augmente pour un pourcentage de fines de 12% à 15%.
- KENAI et al. [8] après avoir effectué des essais sur des bétons à base de sable de concassage ont conclu qu'il est possible de réaliser des bétons et des mortiers contenant jusqu'à 20% de fines calcaires sans affecter les performances du béton.

- MENADI et al. [9] ont conclu que l'affaissement des bétons diminue avec l'augmentation du pourcentage de fines calcaires quelque soit le type de ciment utilisée et que l'incorporation de 15% de fines calcaires provoque une diminution de la résistance à la compression du béton par rapport au béton témoin.
- BERTRANDY [10] a réalisé des essais sur des bétons contenant des fines calcaires à faible coefficient d'activité, il a conclu que l'incorporation des fines calcaires à faible coefficient d'activité améliore les résistances à la compression surtout lorsque les fines calcaires sont de l'ordre de 8 à 12%, par contre les résistances à la traction sont moins influencées par les fines calcaires.
- BONAVENTI, et al. [11] ont utilisé trois types de fines (Calcaire, Quartz, et Granite) pour la confection de trois mortiers contenant 5, 10, 15 et 20% de fines. Les essais réalisés sur ces mortiers ont montré que les fines calcaires, améliorent la résistance à la compression des mortiers à jeunes âges (7jours).

I.3. L'EFFET DES AJOUTS MINÉRAUX SUR LES BÉTONS AUTOPLAÇANTS

Nombreuse sont les études qui ont pour objectif de trouver une bonne formulation des bétons autoplaçants (BAP) en utilisant divers ajouts minéraux. Les bétons autoplaçant sont des bétons très spéciaux dont les caractéristiques résident essentiellement dans leurs grandes fluidités. Parmi ces études on cite :

- NECIRA.B [12] a effectué des essais sur des bétons autoplaçants confectionnés avec trois types d'ajouts minéraux (Fillers calcaires FC, Pouzzolane naturelle PZ et le laitier du haut fourneau LT). Il a conclu que l'introduction des ajouts minéraux tels que (FC, PZ et LT) améliore considérablement les propriétés rhéologiques des BAP et que les résistances à la compression sont inversement proportionnelles au pourcentage d'ajout minéral. Il a conclu aussi que le BAP contenant le laitier du haut fourneau donne des résistances à la compression plus élevées que les BAP contenant les fillers calcaires ou les pouzzolanes naturelles.
- SAMARA.M. [13] a étudié la possibilité d'utiliser les sédiments des cours d'eau comme un fillers dans la composition du béton autoplaçant. Il a effectuée des essais sur deux types de béton autoplaçant, le premier est à base de fillers calcaires et le

deuxième à base de sédiments. Il a observé une perte de maniabilité sur bétons et mortiers à l'état frais, cette perte est due au pouvoir d'absorption d'eau des sédiments liée à la porosité intragranulaire des sédiments traités. Les résistances à la compression sont similaires aux résistances données par les bétons à base de fillers calcaires.

- AYED.K. [14] a élaboré à partir d'une même formulation de base, trois BAP de même classe de résistance incorporant chacun un type de fines locales d'Algérie, à savoir des fines siliceuses provenant des déchets de sable siliceux servant à la fabrication du verre, des fines pouzzolaniques naturelles et des fines calcaires. L'analyse comparative des résultats a permis de mettre en évidence l'influence du type d'addition minérale sur le comportement à long terme des BAP.
- REBOUH.N [15] a trouvé que l'ajout des cendres volantes dans la composition du béton autoplaçant améliore les caractéristiques de ce dernier, et augmente les résistances mécaniques au jeune âge.
- EL HILALIA [16] traite dans son étude l'influence des fillers calcaires sur les propriétés des bétons autoplaçants à l'état frais. Toutes les compositions ont été fabriquées avec une teneur en eau fixe, un même rapport eau/ciment, un rapport G/S=1 et un dosage en superplastifiant différent. La teneur en fines est constante avec trois types de fillers calcaires différents.
Les résultats conduits sur les BAP frais montrent que l'ajout de fillers ayant une grande surface de Blaine améliore la fluidité du BAP particulièrement en milieu confiné, sa résistance à la ségrégation et la robustesse de sa formulation. De même, il apparaît que la finesse des fillers influe sur la demande en superplastifiant de façon significative.
- BOUHAMOU.N et al. [17] ont montré que l'incorporation des fines calcaires influe sur le comportement du béton autoplaçant à l'état frais à base de matériaux locaux notamment le sable de mer et le sable de carrière. Les résultats obtenus offrent de belles perspectives pour optimiser les BAP. Les résistances élevées des BAP sont liées au volume de pâte important. L'utilisation du superplastifiant "viscocrete 20HE" dans les formulations autoplaçantes peut avoir une influence bénéfique sur la résistance mécanique. La présence d'une quantité importante de filler calcaire comme addition

dans les BAP peut également avoir une action positive sur leurs compacités et par conséquent sur leurs résistances mécaniques.

- HADDAD.O et al. [18] ont travaillé sur des mortiers issues des formules de BAP, ces mortiers sont obtenues en faisant varier le dosage en addition de fines calcaires (15, 30,50%). Les résultats montrent que l'addition d'un pourcentage différent en fillers n'a pas une influence significative sur l'âge du début et fin de prise. Concernant les résistances mécaniques en compression, ils ont conclu qu'elles sont inversement proportionnelles au volume de fillers introduit et donc au rapport E/C.

- MEBROUKIA [19] a étudié l'influence de l'ajout des fillers calcaires locales d'Algérie (carrière de Kristel d'Oran) sur la pâte autoplçante. Les pâtes de ciment ont été confectionnées à partir des combinaisons entre constituant de base (ciment, filler calcaire, eau et superplastifiant). La pâte est élaborée par ajout de suspensions solides provenant du ciment et du filler. Il a constaté que l'incorporation d'une quantité importante de fines calcaires influe sur le comportement du béton autoplçant (pâte sec ou très ferme). L'ajout de filler dans la pâte de ciment conduit à une diminution de la valeur d'étalement de la pâte et en contre partie le filler améliore l'écoulement de la pâte.

I.4. CONCLUSION

Les études antérieures effectuées sur l'influence de l'ajout des fines calcaires dans les bétons ordinaires ont montré que la présence des fines calcaires en faible quantité améliore les caractéristiques du béton (ouvrabilité, résistances), l'excès de fines influe négativement sur les caractéristiques du béton.

Pour le béton autoplçant on peut conclure que les fillers (calcaire, silice, pouzzolane, laitier du haut fourneau) et les superplastifiants ont une très grande influence sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons autoplçants.

Chapitre II

Le béton autoplaçant



Le béton autoplaçant

II.1. INTRODUCTION

Les bétons autoplaçants (BAP, ou SCC, en anglais, pour Self-Compacting Concrete) ont été utilisés pour la première fois au Japon vers la fin des années 1980 afin d'améliorer la rentabilité de la construction, d'assurer constamment une mise en place correcte avec un béton de qualité et de diminuer les nuisances sonores.

Le béton autocompactant est également dénommé béton autoplaçant pour les parois verticales, ou encore autonivelant pour les parois horizontales, mais l'appellation la plus courante en Algérie est : béton autoplaçant notée BAP. [20]

Ce chapitre fait l'objet d'une initiation au béton autoplaçant, il comporte des notions fondamentales relatives aux caractéristiques des BAP.

II.2. HISTORIQUE DU BÉTON AUTOPLAÇANT

Au Japon, le nombre d'ouvriers qualifiés dans la construction n'a cessé de diminuer depuis le début des années 1980, engendrant une perte de connaissance, notamment dans les techniques de vibration du béton. L'utilisation de bétons très fluides, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème [21]. C'est ainsi qu'est né le concept des bétons autocompactants (self-compacting concrete, traduit par béton autoplaçant ou béton autonivelant). Outre leur facilité de mise en œuvre, de tels bétons présentent aussi l'intérêt de réduire le temps de travail sur chantier.

L'essor important de ce type de bétons se justifie par le fait qu'ils présentent de nombreux avantages :

- Pour la mise en œuvre :
 - ✓ diminution du temps de coulée ;
 - ✓ suppression de la vibration et donc diminution notable des nuisances sonores et de l'usure des moules métalliques et des coffrages ;
 - ✓ meilleures conditions de travail, ce qui permet d'attirer une main d'œuvre qui n'appréciait pas toujours les conditions de travail « bruyantes » ;

- ✓ possibilité de couler des bétons dans des endroits inaccessibles ;
- ✓ possibilité de couler des voiles de grande hauteur en une seule opération.
- Sur la qualité du béton :
 - ✓ parfait remplissage des éléments fortement ferraillés ;
 - ✓ obtention d'une bonne qualité de parement (surface de béton lisse et donc moins de pores en surface) ;
 - ✓ et d'une manière générale, obtention d'une meilleure qualité du béton, in situ, pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers durant la réalisation ; cela va dans le sens d'une durabilité accrue des ouvrages.
- Concernant la conception :
 - ✓ permet d'envisager de nouveaux types d'éléments en béton ;
 - ✓ possibilité d'intégrer des réservations dans le coffrage.

Cependant, ces avantages s'accompagnent fatalement de certains inconvénients :

- ✓ Augmentation du coût des matières premières (additions, adjuvants),
- ✓ Modifications des outils de fabrication (outils de mise en place).

Les chercheurs et les industriels Japonais n'ont pas tout de suite publié leurs recherches. La viabilité des bétons autoplaçants devait être prouvée. Plusieurs équipes de recherche et de développement s'y sont consacré. Des réalisations en vraie grandeur ont confirmé le travail mené au Japon depuis plus de dix ans. Le challenge actuel consiste à maîtriser la formulation du béton autoplaçant dans plusieurs classes de résistance pour un prix compétitif, en prenant en compte d'une part le cahier des charges intégrant les performances rhéologiques et d'autre part les techniques et matériaux disponibles.[22]

II.3. DÉFINITION D'UN BÉTON AUTOPLAÇANT

Par définition, un béton autoplaçant (BAP) est un béton très fluide, homogène et stable, qui se met en place par gravitation et sans vibration. Il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique. Le terme de béton autonivelant peut aussi être utilisé mais il concerne plutôt des applications horizontales (dallage par exemple).

Les bétons autoplaçants (BAP) se distinguent donc des bétons dits ordinaires (BO), ou bétons à vibrer, par leurs propriétés à l'état frais [23]. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de

l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique).

Pour obtenir un béton autoplaçant il ne s'agit pas d'ajouter de l'eau, au contraire, une telle manipulation conduit à des phénomènes de ségrégation entraînant une chute des performances. Il s'agit de trouver la composition optimale entre les différents constituants (gravier, sable, ciment, eau, ajouts et adjuvants), et de garantir l'absence de ségrégation et de ressuage.

Pour parvenir à ce cahier des charges, les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons. En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons ou au ciment. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie. [23]

II.4. DOMMAINE D'APPLICATION

Le béton autoplaçant est une solution bien adaptée pour :

- Tous types de dalles y compris dalles de compression sur poutrelles hourdis,
- Radiers,
- Plancher dalle pleine et plancher chauffant,
- Rattrapage de niveau en rénovation,
- Fondations superficielles,
- Voiles, poteaux, poutres.

II.5. MISE EN OEUVRE ET PRÉCAUTIONS D'EMPLOI DU BAP

La fabrication, le transport et la mise en œuvre du BAP se font avec le matériel habituellement utilisé pour les bétons ordinaires. Il faudra néanmoins porter une attention particulière aux points suivants :

- Pour tous types d'utilisation :
 - ✓ La vitesse de bétonnage (pas trop rapide pour éliminer l'air excédentaire)
 - ✓ Ajouts d'eau interdits
 - ✓ Une bonne étanchéité du coffrage, sa résistance à la poussée hydrostatique

- ✓ Bonne fixation des mannequins de réservations
- ✓ Protection du béton frais par des conditions de cure adaptées.

- Pour les ouvrages verticaux, architectoniques ou Génie civil :
 - ✓ La hauteur de chute du béton (utilisation d'un tube plongeur conseillée).

- Pour les ouvrages horizontaux en particulier :
 - ✓ Nécessité d'un calepinage des joints (retrait, dilatation..)
 - ✓ Mise en place de renforts d'armatures aux droits des angles rentrants, en prolongation des murs, réservations et seuils de portes.

II.6. PRESCRIPTION D'UN BÉTON AUTOPLAÇANT

La prescription d'un béton autoplaçant se fait, comme pour tout autre béton, sur base des performances souhaitées à l'aide des données de base de la norme NBN EN 206-1 et de son supplément NBN B 15-001. Ces données sont ensuite complétées par des exigences complémentaires spécifiques au béton autoplaçant.

Outre la conformité à la norme NBN EN 206-1 : 2001 « Béton - Spécification, performances, production et conformité » et à son supplément NBN B 15-001 : 2004, les données de base pour la prescription du béton à propriétés spécifiées sont :

- A : la résistance à la compression, définie par une classe de résistance ;
- B : la durabilité traduite par le domaine d'utilisation (B1) et la classe d'environnement (B2). Les classes d'environnement fixent les paramètres de composition qui régissent la durabilité du béton comme par exemple la teneur minimale en ciment et le rapport eau/ciment maximum ;
- C : l'ouvrabilité, définie par la classe de consistance. A noter que cette spécification est indicative et non mesurable par les essais classiques d'affaissement au cône d'Abrams et d'étalement à la table à chocs ;
- D : la dimension nominale maximale des granulats (D_{max}). Ces données de base sont complétées par les exigences complémentaires suivantes (donnée E). Celles-ci sont spécifiques au béton autoplaçant et complètent la prescription concernant la classe de consistance du béton (donnée C).
- E : la valeur d'étalement (Slump flow), la hauteur à la boîte en U et la stabilité au tamis.

Ces données permettent, dans la majorité des cas, de garantir l'aptitude du béton à répondre aux applications les plus courantes.

Si les propriétés du béton doivent être précisées davantage, une série d'exigences complémentaires peuvent être formulées mais celles-ci ne doivent pas se trouver en contradiction avec les exigences fondamentales.

II.7. CAHIER DES CHARGES D'UN BÉTON AUTOPLAÇANT

La spécificité des BAP réside dans leur comportement à l'état frais. En effet ce type de béton doit se caractériser par une grande ouvrabilité et une grande déformabilité tout en restant stable. Ces propriétés contribuent à assurer des structures durables et de qualité [22].

Le cahier des charges suivant décrit les propriétés rhéologiques exigées pour un BAP :

- Un BAP doit s'écouler naturellement sous son poids propre (avec un débit suffisant), c'est à dire avoir un étalement et une vitesse d'étalement importants,
- Un BAP doit aussi pouvoir remplir, sans vibration, des zones confinées et une grande fluidité du béton peut ne pas être suffisante pour cela. En effet, lors de son écoulement au droit d'un obstacle, les gravillons cisailent le mortier et ont tendance à entrer en contact les uns avec les autres si ce dernier ne résiste pas suffisamment au cisaillement. Ainsi, des arches peuvent se former et interrompre l'écoulement par colmatage. Pour éviter ceci, il est nécessaire qu'un BAP ait une bonne résistance à la ségrégation en phase d'écoulement en zone confinée,
- Un BAP doit présenter une bonne résistance à la ségrégation statique jusqu'à la prise du béton, pour des raisons évidentes d'homogénéité de ses propriétés mécaniques.
- De plus, le ressuage d'un BAP ne doit pas être trop fort car ceci peut générer une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées, par rapport à celles situées en zone inférieure lors du coulage, ainsi que l'apparition de fissures.

II.8. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS

Malgré les différentes méthodes de formulation existantes, certaines caractéristiques demeurent intrinsèques aux BAP mais peuvent légèrement différer d'une approche à l'autre.

La composition d'un béton autoplaçant doit avoir certaines caractéristiques [24,25] :

- Une quantité de fines importante,
- Volume de pâte élevé,

- L'emploi de superplastifiants
- L'utilisation éventuelle d'un agent de viscosité (rétenteur d'eau),
- Un faible volume de gravillon.

II.8.1. Quantité de fines importante

Les compositions de BAP comportent une grande quantité de fines (environ 500 kg/m^3) pour limiter les risques de ressuage et de ségrégation. Toutefois, le liant est fréquemment un mélange de deux, voire trois constituants, pour éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes (et un coût de formule trop élevé).

Ce sont les exigences de résistance à la compression, les critères de durabilité (DTU 21, normes XP P 18-305 ou EN 206, etc.) et les paramètres d'ouvrabilité (fluidité) qui déterminent le choix de ces additions (cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire, etc., le filler calcaire étant l'une des additions fréquemment rencontrées dans les formulations de BAP) et leur proportion respective.

L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence les caractéristiques mécaniques et autoplaçantes du béton (figure II.1) [26].

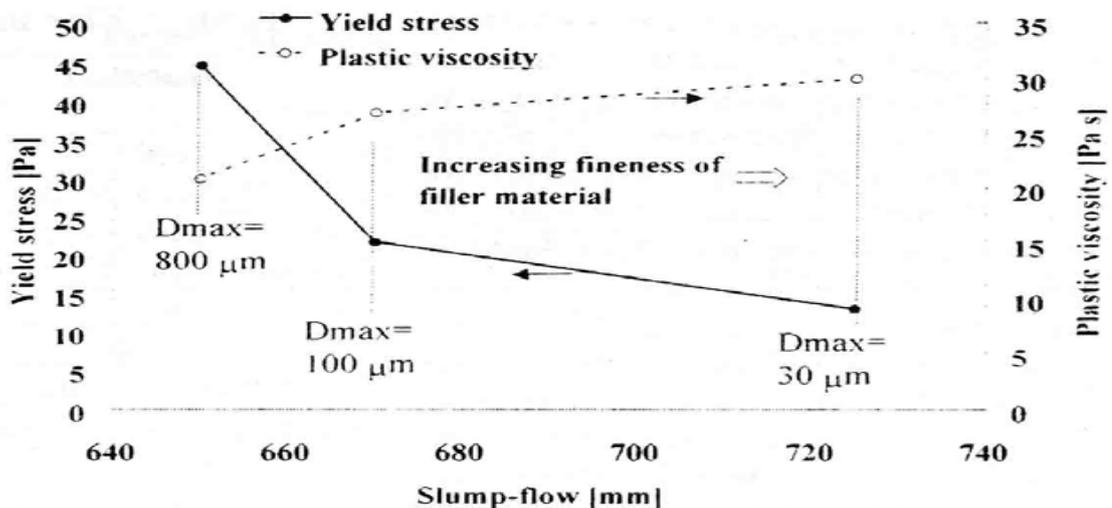


Figure II.1: Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton [26]

II.8.2. Volume de pâte élevé

Les frottements entre granulats sont source de limitations vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment + additions + eau efficace + air) étant précisément d'écartier les granulats, son volume dans les BAP est donc élevé (330 à 400l/m³).

II.8.3. Emploi de superplastifiants

La fluidité des BAP est obtenue en ajoutant des superplastifiants. Ces fluidifiants sont identiques à ceux employés pour les autres types de béton, à savoir des polymères de type polycarboxylate, polyacrylate/polyacrylate ester acrylique. Cette adjuvantation ne doit pas être trop élevée (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 la ségrégation et du ressuage.

Les superplastifiants interagissent avec les particules du ciment et des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau. Ainsi, les particules sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante [27].

II.8.4. Utilisation d'un agent de viscosité (rétenteur d'eau)

L'ajout d'un superplastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, afin de minimiser ce dernier point, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci (figure II.2). Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse et en conservant une répartition homogène des différents constituants.

Cependant, l'action de ces produits est, d'une certaine façon, opposée à celle des superplastifiants. La formulation d'un BAP requiert donc la sélection d'un couple agent de viscosité - superplastifiant compatible et l'optimisation de leur dosage (figure II.3).

Ces produits semblent utiles pour des bétons ayant des rapports eau/liant (E/L) élevés, les fines n'étant alors pas suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. En revanche, leur utilisation ne se justifie pas pour des BAP ayant des rapports E/L faibles (rapport eau/fines < 0,3). Pour les bétons intermédiaires, leur utilisation doit être étudiée au cas par cas.

Les agents de viscosité ont aussi la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations de la teneur en eau à l'égard des problèmes de ressuyage et de ségrégation, mais ils peuvent conduire à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de la fluidité [28].

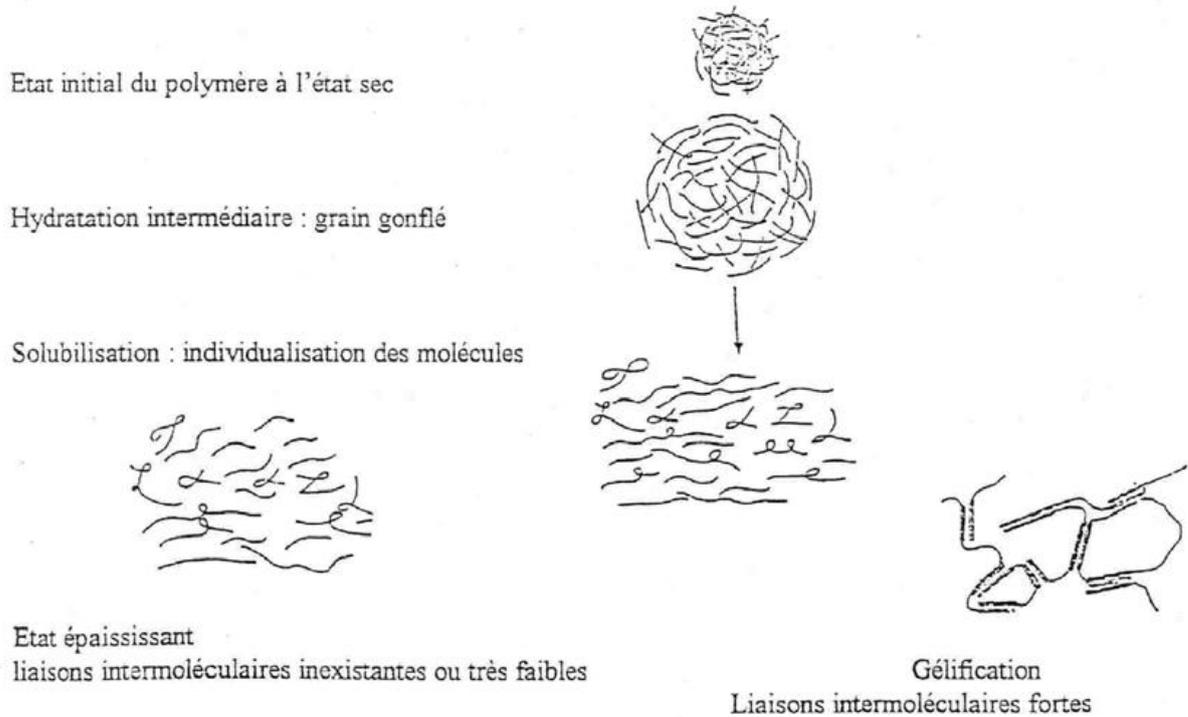


Figure II.2 : Interaction entre l'eau et les polysaccharides [29]

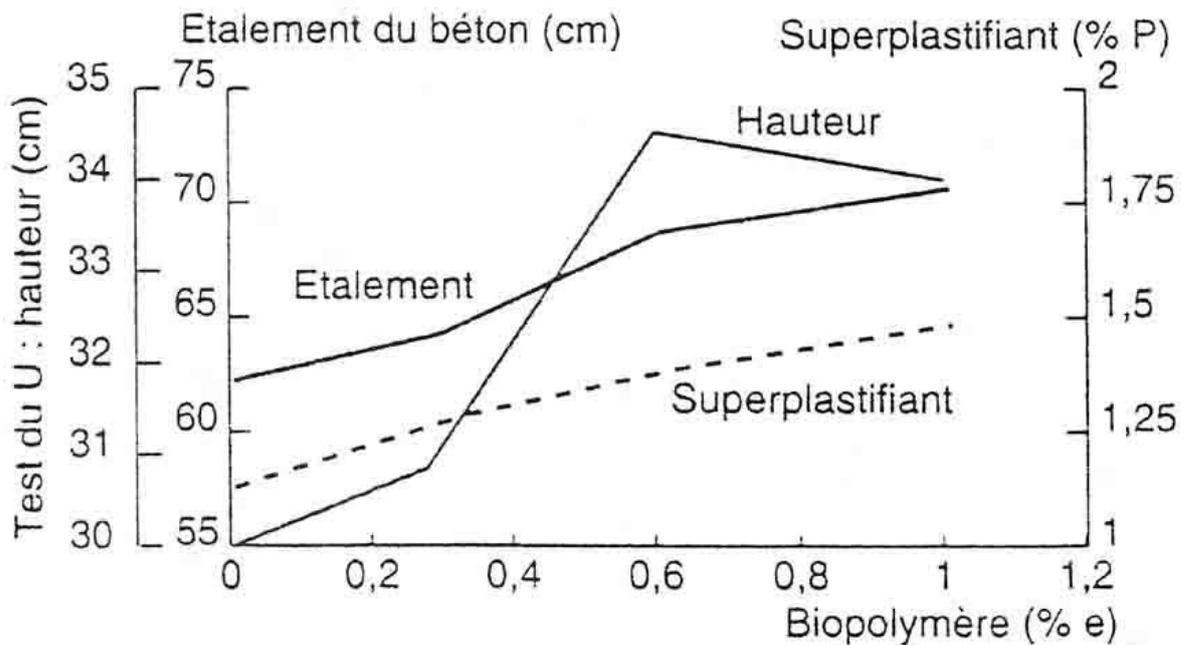


Figure II.3 : Optimisation du dosage agent de viscosité – superplastifiant [30]

II.8.5. Faible volume de gravillon

Les BAP peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés. Cependant, comme nous l'avons vu précédemment, il faut en limiter le volume car les granulats sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée. Toutefois, comme ils conduisent par ailleurs à une augmentation de la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire à une bonne ouvrabilité et une résistance souhaitée.

Ces deux facteurs conduisent à prendre pour les BAP un rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 1, qui peut être corrigé suivant le confinement de la structure étudiée.

Le diamètre maximal des gravillons (D_{max}) dans un BAP est compris classiquement entre 10 et 20 mm, mais comme les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec (D_{max}) cela conduit à diminuer le volume de gravillon.

En résumé, les composants de base d'une formulation de BAP sont identiques à ceux d'une formulation de béton vibré mais leurs proportions sont différentes (figure II.4). Afin d'obtenir les propriétés requises à l'état frais d'un BAP, une importante quantité de fines et l'incorporation d'adjuvants (notamment les superplastifiants) sont nécessaires.

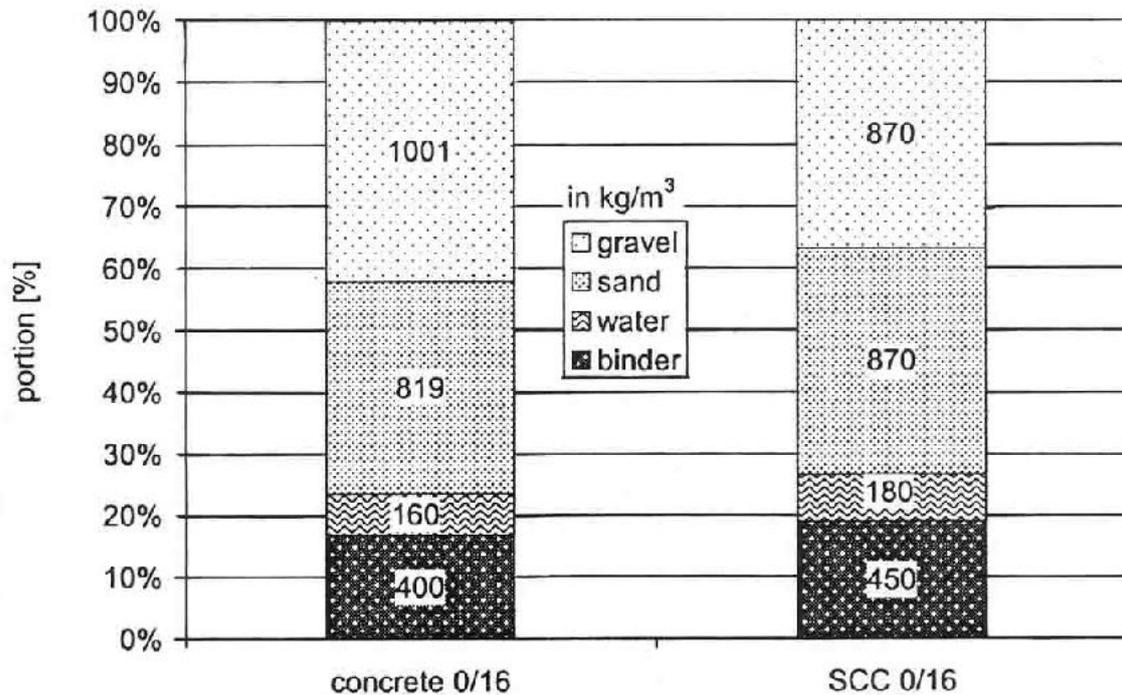


Figure II.4 : Comparaison entre une composition de BAP et celle d'un béton vibré [31]

II.9. CONSTITUANTS DU BÉTON AUTOPLAÇANT

Les granulats et le ciment utilisés pour un BAP sont les mêmes que ceux utilisés pour la fabrication d'un béton ordinaire. En plus des granulats, la formulation d'un BAP se distingue par la présence d'un ajout chimique et /ou minéral. [25,28]

II.9.1. Granulats

Les BAP sont réalisés avec des granulats roulés ou concassés, toutefois, comme pour un béton ordinaire, la forme des granulats a une influence sur le comportement rhéologique. Le coefficient de frottement est plus faible entre les granulats roulés qu'entre les granulats concassés. Les granulats roulés présentent par ailleurs un plus petit vide intergranulaire, ce qui nécessite une plus petite quantité de pâte de ciment pour le remplir.

Cependant pour le sable, et face au problème de la surexploitation des gisements, il est préférable d'utiliser un sable concassé qu'un sable roulé car le sable concassé apporte au mélange une part non négligeable de fines qui améliorent la maniabilité, la compacité, la résistance et la durabilité du béton.

D'autre part la flottabilité des granulats concassés dans la pâte de ciment est meilleure, raison de leur plus grande surface spécifique à masse identique. Afin d'empêcher tout risque de blocage lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16 mm.

II.9.2. Ciment

Les BAP peuvent être réalisés avec la plupart des ciments.

II.9.3. Ajouts minéraux

Les ajouts minéraux sont définis par la norme européenne provisoire ENV 206 comme suit : 'Matériau minéral finement divisé et pouvant être ajouté au béton pour améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières [28].

L'utilisation des ajouts minéraux a des bénéfices : fonctionnels, économiques et écologiques [25].

- L'incorporation des particules fines améliore la maniabilité, les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. La substitution d'une quantité de ciment par des fines diminue la chaleur d'hydratation dégagée lors de la confection du béton, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique (retrait).

- La majorité des ajouts minéraux sont des sous-produits de différentes industries. Le remplacement du ciment qui est un grand consommateur d'énergie par des ajouts minéraux permet de réduire le coût du béton.
- L'utilisation de ces sous produits permet de les éliminer de la nature, tout en diminuant la quantité de CO₂ émise par l'industrie cimentaire.

II.9.3.1. Cendres volantes

Il résulte de la combustion du charbon pulvérisé dans les centrales thermiques des composants volatiles du carbone et des impuretés minérales. Les composants volatiles et le carbone sont brûlés, tandis que les impuretés minérales telles que l'argile, le quartz et les feldspaths sont fusionnés et entraînés vers la zone froide où ils se solidifient en de petites sphères vitreuses. La majorité de ces sphères sont emportées par le courant gazeux vers l'extérieur. Ces cendres sont récupérées dans un précipitateur électrostatique. La composition chimique des cendres volantes dépend des impuretés contenues dans le charbon utilisé. Pour la composition minéralogique, selon la teneur en CaO les cendres volantes se divisent en deux catégories :

- Classe F: contenant moins de 10% de CaO.
- Classe C: contenant entre 15 % et 35% de CaO.

II.9.3.2. Fumées de silice

La fumée de silice est un sous produit de la fabrication du silicium métallique ou des différents ferroalliages contenant du silicium (comme : FeSi, CaSi).

Selon la norme, on distingue deux classes A et B : les fumées de silice de classe A étant les plus riches en silice et les plus fines.

Compte tenu de leur très grande finesse et de leur très grande réactivité avec la portlandite libérée par l'hydratation du ciment, la proportion des fumées de silices est limitée à 10% du poids de ciment. Leur emploi est réservé aux bétons contenant un superplastifiant [28].

II.9.3.3. Laitier de haut fourneau

C'est un coproduit de la production de la fonte. Dans le procédé de fabrication, dans les hauts fourneaux, le laitier surnage au dessus de la fonte, et se vitrifie rapidement après refroidissement. Le broyage de ce dernier (à environ 400 m²/kg à 500 m²/kg) donne ce qu'on appelle le laitier vitrifié moulu. Il est utilisé comme ajout.

La composition chimique du laitier est relativement constante, car pour permettre le refroidissement de la fonte la composition chimique des matières premières doit être bien ajustée. Tandis que sa composition minéralogique dépend de son mode de refroidissement, un laitier est d'autant plus vitreux que le refroidissement est rapide.

II.9.3.4. Fillers

Ce sont des produits finement divisés utilisés comme des correcteurs granulométriques, provenant de roches massives ou meubles traitées de telle sorte qu'ils ne renferment pas plus de 20% d'éléments supérieurs à 125 µm (P 18-541).

II.9.4. Eau de gâchage

Nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier. L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours. Le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme NF EN 1008.

II.9.5. Ajouts chimiques

Les ajouts chimiques sont des adjuvants qui, incorporés au béton modifient une ou plusieurs de ses propriétés à l'état frais ou durci. Étant constitués le plus souvent de produits tensio-actifs, il suffit donc de très faibles proportions du produit pour provoquer des modifications importantes des propriétés du béton, notamment si le dosage prescrit par le fabricant est respecté. Pour certains types d'adjuvants, et pour un dosage moindre, le même adjuvant peut présenter une fonction secondaire [27].

II.9.5.1. Adjuvants modifiant l'ouvrabilité du béton

- Les plastifiants : A teneur en eau égale, ils augmentent la maniabilité du béton.
- Les plastifiants réducteurs d'eau : A même maniabilité, ils augmentent les résistances mécaniques.
- Les superplastifiants : Ils provoquent un fort accroissement de la maniabilité du mélange.

II.9.5.2. Adjuvants modifiant la prise et le durcissement

- Les accélérateurs de prise et de durcissement : Ils diminuent les temps de prise ou de durcissement du ciment.
- Les retardateurs de prise : Ils augmentent le temps de prise du ciment.

II.9.5.3. Adjuvants modifiant certaines propriétés du béton

- Les entraîneurs d'air : Ils entraînent la formation de microbulles d'air uniformément réparties.
- Les hydrofuges de masse : Ils diminuent l'absorption capillaire des bétons et des mortiers durcis.
- Les rétenteurs d'eau : Ils augmentent l'homogénéité et la stabilité du mélange.

II.10. RELATION ENTRE LES DIFFERENTES PROPRIETES D'UN BAP

Une fluidité élevée et une résistance suffisante à la ségrégation sont deux exigences essentielles pour qu'un béton puisse être considéré comme autoplaçant. Le béton autoplaçant doit être capable de se déformer pour remplir les coffrages densément armés sans intervention extérieure, ceci doit se faire sans qu'il y ait un risque de séparation des différents constituants, cette caractéristique est appelée capacité de remplissage.

La capacité de remplissage dépend de deux facteurs : la déformabilité et la stabilité.

En 1991, Ozawa et al ont présenté la relation entre la capacité de remplissage et l'affaissement du béton, (Figure II.5), lorsque l'affaissement est faible, les frictions entre les particules augmentent ainsi l'écoulement est arrêté. [25]

Par contre lorsque l'affaissement est élevé, les granulats cisailent le mortier et se rapprochent les uns des autres, on assiste à la formation de voûtes (signe de ségrégation) qui empêchent l'écoulement du béton.

En conséquence, pour garantir une bonne capacité de remplissage il est nécessaire d'augmenter la déformabilité du béton et de diminuer le risque de ségrégation (assurer une bonne stabilité).

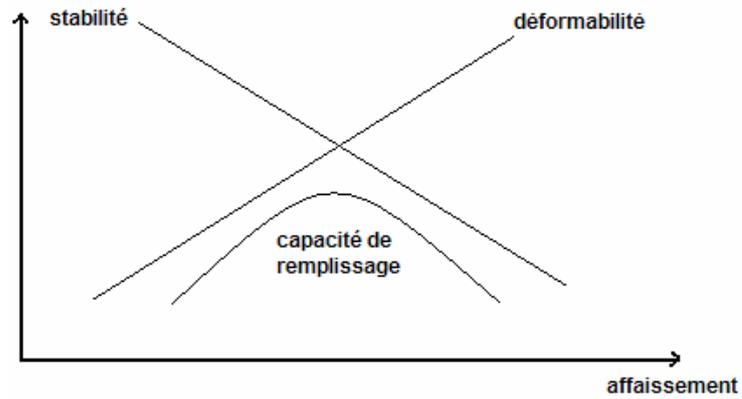


Figure II.5 : Variation de la capacité de remplissage en fonction de l'affaissement [25]

II.11. CONCLUSION

Le béton autoplaçant est un béton très fluide, homogène et stable qui se met en place par gravitation et sans vibration. Pour obtenir un béton autoplaçant plusieurs méthodes de formulation ont été développées,

L'objectif du prochain chapitre est d'exposer quelques méthodes de formulation des bétons autoplaçants.

Chapitre III

Formulation du béton autoplaçant



Formulation du béton autoplaçant

III.1. INTRODUCTION

La formulation de BAP est beaucoup plus complexe que celle de béton ordinaire. Pour l'instant, il n'existe pas de méthode générale de formulation pour le BAP. Cependant, plusieurs méthodes de formulation ont été développées dans des pays différents.

III.2. PRINCIPES DE FORMULATION

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

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

La mise au point d'une formule de BAP est beaucoup plus complexe, parce que, d'abord, les constituants sont au nombre minimal de six, contre quatre dans le cas des bétons ordinaires. Ensuite, le cahier des charges d'un BAP comporte plus de clauses, en particulier à l'état frais ; il faut réaliser, en plus de l'essai au cône, l'essai à la boîte en L et l'essai de stabilité au tamis. Enfin, et surtout, les propriétés des BAP sont contradictoires ; un béton riche d'une pâte fluide est très sensible à la ségrégation.

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

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

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

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

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m³.
- La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme du BPE (P18-305), soit en général de 300 à 350 kg/m³. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m³.
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

La formulation se fait par tâtonnement sur la base de ces plages. Certains formulateurs ont certes développés leur propre outil. Ce sont le plus souvent des méthodes dérivées de la méthode Dreux- Gorisse, avec une courbe granulométrique de référence englobant les éléments fins. Ces approches sont intéressantes dans le sens où elles permettent de détecter les classes granulaires manquantes. On ne peut toutefois pas les considérer comme des techniques à proprement parler de composition, car il n'existe pas de courbe de référence universelle (nous le voyons au chapitre suivant : la granulométrie n'est pas suffisante pour décrire un empilement, puisque la forme des grains est un facteur tout aussi essentiel). Ce sont plus des supports qui facilitent la formulation.

Après la conception sur le papier, la formule est vérifiée et optimisée par des essais effectués la plupart du temps directement en centrale à béton. Le nombre d'essais à réaliser dépend de la justesse de la composition initiale. Par ailleurs, le diagnostic d'une mauvaise formule est rendu difficile, en centrale à béton, par les erreurs inhérentes au dispositif de fabrication ; par exemple, la teneur en eau exacte du sable fait parfois défaut. On comprend dès lors le caractère fastidieux que peut prendre la formulation d'un BAP.

Pour la formulation des bétons autoplaçants, le dosage en eau ne s'exprime plus par le rapport E/C mais par le rapport E/L, L étant le liant hydraulique.

$$L = C + kA$$

Où C = dosage en ciment

A = dosage en additions (calcaires en général)

et k = indice (ou coefficient) d'activité hydraulique des additions.

Beaucoup de recherches ont été faites sur l'optimisation et le développement de formulations de béton autoplaçant, l'objectif principal de ces recherches est l'amélioration des performances du béton à l'état frais et durci.

III.3. FORMULATION DU BÉTON AUTOPLAÇANT

Contrairement à la formulation du béton ordinaire, la formulation du béton autoplaçant est relativement complexe. On citera quelques méthodes de formulations de béton autoplaçant rapportées dans la littérature.

III.3.1. Optimisation du mortier

Okamura et Ozawa sont les précurseurs en matière de formulation des BAP. Les caractéristiques requises sont une capacité de déformation élevée de la pâte et du mortier, ainsi qu'une résistance à la ségrégation lors de l'écoulement en milieu confiné. Leur méthode de formulation se base sur les critères suivants [32] :

- Une quantité de gravillons limitée,
- Un rapport eau/poudre faible,
- Utilisation d'un superplastifiant.

Les quantités de gravillons et de sable sont fixées de manière à obtenir facilement les caractéristiques des BAP en n'ajustant que le rapport eau/poudre et le dosage en superplastifiant. Ainsi, la quantité de gravillons est limitée à 50% de leur compacité (qui est le rapport entre le volume de grains sur le volume total du système grains+vides) afin de minimiser les risques de blocage. Il semblerait que ce rapport soit sécuritaire. La quantité de sable est par ailleurs limitée à 40% du volume du mortier. Les propriétés de la pâte (rapport eau/poudre et quantité de superplastifiant) sont ensuite optimisées et caractérisées à l'aide d'essais sur mortiers. Un étalement relatif (Γ_m) est déterminé à l'aide de l'essai au mini-cône et une vitesse d'écoulement relative (R_m) est déterminée par un essai au V-funnel pour mortier :

$$\Gamma_m = \frac{(d^2 - d_0^2)}{d_0^2}$$

$$R_m = \frac{10}{t}$$

d^2 est le diamètre de la galette de mortier, d_0 est le diamètre inférieur du cône, et t est le temps d'écoulement du mortier.

Les auteurs ont montré qu'il existait une relation linéaire entre Γ_m et R_m pour un dosage en superplastifiant donné et quand le rapport eau/poudre varie. Pour formuler un BAP acceptable, il faut obtenir simultanément $\Gamma_m = 5$ et $R_m = 1$.

Edamatsu et al. [33] proposent une méthode pour évaluer les interactions entre le sable ou les poudres du mortier et les gros granulats. Ils montrent qu'en faisant varier les paramètres Γ_m et R_m dans une certaine gamme, le rapport R_{mb}/R_m est constant. R_{mb} est la vitesse d'écoulement relative du béton modèle composé du mortier étudié ainsi que 20% de billes de verre de 10 mm de diamètre. A partir de ce rapport, les auteurs déclarent qu'il est possible d'évaluer les interactions entre les gravillons et les particules du mortier (sable ou poudre).

III.3.2. Optimisation de la quantité de pâte

Van Bui et Montgomery [34] présentent une méthode de formulation basée sur l'optimisation de la quantité de pâte. Ils montrent que :

- il existe une quantité de pâte minimum pour éviter les blocages lors de l'écoulement
- il existe une quantité de pâte minimum pour assurer la maniabilité du mélange.

La quantité de pâte minimum pour éviter les risques de blocage, soit la quantité de granulat maximum est calculée selon l'expression :

$$Vab_{max} = \frac{\rho_g + (\rho_s - \rho_g)Nga}{\sum \frac{Pvg_m \cdot Nga \cdot \rho_s}{Vab_m} + \sum \frac{Pvs_n \cdot (1 - Nga) \cdot \rho_g}{Vab_n}}$$

avec ρ_g masse volumique des gravillons, ρ_s masse volumique du sable, Nga pourcentage de gros gravillons, Pvg_m et Pvg_n rapport entre le volume des gros granulats de classe m (respectivement des granulats fins de classe n) sur le volume total de granulats, Vab_m et Vab_n respectivement les volumes bloqués des granulats de classe m et n .

Ils prennent en compte la distance entre armatures (c) et le diamètre d'une fraction granulaire d , tel que : $Dca = c/d_i$

$$\text{avec } d_i = M_{i-1} + \frac{3}{4}(M_i - M_{i-1})$$

M_i et M_{i-1} sont les dimensions des tamis encadrant la classe granulaire i .

Par ailleurs, la quantité de pâte minimum requise pour obtenir une certaine fluidité est calculée par :

$$Vpd_{\min} = Vt - \frac{Vt - Void}{\left(\frac{Dss_{\min}}{Dav} + 1\right)^3}$$

III.3.3. Optimisation du squelette

Le principe de formulation proposé par de Larrard [35] se base sur le fait que la rhéologie du béton dépend de l'arrangement de son squelette granulaire. L'optimisation de la compacité du béton permet de réduire la teneur en eau à ouvrabilité constante. Les modèles développés permettent d'étudier des mélanges de grande étendue granulaire et ainsi de prendre en compte la contribution des différents constituants des bétons.

Dans un empilement, si tous les grains sont arrangés de manière optimale, la compacité maximale (γ_i) est atteinte (paramètre également appelé compacité virtuelle dont nous ne donnerons pas l'équation ici). Or dans la pratique, un empilement ne peut pas atteindre cette compacité virtuelle. Un paramètre a été calculé afin de rendre compte de la compactabilité des mélanges, c'est à dire la capacité des bétons à se mettre en place dans un moule donné, selon un procédé donné. Il est exprimé selon la forme :

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

avec K'_i indice de serrage de chacune des classes granulaires, y_i est la proportion volumique des grains de diamètre d_i , β_i est la compacité virtuelle des grains de classe i , φ est la compacité réelle du mélange, γ_i est la compacité virtuelle lorsque la classe i est dominante.

En se basant sur ce concept et après validation expérimentale, de Larrard et Ferraris, proposent également des modèles pour décrire le seuil d'écoulement et la viscosité des bétons.

Dans le cas d'un dosage en superplastifiant au dosage à saturation, les expressions obtenues sont les suivantes :

$$\tau_0 = \exp(2.537 + 0.540K'_g + 0.854K'_s + 0.224K'_c)$$

$$\mu = \exp\left(26.75\left(\frac{\varphi}{\varphi^*} - 0.7448\right)\right)$$

Où φ^* est la compacité maximale du mélange et les indices g, s et c correspondent respectivement au granulat, au sable, et au ciment.

Sedran [28] obtient des constantes légèrement différentes donnant une meilleure description des faibles viscosités :

$$\mu = \exp\left(45.88\left(\frac{\varphi}{\varphi^*} - 0.8512\right)\right)$$

Les différentes données sont ensuite insérées dans un logiciel calculant les différentes propriétés du béton. Ce logiciel permet également d'optimiser la formule de béton à partir d'un cahier des charges précis.

La formulation des BAP ne se base pas sur une optimisation du squelette granulaire, mais sur l'optimisation d'autres propriétés. De Larrard [35] et Sedran [28] ont ainsi défini un cahier des charges reporté dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : Cahier des charges du béton autoplaçant

critère	Paramètre	Cahier des charges
Auto-compactibilité	K'	≤ 7
Prévention de la ségrégation des gros grains	K'_c	≥ 3.4
Prévention du blocage des gros grains (ferraillage dense)	K'_g	≤ 1
Prévention de la ségrégation (stabilité générale)	S^*	≤ 0.8
Aptitude à l'auto-nivellement	τ_0	$\leq 500Pa$
Pompabilité	μ	$\leq 200/300Pa.s$
Coût	-	minimum

* $S = \max S_i$, et $S_i = 1 - \frac{\varphi}{\varphi^*}$

III.3.4. Approche suédoise [15]

Cette méthode est basée sur la méthode japonaise (Okamura), le principe est d'intégrer l'approche de l'évaluation du risque de blocage dans le processus de formulation.

Pour chaque rapport G/S on estime le volume de pâte critique pour le blocage, on retiendra ensuite le rapport G /S qui vérifie les propriétés rhéologiques recherchées.

Les dosages des fines, de l'eau et du superplastifiant sont ajustés pour avoir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement, et une résistance souhaitée.

Cette approche permet une meilleure optimisation du squelette granulaire. Cependant, on ne peut pas appliquer le critère de blocage à n'importe quel type de granulats.

III.3.5. Approche de la JSCE [15]

Cette méthode a été proposée par la *Japenese Society of Civil Engineers* en 1998, après plusieurs recherches et applications pratiques.

Pour cette méthode la quantité d'eau, le rapport eau/poudre, et la teneur en poudre, varient en fonction de l'emploi ou non d'un agent de viscosité.

Les quantités de différents constituants sont déterminées comme suit :

- La quantité de gros granulats varie selon l'autocompactibilité recherchée. Elle est située entre 0,30 à 0,32 m³/m³ et le diamètre maximum est limité à 20 mm voir 25 mm.
- Lors de l'utilisation d'un agent de viscosité, la quantité d'eau se situe sous les 180 kg/ m³ dans les conditions d'exposition normales. Cas particulier, lorsque la durabilité du béton n'est pas une contrainte majeure, on peut aller jusqu'à 190 kg/ m³. En l'absence d'agent de viscosité, la quantité d'eau est réduite à 155 jusqu'à 175 kg/ m³.
- Le rapport eau/poudre est basé sur les performances du béton à l'état durci. Lorsque la fluidité n'est pas atteinte on peut augmenter la quantité du liant. Le rapport massique eau / poudre doit être entre 28 et 37%, et le rapport volumique entre 85 et 115 %.
- La quantité de poudre se déduit du rapport eau /poudre. Dans le cas d'un agent de viscosité de type polysaccharide, la quantité de poudre est de 0,13 m³/m³. dans les autres cas la valeur prise doit être entre 0,16 et 0,19 m³/m³.
- Le volume d'air dépend du diamètre maximum des gros granulats, de la résistance souhaitée et des conditions d'exposition du béton. La valeur type s'élève à 4,5% d'air.
- La quantité des fines est déduite des quantités précédentes.
- Le dosage en adjuvant est évalué expérimentalement. Pour le superplastifiant, son dosage dépend du rapport eau/poudre ainsi que de la nature des poudres. Il est généralement de 1 à 2 kg d'extrait sec par m³, pour une solution aqueuse de 35% c'est

l'équivalent de 3 à 6 litres. En ce qui concerne l'agent de viscosité, son dosage varie selon la nature de l'agent, aussi selon le type de béton (avec ou sans ajouts de fines).

III.3.6. Approche du laboratoire central des ponts et chaussées LCPC [15]

Cette approche consiste à développer un modèle mathématique à partir d'un modèle de suspension solide. Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre différents constituants du mélange.

Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire et de prendre en compte l'effet de confinement des armatures sur la compacité du béton et donc sur son ouvrabilité.

La compacité du mélange est déterminée avec une précision inférieure à 1% à partir des caractéristiques des constituants suivants :

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

Ce modèle est utilisé pour prévoir l'évolution de l'ouvrabilité des bétons en fonction de leur composition, il sert aussi à :

- Comprendre et évaluer l'influence des différents constituants sur les propriétés du béton.
- Choisir les matériaux qui permettent d'assurer un béton de bonnes caractéristiques que ce soit à l'état frais (ouvrabilité, stabilité) ou à l'état durci (résistance, retrait, fluage)
- Prendre en compte la spécificité et la nature d'un projet lors de la formulation de béton (béton pompé par exemple).

III.3.6.1. Exigences du cahier des charges

La formulation d'un béton se fait à partir d'un cahier de charges, dans ce cas les critères exigés sont les suivants :

- Étalement : 600 à 700 cm
- Viscosité plastique : supérieure à 100 Pa.s pour éviter la ségrégation et inférieure à 200Pa.s pour un coulage rapide
- Il faut aussi connaître la résistance à la compression souhaitée à 28 jours

L'environnement de bétonnage qui traduit un confinement potentiel, il faut tenir compte de l'effet de paroi (espacement des armatures).

Après le choix des matériaux il est nécessaire de déterminer les caractéristiques suivantes :

- La compatibilité ciment –super plastifiant
- La compatibilité super plastifiant –agent de viscosité
- La nature des additions minérales (fumées de silices, laitiers, fillers calcaire)

III.3.6.2. Détermination des proportions des constituants

- Fixer la proportion de liant a priori
- Détermination du dosage en saturation su super plastifiant
- Détermination du besoin en eau du mélange en présence du SP, cette valeur donne une mesure indirecte de la compacité, valeur nécessaire pour vérifier le modèle de suspension de solide.
- Le calcul est effectué avec un logiciel en tenant en compte du confinement.
- La viscosité est fixée arbitrairement à 5.10^4 Pa.s (valeur correspondant au BAP selon les expériences du LCPC)
- La teneur en eau est réduite en conséquence et la teneur en fillers est maintenue constante.
- Le rapport G / pâte liante est optimisé
- Le béton est élaboré en petites quantités 10 à 15 l et sa teneur en eau est ajustée pour améliorer la résistance.
- Le dosage en SP est aussi ajusté pour obtenir l'étalement souhaité, ceci n'affecte pas la viscosité plastique.

A ce stade le béton vérifie les propriétés rhéologiques imposées par le cahier des charge a savoir la contrainte de cisaillement et la viscosité plastique.

L'évolution du comportement rhéologique doit être étudiée, l'addition d'un ajout chimique peut s'avérer nécessaire.

Pour vérifier la validité d'une formulation celle-ci doit être confrontée à des expérimentations en vraie grandeur pour appréhender les problèmes de ségrégation.

III.3.7. Méthode Rui Ferreira

Cette proposition est basée sur les travaux de Lourenço, qui a établi un organigramme très clair pour l'étude des compositions des bétons ordinaires. En admettant la validité de cet organigramme pour la formulation des BAP, il faudra néanmoins tenir compte du fait que la prévision de la compacité et la quantification de plusieurs constituants nécessiteront l'utilisation de plusieurs méthodes de composition classiques [36].

III.3.8. Méthode basée sur un plan d'expérience

Le nombre de constituants d'un BAP est tel que l'utilisation d'un plan d'expérience est intéressant pour connaître l'effet des paramètres de composition. Khayat et al [37] ont réalisé une telle étude avec les facteurs suivants : le volume de gravillons, la masse de fines (C+A), le rapport massique eau sur fines $E/(C+A)$, la masse de superplastifiant et la masse d'agent de viscosité. Chaque facteur a été varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre de compositions testées à 25. Au final, les auteurs fournissent les modèles obtenus, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs. Ces modèles ne sont exploitables que pour les constituants utilisés dans l'étude. Plus qu'une méthode de formulation, cette approche fournit surtout un support pour corriger une formule ne répondant pas, par exemple aux critères de l'AFGC.

III.4. CONCLUSION

Les bétons autoplaçants sont des bétons relativement nouveaux, leurs formulation est beaucoup plus complexe que celle de béton ordinaire.

Il reste que, pour l'heure, il n'existe pas pour les bétons autoplaçants de méthode de formulation généralisée, comme peut l'être la méthode Dreux-Gorisse pour les bétons ordinaires.

Chapitre IV

Caractérisation du béton autoplaçant

Caractérisation du béton autoplaçant

IV.1. INTRODUCTION

Les connaissances acquises depuis l'apparition des bétons autoplaçants et la meilleure maîtrise de toutes les étapes (formulation, fabrication, mise en œuvre et contrôle) sont suffisantes pour permettre l'utilisation de ces bétons dans de nombreuses applications. Certains points restent cependant à améliorer pour en étendre l'emploi.

A cet effet, des chercheurs ont développés différents types d'essais, sur mortier et sur béton, on citera quelques uns.

IV.2. CARACTÉRISTIQUES RHÉOLOGIQUES FONDAMENTALES DES BAP

La caractérisation du béton à l'état frais peut se faire grâce à l'étude des propriétés rhéologiques fondamentales telles que le seuil de cisaillement ou la viscosité plastique.

La rhéologie donne les relations entre contraintes et déformations d'un élément de volume, en tenant éventuellement compte de leur histoire et des valeurs actuelles de leur dérivée par rapport au temps. Ces relations, dites de comportement, font correspondre les déformations d'un élément de volume aux contraintes qui lui sont imposées.

Le comportement rhéologique d'un matériau (figure IV.1) est dit viscoplastique si son écoulement ne se produit qu'au-delà d'une certaine valeur des contraintes appliquées, appelée seuil de cisaillement, τ_0 .

Le fluide est considéré comme *binghamien* si la courbe d'écoulement est une droite, qui a pour équation : $\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma}$

Avec τ la contrainte de cisaillement (Pa), τ_0 le seuil de cisaillement (Pa), η_p la viscosité plastique (Pa.s⁻¹) et $\dot{\gamma}$ la vitesse de déformation (s⁻¹).

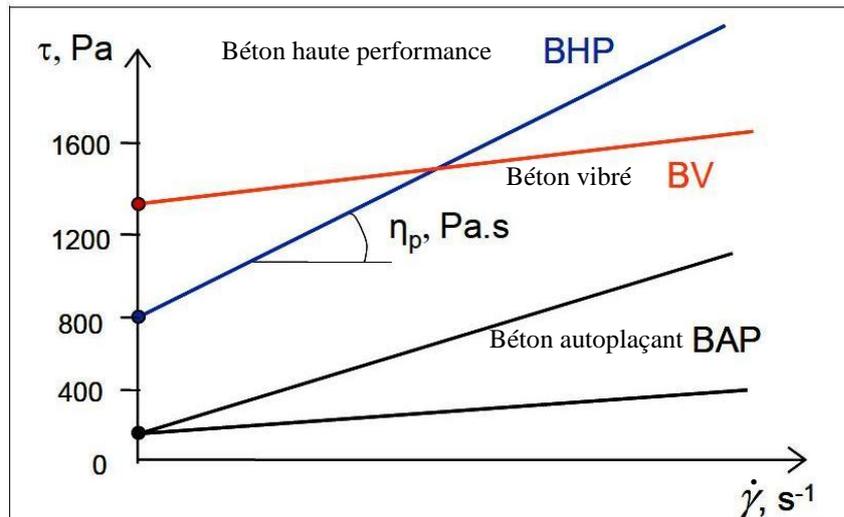


Figure IV.1 : Exemples de comportements rhéologiques pour différents types de béton

En ce qui concerne les bétons autoplaçants, des auteurs [35] ont montré que leur équation de comportement suit le modèle de *Herschel-Bulkley* dont l'équation de comportement est la suivante : $\tau = \tau_0 + a\dot{\gamma}^b$

Où a : paramètre de viscosité

b : paramètre rhéologique.

Toutefois, ce modèle est plus exigeant que celui de Bingham car il nécessite la détermination d'un paramètre supplémentaire.

Ces grandeurs (seuil de cisaillement, viscosité plastique), permettant de définir le comportement d'un béton lors de sa mise en place, sont quantifiables à partir d'appareils appelés rhéomètres. A ce jour, les principaux dispositifs expérimentaux utilisés pour des mesures sur béton frais sont :

- le viscosimètre à plaque parallèle BML,
- le rhéomètre coaxial BTRHÉOM,
- le rhéomètre coaxial CEMAGREF-IMG,
- le rhéomètre coaxial RHÉOCAD (mis au point par la société CAD Instrumentation avec l'aide de M. Vernet, ingénieur au CTG).

Tous ces appareils mesurent le couple résistant du béton en fonction de la vitesse d'écoulement imposée (par mise en rotation de divers mobiles ou palettes). Ces deux données permettent ensuite d'obtenir, par différents calibrages, les grandeurs caractéristiques de l'écoulement du béton, à savoir le seuil de cisaillement et la viscosité plastique.

Cependant, la présence de granulats de tailles variées dans le béton ne permet pas de définir un matériau type pour tous ces rhéomètres qui servirait de référence à toutes les

mesures. Par conséquent, étant donné les caractéristiques inhérentes à chaque rhéomètre, les comparaisons de résultats d'un appareil à l'autre ne sont pas forcément évidentes.

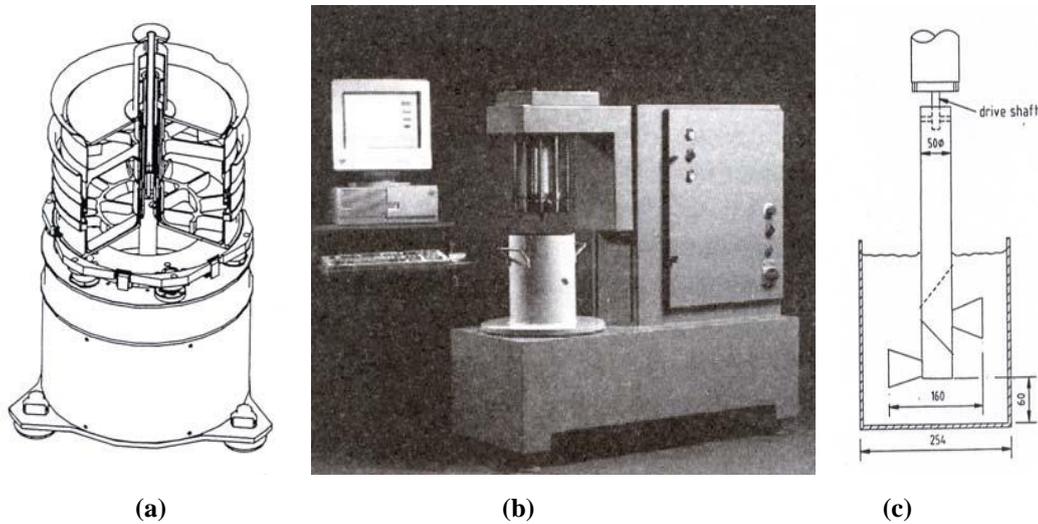


Figure IV.2 : Rhéomètres développés pour les bétons, (a) BTRHEOM, (b) BML, (c) Two-point test

IV.3. ESSAIS DE CARACTÉRISATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS

Des essais de caractérisation spécifiques des BAP ont été mis au point. Cependant, ces essais, que l'on peut qualifier de technologiques, ne permettent pas de déterminer les propriétés rhéologiques intrinsèques des bétons testés même si les grandeurs mesurées en dépendent.

IV.3.1. Essai au cône d'Abrams

L'essai le plus courant, car le plus facile à mettre en œuvre, permettant de caractériser la mobilité en milieu confiné, est l'essai d'étalement réalisé à l'aide du cône d'Abrams (voir figure IV.3) (le cône DIN peut aussi être utilisé). En effet, la valeur de l'étalement, donnée par la mesure du diamètre de la galette de béton, s'avère être plus représentative que celle de l'affaissement.

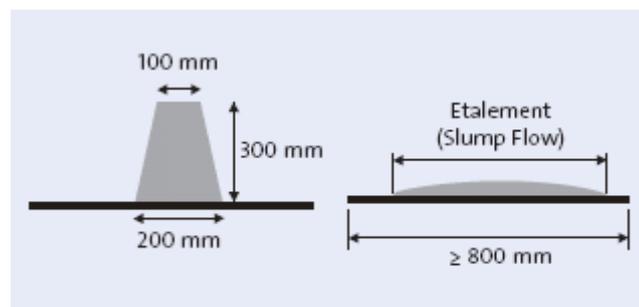


Figure IV.3 : Essai d'étalement

La vitesse d'étalement du béton est également une indication souvent prise en compte (t_{50} par exemple : temps pour atteindre une galette de diamètre 50 cm), t_{50} est un bon indice de coulabilité.

En 2002, les recommandations en terme d'étalement admissible définissaient la fourchette : 600-750 mm. Depuis, différentes classes de BAP ont été désignées en fonction du type d'application). Ainsi, différentes classes d'étalement ont été définies [38] :

- Classe SF1 : étalement compris entre 550 et 650 mm,
- Classe SF2 : étalement compris entre 660 et 750 mm,
- Classe SF3 : étalement compris entre 760 et 850 mm.

IV.3.2. Essai d'étalement modifié (J-Ring)

Cet essai a le même principe que l'essai au cône, sauf que le béton s'écoule au travers de barres d'armatures [38]. Le but est d'évaluer sa tendance au phénomène de blocage.

A cet effet le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique ; sur cet anneau de 300mm de diamètre sont soudées des barres d'armatures de diamètre 16 à 28 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. On déduit que le béton autoplaçant répond pleinement aux exigences recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et que la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau (figure IV.4).

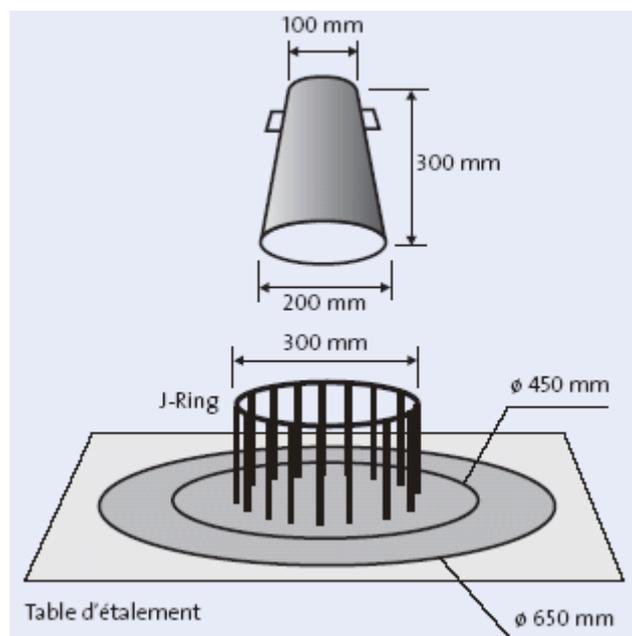


Figure IV.4 : Dispositif de l'essai d'étalement modifié (J-Ring)

IV.3.3. Essai de la boîte en L

Pour caractériser la mobilité en milieu confiné, c'est-à-dire la ségrégation dynamique, aucun essai de référence n'a encore fait l'unanimité, mais tous ont pour objectif d'évaluer la capacité du béton à s'écouler dans une zone confinée. Ils peuvent permettre de déceler des problèmes de blocage (par formation de voûtes des granulats) lors de l'écoulement.

L'essai de la boîte en L (figure IV.5) fait partie de ces essais. La partie verticale du L est remplie de béton en une seule fois. Après ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers un ferrailage standard (39 mm entre 3 barres de diamètre 14mm) qui correspond à des ouvrages très ferrillés mais qui peut être éventuellement allégé (58 mm d'espace libre entre 2 barres) [38].

Pour que le BAP soit accepté, le taux de remplissage de la boîte en L (rapport des hauteurs H_2/H_1 , voir figure IV.5) doit être supérieur à 0,8 [38]. Des temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour apprécier la viscosité du béton.

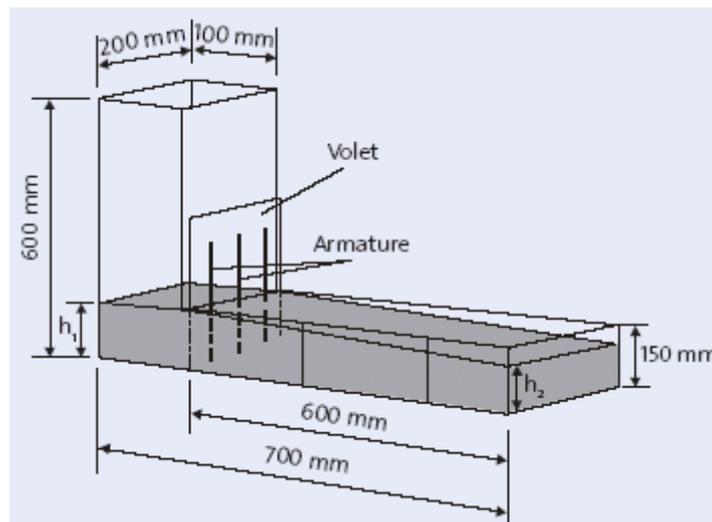


Figure IV.5 : Boîte en L (L-Box)

IV.3.4. Essai de la table de fluidité (par Kasai et coll1991)

Cet essai est semblable à l'essai d'étalement (flow table) ; il consiste à exécuter l'étalement sur un plateau circulaire de 670 mm de diamètre avec un bord élevé de 20 mm. Par une manivelle, on impose des mouvements de montée et descente avec une vitesse de 12,5mm/s.

On mesure le nombre l'amplitude correspondant a l'arrivée du béton au bord du plateau, au contact avec le demi périmètre, et au contact total avec le plateau [15].

IV.3.5. Mesure de la déformabilité, Essai du box (Kasai et coll. 1999)

L'essai du box se fait à l'aide d'une boîte en plexiglas à deux compartiments séparés par une porte coulissante. On verse une quantité de béton dans un des deux compartiments de la boîte et on lève la porte coulissante, le matériau passe alors de son compartiment vers l'autre. Après stabilisation du béton on mesure la dénivellation entre les deux niveaux (compartiments), une faible dénivellation est signe d'une bonne déformabilité [15].

IV.3.6. Essai de l'entonnoir en forme de V (V-funnel)

Le principe de cet essai est de mesurer le temps d'écoulement du béton dans un espace limité (figure IV.6), l'essai permet aussi d'évaluer la stabilité du béton lors de l'écoulement [39].

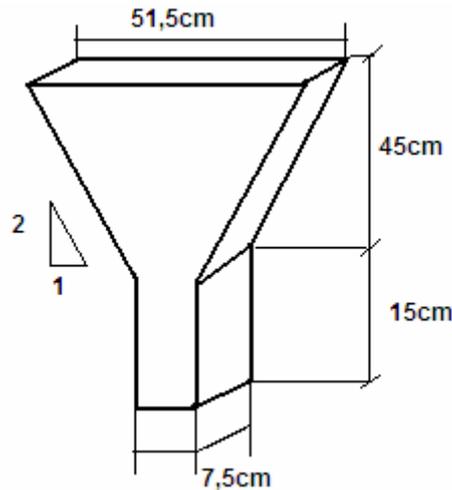


Figure IV.6 : Essai de l'entonnoir en forme de V

Ce dispositif permet en effet de mesurer la vitesse d'écoulement d'un échantillon de 12 litres de béton passant à travers une ouverture étroite. Plus le temps d'écoulement est court, plus la fluidité du béton est importante.

IV.3.7. Essai de tassement

L'essai est effectué sur des colonnes de béton, une plaque circulaire en plexiglas est fixée sur la surface du béton frais et ancrée à l'aide de boulons. On met au contact de la plaque une aiguille de la longueur d'un comparateur de détection de déplacement à grande précision [25].

On note la variation du tassement au cours du temps jusqu'à prise du béton (stabilité).

On calcul alors le tassement relatif (T_R) en divisant la valeur maximale du tassement (T_{max}) par la hauteur de la colonne (H), cette valeur doit être minimale.

$$T_R (\%) = (T_{max} / H) \times 100$$

On peut aussi mesurer l'eau de ressuage externe apparue sur la plaque de plexiglas.

Après durcissement du béton, on peut scier les colonnes verticalement pour avoir une idée sur la résistance à la ségrégation du béton (figure IV.7).

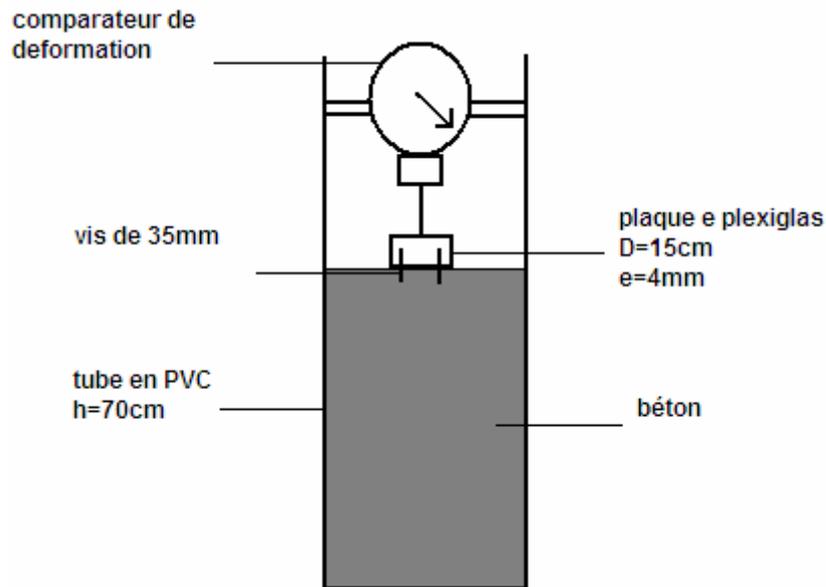


Figure IV.7 : Essai du tassement

IV.3.8. Essai de la stabilité au tamis

L'essai de la stabilité au tamis (figure IV.8) permet de qualifier les bétons autoplaçants vis à vis du risque de ségrégation. Il s'agit de verser 10 litre du béton juste après le malaxage dans un sceau, puis couvrir le sceau pour protéger le béton de la dessiccation et laisser reposer durant 15 mn. Verser 5 kg du béton au centre d'un tamis 5mm, à une hauteur de chute de 50cm, on récupère le béton passant dans un récipient. Après 2mn On mesure le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon passant au travers le tamis.

La mesure du pourcentage de laitance conduit à classer les formules de béton autoplaçant de la façon suivante [38] :

- $0\% \leq P_{\text{laitance}} \leq 15\%$ Stabilité satisfaisante
- $15\% < P_{\text{laitance}} \leq 30\%$ Stabilité critique (essai de ségrégation à réaliser in situ)
- $P_{\text{laitance}} > 30\%$ Stabilité très mauvaise.

Lorsque $0 \leq P_{\text{laitance}} \leq 5\%$, la résistance à la ségrégation est dite « trop importante ». La pâte ou le mortier est trop visqueux pour s'écouler à travers le tamis. Cela peut conduire à une qualité de parements assez mauvaise.

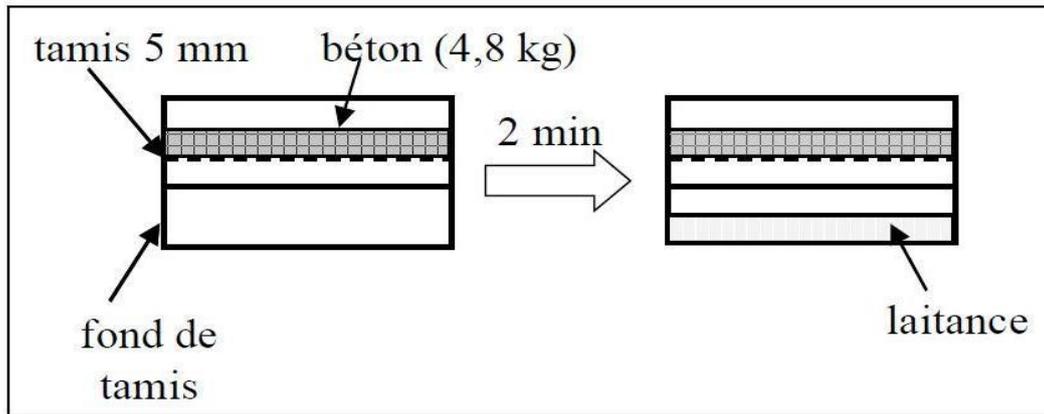


Figure IV.8 : Essai de la stabilité au tamis

IV.3.9. Essai du tube en U

Le tube en U (figure IV.9) est composé de deux parties R1 et R2 séparées par une trappe. L'essai consiste à remplir la partie R1 puis à ouvrir la trappe et laisser le béton s'écouler librement. Après écoulement on mesure la hauteur de remplissage dans la partie R2, celle si doit être supérieure à 30cm pour un BAP [24].

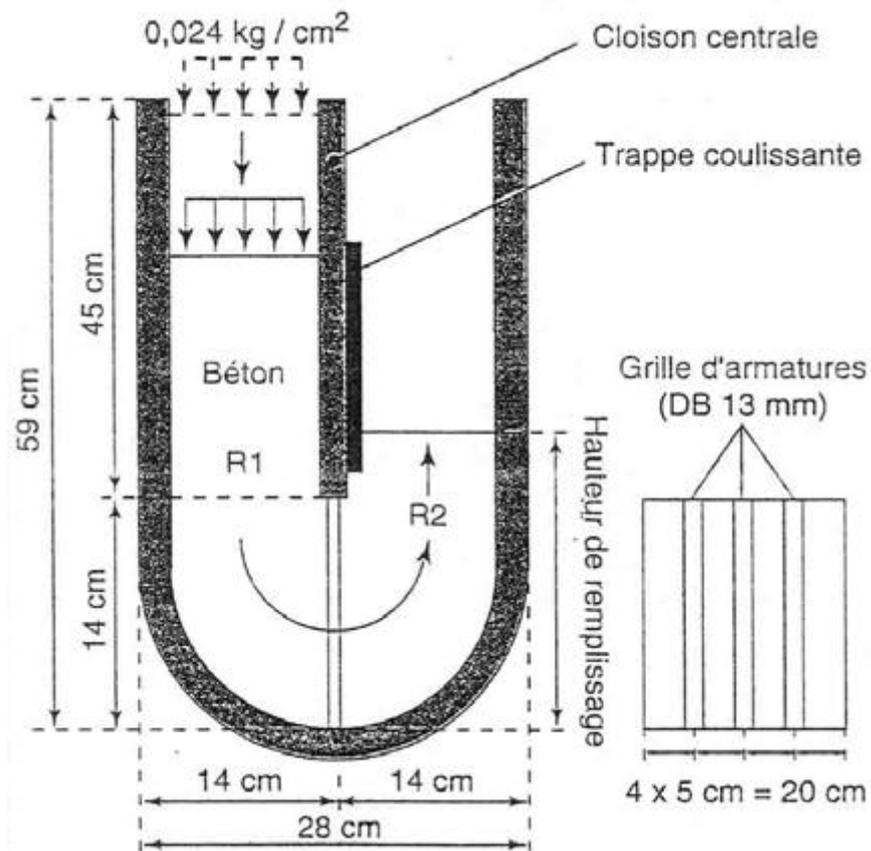


Figure IV.9 : Essai du tube en U

IV.3.10. Essai du caisson

L'essai de la figure IV.10 sert à évaluer l'aptitude au remplissage du béton. La quantité de béton nécessaire pour effectuer l'essai est de l'ordre de 35 litres. Le principe est de remplir la partie X jusqu'à atteindre les 22 cm, on caractérise l'aptitude de remplissage du béton avec le ratio $A / (A+B)$ avec :

A : partie remplie par le béton ;

B : partie non remplie par le béton.

Un béton peut être considéré comme BAP si le rapport est supérieur à 60%. [22]

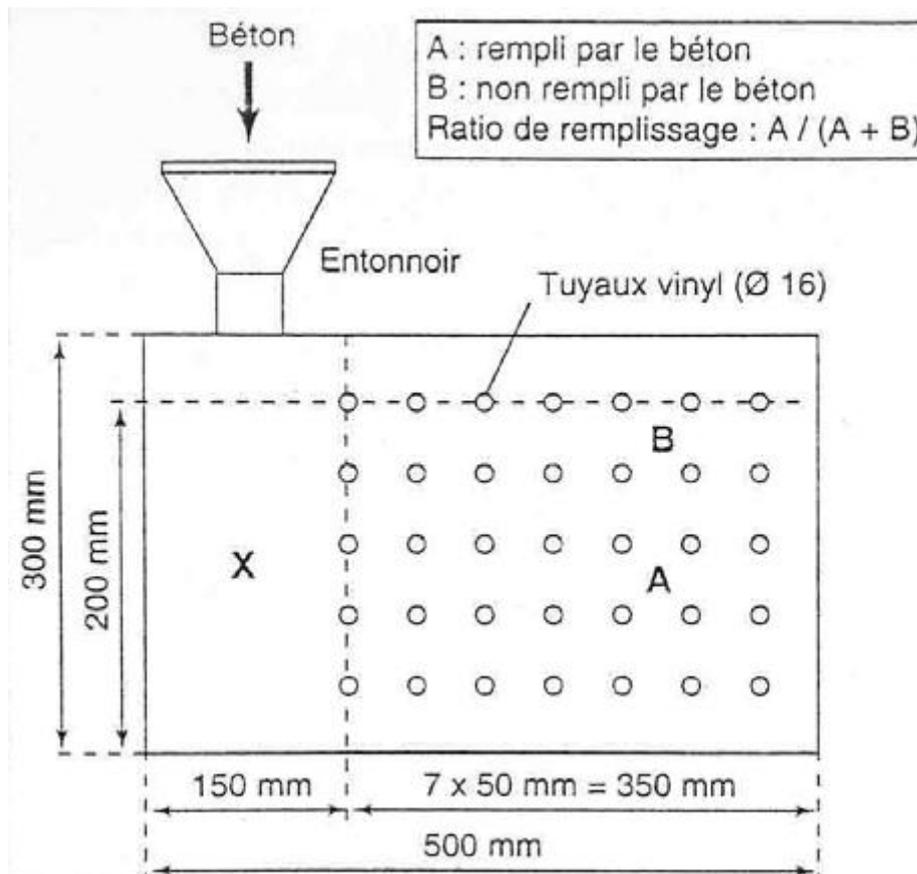


Figure IV.10 : Essai du caisson

IV.3.11. Ressuage

La capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié (développé par le LCPC, figure IV.11) : le volume d'eau libéré par l'échantillon de béton remonte au-dessus du perchloroéthylène (dont la densité est supérieure à celle de l'eau : 1,59) dans une colonne graduée où il est facile de l'estimer [38]. Ce test semble cependant peu pratique à utiliser étant donné la nocivité du produit employé.

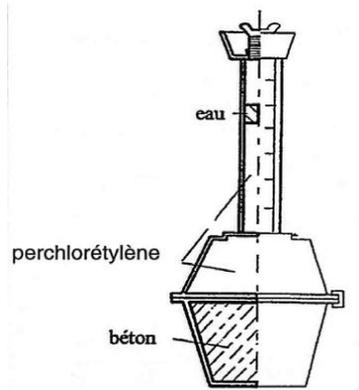


Figure IV.11 : Essai de ressuage à l'aëromètre

IV.3.12. Essai à la colonne

Cet essai à été développé indépendamment par le centre ACM de l'Université de Paisley (en 2002) et par l'Université de Ghent (en 2001).

Il s'agit de remplir la colonne présentée sur figure IV.12 et de laisser le matériau au repos pendant 1 min. Après cette phase de repos, la colonne est vibrée à l'aide d'une table à secousses. Les échantillons des différentes parties de la colonne (haut, milieu, fond) sont prélevés. Chaque prélèvement est lessivé et tamisé afin de ne récupérer que les gros granulats qui sont ensuite pesés.

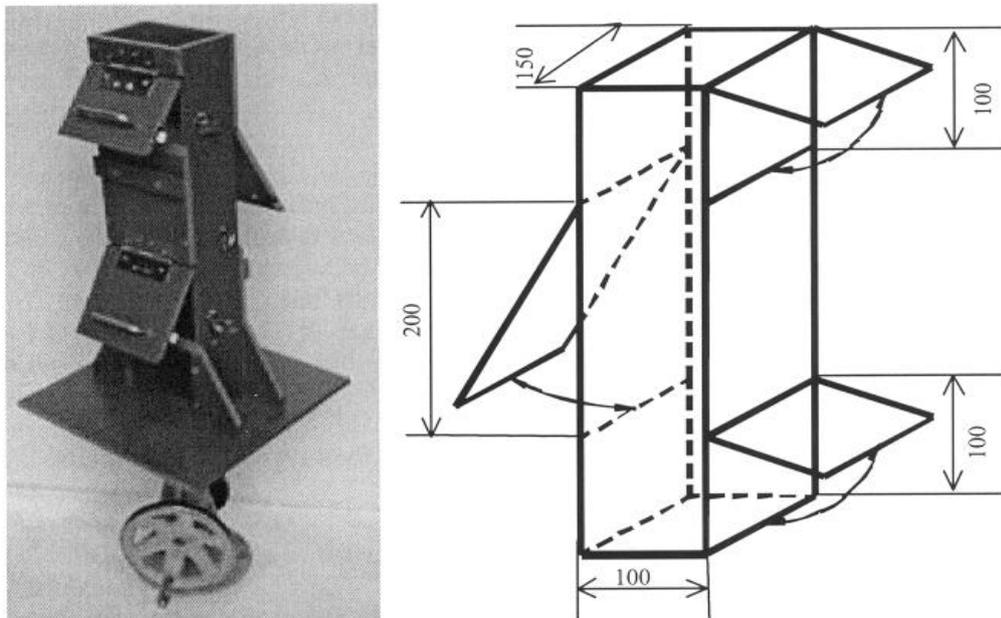


Figure IV.12 : Essai de stabilité à la colonne

Le critère de stabilité de cet essai est le suivant :

- si le rapport entre la masse de l'échantillon supérieur/ masse de l'échantillon inférieur est supérieur à 0,95 alors le béton a une bonne résistance à la ségrégation
- si ce rapport est inférieur à 0,9 il y a un risque de ségrégation du béton.

Cet essai permet d'obtenir une certaine appréciation de la ségrégation (gradation de la ségrégation). Le principe est simple et les résultats sont obtenus directement. Cependant, la réalisation d'un essai nécessite un appareillage spécifique (colonne et balances pour les pesées) et prend du temps. Il est plus adapté à des essais en laboratoire que sur chantier. Par ailleurs, la répétabilité s'amenuise à mesure que le risque de ségrégation augmente [58]. On peut s'interroger sur le sens physique de cet essai et de sa pertinence dans le cas des BAP puisque la vibration accélère les phénomènes de ségrégation.

Chapitre V

Partie
Expérimentale



Partie expérimentale

V.1. INTRODUCTION

L'identification des matériaux entrant dans la composition des bétons est indispensable. La connaissance des caractéristiques physico-chimiques de chaque composant à part, par des analyses et essais normalisés effectués au laboratoire, nous permet de faire l'interprétation des résultats obtenus par les essais sur le mélange de ces matériaux.

V.2. IDENTIFICATION DES MATERIAUX

V.2.1. Granulats

Les carrières de provenance et de prélèvement des granulats utilisés dans cette étude sont :

- Graviers 3/8 et 8/15 carrière Ben Azzouz (Skikda)
- Sables 0/4 : sable carrière Ben Azzouz (Skikda) et sable carrière El Khroub (Constantine).

V.2.2. Ciment

Pour cette étude, le ciment utilisé est un ciment portland composé (CPJ CEM II/A - 42,5) de la cimenterie de Hamma Bouziane (Constantine) obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts. Du sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse en tant que régulateur de prise. C'est un ciment conforme à la norme NA 442 : 2000.

V.2.3. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la confection de béton est une eau de puits utilisée par le laboratoire.

V.2.4. Essais sur granulats

V.2.4.1. *Échantillonnage des matériaux*

Le but principal de l'échantillonnage est de conduire au prélèvement d'une fraction représentative de tout le matériau envoyé au laboratoire pour effectuer les essais.

L'opération d'échantillonnage peut se faire par quartage ou à l'aide d'un diviseur (échantillonneur).

V.2.4.2. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de classer, et de définir d'après la grosseur des grains qui les composent, les différents matériaux employés dans la construction.

Pour effectuer ce classement, on se sert d'une série de tamis et de passoires, par définition, un tamis comporte des mailles carrées constituées par des fils qui se croisent, et une passoire comporte des trous ronds, pratiqués dans une tôle.

Les résultats de l'analyse granulométriques sont représentés dans la courbe granulométrique.

L'essai est effectué conformément à la norme française P 18-560 [40].

Les analyses granulométriques et les courbes granulométriques établies pour chaque fraction sont représentées dans les tableaux et figures suivants.

Tableau V.1: Analyse granulométrique des graviers

Gravier 8/15		Gravier 3/8	
Tamis (mm)	Tamisat (%)	Tamis (mm)	Tamisat (%)
20	100	10	100
16	97,66	8	97,53
12,5	70,75	6,3	88,29
10	25,13	5	54,82
8	7,66	3,15	12,47
6,3	0,61	2	3,65
5	0,28	1,25	1,94
4	0,24	1	0,76

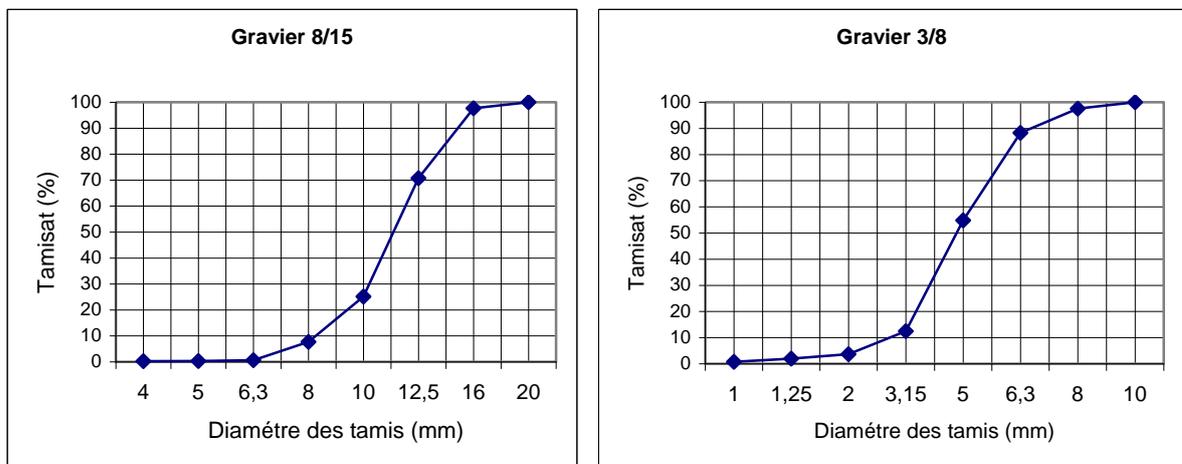


Figure V.1: Courbes granulométriques des graviers

Tableau V.2: Analyse granulométrique des sables

Sable Ben Azzouz		Sable El Khroub	
Tamis (mm)	Tamisat (%)	Tamis (mm)	Tamisat (%)
8	100	8	100
6,3	100	6,3	100
5	98,43	5	100
4	94,36	4	96,43
2	72,43	2	81,61
1	63,86	1	77,14
0,5	50,14	0,5	62,04
0,4	46,71	0,4	53,75
0,315	41,29	0,315	38,28
0,25	34,58	0,25	30,65
0,125	20,14	0,125	24,57
0,08	17,48	0,08	19,83
0,063	15,67	0,063	18,16

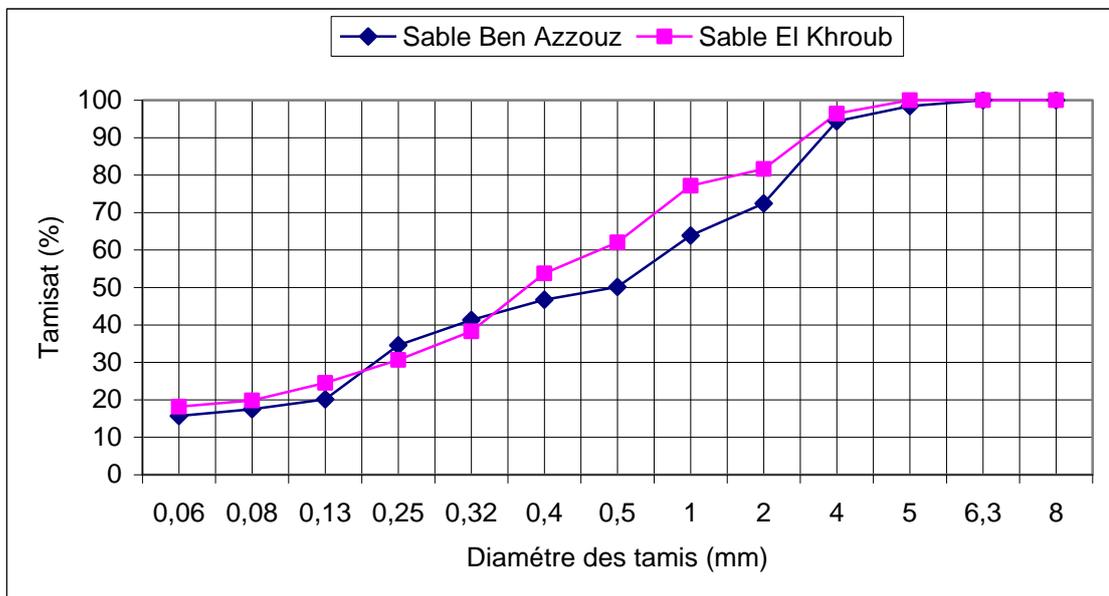


Figure V.2: Courbes granulométriques des sables

D'après l'analyse granulométrique des deux sables on constate directement que le pourcentage des fines inférieurs à $63\mu\text{m}$ est élevé (15,67% pour le sable de Ben Azzouz et 18,16% pour le sable d'El Khroub).

V.2.4.3. Masses volumiques (absolue et apparente)

La masse volumique apparente ou densité apparente est la masse du matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides.

La masse volumique absolue ou densité absolue est la masse par unité de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

Elles sont déterminées selon les méthodes classiques, respectivement masse d'un certain volume de matériau et éprouvette graduée (ou bien le pycnomètre) [41,42].

Le tableau V.3 représente les valeurs des densités pour les différentes fractions des granulats.

Tableau V.3: Densité apparente et absolue des granulats

Granulats	Gravier 8/15	Gravier 3/8	Sable Ben Azzouz	Sable El Khroub
Masse volumique apparente kg/m³	1335	1342	1548	1523
Masse volumique absolue kg/m³	2520	2530	2600	2580

V.2.4.4. Propreté superficielle

La propreté superficielle est définie comme étant le pourcentage pondéral de particules inférieures à 0,5 mm mélangées ou adhérentes à la surface des granulats supérieures à 2 mm. Ces particules sont séparées par lavage sur le tamis correspondant.

Selon la norme NFP 18-591 [43] le pourcentage des impuretés ne doit pas dépasser 2%.

Les résultats de l'essai effectué sur gravier sont présentés dans le tableau V.4.

Tableau V.4: Propreté superficielle des granulats

Granulats	Gravier 8/15	Gravier 3/8	Spécifications
Propreté superficielle (%)	0,5	0,6	≤ 2 %

V.2.4.5. Coefficient d'absorption

Cet essai est effectué conformément à la norme française P 18-555 [41]. Pour cela, un échantillon de granulat est plongé dans l'eau pendant 24 heures à 20°C et à la pression atmosphérique normale. A l'issue des 24 heures, on effectue sa pesée. Puis on calcule l'augmentation de masse par rapport à sa masse sèche. Enfin on obtient le coefficient d'absorption d'eau en effectuant le rapport de l'augmentation de masse à la masse sèche initiale. Le tableau V.5 résume le résultat obtenu.

Tableau V.5: Coefficient d'absorption des granulats

Granulats	Gravier 8/15	Gravier 3/8	Sable Ben Azzouz	Sable El Khroub
Coefficient d'absorption (%)	0,83	1,15	2,46	1,44

V.2.4.6. Coefficient d'aplatissement

La détermination du coefficient d'aplatissement est l'un des tests permettant de caractériser la forme plus au moins massive des granulats dont le pourcentage pondéral des éléments vérifier la relation : $G/E > 1.58$ (la grosseur excède 1.58 fois l'épaisseur).

Le coefficient s'obtient, en utilisant successivement, et pour le même échantillon de granulats :

- Une série de tamis normalisés à mailles carrées
- Une série de tamis à fentes de largeur normalisée

Tableau V.6: Coefficient d'aplatissement

Granulats	Gravier 8/15	Gravier 3/8	Spécifications
Coefficient d'aplatissement A %	20,66	25,42	A < 30%

V.2.4.7. Essai Los Angeles (Résistance à la fragmentation)

L'essai consiste à estimer la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques. Il est réalisé sur les classes granulaires 4/6,3 – 6,3/10 et 10/14.

On place 5 kg de granulats et des boules en acier (7 à 11 de 420 g) dans un tombeur muni d'une plaque intérieure suivant la génératrice.

Après un nombre normalisé de tours (500 tours à 33 tours/mn), on récupère le passant P au tamis 1,6 mm.

Le coefficient Los Angeles est : $LA = 100 P / 5000$

Le coefficient Los Angeles est d'autant plus élevé que le granulat est moins bon, la valeur spécifier par les normes est 40 % [44].

Tableau V.7: Résistance à la fragmentation (LA)

Granulats	Gravier 8/15	Gravier 3/8	Spécifications
Coefficient Los Angeles LA (%)	25,76	27,35	LA < 15 Très bon à bon 15 ≤ LA < 20 Bon à moyen 20 ≤ LA < 30 Moyen à faible LA ≥ 30 Médiocre

V.2.4.8. Essai d'usure Micro-Deval

L'essai Micro-Deval consiste à estimer la résistance à la fragmentation par choc et à l'usure au contact par l'eau. Il est réalisé sur les mêmes classes granulaires utilisées pour Los Angeles. On place 500 g de granulats avec une charge abrasive de 2 à 5 kg d'acier de 10 mm de diamètre. Le cylindre tourne à 100 tours/mn pendant 2 heures, on récupère le passant P au tamis 1,6 mm puis séchage à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante.

Le coefficient Micro-Deval est : $MDE = 100 P / 500$

Selon la norme NF P18-572 le MDE ne doit pas dépassé 35 % [45].

Tableau V.8: Résistance à l'usure (MDE)

Granulats	Gravier 8/15	Gravier 3/8	Spécifications
Micro-Deval MDE (%)	18,42	19,13	MDE < 13 Très bon à bon 13 ≤ MDE < 20 Bon à moyen 20 ≤ MDE < 25 Moyen à faible MDE ≥ 25 Médiocre

V.2.4.9. Module de finesse

C'est un coefficient qui sert à caractériser la grosseur d'un sable pour béton. Un sable grossier est représenté par un coefficient élevé $2,8 < M_f < 3,2$ un sable fin par un coefficient plus faible $1,8 < M_f < 2,2$ et un sable moyen par $2,2 < M_f < 2,8$ qui est préférentiel pour la confection des bétons.

La valeur du module de finesse dépend surtout de la teneur en grains fins du sable.

Le module de finesse d'un sable est égal au centième de la somme des refus cumulés, exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante : 4 – 2 – 1 – 0,5 – 0,25 – 0,125 mm.

Le tableau V.9 présente les résultats obtenus

Tableau V.9: Module de finesse des sables

Granulats	Sable Ben Azzouz	Sable El Khroub
Module de finesse M_f	2,64	2,27

V.2.4.10. Équivalent de sable

L'essai d'équivalent de sable, permet de mesurer la propreté de sable entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les particules fines d'un poids défini de sable par une solution flocculante.

On laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, après agitation (90 cycles de secouage en 30 s) on mesure une hauteur (H_1) qui correspond au sédiment et (H_2) au sédiment + flocculat [46].

L'équivalent de sable est donné par : $ES = (H_1 / H_2) * 100$

Si le pourcentage de filler est inférieur ou égale à 10%, on exécute directement l'essai d'équivalent de sable de manière classique.

Si le pourcentage de filler est supérieur à 10%, on procède à une augmentation de la fraction sableuse 0,063/ 2mm, afin de ramener la teneur en filler du sable à 10%.

Tableau V.10: Équivalent de sable (ES)

Granulats	Sable Ben Azzouz	Sable El Khroub	Spécifications
ESV	74,52%	79,62%	70 à 80% pour un sable roulé
ESP	63,19%	68,34%	> 65% pour un sable concassé

V.2.4.11. Essai au bleu de méthylène

Cet essai, utilisé de manière courante pour caractériser l'activité des argiles contenues dans les sols, est également utilisé pour évaluer l'influence des fines d'origines argileuses contenues dans les sables et graves d'origine naturelle ou artificielle.

Il rend compte ainsi de l'activité de surface des argiles, des matières organiques ainsi que des hydroxydes de fer contenus dans les fines. Cet essai est un test performant pour quantifier de manière sûre et simple la propreté des granulats.

A nature de fines donnée, plus la teneur en fines sera importante plus la valeur du bleu sera forte. A teneur en fines donnée, plus les fines seront 'actives' plus la valeur de bleu sera également forte.

Les valeurs de bleu au méthylène sont données par le tableau ci-dessous :

Tableau V.11: Bleu de méthylène des sables

Sable Ben Azzouz	Sable El Khroub	Spécifications
1,16	0,89	VBm \leq 1

Le sable de Ben Azzouz possède un VBm qui dépasse les spécifications de la norme ; cette valeur se traduit par la présence d'une quantité importante de fines argileuses dans le sable.

V.2.5. Caractéristiques du superplastifiant

Les caractéristiques des ajouts utilisés ont été données dans la fiche technique fournie par l'entreprise GRANITEX [47].

Le super plastifiant utilisé est un haut réducteur d'eau commercialisé par l'entreprise GRANITEX sous le nom de MEDAFLOW 30. Conçu à base de poly carboxylates, cet adjuvant n'a aucun effet retardateur.

V.2.6. Fines calcaires

Pour le béton ordinaire, on a utilisé les fines calcaires récupérées après lavage du sable concassé.

Pour le béton autoplçant, on a utilisé les fillers calcaires commercialisées par l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG) sous le nom de ALCAL F50 du gisement El Khroub qui est constitué de calcaire d'origine biochimique nérotique caractérisé par une grande pureté chimique et une blancheur élevée [48].

L'analyse granulométrique et les caractéristiques physiques et chimiques des fines calcaires (ALCAL F50) sont résumées dans la figure V.3 et le tableau V.12.

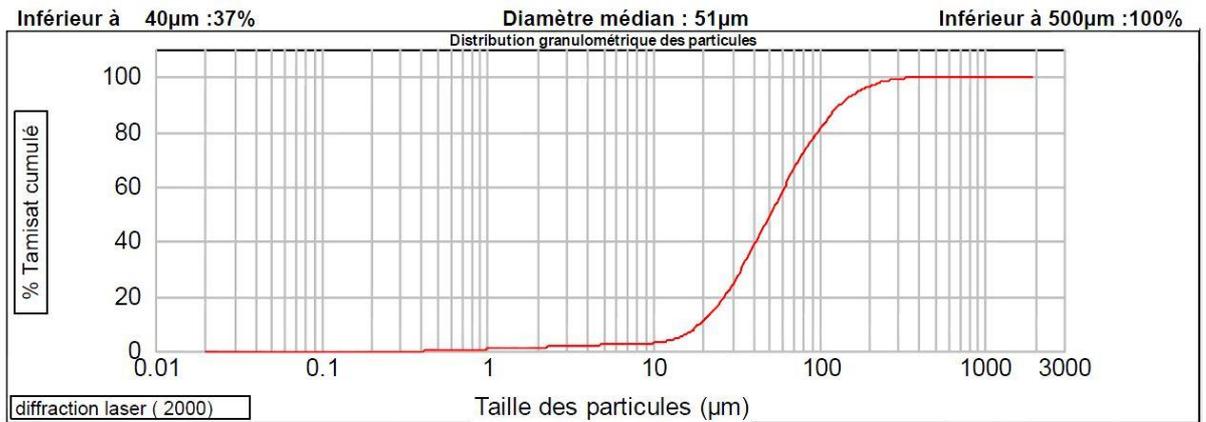


Figure V.3: Analyse granulométrique des fillers calcaires (ALCAL F50)

Tableau V.12 : Caractéristiques physiques et chimiques de l'ALCAL F 50

Caractéristiques physiques		Analyse chimique	
Dureté (MOHS)	3	CaCO ₃	98 +/-1
Poids spécifique	2,7	CaO	55,5% - 56,33 %
Densité apparente non tassée	1,31gr/cm ³	SiO ₂	0,04% - 0,06%
Indice de réfraction	1,71	Na ₂ O	0,05% - 14%
Blancheur (CR310 MINOLTA)	L:91,69 a+1,18 b+5,86	MgO	0,38% - 0,57%
		Al ₂ O ₃	0,03% - 0,08%
		Fe ₂ O ₃	0,025% - 0,03%
		Perte au feu	43%
		Ph	09

V.3. ELABORATION DU BETON ORDINAIRE

V.3.1. Formulation du béton ordinaire (Méthode de Faury)

La formulation d'un béton consiste à sélectionner de bons constituants, puis à optimiser leurs proportions afin d'obtenir un mélange possédant deux qualités essentielles à savoir : la résistance et l'ouvrabilité. Or ces deux qualités sont étroitement liées l'une à l'autre mais varient en sens inverse.

Nous avons choisi pour notre étude la méthode de composition proposée par Faury [49], ceci pour deux raisons principales :

- Cette méthode est applicable à tous les granulats, quelle que soit leur masse volumique,

- Elle est basé sur la loi de continuité des courbes granulométriques, donc lorsqu'on substitue un pourcentage de granulats naturels par un même pourcentage de granulat appartenant à la même fraction, on préserve au maximum possible l'allure et la continuité de ces courbes (avant substitution).

La courbe de référence est composée de deux segments de droites, tracés en joignant trois points :

- Premier point (D_{\max} , 100%)
- Deuxième point ($D_{\max}/2$, Y)
- Troisième point (0,0065, 0)

V.3.1.1. Calcul de Y

Y est l'ordonnée du point d'intersection des deux segments de droites de la courbe de référence. Sa valeur est donnée par la formule suivante qui tient compte de la nature des granulats et de la consistance désirée et même de la puissance de vibration et des dimensions du coffrage.

On a :

$$Y = A + 17 (D_{\max})^{1/5} + B/(R/D - 0,75)$$

Avec :

A : coefficient qui dépend de la nature des granulats et de la consistance visée du béton.

D_{\max} : dimension maximale du granulat du béton.

B : coefficient dépendant de la puissance de serrage.

On prend pour un serrage moyen (béton mou) $B = 1,5$ et pour un serrage énergétique (béton ferme) $B = 1,0$.

R : rayon moyen du moule.

En masse indéfinie, la relation devient :

$$Y = A + 17 (D_{\max})^{1/5}$$

Pour une consistance molle et des granulats concassés, on prend $A = 34$.

On aura alors : $Y = 64,95$

**COURBE GRANULOMETRIQUE
Selon M..FAURY**

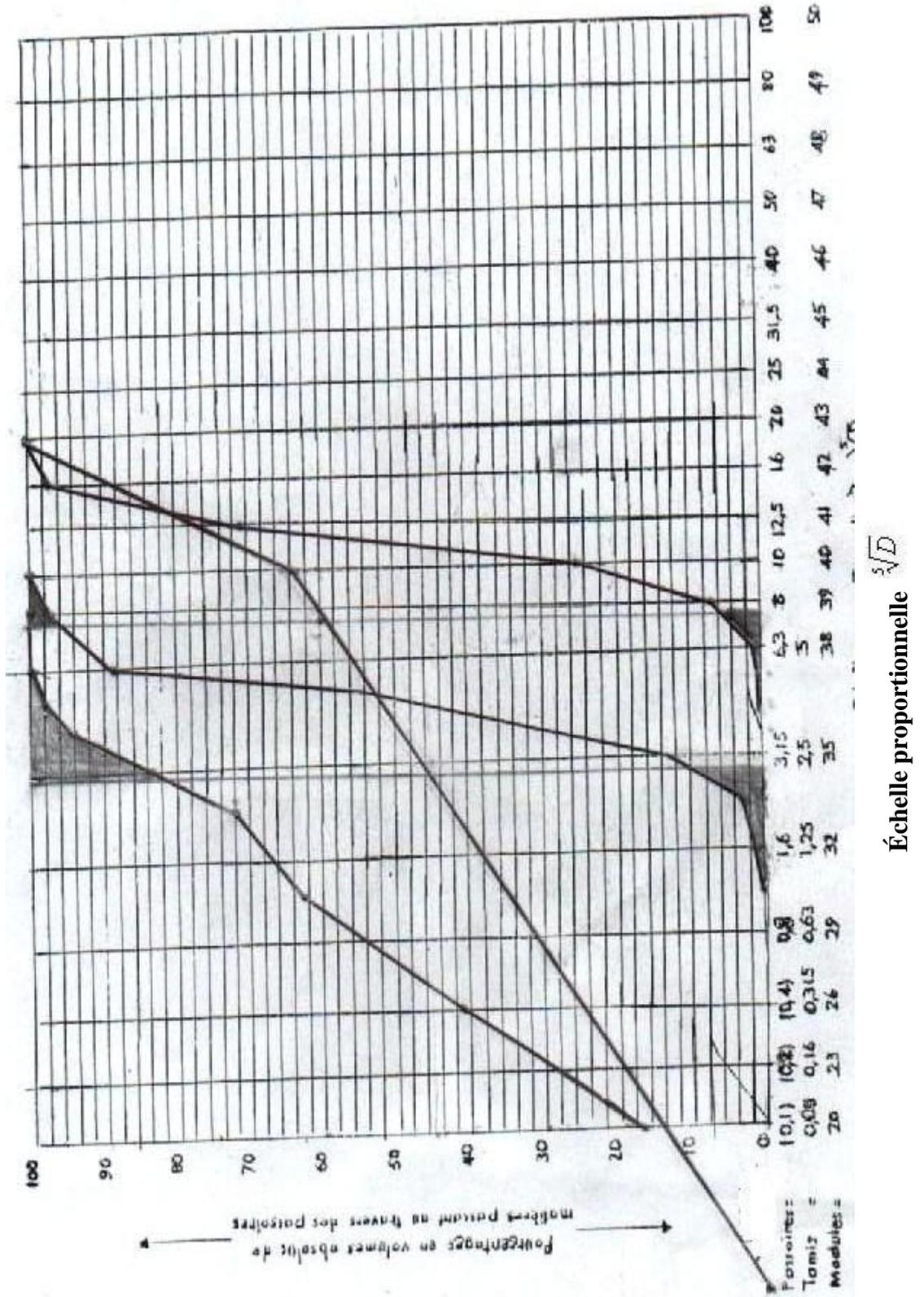


Figure V.4 : Courbe de référence FAURY (sable Ben Azzouz)

COURBE GRANULOMETRIQUE
Selon M..FAURY

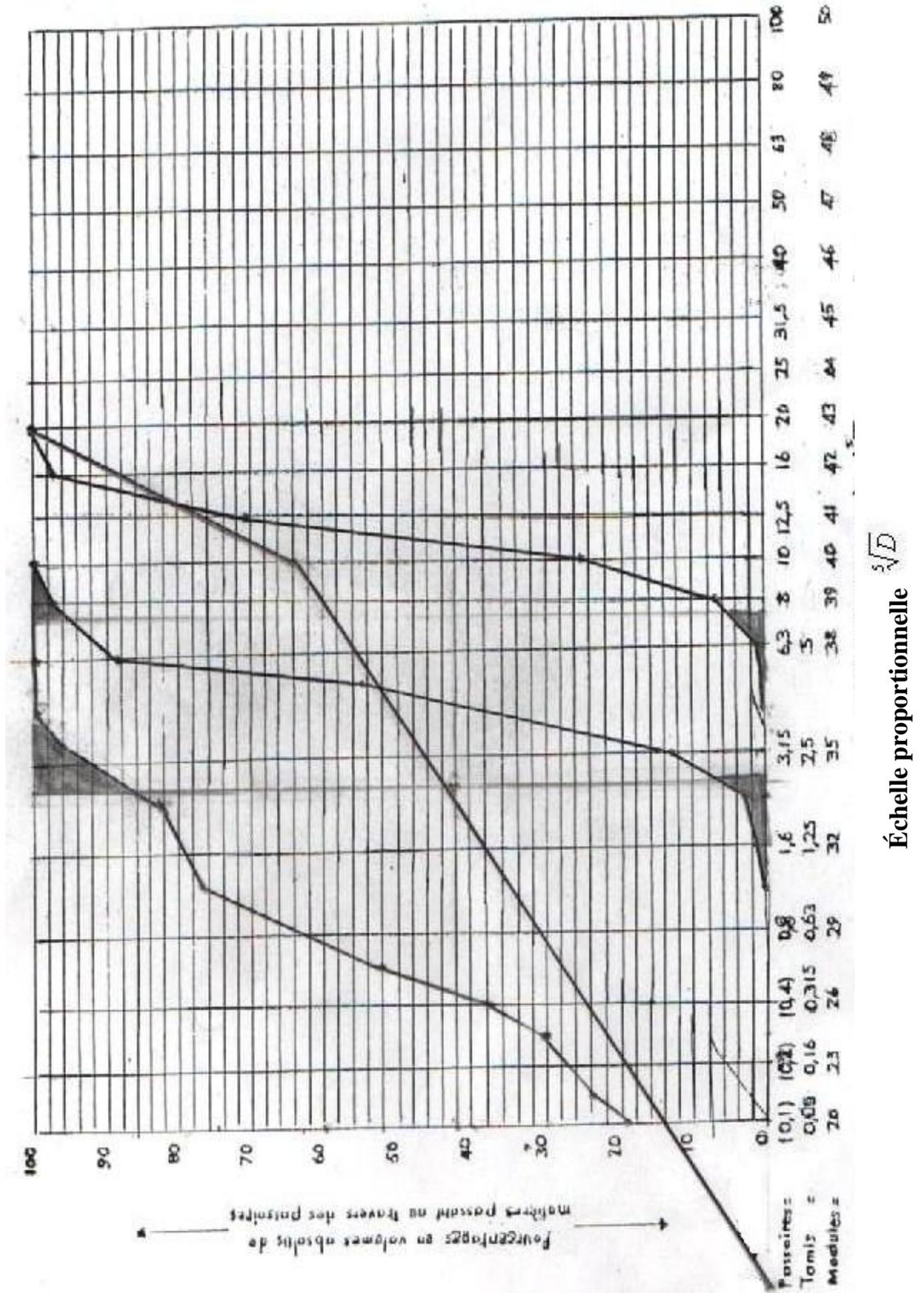


Figure V.5 : Courbe de référence FAURY (sable El Khroub)

V.3.1.2. Détermination des pourcentages des granulats

Les pourcentages des constituants du béton (sauf l'eau) sont déterminés en volumes absolus par la détermination graphique de Joisel. On trace des droites parallèles à l'axe des ordonnées de manière à obtenir des surfaces égales de part et d'autre des extrémités des courbes granulométriques (Figure V.4 et figure V.5). Les points d'intersection des droites avec la courbe optimale ont pour ordonnées x et y avec :

x % : pourcentage en volume absolu de sable + ciment.

$(y - x)$ % : pourcentage en volume absolu de gravillons.

y % : pourcentage en volume absolu de gravier.

Les résultats sont dans le tableau V.13 :

Tableau V.13: Pourcentage des différentes fractions suivant la méthode de Faury

Fraction	Formulation Sable Ben Azzouz	Formulation Sable El Khroub
Sable + ciment	45 %	42 %
Gravier 3/8	15 %	18 %
Gravier 8/15	40 %	40 %

V.3.1.3. Calcul de la quantité d'eau de gâchage

La quantité d'eau de gâchage dans un mètre cube de béton est donnée par la formule :

$$1.2 I \leq E \leq 1.3 I \quad \text{avec} \quad I = \frac{1000 k}{\sqrt[5]{D_{\max}}} + \frac{1000 k'}{\frac{R}{D} - 0.75} \quad (I)$$

I : volume des vides

k : fonction de la nature des granulats et des moyens de serrage du béton $k = 0,350$.

$$E = 1.25 \times \frac{1000 \times 0.350}{\sqrt[5]{20}} = 240.31 l$$

V.3.1.4. Calcul des proportions des granulats

Nous avons : $V_C + V_S + V_g + V_G = 1 - E$

V_C, V_S, V_g et V_G sont les volumes absolus respectifs des composants du béton.

$$V_c + V_s = \frac{x}{100} \times (1 - E)$$

$$\text{avec } V_c = \frac{C}{\rho_c}$$

$$V_s = \frac{x}{100} \times (1 - E) - V_c$$

$$V_g = \frac{y - x}{100} \times (1 - E)$$

$$V_G = \frac{100 - y}{100} \times (1 - E)$$

Les tableaux V.14 et V.15 suivants résument le calcul des proportions de chaque constituant du béton.

Tableau V.14: Composition du béton ordinaire (Sable Ben Azzouz)

Composant	Volume des composants (l)	Densité	Composants (kg)
Gravier 8/15	303,87	2,52	765,75
Gravier 3/8	113,95	2,53	288,29
Sable Ben Azzouz	228,86	2,6	595,04
Ciment	113	3,10	350
Eau	240,31	1	240,31

Tableau V.15: Composition du béton ordinaire (Sable El Kroub)

Composant	Volume des composants (l)	Densité	Composants (kg)
Gravier 8/15	303,87	2,52	765,75
Gravier 3/8	136,74	2,53	345,95
Sable El Khroub	206,06	2,58	531,63
Ciment	113	3,10	350
Eau	240,31	1	240,31

V.3.2. Formulation avec Adjuvant

Pour améliorer les performances de nos bétons, et dans le but d'augmenter le pourcentage de fines contenues dans le sable, nous avons ajouté dans nos compositions un adjuvant de la famille des superplastifiants pour les bétons confectionnés avec 15, 20 et 25% de fines calcaires.

V.4. ELABORATION DU BÉTON AUTOPLAÇANT

Contrairement à la formulation du béton ordinaire témoin, pour la formulation du béton autoplaçant nous n'avons pas suivi une formulation classique.

Nous avons respecté les conditions nécessaires permettant de garantir l'autoplaçabilité tout en se basant sur des compositions proposées dans la littérature spécialisée [25].

Il s'agit de choisir les proportions des constituants pour un mètre cube de béton en ayant comme données les paramètres suivants :

- Un rapport G/S = 1.
- Un rapport E/C relativement faible.
- Un dosage en ciment plutôt élevé.
- Un pourcentage déterminé en ajouts (superplastifiant, fines calcaires, ou encore les deux).

Pour pouvoir comparer les performances des différents bétons indépendamment de l'action du ciment, on a fixé le dosage de ce dernier à 500 kg/m^3 pour tous les bétons testés.

V.4.1. Formulation du BAP sans fillers calcaires

Les bétons autoplaçants élaborés sans ajouts minéraux sont :

- ✓ Un BBP 1 (Sable Ben Azouz) sans ajouts minéraux avec un dosage en superplastifiant de 1% C, avec E/C = 0,5.
- ✓ Un BBP 2 (Sable Ben Azzouz) sans ajouts minéraux avec un dosage en superplastifiant de 1,5 %C, avec E/C = 0,5.
- ✓ Un BKP 1 (Sable El Khroub) sans ajouts minéraux avec un dosage en superplastifiant de 1% C, avec E/C = 0,5.
- ✓ Un BKP 2 (Sable El Khroub) sans ajouts minéraux avec un dosage en superplastifiant de 1,5 % C, avec E/C = 0,5.

Pour calculer les proportions des constituants pour un mètre cube, on fixe les rapports suivants :

- G/S =1 pour augmenter la quantité de sable, celle-ci permet d'assurer une meilleure stabilité et une quantité suffisante de mortier.
- Le rapport E/C = 0,5, le dosage en ciment étant constant.
- Le volume d'air occlus (A) est de l'ordre de 5%.

Dans 1m^3 de béton, on a les constituants suivants :

$$G + S + C + E + A = 1000 \text{ l}$$

Avec :

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

$$E/C = 0,5 \text{ avec } C = 500 \text{ kg /m}^3 \text{ On a donc } E = 250 \text{ l/m}^3$$

$$\text{On obtient alors } G + S = 1000 - 5 - 161,29 - 250 = 583,71 \text{ l}$$

Le rapport étant fixé à : $G/S = 1$

On peut calculer les volumes G et S :

$$G = S = 291,85 \text{ l/m}^3$$

Pour les deux fractions du gravier on a choisi d'utiliser 50% de 8/15 et 50% du 3/8.

On obtient les formulations suivantes pour les deux types de sables (tableau V.16 et V.17).

Le dosage en superplastifiant a été varié (1% C et 1,5% C).

Tableau V.16: Composition des bétons autoplaçants BBP 1 et BBP 2

Composant	Composant l/m ³	Densité	Composant kg/m ³
Gravier 8/15	145,92	2,52	367,71
Gravier 3/8	145,92	2,53	369,18
Sable (Ben Azzouz)	291,85	2,6	758,81
Ciment	162,29	3,1	500
Adjuvant (1%C)	4,67	1,07	5
Adjuvant (1,5%C)	7,01	1,07	7,5

Tableau V.17: Composition de béton autoplaçants BKP 1 et BKP 2

Composant	Composant l/m ³	Densité	Composant kg/m ³
Gravier 8/15	145,92	2,52	367,71
Gravier 3/8	145,92	2,53	369,18
Sable (El Khroub)	291,85	2,58	752,97
Ciment	162,29	3,1	500
Adjuvant (1%C)	4,67	1,07	5
Adjuvant (1,5%C)	7,01	1,07	7,5

V.4.2. Formulation du BAP avec les fillers calcaires

Pour la formulation avec les ajouts minéraux (fines calcaires) les bétons autoplaçants élaborés sont :

- Un BBF 1 (Sable Ben Azzouz) avec un ajout minéral (fines calcaires 5%C). Le dosage en superplastifiant est de 1%C, et $E/C = 0,4$.
- Un BBF 2 (Sable Ben Azzouz) avec un ajout minéral (fines calcaires 10%C). Le dosage en superplastifiant est de 1%C, et $E/C = 0,4$.
- Un BBF 3 (Sable Ben Azzouz) avec un ajout minéral (fines calcaires 15%C). Le dosage en superplastifiant est de 1%C, et $E/C = 0,4$.

- Un BBF 4 (Sable Ben Azzouz) avec un ajout minéral (fines calcaires 20%C). Le dosage en superplastifiant est de 1% C, et $E/C = 0,4$.
- Un BKF 1 (Sable El Khroub) avec un ajout minéral (fines calcaires 5%C). Le dosage en superplastifiant est de 1% C, et $E/C = 0,4$.
- Un BKF 2 (Sable El Khroub) avec un ajout minéral (fines calcaires 10%C). Le dosage en superplastifiant est de 1% C, et $E/C = 0,4$.
- Un BKF 3 (Sable El Khroub) avec un ajout minéral (fines calcaires 15%C). Le dosage en superplastifiant est de 1% C, et $E/C = 0,4$.
- Un BKF 4 (Sable El Khroub) avec un ajout minéral (fines calcaires 20%C). Le dosage en superplastifiant est de 1% C, et $E/C = 0,4$.

Pour formuler un BAP avec un ajout minéral, on utilise la même formulation que pour un BAP sans ajout minéral (fillers calcaires FC), mais vue l'importance de la quantité de l'ajout dans le mélange (quantité non négligeable), la présence de cet ajout est prise en compte dans le calcul des constituants.

Si on prend un dosage en fines calcaires (FC) de 5% C (poids du ciment) on a :

$$FC = 5\% \quad C = 25 \text{ kg /m}^3 = (25 / 2,7) \text{ l/m}^3 = 9,26 \text{ l/m}^3$$

Les constituants présents dans le mélange sont :

$$G + S + C + E + A + FC = 1000 \text{ l}$$

Avec:

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

$$E/C = 0,4 \text{ et } C = 500 \text{ kg /m}^3 = (500/3,1) \text{ l/m}^3 = 161,29 \text{ l/m}^3$$

$$\text{On a donc } E = 200 \text{ l/m}^3$$

On peut calculer les proportions des graviers et du sable :

$$G+S = 1000 - (5 + 161,29 + 200 + 9,26) = 624,45 \text{ l}$$

Avec $G/S = 1$

$$\text{On a donc : } G = S = 312,22 \text{ l/m}^3$$

Pour les deux fractions du gravier on a choisi d'utiliser 50% de 8/15 et 50% du 3/8.

Le dosage en superplastifiant est fixé à 1% du poids du ciment.

On obtient les formulations suivantes pour les deux types de sables (tableau V.18et V.19).

Tableau V.18 : Composition des BAP avec les fines calcaires

Composition (Kg/m ³)	Désignation des bétons autoplaçants							
	Sable Ben Azzouz				Sable El Khroub			
	BBF 1	BBF 2	BBF 3	BBF 4	BKF 1	BKF 2	BKF 3	BKF 4
Ciment	500	500	500	500	500	500	500	500
Fines calcaires	25	50	75	100	25	50	75	100
Sable	811,77	799,37	787,70	775,68	805,52	793,58	781,64	769,72
Gravier 3/8	394,95	389,08	383,24	377,40	394,95	389,08	383,24	377,40
Gravier 8/15	393,39	387,55	381,73	375,91	393,39	387,55	381,73	375,91
Eau	200	200	200	200	200	200	200	200
Adjuvant (%)	1	1	1	1	1	1	1	1

V.5. FABRICATION DES EPROUVETTES POUR ESSAIS

La préparation du malaxage (béton) se fait comme suit :

- Placer le sable, le ciment, les fines et les graviers dans le malaxeur.
- Malaxer à sec pendant 5 minutes.
- Ajouter l'eau d'une façon uniforme. Continuer le malaxage pendant 5 minutes.
- Directement après malaxage, on passe aux essais sur béton frais, puis on remplit les moules à raison de deux couches ; la vibration du béton a été effectuée à l'aide d'une aiguille vibrante.
- Enfin, araser et lisser la surface du béton à l'aide d'une truelle.

Après le gâchage pour un béton ordinaire ou pour un BAP, les moules sont conservés dans une pièce à température ambiante, et démoulés après 24h. Une fois démoulées, pour assurer un bon mûrissement du béton, les éprouvettes sont conservées dans un bac d'eau à une température de 20°C, ceci permet d'éviter les pertes d'eau, et de garantir le déroulement normal du processus d'hydratation du ciment.

Les éprouvettes utilisées dans notre étude sont des éprouvettes prismatiques de dimension (7×7×28) cm pour l'essai de traction par flexion et des éprouvettes cubiques de 20 cm de côté pour l'essai de compression simple.

V.6. ESSAIS MÉCANIQUES

V.6.1. Essai de compression

L'essai s'effectue sur machine à compression conformément à la norme NF P 18-406 [50]. La résistance à la compression est déduite par la moyenne d'écrasement de trois éprouvettes cubiques de 20 cm de côté pour chaque pourcentage et pour chaque âge.

La résistance à la compression correspond à la contrainte maximale est :

$$\sigma_c = \frac{P}{a^2} \text{ (MPa)}$$

P : la charge de rupture,

a : le côté de l'éprouvette cubique,

σ_c : Résistance à la compression.

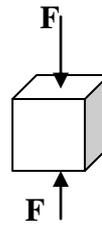


Figure V.6 : Essai de compression

V.6.2. Essai de traction par flexion

La résistance à la traction est mesurée par la méthode de traction par flexion conformément à la norme NF P 18-407 [51]. L'essai s'effectue sur une machine automatique de flexion, sollicitant l'écrasement d'éprouvette prismatique (7×7×28) cm à une flexion directe à raison de trois éprouvettes pour chaque pourcentage et pour chaque âge.

La résistance à la traction par flexion se calcule par la formule : $\sigma_T = 1,8 \frac{P}{a^2}$ (MPa)

P : la charge de rupture,

a : le côté de l'éprouvette prismatique ($a \cdot a \cdot 4a$).

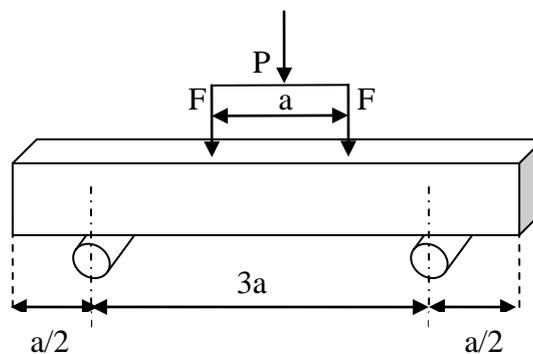


Figure V.7 : Essai de traction par flexion

V.7. CONCLUSION

Les essais effectués sur les granulats ont confirmé la bonne qualité de ces derniers, et leur conformité à l'élaboration du béton ordinaire et du béton autoplaçant.

L'objectif du prochain chapitre est d'exposer les résultats des essais relatifs au béton ordinaire et béton autoplaçant (frais et durci), suivis de quelques discussions et interprétations.

Chapitre VI

Résultats et Interprétations

Résultats et interprétations

VI.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, qui se compose de deux parties, nous allons présenter les différents résultats expérimentaux des essais effectués sur le béton ordinaire et le béton autoplaçant.

Dans la première partie on va voir l'influence des fines calcaires contenues dans le sable de concassage sur les caractéristiques mécaniques du béton ordinaire.

La deuxième partie concerne le béton autoplaçant, on essaye de déterminer l'influence des ajouts minéraux (fillers calcaires) sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques du béton autoplaçant.

VI.2. BÉTON ORDINAIRE

Les sables de concassage, du fait du taux de fines élevé qu'ils renferment, auront naturellement pour effet d'accroître la quantité d'eau de gâchage. Leur présence devrait donc, conduire à un accroissement du rapport E/C à maniabilité égale, entraînant inévitablement une baisse des performances des bétons [5].

L'objectif de cette première partie est d'étudier la possibilité de composer des bétons ordinaires de caractéristiques satisfaisantes à base de sable de concassage (Sable Ben Azzouz, Sable El Khroub).

Dans une étude de bétons, le nombre de paramètres qui peuvent être examinés est toujours très élevé. Dans le cas présent, le principal paramètre est la teneur en fines du sable de concassage qu'on fait varier de 0 à 30% par palier de 5% pour chaque composition.

Pour voir l'influence de l'ajout d'un superplastifiant, d'autres bétons ont été confectionnés à des teneurs en fines de 15, 20 et 25% en ajoutant 1 et 2% de superplastifiant (MEDAFLOW 30).

Les caractéristiques étudiées sont :

- Le rapport E/C,
- Les résistances mécaniques à la compression et à la traction,
- L'influence du superplastifiant.

VI.2.1. Formulation sans adjuvant

Dans la formulation du béton ordinaire sans adjuvant, on cherche à déterminer le pourcentage optimal de fines calcaires présentes dans le sable de concassage, et de voir leur influence sur les caractéristiques mécaniques du béton.

VI.2.1.1. Affaissement au cône d'Abrams

L'ensemble des bétons mis en œuvre ont été confectionnés à ouvrabilité constante avec un affaissement au cône ≈ 10 cm en faisant varier le rapport E/C. Les résultats obtenus sont représentés sur le tableau et la figure 4.

Tableau VI.1 : Rapport E/C en fonction des fines

% fines	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
Sable Ben Azzouz	0,61	0,68	0,80	0,91	0,99	1,21	1,30
Sable El khroub	0,58	0,62	0,70	0,75	0,81	0,92	0,96

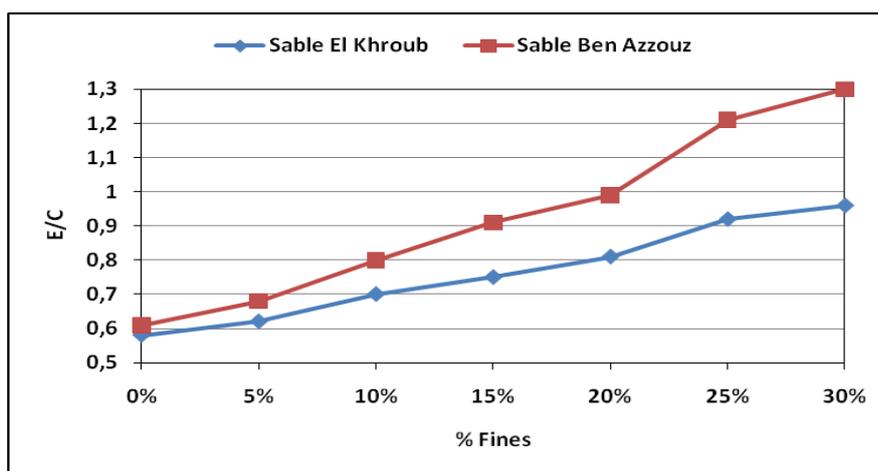


Figure VI.1: Variation du rapport E/C en fonction des fines

Nous remarquons que le rapport E/C augmente avec le pourcentage des fines, il est lié à la présence des fines calcaires et leur pouvoir absorbant. Le rapport E/C du sable ben Azzouz est plus grand que celui d'El Khroub et cela est dû aux fines argileuses contenues dans le sable de Ben Azzouz ($VBm = 1,16$).

VI.2.1.2. Résistance à la compression

Cet essai est effectué sur des éprouvettes de 20 cm de côté. Nous avons choisi trois âges d'écrasement ; 7, 28 et 90 jours pour toutes les compositions, le but est de suivre l'évolution de la résistance à la compression du béton et le comportement du béton contenant différents pourcentages de fines.

Les résultats de la résistance à la compression, pour les deux sables utilisés sont représentés dans les tableaux et graphes suivants.

Tableau VI.2 : Résistance à la compression du béton ordinaire (Sable Ben Azzouz)

Sable Ben Azzouz	Résistance à la compression (MPa)		
	7 jours	28 jours	90 jours
% fines			
0%	18,75	24,31	25,33
5%	20,14	25,86	26,86
10%	20,36	26,83	28,64
15%	15,79	24,82	26,76
20%	13,56	20,65	22,09
25%	12,38	17,69	19,20
30%	11,43	15,57	16,43

Tableau VI.3 : Résistance à la compression du béton ordinaire (Sable El Khroub)

Sable El Khroub	Résistance à la compression (MPa)		
	7 jours	28 jours	90 jours
% fines			
0%	17,29	26,56	27,84
5%	17,60	27,68	29,21
10%	18,25	28,12	30,20
15%	19,32	29,60	30,85
20%	15,62	24,65	26,43
25%	13,70	21,69	23,96
30%	12,86	19,57	20,74

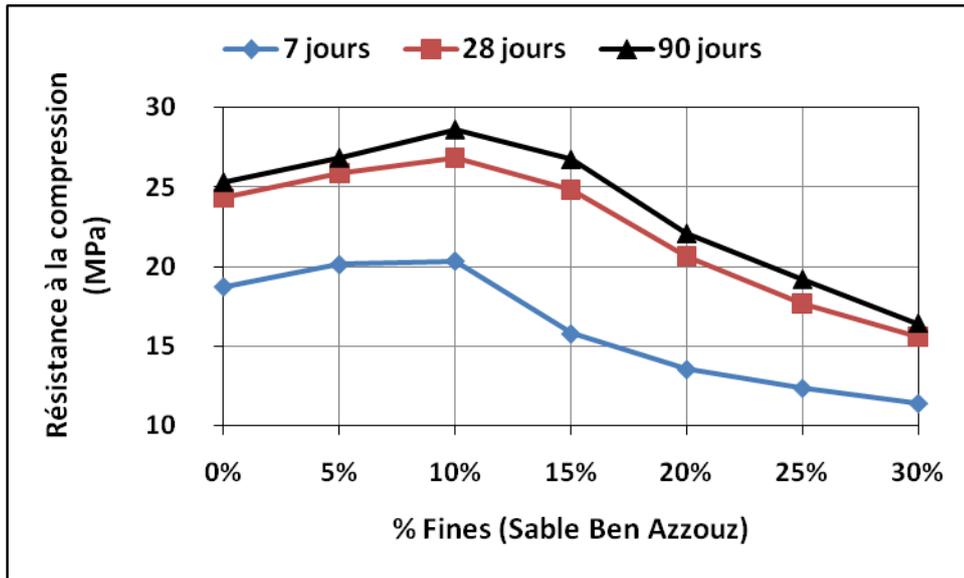


Figure VI.2 : Variation de la résistance à la compression du béton ordinaire en fonction des fines (sable Ben Azzouz)

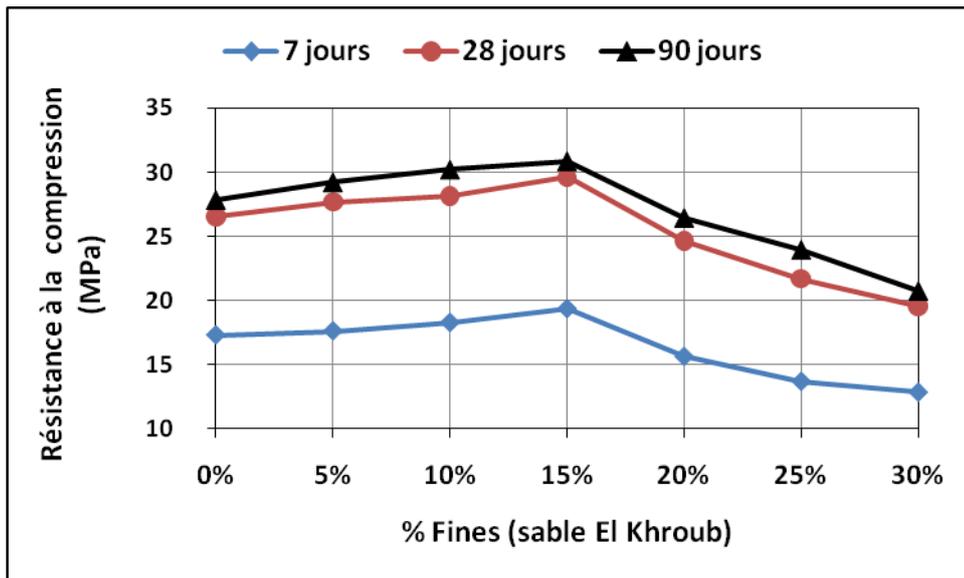


Figure VI.3 : Variation de la résistance à la compression du béton ordinaire en fonction des fines (sable El Khroub)

D'après les graphes ci-dessus (figure VI.2 et VI.3) on remarque que la résistance à la compression des bétons augmente légèrement avec l'augmentation du pourcentage de fines incorporées dans la composition du béton et cela pour les deux types de sable jusqu'à atteindre un optimum qui est de 10% de fines pour le sable de Ben Azzouz et 15% de fines pour le sable d'El Khroub. Au delà de ces deux valeurs on remarque une diminution sensible de la résistance à la compression.

La présence de fines en faible quantité, n'affecte pas la résistance à la compression du béton du fait de l'amélioration de sa compacité, mais l'excès en fines fait chuter sensiblement la résistance due au pouvoir absorbant des fines.

Nous remarquons aussi que la résistance à la compression à 90 jours s'évolue de la même manière que la résistance à 28 jours et que les résistances à la compression à 90 jours sont améliorées de 10% par rapport aux résistances obtenus à 28 jours.

Pour les deux sables utilisés nous pouvons dégager donc deux seuils d'utilisation (incorporation) de proportion en fines qui sont de 10% pour le sable de Ben Azzouz et de 15% pour le sable d'El Khroub.

VI.2.1.3. Résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction par flexion est mesurée sur des éprouvettes prismatiques (7×7×28) cm. Cet essai a été réalisé à 7, 28 et 90 jours pour tous les pourcentages de fines introduit dans la formulation des bétons.

L'objectif de l'essai étant de suivre l'évolution de la résistance du béton à la traction par flexion en fonction de l'âge et des pourcentages des fines.

Les résultats obtenus sont résumés dans les tableaux et figures suivants :

Tableau VI.4 : Résistance à la traction (Sable Ben Azzouz)

Sable Ben Azzouz % fines	Résistance à la traction (MPa)		
	7 jours	28 jours	90 jours
0%	2,72	3,29	3,69
5%	2,86	3,32	3,71
10%	2,93	3,54	3,87
15%	2,49	3,43	3,78
20%	1,92	2,38	3,2
25%	1,77	1,96	2,34
30%	1,33	1,82	2,48

Tableau VI.5 : Résistance à la traction (Sable Ben Azzouz)

Sable El Khroub % fines	Résistance à la traction (MPa)		
	7 jours	28 jours	90 jours
0%	2,16	3,49	4,14
5%	2,38	3,52	4,19
10%	2,72	3,6	4,22
15%	2,94	3,77	4,38
20%	2,08	3,33	3,92
25%	1,69	2,89	3,12
30%	1,48	2,42	2,69

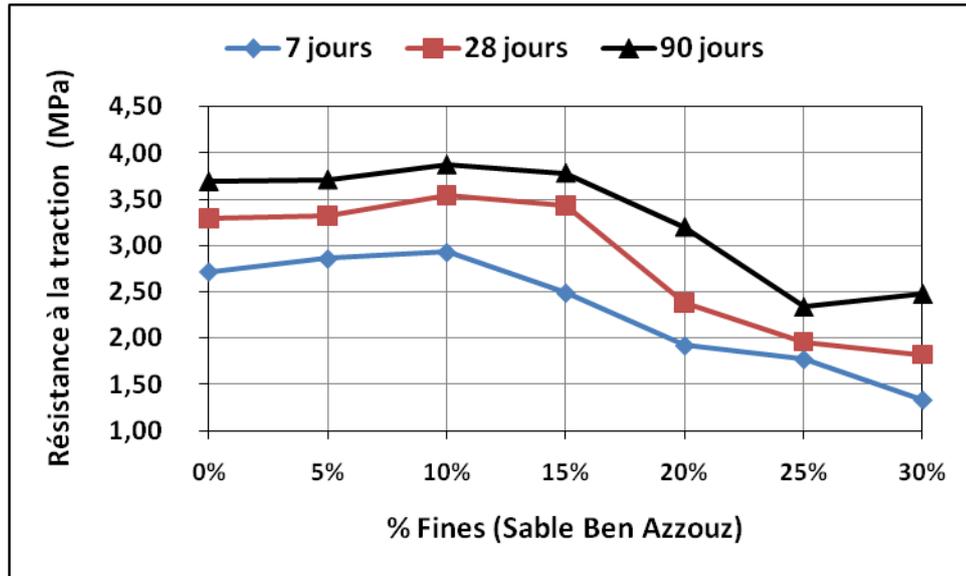


Figure VI.4 : Variation de la résistance à la traction en fonction des fines (sable Ben Azzouz)

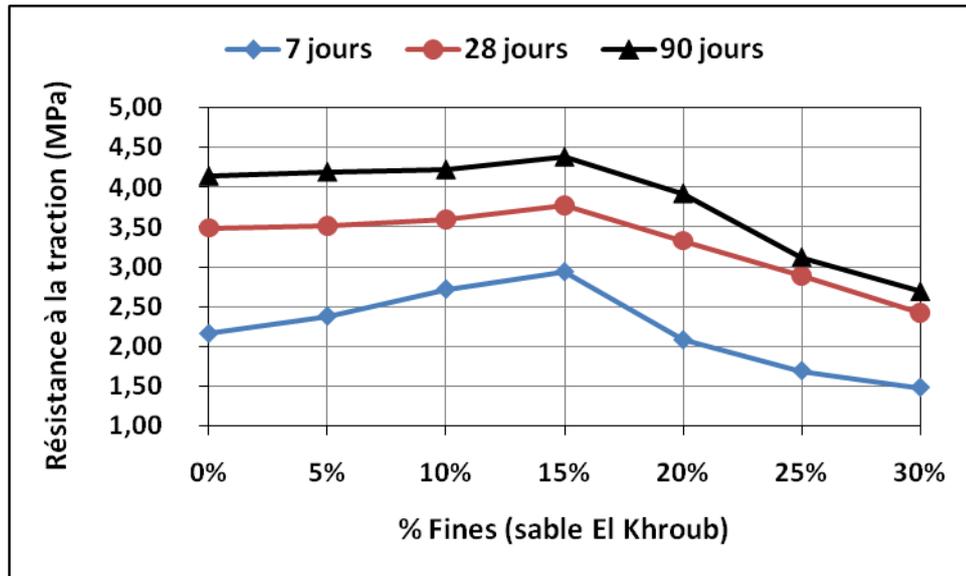


Figure VI.5 : Variation de la résistance à la traction en fonction des fines (sable El Khroub)

Une corrélation presque parfaite est observée entre les résultats de résistance à la compression et ceux obtenus par les essais de résistance à la traction par flexion (figures VI.4 et VI.5).

Les mêmes commentaires cités plus haut peuvent être relatés ici.

VI.2.2. Formulation avec adjuvant

Pour améliorer les performances de nos bétons, et dans le but d'augmenter le pourcentage de fines contenues dans le sable, nous avons ajouté dans nos compositions un adjuvant de la

famille des superplastifiants pour les bétons confectionnés avec 15, 20 et 25% de fines calcaires.

Les résultats obtenus en compression et en traction pour les deux sables à 28 jours sont représentés dans le tableau VI.6.

Tableau VI.6 : *Variation des résistances mécaniques en fonction du pourcentage d'adjuvant*

Sable Ben Azzouz						
Fines (%)	15			20		
Adjuvant (%)	0	1	2	0	1	2
Résistance à la compression (MPa)	24,82	27,53	29,77	20,65	23,77	24,64
Résistance à la traction par flexion (MPa)	3,43	3,81	4,35	2,38	2,71	3,63
Sable El Khroub						
Fines (%)	20			25		
Adjuvant (%)	0	1	2	0	1	2
Résistance à la compression (MPa)	24,65	29,21	31,18	21,69	25,43	27,20
Résistance à la traction par flexion (MPa)	3,33	4,06	5,42	2,89	3,46	4,35

Les résultats obtenus en compression et en traction pour un dosage de 2% d'adjuvant sont nettement supérieurs à ceux obtenus pour un dosage de 1% d'adjuvant.

L'introduction du superplastifiant avec un dosage de 2% du poids du ciment dans la formulation du béton permet une réduction de la quantité d'eau et une augmentation des performances mécaniques du béton.

A titre d'exemple, pour le béton à base de sable en provenance de la carrière Ben Azzouz on notera une augmentation de l'ordre de 7,52% pour la résistance à la compression et 12,41% pour la résistance à la traction par rapport à la formulation avec un dosage de 1% d'adjuvant.

On notera, aussi, que même les résistances mécaniques obtenues pour un ajout de 20% et 25% de fines sont satisfaisantes (par rapport au témoin).

D'après les résultats satisfaisants obtenus par la formulation avec adjuvant, l'optimum de fines est décalé de 10% à 15% (voir même 20%) pour le sable de Ben Azzouz et de 15% à 20% (voir même 25%) pour le sable d'El Khroub.

VI.2.3. Conclusion

L'analyse des résultats obtenus montre que la présence des fines calcaires en faible quantité dans le sable de concassage améliore les résistances mécaniques du béton, mais un excès peut avoir un effet inverse sur les caractéristiques mécaniques du béton.

L'utilisation du superplastifiant dans la formulation du béton ordinaire peut contribuer à l'amélioration des résistances mécaniques du béton.

On peut dire que le taux de fines admissible est de 15% pour le sable en provenance de la carrière Ben Azzouz et de 20% pour le sable de la carrière El Khroub.

Il est donc possible de confectionner des bétons à base de sable de concassage contenant des proportions de fines de l'ordre de 15 à 20% sans conséquences préjudiciables sur les caractéristiques mécaniques des bétons.

VI.3. BÉTON AUTOPLAÇANT

Les objectifs de cette deuxième partie d'étude visent à déterminer l'influence du dosage d'ajouts minéraux (fillers calcaires) ainsi que la variation du dosage en superplastifiant sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons autoplaçants. Il s'agit également de trouver les proportions optimales des fillers calcaires et d'adjuvant qui procurent de bonnes propriétés rhéologiques (fluidité, déformabilité, stabilité) tout en préservant de bonnes résistances mécaniques.

Pour voir l'influence des fillers calcaires sur le comportement du béton autoplaçant, plusieurs bétons autoplaçants ont été élaborés dont le dosage en fillers calcaires varie de 5% à 20%. On a aussi élaboré des BAP sans fillers calcaires avec une variation du dosage en superplastifiant (1 et 1,5% du poids du ciment) pour voir l'influence de ce dernier.

Les caractéristiques étudiées sont :

- La fluidité (essai d'étalement),
- La déformabilité (Boite en L),
- La stabilité (essai de la stabilité au tamis)
- L'influence du superplastifiant,
- Les résistances mécaniques à la compression et à la traction.

VI.3.1. Affaissement au cône d'Abrams

L'essai au cône d'Abrams s'effectue de la même manière que pour un béton ordinaire, il s'agit de démouler un cône normalisé (cône d'Abrams) de béton frais et de mesurer le diamètre de la galette de béton obtenue (figure VI.6).



Figure VI.6 : Essai d'étalement

Les résultats obtenus par cet essai sur les différents bétons sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau VI.7 : Résultats de l'essai au cône d'Abrams (sable Ben Azzouz)

Béton	BBP 1	BBP 2	BBF 1	BBF 2	BBF 3	BBF 4
Adjuvant (%)	1	1,5	1	1	1	1
Fines (%)	0	0	5	10	15	20
Étalement (cm)	66	70	74	68	64	59

Tableau VI.8 : Résultats de l'essai au cône d'Abrams (sable El Khroub)

Béton	BKP 1	BKP 2	BKF 1	BKF 2	BKF 3	BKF 4
Adjuvant (%)	1	1,5	1	1	1	1
Fines (%)	0	0	5	10	15	20
Étalement (cm)	64	69	72	70	66	63

Nous pouvons constater que l'ensemble des bétons autoplaçants confectionnés respecte le critère d'étalement (entre 60 et 75cm).

L'effet du superplastifiant se traduit par une augmentation de l'étalement des bétons autoplaçants. Les BAP avec un dosage en superplastifiant de 1,5% du poids de ciment présentent une amélioration du diamètre d'étalement de 5,71% et de 7,24% par rapport à ceux avec un dosage de 1% du poids de ciment pour le sable de Ben Azzouz et d'El Khroub respectivement. Ceci est expliqué par l'insuffisance du dosage en superplastifiant qui ne permet pas de défloculer tous les grains de ciment, la quantité d'eau libérée est donc insuffisante pour l'obtention de la fluidité désirée. L'augmentation du dosage en superplastifiant a permis une plus grande défloculation des grains de ciment, la quantité d'eau libérée dans le béton est donc plus importante.

Les fines calcaires influent négativement sur les propriétés rhéologiques des BAP (diminution de l'étalement). On peut expliquer ce phénomène par le fait que les fines calcaires incorporées à petit dosage augmentent le volume de pâte dans le béton. De ce fait, elles améliorent la maniabilité, la cohésion entre les constituants, ce qui crée une bonne harmonie dans le mélange. En revanche, tout excès de fines calcaires par rapport à la quantité nécessaire pour combler les vides intergranulaire peut causer une perte de la fluidité.

VI.3.2. Essai de la boîte en L

La boîte en L (figure VI.7) permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que sa mise en place ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage. Treize (13) litres de béton sont mis dans la partie verticale de la boîte puis on laisse le béton se reposer pendant 1 minute. La trappe est ensuite levée et le béton s'écoule dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage. A la fin de l'écoulement, on mesure H_1 et H_2 et le résultat est exprimé en terme de taux de remplissage H_2/H_1 .



Figure VI.7 : Essai de la boîte en L

Les résultats des essais effectués sur les différents BAP sont présentés dans les tableaux VI.9 et VI.10.

Tableau VI.9: Essai de la boîte en L (sable Ben Azzouz)

Béton	BBP 1	BBP 2	BBF 1	BBF 2	BBF 3	BBF 4
Adjuvant	1	1,5	1	1	1	1
Fines (%)	0	0	5	10	15	20
L-Box (H_2/H_1)	0,75	0,90	0,88	0,82	0,76	0,65

Tableau VI.10 : Essai de la boîte en L (sable El Khroub)

Béton	BKP 1	BKP 2	BKF 1	BKF 2	BKF 3	BKF 4
Adjuvant (%)	1	1,5	1	1	1	1
Fines (%)	0	0	5	10	15	20
L-Box (H_2/H_1)	0,77	0,86	0,80	0,78	0,72	0,69

On peut noter que l'augmentation du dosage en superplastifiant a engendré une augmentation de la capacité de remplissage des BAP et que les BAP avec un dosage en superplastifiant de 1% possèdent un rapport H_2/H_1 inférieur à 0,8 (valeur spécifiée par l'AFGC). Cette augmentation s'explique par l'augmentation de la viscosité de l'eau due au superplastifiant.

L'effet de l'ajout des fines calcaires se traduit par une diminution de la capacité de remplissage de tous les BAP. La capacité au remplissage est assurée par l'action combinée du superplastifiant et des fines calcaires. En effet, on considère que le mortier atteint sa compacité maximale lorsque le dosage critique en fillers calcaires est atteint, rendant le béton autoplaçant plus visqueux et limite sa capacité au remplissage (performances en milieu confiné).

A cet effet on constate que les bétons autoplaçants BBP1, BBF 3, BBF 4, BKP1, BKF2, BKF 3 et BKF 4 ne répondent pas aux spécifications de l'AFGC en terme de taux de remplissage.

VI.3.3. Essai de la stabilité au tamis

Il consiste à mesurer la proportion P d'éléments fins de béton (laitance) passant au travers d'un tamis d'ouverture 5 mm pour qualifier le béton vis-à-vis du risque de ségrégation et de déduire si le béton testé possède une stabilité satisfaisante ou non (figure VI.8).

**Figure VI.8 : Essai de la stabilité au tamis**

Cet essai a été effectué sur tous les BAP, les résultats sont présentés dans les tableaux suivants.

Tableau VI.11: Résultats de l'essai de la stabilité au tamis (sable ben Azzouz)

Béton	BBP 1	BBP 2	BBF 1	BBF 2	BBF 3	BBF 4
Adjuvant (%)	1	1,5	1	1	1	1
Fines (%)	0	0	5	10	15	20
Poids de laitance (%)	8,52	10,31	6,21	4,33	3,28	2,44

Tableau VI.12 : Résultats de l'essai de la stabilité au tamis (sable El Khroub)

Béton	BKP 1	BKP 2	BKF 1	BKF 2	BKF 3	BKF 4
Adjuvant (%)	1	1,5	1	1	1	1
Fines (%)	0	0	5	10	15	20
Poids de laitance (%)	9,11	11,73	5,18	4,57	4,11	2,70

On remarque que tous les BAP présentent une stabilité satisfaisante (entre 0 et 15%). Les BAP avec fines calcaires se caractérisent par une très grande stabilité.

La croissance considérable du volume de pâte par ajout de fines calcaires améliore largement la stabilité (pour un dosage en fines calcaires de 20%, on note une stabilité de 2 % pour les deux types de sables).

VI.3.4. Essai de compression

L'essai de compression est effectué sur des éprouvettes cubiques de 20cm de côté. La mise en charge de l'éprouvette doit se faire d'une manière continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

Nous avons choisi trois âges d'écrasement, 7, 28 et 90 jours pour toutes les compositions ; le but est de suivre l'évolution de la résistance à la compression du béton autoplaçant à long terme et de voir l'influence du superplastifiant et de l'ajout des fillers calcaires sur le comportement du béton autoplaçant.

Les résultats de l'essai de compression sur les différents bétons autoplaçants sont représentés dans les tableaux et figures suivants.

Tableau VI.13 : Résistance à la compression des BAP (Sable Ben Azzouz)

Béton	Résistance à la compression (Sable Ben Azzouz) (MPa)		
	7 jours	28 jours	90 jours
BBP 1	37,14	42,85	45
BBP 2	39,80	45,71	48,10
BBF 1	42,14	49,89	51,67
BBF 2	39,80	45,71	48,10
BBF 3	32,68	36,26	37,72
BBF 4	30,18	31,93	33,54

Tableau VI.14 : Résistance à la compression des BAP (Sable El Khroub)

Béton	Résistance à la compression (Sable El Khroub) (MPa)		
	7 jours	28 jours	90 jours
BKP 1	40,08	44,32	47,53
BKP 2	42,14	49,90	51,82
BKF 1	46,28	51,42	54,20
BKF 2	47,36	51,88	53,3
BKF 3	38,58	42,66	45,72
BKF 4	34,24	40,11	42,88

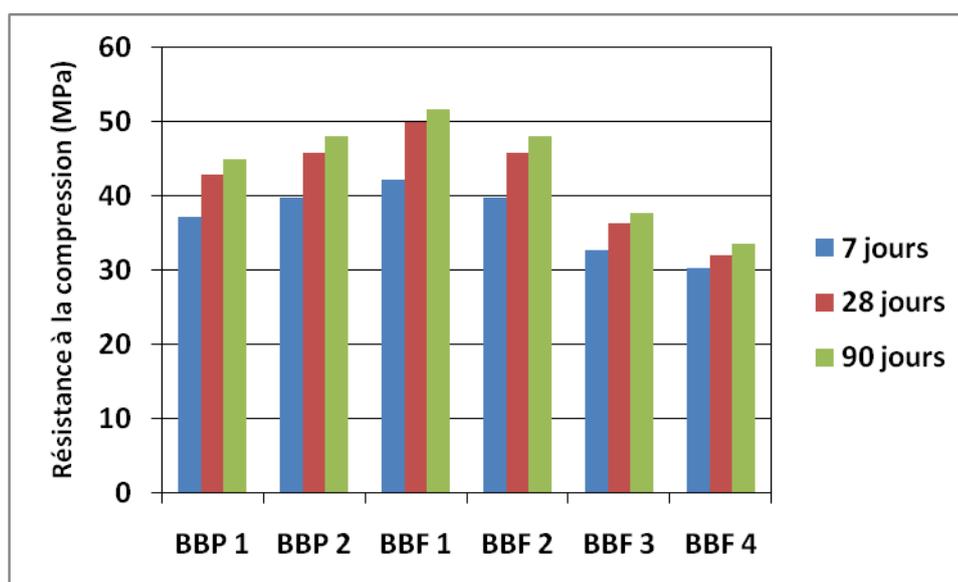


Figure VI.9 : Variation de la résistance à la compression des BAP (sable Ben Azzouz)

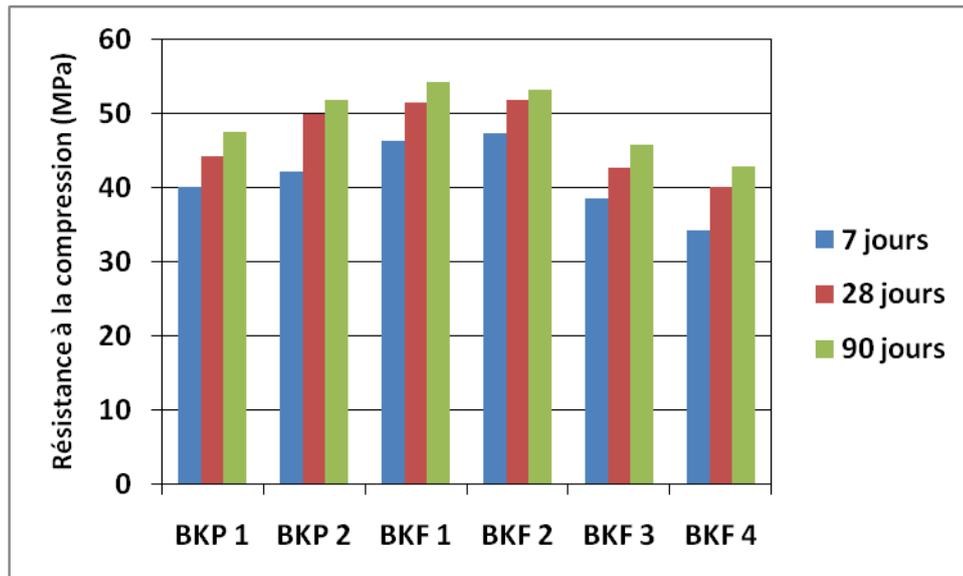


Figure VI.10 : Variation de la résistance à la compression des BAP (sable El Khroub)

D'après la figure VI.9 et VI.10, on remarque que la variation du dosage en superplastifiant de 1% à 1,5% améliore les résistances mécaniques des BAP (BBP1, BBP 2 et BKP1, BKP2).

La résistance à la compression des bétons et inversement proportionnelle au pourcentage de fillers calcaires. Cette diminution est due essentiellement aux caractéristiques des fillers calcaires utilisés.

Les fillers calcaires étant une poudre extra fine, en l'ajoutant au béton, ils jouent le rôle d'un correcteur granulométrique, ils comblent les vides existant dans le matériau, augmente la compacité, qui se traduit par l'augmentation de la résistance à la compression.

La présence de fillers calcaires dans le béton à fort dosage augmente la demande en eau et en superplastifiant qui se traduit par une diminution de la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation du ciment donc une diminution de la résistance à la compression et ce pour les deux types de sables.

Le béton autoplaçant BKF 2 contenant 10% de fillers calcaires possède une résistance à la compression supérieure à celle du BKF 1 qui contient 5% de fillers. Ce béton est refusé parce qu'il ne respecte pas les spécifications de l'AFGC (essai L-box inférieur à 0,80).

L'optimum de résistance à la compression est obtenu on ajoutant 5% de fillers calcaires pour les deux types de sables.

Les résistances des BAP à 90 s'évaluent de la même manière que les résistances des BAP obtenues à 28 jours avec une légère amélioration.

VI.3.5. Essai de traction par flexion

L'essai de traction par flexion est effectué sur des prismes de sections carrées (7×7×28) cm. L'objectif de l'essai étant de suivre l'évolution de la résistance du béton autoplaçant à la traction par flexion en fonction des fines calcaires.

Les résultats de l'essai de traction par flexion sur les différents bétons autoplaçants sont représentés dans les figures et tableaux suivants.

Tableau VI.15 : Résistance à la traction des BAP (Sable Ben Azzouz)

Béton	Résistance à la traction (Sable Ben Azzouz) (MPa)		
	7 jours	28 jours	90 jours
BBP 1	2,46	2,69	2,85
BBP 2	3,30	3,61	3,77
BBF 1	4,20	4,8	4,92
BBF 2	3,66	3,89	4,25
BBF 3	2,83	3,17	3,58
BBF 4	2,48	2,8	3,24

Tableau VI.16 : Résistance à la traction des BAP (Sable El Khroub)

Béton	Résistance à la traction (Sable El Khroub) (MPa)		
	7 jours	28 jours	90 jours
BKP 1	2,65	2,92	3,18
BKP 2	3,23	4,09	4,35
BKF 1	4,58	4,84	5,11
BKF 2	5,12	5,35	5,87
BKF 3	3,82	4,57	4,97
BKF 4	3,53	3,73	4,25

Corrélativement à la compression la résistance à la traction est amélioré pour les BAP ayant un dosage de superplastifiant de 1,5% du poids de ciment.

On peut dire aussi que la résistance à la traction décroît en fonction du pourcentage du pourcentage de fillers calcaires incorporé dans la composition des BAP.

L'optimum de résistance à la traction est obtenu on ajoutant 5% de fillers calcaires pour les deux types de sables.

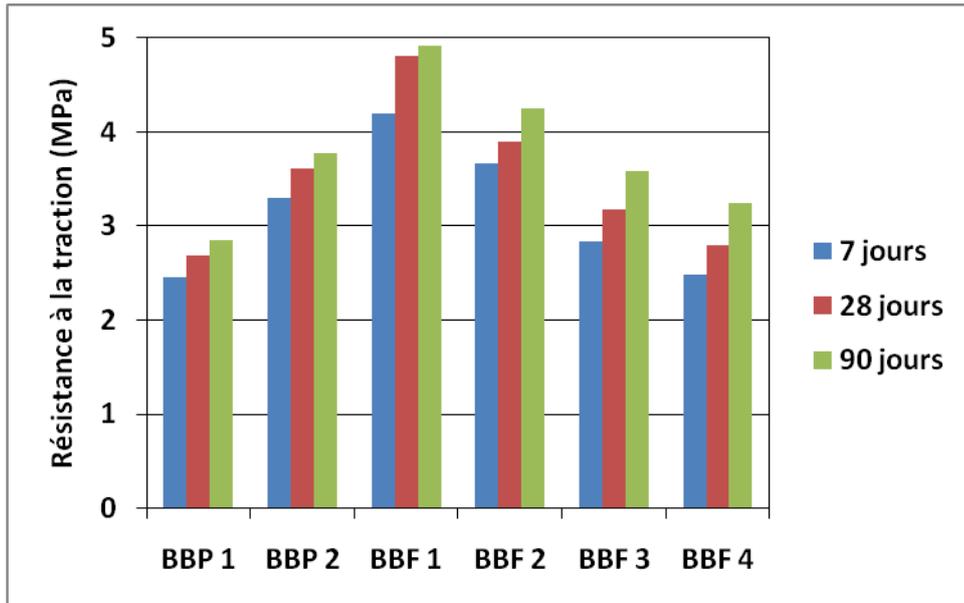


Figure VI.11 : Variation de la résistance à la traction des BAP (Sable Ben Azzouz)

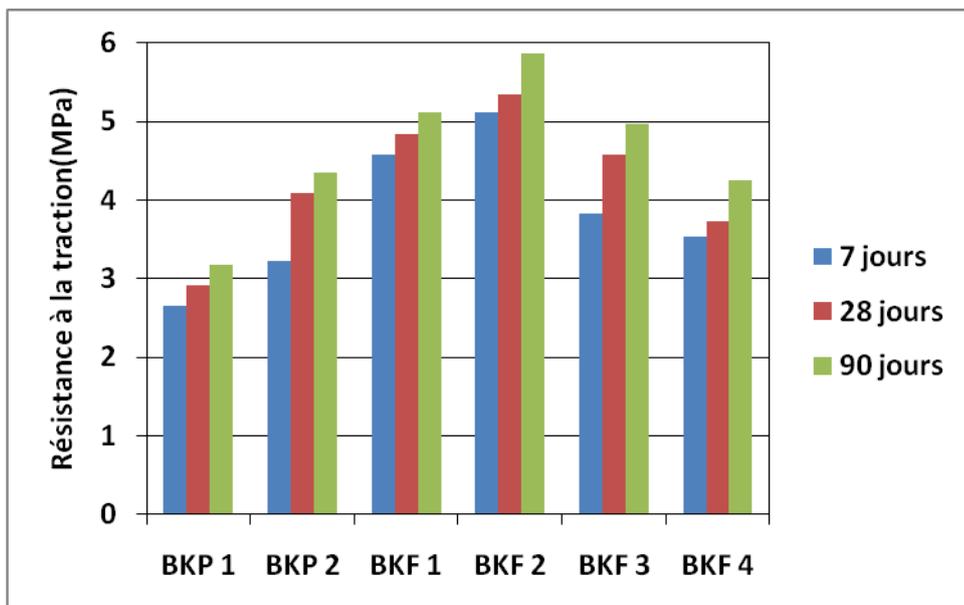


Figure VI.12 : Variation de la résistance à la traction des BAP (Sable El Khroub)

VI.3.6. Conclusion

D'après les résultats des essais effectués sur les différents bétons autoplaçants élaborés dans le cadre de cette étude on peut tirer les conclusions suivantes :

La formulation du béton autoplaçant est beaucoup plus complexe que la formulation de béton ordinaire (nombre de constituants ≥ 6), elle nécessite une attention particulière en ce qui concerne la méthode de formulation choisie, la nature du superplastifiant et le type de fillers utilisés (calcaire, fumé de silice, laitier du haut fourneau)

La variation du dosage en superplastifiant peut contribuer à améliorer les caractéristiques rhéologiques et mécaniques du béton autoplaçant.

Le dosage élevé en fillers calcaires (supérieur à 5% du poids de ciment) a un effet négatif sur les propriétés du béton autoplaçant, il faudra peut être augmenter le dosage en superplastifiant (ou bien utilisé un agent de viscosité).

Conclusion Générale



Conclusion générale

L'objectif de ce travail consiste à étudier le comportement de deux bétons (béton ordinaire, béton autoplaçant) confectionnés à partir de sable de concassage en utilisant les sables produit par les carrières de l'Est d'Algérie.

L'examen des différents résultats obtenus lors de la réalisation de ce travail sur l'influence des fines calcaires sur les propriétés mécaniques du béton ordinaire en première partie et l'influence des fillers calcaires sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton autoplaçant en deuxième partie a permis de tirer les conclusions suivantes :

➤ Pour le béton ordinaire :

- ✓ la présence des fines calcaires en faible quantité dans le sable de concassage améliore les résistances mécaniques du béton, mais un excès peut avoir un effet inverse sur elles,
- ✓ L'utilisation du superplastifiant dans la formulation du béton ordinaire peut contribuer à l'amélioration des résistances mécaniques du béton.
- ✓ On peut dire que le taux de fines admissible est de 15% pour le sable en provenance de la carrière Ben Azzouz et de 20% pour le sable de la carrière El Khroub.
- ✓ Il est donc possible de confectionner des bétons à base de sable de concassage contenant des proportions de fines de l'ordre de 15 à 20% sans conséquences préjudiciables sur les caractéristiques mécaniques des bétons.

➤ Pour le béton autoplaçant

- ✓ La formulation du béton autoplaçant est beaucoup plus complexe que la formulation de béton ordinaire (nombre de constituants ≥ 6) ; elle nécessite une attention particulière en ce qui concerne la méthode de formulation choisie, la nature du superplastifiant et le type de fillers utilisé (calcaire, fumée de silice, laitier du haut fourneau),

- ✓ La variation du dosage en superplastifiant peut contribuer à améliorer les caractéristiques rhéologiques et mécaniques du béton autoplaçant.
- ✓ Le dosage élevé en fillers calcaires (supérieur à 5% du poids de ciment) a un effet négatif sur les propriétés du béton autoplaçant ; il faudra peut être augmenter le dosage en superplastifiant (ou bien utilisé un agent de viscosité).

Pour des études ultérieures sur le béton autoplaçant, nous recommandons de réaliser d'autres travaux de recherche sur :

- ✓ Le comportement du béton autoplaçant en utilisant d'autres types de fillers, avec l'utilisation d'un agent de viscosité,
- ✓ La variation du dosage en superplastifiant avec le pourcentage de fillers calcaires
- ✓ Le phénomène de retrait qui est, d'après quelques recherches, plus important que celui des bétons ordinaires.
- ✓ Le comportement des BAP aux différents traitements de surface.
- ✓ La résistance au feu.
- ✓ La pompabilité des BAP.
- ✓ Les résistances à l'usure et aux chocs.
- ✓ L'influence des traitements thermiques sur les caractéristiques et propriétés des BAP.

*Références
Bibliographiques*



Références bibliographiques

- [1]. Instruction N°003/S.P/C.G, « Exploitation de sable de plage et de sable d'alluvion», Alger, Mars 1999
- [2]. Ministère de l'Équipement et du Logement, instruction ministérielle N°017/SMP/D.RTC/92 Relative à la gestion et la protection du Domaine Public Maritime et Hydraulique (Concession d'extraction des matériaux) Alger, Décembre 1999.
- [3]. Normes Européennes EN 12620, Août 2003.
- [4]. Normes françaises XP P18540, Octobre 1997.
- [5]. Document E.N.G, «La problématique de l'utilisation des sables calcaires dans les bétons hydrauliques », Alger, Mai 2006.
- [6]. Document C.N.E.R.I.B, « Valorisation des sables concassés fillerisés », Alger, Novembre 1995.
- [7]. HEBBOUCHE.A, « Propriétés mécaniques et durabilité du béton à base de sable de concassage », Mémoire de Magister, Université Saad Dahlab, Algérie, 2002.
- [8]. KENALS, BENNA.Y et MENNADI.B « The effect of stone in crushed calcareous sand on properties of mortar and concrete » International conference on infrastructure regeneration and rehabilitation, Sheffield, Editor R.N Swamy, 1999, PP 253-261.
- [9]. MENNADI.B, KENALS KHATIB.J AIT-MOKHTR.A, « Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand». Construction and building materials, Elsevier, 2008.
- [10]. BERTRANDY.R et CHABERNAUD.J.L, «Étude de l'influence des fillers calcaires dans les bétons hydrauliques». CEMEREX, France, 1970, PP 1-15.
- [11]. BONAVETTI.V.L et IRASSAR.E, «The effect of stone dust content in sand». Cement and concrete research, Vol 23,N°3, 1994.
- [12]. NECIRA.B, GUETTALA.A, CHABIS, «Formulation des bétons autoplaçants: effet des ajouts minéraux et des adjuvants », Doctorat d'État, Université de Biskra, Algérie,
- [13]. SAMARA.M, ROZIERE.E, KHOKHAR.M, LOUKILLA, « Valorisation des sédiments traités dans les bétons autoplaçants». Projet ANR-RGCU SEDIBET, 2007.

- [14]. AYED.K, VIDAL.T, PONS.G, BENAÏSSA.A, «Influence du type d'addition minérales sur les déformations différées des bétons autoplaçants », Thèse INSA, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, 2006.
- [15]. REBOUH.N « Formulation et caractérisation d'un béton autoplaçant », Projet de fin d'études, École Nationale Polytechnique, Alger, 2006.
- [16]. EL HILALI.A, E.GHORBEL.E, P.GONNON. «Influence des fillers sur l'ouvrabilité des bétons autoplaçants ».Université de Cergy-Pontoise, France, 2005.
- [17]. BOUHAMOU.N, BELAS.N, MEBROUKI.A, MESBAH.H, AMMAR.Y, « Étude de l'influence des paramètres de composition sur le comportement a l'état frais du béton autoplaçant à base de matériaux locaux ». Doctorat d'État, Université de Mostaganem, Algérie,2004.
- [18]. HADDAD.O, AGGOUN.S, CABRILLAC.R, « Influence des addition minérales sur le comportement a court terme des bétons autoplaçants », Université de Cergy-Pontoise,France, 2003.
- [19]. MEBROUKI.A, BELAS.N, BOUHAMOU.N, «Contribution à la formulation d'une pâte autoplaçante à base de matériaux locaux » Université de Mostaganem, 2007.
- [20]. BATIMAG, revue spécial huitième salon BATIMATEC, Mai 2005.
- [21]. OKAMURA.H, OZAWA.K, and OUCHI.M « Self-compacting concrete. Structural Concrete» March 2000.
- [22]. SEDRAN.T, Les bétons autonivelants (BAN) synthèse bibliographique, Bulletin de liaison LCPC, mars 1995.
- [23]. SEDRAN.T. « Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants ». Thèse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 1999.
- [24]. PROUGEAU.P et CH MARRY DIPPE, FRANCY.O, « Les BAP : synthèse des connaissances et campagne expérimentale », CERIB, février 2001.
- [25]. ABIB.Z , «Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants », mémoire de magister USTHB, 2004.
- [26]. BILLBERG P, «Influence of filler characteristics on SCC rheology and early hydration, Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp. 285-294, 23-25 Octobre 2001.
- [27]. BARON.J et.OLLIVIER.J-P, « Les bétons : bases et données pour leur formulation », Eyrolles, 1999.
- [28]. SEDRAN.T. « Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux BAP », thèse de doctorat de l'ENPC, 1999.
- [29]. HASNI. L. « Bétons Autoplaçants », Rapport de recherche n°98-004/98-006 du CEBTP présenté aux journées du PN BAP, juillet 1999.

- [30]. TANGTERMSIRIKULS S., SAKAMOTO J., SHINDOH T. and MATSUOKA Y.H., « Evaluation of resistance to segregation of super workable concrete and role of a new type of viscosity agent », Taisei Technical Research Report, pp.369-376, 1991.
- [31]. JACOBS F. and HUNKELER F. « Design of self-compacting concrete for durable concrete structures », Proceedings of First International Symposium on Self-Compacting Concrete, (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 397-407, 13-15 septembre 1999.
- [32]. OKAMURA.H et OUCHI.M, « Self-compacting concrete » Journal of advanced Concrete Technology, 2003, vol 1, n°1, pp 5-15.
- [33]. EDAMATSU, NISHIDA et OUCHI, « A rational mix-design method for self-compacting concrete considering interaction between coarse aggregate and mortar particles » Proceedings of the 1st international RILEM Symposium, Stockholm, pp 309-320.
- [34]. TOUTOU, « Rhéologie et formulation des géosuspensions concentrées : évaluation des conditions d'extrudabilité », thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliquées de Rennes, 2002, 221 pages.
- [35]. De LARRARD, « Structures granulaires et formulation des bétons », Etudes et Recherches des laboratoires des ponts et chaussées, OA 34.
- [36]. FERREIRA.R, « Béton autoplaçant : méthodologie de composition », Université de Minho- Escola, Engenharia 2001.
- [37]. KHAYAT.H, « Optimisation et caractérisation des bétons autoplaçants pour coffrages fortement armés », Université de Sherbrooke, Québec, CANADA, 2000.
- [38]. Association Française de Génie Civil (AFGC), « les bétons autoplaçants », Recommandations provisoires, 2000.
- [39]. BRAQUENIER J-C et J.DESNYTER.J, « le béton autoplaçant ou autocompactant », 2000.
- [40]. Norme Française : « Granulats – analyse granulométrique par tamisage », AFNOR, Paris, Septembre 1990.
- [41]. Norme Française : « Mesure des masses volumiques, coefficients d'absorption », AFNOR, Paris, décembre 1990
- [42]. Norme française, 18-554 « Granulats –détermination de la masse volumique des sables».AFNOR,Paris 1990.
- [43]. Norme Française : « Granulats – Détermination de la propreté superficielle », AFNOR, Paris, septembre 1990.
- [44]. Norme Française : « Granulats – Essai Los Angeles », AFNOR, Paris, septembre 1990.

- [45]. Norme Française : « Granulats – Essai d’usure Micro-Deval », AFNOR, Paris, septembre 1990.
- [46]. Norme Française : « Granulats – Équivalent de sable », AFNOR, Paris, Septembre 1998.
- [47]. GRANITEX, Fiche technique de MEDAFLOW 30
- [48]. Entreprise Nationale des Granulats (ENG), Fiche techniques ALCAL F50.
- [49]. DREUX.G, et FESTA.J : « Nouveau guide du Béton et de ses constituants », Eyrolles Huitième édition, Paris 1998.
- [50]. Norme Française : « Béton – essais de compression », AFNOR, Paris 1981.
- [51]. Norme Française : « Béton – essais de flexion », AFNOR, Paris 1981.