UNIVERSITÉ YAHIA FARÈS DE MÉDÉA

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département du Génie de la Matière

MÉMOIRE de MAGISTER

Spécialité : Génie Civil

Option : Ingénierie des Matériaux et Géotechnique

Thème :

Etude de l'influence des caractéristiques des granulats de la région de Médéa sur les performances du béton autoplaçant

Par

M^r^ KORTEBY Abdelkarim

Soutenue devant le jury composé de :

Dr Bentchikou Mohamed	**MCA**	**Univ de Médéa**	**Président**
Dr Boukendakdji Othmane	**MCA**	**Univ de Médéa**	**Examinateur**
Pr Ezziane Karim	**Professeur**	**Univ de Chlef**	**Examinateur**
Dr Debieb Farid	**MCA**	**Univ de Médéa**	**Rapporteur**
Pr Kadri El-Hadj	**Professeur**	**Univ de Cergy-Pontoise (France)**	**Co-Rapporteur**

Décembre 2015

Remerciements

Au terme de ce modeste travail, je tiens d'abord à remercie ALLAH le Miséricordieux de m'avoir donné la force et la patience à achever ce mémoire ainsi que mes parents qui m'ont toujours encouragé et soutenu durant toute la durée de mes études.

J'adresse mes profonds gratitudes et remerciement à mon enseignant et directeur de mémoire, Mr DEBIEB Farid qui a bien voulu diriger ce travail et pour son aide et ses nombreux conseils très précieux, qui m'ont été très bénéfiques et sa compréhension durant l'élaboration de cette recherche.

Je tiens à remercier Mr Bentchikou Mohamed, maître de conférences à l'Université de Médéa, qui m'a fait le grand honneur d'accepter la présidence du jury et qu'il trouve ici l'expression de mon profond respect.

Mes vifs remerciements s'adressent également à Mr Boukendakdji Othmane, maître de conférences à l'Université de Médéa et Mr Ezziane Karim Professeur à l'Université de Chlef qui ont bien voulu faire partie du jury et d'apporter leur vive contribution à l'enrichissement de ce travail.

Mes remerciements sont destinés à:

- M^{elle} BOUKHELKHAL Djamila MAA à l'université de Médéa pour son aide et ses conseils ainsi que les gens du Hall Technologique de l'université de Médéa ou j'ai effectué mes travaux et j'ai été aimablement soutenu ;
- M^{r} DJEZIRI Khireddine MAA à l'université de Blida ;
- M^{r} SKENDER Zakaria MAA à l'université de Médéa ;
- M^{r} GUENDOUZE Mohamed Doctorant à l'université de Médéa ;
- Mes collègues de travail et d'études.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

ملخـــص

يتم سوق الرمل والحصى في الجزائر بعدد كبير من المنتجين لعدة آلاف من المقاولات ذات أشكال. المنافسة بين مختلف أنواع الحصى وفقا لمنشئها تعتمد على عدة عوامل،. في هذا المشروع البحثي نهدف إلى دراسة مدى تأثير خصائص الرمل والحصى لمنطقة المدية على خصائص الخرسانة المرصوصة ذاتيا. دراسة الخصائص الفيزيائية،الميكانيكية وقدرة البقاء لهذا النوع من الخرسانة. أظهرت النتائج المتحصل عليها أن الرمل والحصى المحلية في منطقة المدية المستخدمة في هذا العمل، تلبي متطلبات المعايير المعمول بها.الخليط المحصول على أفضل سيولة و مقاومة ميكانيكية هو الخليط المنجز بالرمل المصحح مع حصى كاف العسل.

الكلمـات المفتاحية:

الخرسانة المرصوصة ذاتيا، الحصى،سيليو ، الطبيعة المعدنية، المقاومة الميكانيكية، مصدر الإنتاج، قدرة البقاء.

Résumé

Le marché des granulats en Algérie se caractérise par un grand nombre de producteurs pour un millier d'exploitation de tailles diverses. La rivalité entre les différents granulats selon leurs origines dépend de plusieurs facteurs. Dans ce projet de recherche on vise à étudier l'influence des caractéristiques des granulats de la région de Médéa sur les performances du béton autoplaçant (BAP). Les propriétés physiques, mécaniques ainsi que la durabilité du béton sont à étudier. Les résultats trouvés ont montrés que les granulats locaux de la région de Médéa utilisés dans le cadre de ce travail, répondent aux exigences des normes en vigueurs. Le mélange optimal pour avoir la meilleure fluidité et résistance mécanique est celui confectionné par du sable corrigé avec le gravier de Kaf El Assel.

Mots-clés :

Béton autoplaçant, granulats, fluidité, nature minéralogique, résistances mécaniques, source de production, durabilité.

Abstract

The aggregates market in Algeria is characterized by a large number of producers for a thousand operations of various sizes. The rivalry between the different aggregates according to their origins depends on several factors. In this research project we aim to study the influence of properties of aggregates of the region of Medea on performance self-compacting concrete (SCC). The physical, mechanical properties and durability of concrete are studied. The found results showed that local aggregates the region of Medea used in this work, meet the requirements of standards in practice. The optimum mixture for the best fluidity and mechanical strength is one crafted by the corrected sand with gravel Kaf El Assel.

Key words:

self-compacting concrete, aggregates, fluidity, mineralogy, mechanical strength, source of production, durability.

TABLE DES MATIERES

Remerciement
Résumés
Table des Matières
Liste des Figures
Liste des Tableaux
Notation et Abréviation

Introduction Générale

1/ Contexte général…….. 19
2/ Objectif de travail…… 19
3/ Plan de travail…….. 20

Chapitre I : Revenu Bibliographique

Introduction.…… 23
I.1/ Activité granulat.…….…. 23
I.1.1/ Présentation de l'activité minière dans la wilaya de Médéa…….. 23
I.1.2/ Carrières (implantation, production et réserve) Situation en 2014……..…. 23
I.1.3/ Résumé des usages nationaux……..... 27
I.1.4/ Prospective pour les granulats concassés et les sables……..…. 27
I.1.4.1/ Sur le plan quantitatif.…..……. 28
I.1.4.2/ Sur le plan qualitatif.…… 28
I.1.4.3/ Aspect environnemental…….…….…….... 29
I.2/ Granulat pour Béton…….…… 29
I.2.1/ Définition des granulats……. 29
I.2.2/ Différents types de granulats…….……. 31
I.2.2.1/ Granulats naturels…….…. 31
I.2.2.2/ Granulats artificiels…….……. 33
I.2.2.3/ Granulats recyclés……...…. 33
I.2.3/ Granulats et composants légers…….. 33
I.2.3.1/ Les granulats légers usuels..……...…….. 33
I.2.3.2/ Les composants légers..…….... 33
I.2.4/ Production des granulats…….…..……. 34
I.2.5/ Identification géologique des roches……. 34

I.2.5.1/ Minéraux de base et classifications……. 35
I.2.5.2/ Propriétés des roches…… 35
I.2.6/ Normes de référence……..…. 36
I.2.6.1/ La norme NF EN 12620 (août 2003) Granulats pour béton…… 36
I.2.6.2/ La norme XP P 18-545 (février 2004) Granulats…… 36
I.2.7/ Caractéristiques des granulats…… 36
I.2.7.1/ Caractéristiques géométriques…….. 37
I.2.7.1.1/ Classe granulaire……..….. 37
I.2.7.1.2/ Granularité……..... 37
I.2.7.2/ Forme des gravillons……... 38
I.2.7.2.1/ Coefficient d'aplatissement……..…. 38
I.2.7.2.2/ Module de finesse……..……... 38
I.2.7.3/ Caractéristiques physico-chimiques……. 38
I.2.7.3.1/ Propreté des granulats……...…… 38
I.2.7.4/ Caractéristiques physiques et mécaniques……...… 39
I.2.7.4.1/ Résistance à l'usure des gravillons……..... 39
I.2.7.4.2/ Résistance à la fragmentation des gravillons……..... 39
I.2.7.4.3/ Résistance au polissage des gravillons……... 40
I.2.7.4.4/ Résistance des gravillons au gel-dégel……...… 40
I.2.7.4.5/ Porosité…….….. 40
I.2.7.4.6/ Compacité……..…. 40
I.2.7.4.7/ L'absorption d'eau……..... 41
I.2.7.4.8/ Teneur en eau……..…... 41
I.2.7.4.9/ Masse volumique en vrac ou apparente……..... 41
I.2.7.4.10/ La masse volumique absolue…….……... 42
I.2.7.4.11/ La masse volumique réelle……...… 42
I.2.7.5/ Caractéristiques chimiques…….. 42
I.2.7.5.1/ Teneur en ions chlorures……...…. 42
I.2.7.5.2/ Réactivités aux alcalis…… 42
I.2.7.5.3/ Teneur en soufre et en sulfates……..…. 43
I.2.7.6/ Caractéristiques esthétiques……. 43
I.3/ Le béton autoplaçant…….. 44
I.3.1/ Généralité……... 44
I.3.1.1/ Avantages techniques..…….... 45
I.3.1.2/ Avantages socio-économiques..……..…. 45
I.3.1.3/ Historique des bétons autoplaçants…….. 46
I.3.1.4/ Utilisation des bétons autoplaçants en Algérie……..47

I.3.2/ Définition et caractéristiques d'un BAP……..... 47
I.3.2.1/ Définition d'un BAP…….…….. 47
I.3.2.2/ Domaine d'emploi…….…….…… 49
I.3.2.3/ Mise en œuvre..…….…….…..…. 49
I.3.2.4/ Impacts socio-économiques..…….…….…. 50
I.3.3/ Constituants d'un BAP……..…….…….. 51
I.3.3.1/ Ciment……..…..... 51
I.3.3.2/ Granulats.……...….. 52
I.3.3.3/ Eau de gâchage……...…. 53
I.3.3.4/ Ajouts minéraux……..……...….. 54
I.3.3.5/ Superplastifiant -Haut réducteur d'eau-……..…… 55
I.3.3.6/ Agent de viscosité……..…. 57
I.3.4/ Propriétés d'un BAP à l'état frais……..……..….. 58
I.3.4.1/ Capacité au remplissage…….……..…..... 59
I.3.4.2/ Capacité de passage…….. 59
I.3.4.3/ Résistance à la ségrégation…….……...…..... 60
I.3.4.4/ Caractéristiques rhéologiques d'un BAP……...….. 60
I.3.5/ Formulation et Composition d'un BAP……...……..….... 61
I.3.5.1/ Formulation OKAMURA « la Méthode Générale » (Japon)……..…… 62
I.3.5.2/ Formulation CBI (Suède)……..…..…. 63
I.3.5.3/ Formulation LCPC (France)……...……. 64
I.3.6/ Essais relatifs au mortier à l'état frais……... 65
I.3.6.1/ Essai d'étalement au mini-cône……..…….…… 66
I.3.6.2/ Essai à l'entonnoir en V (Mini V-Funnel test)……..…….. 66
I.3.7/ Essais relatifs au BAP à l'état frais……...…….…… 66
I.3.7.1/ Essai d'étalement (Flow test) et T_{50}……...……...…… 67
I.3.7.2/ Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)……..……..….. 69
I.3.7.3/ Essai à la couronne J (J-Ring test)……..…… 70
I.3.7.4/ Essai à la boite en L (L-Box test)……..…….. 71
I.3.7.5/ Essai à la boite en U (U-Box test)……..……. 72
I.3.7.6/ Essai de résistance à la ségrégation par tamisage…….…….……. 73
I.3.8/ Propriétés mécaniques d'un BAP à l'état durci……..…….…. 74
I.3.8.1/ Résistance à la compression…….……..……. 74
I.3.8.2/ Résistance à la traction…….…..……. 75
I.3.8.3/ Module de déformation longitudinale et coefficient de poisson …….…….. 75
I.3.8.4/ Retraits……..……... 76

I.3.8.5/ Perméabilité à l'eau……..……..... 81
I.3.8.6/ Absorption d'eau……..…….. 81
I.3.8.7/ Gel-Dégel des BAP……..….. 82
Conclusion…….. 83

Chapitre II : Etude Expérimentale
Matériaux, Formulation et Essais

Introduction…… 84
Programme expérimental……... 84
II.1/ Identification et Caractérisation des Constituants……..….. 86
II.1.1/ Graviers……..….. 87
II.1.1.1/ Analyse granulométrique……..... 88
II.1.1.2/ Masse volumique, Compacité, Porosité et Indice des vides…… 89
II.1.1.3/ Résistance mécanique (Essai de Los-Angeles)…… 89
II.1.1.4/ Absorption d'eau……..… 89
II.1.1.5/ Essai de la propreté superficielle……..… 90
II.1.1.6/ Forme des grains et état de surface……..… 91
II.1.2/ Sable……..…. 92
II.1.2.1/ Propreté (Equivalent de sable)……..… 93
II.1.2.2/ Granulométrie et Module de finesse…… 93
II.1.2.3/ Absorption d'eau……..… 94
II.1.2.4/ Masse volumique, Compacité, Porosité et Indice des vides…… 94
II.1.3/ Ciment……..… 95
II.1.3.1/ Composition chimique et minéralogique du ciment…… 95
II.1.3.2/ Essais physico-mécaniques……..… 96
II.1.4/ Superplastifiant……..…. 97
II.1.5/ Eau de gâchage……... 97
II.2/ Formulation du béton Autoplaçant……..….. 98
II.2.1/ Formulations adoptées……..……...… 98
II.2.2/ Formulation du Mortier……..……...……... 98
II.2.2.1/ Rapport Eau/Ciment (E/C)……...……..... 99
II.2.2.2/ Rapport Sable/Mortier (S/M)……..….. 99
II.2.2.3/ Variation du rapport Superplastifiant/Ciment (Sp/C)…….. 100
II.2.3/ Formulation du Béton……..……...…. 100
II.2.3.1/ Fixation des rapports Sable/Mortier (S/M) et Eau/Ciment (E/C)……....… 101
II.2.3.2/ Fixation du rapport Superplastifiant/Ciment (Sp/C)……....… 101

II.2.4/ Procédure de malaxage…….…….. 102
II.2.4.1/ Pour le mortier …… 102
II.2.4.2/ Pour le béton…… 103
II.3/ Méthodes d'essais (Mortier et Béton)…… 104
II.3.1/ Essais relatifs au Mortier……..... 105
II.3.1.1/ à l'état frais…….. 105
II.3.1.1.1/ Essai d'étalement au Mini-Cône……... 105
II.3.1.1.2/ Essai à l'entonnoir en V (Mini V-funnel)……..... 105
II.3.1.2/ à l'état durci…… 106
II.3.1.2.1/ Résistance à la compression……. 106
II.3.1.2.2/ Résistance à la traction par flexion…….….. 107
II.3.2/ Essais relatifs au Béton…….…..... 107
II.3.2.1/ à l'état frais…….. 107
II.3.2.1.1/ Essais d'étalement au cône d'Abrams et T_{50}……... 108
II.3.2.1.2/ Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)…….…… 111
II.3.2.1.3/ Essai à la couronne J (J-Ring test)……..…. 112
II.3.2.1.4/ Essai à la boite en L (L-Box test)…….……...…. 115
II.3.2.1.5/ Essai de résistance à la ségrégation par tamisage…….…...…. 117
II.3.2.2/ à l'état durci…….…..….. 120
II.3.2.2.1/ Résistance à la compression……..……..…..… 120
II.3.2.2.2/ Résistance à la traction par flexion…….…..…. 122
II.3.2.2.3/ Auscultation sonique (Ultrason)……..……..... 123
II.3.2.2.4/ Le module d'élasticité……..……..….. 124
II.3.2.2.5/ Retrait et Gonflement…….…… 126
II.3.2.2.6/ Absorption d'eau par capillarité…….……..……...…... 128
Conclusion…….……. 129

Chapitre III : Résultats Expérimentaux
Analyse, Discussion et Interprétations

Introduction……. 131
III.1/ Essais relatifs au Mortier …….. 131
III.1.1/ à l'état frais…….…. 131
III.1.1.1/ Essai d'étalement au Mini-Cône……. 131
III.1.1.2/ Effet de superplastifiant sur l'étalement des mortiers…….……...… 132
III.1.2/ à l'état durci…….…….. 134

III.1.2.1/ Résistance à la compression ……..……. 134
III.1.2.2/ Résistance à la traction par flexion ……..… 135
III.2/ Essais relatifs au Béton ……..… 136
III.2.1/ à l'état frais..……...…. 136
III.2.1.1/ Essais d'étalement au cône d'Abrams et T_{50}……...… 137
III.2.1.2/ Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)……...… 140
III.2.1.3/ Essai à la couronne J (J-Ring test)……...…. 141
III.2.1.4/ Essai à la boite en L (L-Box test)…….... 145
III.2.1.5/ Essai de résistance à la ségrégation par tamisage…… 146
III.2.2/ à l'état durci……..….. 147
III.2.2.1/Résistances mécaniques…….……..…. 147
III.2.2.1.1/ Résistance à la compression……..….. 148
III.2.2.1.2/Résistance à la traction par flexion……..…….……..... 150
III.2.2.2/ Auscultation sonique (Ultrason)……. 152
III.2.2.3/ Module d'élasticité….……...…….. 155
III.2.2.4/ Le Retrait……...….. 156
III.2.2.5/ Le Gonflement.……..……. 159
III.2.2.6/ Absorption d'eau par capillarité.……. 162
Conclusion…….……. 164

Conclusion Générale et Recommandations

A/ Conclusions générales……..……... 166
B/ Recommandations…… 168
Références Bibliographiques……...….. 169
Annexe A : Exemple de calcul de la composition du mortier……..……. 177
Annexe B : Exemple de calcul de la composition du béton…….……. 182

LISTE DES FIGURES :

Figure I.1 :	Carte des carrières d'agrégat dans la wilaya de Médéa	27
Figure I.2 :	Types des granulats	32
Figure I.3 :	La courbe granulométrique	37
Figure I.4 :	Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP	48
Figure I.5 :	Domaines d'emploi des BAP	49
Figure I.6 :	Relation entre la Résistance et le rapport E/C pour des Bétons avec et sans superplastifiant avec le temps.	56
Figure I.7 :	Répulsion électronique entre deux particules de ciment	57
Figure I.8 :	Mini-Cône et Mini V-Funnel pour mortier	65
Figure I.9 :	Essai d'Etalement pour mortier	66
Figure I.10 :	Essai à l'Entonnoir en V pour mortier	66
Figure I.11 :	Essai d'étalement (Slump flow)	68
Figure I.12 :	Mesure du diamètre d'étalement pour BAP	68
Figure I.13 :	Essai à l'Entonnoir en V pour BAP	69
Figure I.14 :	Dimensions du J-ring et positions pour mesure de différence de hauteurs	70
Figure I.15 :	Essai à la couronne J pour BAP	71
Figure I.16 :	La boite en L	71
Figure I.17 :	Schématisation de l'essai du tube en U	72
Figure I.18 :	Essai de la stabilité au tamis	73
Figure I.19 :	Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF)	75

Figure I.20 :	Phénomène de ressuage	76
Figure I.21 :	Retrait plastique de BAP et de BV de structure (T=20°C, 50% HR)	77
Figure I.22 :	Retrait plastique des formules de BAP et de BV	77
Figure I.23 :	Comparaison des retraits endogènes d'un béton vibré et de cinq BAP	78
Figure I.24 :	Comparaison des retraits de dessiccation d'un BV et de cinq BAP	79
Figure I.25 :	Déformations sous charge unitaire pour des bétons de résistance supérieure à 40 MPa	81
Figure I.26 :	Résultats d'absorption d'eau par capillarité de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés	82
Figure II.1 :	Différents graviers utilisés	88
Figure II.2 :	Courbes granulométriques des différents graviers étudiés	89
Figure II.3 :	Caractérisation de la forme des granulats en fonction du coefficient d'aplatissement et celui d'élongation.	91
Figure II.4 :	Différents sables utilisés	93
Figure II.5 :	Courbes granulométriques des différents sables utilisés	93
Figure II.6 :	Le type du ciment utilisé	96
Figure II.7 :	Superplastifiant MEDAFLOW 145	97
Figure II.8 :	Malaxeur à mortier	102
Figure II.9 :	Malaxage du béton autoplaçant	104
Figure II.10 :	Malaxeur du béton	104
Figure II.11 :	Développement de l'essai d'étalement pour mortier	105
Figure II.12 :	Remplissage des moules en mortier	106
Figure II.13 :	Essai de compression	106

Figure II.14 : Presse hydraulique (2000 kN) 106

Figure II.15 : Essai de traction par flexion 107

Figure II.16 : Développement de l'essai d'étalement 109

Figure II.17 : Dispositif de l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel) 112

Figure II.18 : Protocole de l'essai du J-Ring 114

Figure II.19 : Dimensions du J-ring et positions pour mesure de différence de hauteurs 114

Figure II.20 : La boite en L (L-Box) 116

Figure II.21 : Protocole de l'essai de la boîte en L (L-Box) 117

Figure II.22 : Protocole de l'essai de stabilité au tamis 119

Figure II.23 : Protocole de remplissage des moules 119

Figure II.24 : Conservation des éprouvettes 120

Figure II.25 : Presse hydraulique (2000 kN) 121

Figure II.26 : Essai de compression 122

Figure II.27 : Essai de traction par flexion 123

Figure II.28 : Etalonnage de l'ultrason à l'aide du barreau de calibrage 124

Figure II.29 : Graissage des faces d'éprouvette avec la vaseline 124

Figure II.30 : Mesure du temps de parcours des ondes ultrasonores 124

Figure II.31 : L'essai du module d'élasticité 125

Figure II.32 : Protocole de l'essai de retrait et de gonflement 126

Figure II.33 : Réctractomètre 127

Figure II.34 : Etalonnage de l'appareil 127

Figure II.35 : Mesure de la variation de masse 127

Figure II.36 :	Absorption d'eau par succion capillaire	129
Figure III.1 :	Essai d'étalement au Mini-Cône	132
Figure III.2 :	Effet de superplastifiant sur l'étalement au Mini-Cône des mortiers étudiés.	133
Figure III.3 :	Résistances à la compression des mortiers étudiés	135
Figure III.4 :	Résistances à la traction des mortiers étudiés	135
Figure III.5 :	Résultats d'étalement au cône d'Abrams des différents BAP réalisés	137
Figure III.6 :	Résultats du T_{50}des différents BAP réalisés	139
Figure III.7 :	Temps d'écoulement $T_{V\text{-}Funnel}$ (V-Funnel test) des différents BAP réalisés	140
Figure III.8 :	Résultats d'étalement $S_{J\text{-}Ring}$ des différents BAP réalisés	141
Figure III.9 :	Variation de l'étalement sans et avec le J-Ring des différents BAP réalisés	142
Figure III.10 :	Temps d'Ecoulement $T_{50J\text{-}Ring}$ des différents BAP réalisés	143
Figure III.11 :	Variation du temps d'écoulement T_{50} sans et avec le J-Ring des différents BAP réalisés	144
Figure III.12 :	Différence de hauteurs $B_{J\text{-}Ring}$ des différents BAP réalisés	144
Figure III.13 :	Résultats d'essai à la boite en L (L-Box test) des différents BAP réalisés	145
Figure III.14 :	Résistance à la ségrégation par tamisage	146
Figure III.15 :	Résistance à la compression des BAP de la famille 01	149
Figure III.16 :	Résistance à la compression des BAP de la famille 02	149
Figure III.17 :	Résistance à la compression des BAP de la famille 03	150
Figure III.18 :	Résistance à la traction des BAP de la famille 01	150
Figure III.19 :	Résistance à la traction des BAP de la famille 02	151
Figure III.20 :	Résistance à la traction des BAP de la famille 03	151

Figure III.21 : Résultats d'auscultation sonique pour les BAP de la famille 01 153

Figure III.22 : Résultats d'auscultation sonique pour les BAP de la famille 02 154

Figure III.23 : Résultats d'auscultation sonique pour les BAP de la famille 03 154

Figure III.24 : Module d'élasticité pour tous les BAP 156

Figure III.25 : Evolution du retrait à l'air libre des BAP de la famille 01 156

Figure III.26 : Evolution du retrait à l'air libre des BAP de la famille 02 157

Figure III.27 : Evolution du retrait à l'air libre des BAP de la famille 03 157

Figure III.28 : Evolution de la perte de masse des BAP de la famille 01 158

Figure III.29 : Evolution de la perte de masse des BAP de la famille 02 158

Figure III.30 : Evolution de la perte de masse des BAP de la famille 03 159

Figure III.31 : Evolution du gonflement dans l'eau des BAP de la famille 01 160

Figure III.32 : Evolution du gonflement dans l'eau des BAP de la famille 02 160

Figure III.33 : Evolution du gonflement dans l'eau des BAP de la famille 03 160

Figure III.34 : Evolution du gain de masse des BAP de la famille 01 161

Figure III.35 : Evolution du gain de masse des BAP de la famille 02 161

Figure III.36 : Evolution du gain de masse des BAP de la famille 03 162

Figure III.37 : Absorption d'eau par capillarité des BAP de la famille 01 162

Figure III.38 : Absorption d'eau par capillarité des BAP de la famille 02 163

Figure III.39 : Absorption d'eau par capillarité des BAP de la famille 03 163

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau I.1 :	Les gisements de la wilaya de Médéa et capacité de production en granulats (Situation 2014)	24
Tableau I.2 :	Les granulats les plus utilisés dans le Béton	30
Tableau I.3 :	Différents types de granulats issus de roches massives	34
Tableau I.4 :	Teintes des granulats en fonction de leur nature minéralogique	44
Tableau I.5 :	Essais relatifs aux BAP	59
Tableau I.6 :	Classification des BAP selon domaine d'utilisation	68
Tableau II.1 :	Différents mélanges de béton autoplaçant utilisées dans ce travail	85
Tableau II.2 :	Caractéristiques des différents types de graviers utilisés	90
Tableau II.3 :	Caractérisation de la forme des granulats utilisés	92
Tableau II.4 :	Caractéristique**s** des différents types de sables utilisés	94
Tableau II.5 :	Composition chimique et minéralogique du ciment	95
Tableau II.6 :	Caractéristique physique et mécanique du ciment	96
Tableau II.7 :	Formulation des différents mortiers obtenus	100
Tableau II.8 :	Compositions des différents BAP étudiés (1m3 de béton)	101
Tableau II.9 :	Essais relatifs aux BAP	108
Tableau II.10 :	Classification des BAP selon l'étalement et le domaine d'utilisation	110
Tableau II.11 :	La classe de viscosité donnée par le temps T_{50}	111
Tableau II.12 :	Classes de viscosité donnée par le temps $T_{V\text{-}F}$	112
Tableau III.1 :	Optimisation du dosage en superplastifiant	132
Tableau III.2 :	Résistances mécaniques sur les mortiers étudiés	134

Tableau III.3 :	Essais rhéologiques et d'ouvrabilité des BAP	136
Tableau III.4 :	Résultats obtenus sur les bétons étudiés à l'état frais	137
Tableau III.5 :	Résistances mécaniques des différents BAP réalisés	147
Tableau III.6 :	Résultats d'auscultation sonique (Ultrason) des différents BAP réalisés	152
Tableau III.7 :	Module d'élasticité pour les trois familles du BAP	155
Tableau A.1 :	Feuille Excel donnant composition du mortier MAP1 (Sable Corrigé)	179
Tableau A.2 :	Feuille Excel donnant composition du mortier MAP2 (Sable Boughezoul)	180
Tableau A.3 :	Feuille Excel donnant composition du mortier MAP3 (Sable Bayazid)	181
Tableau B.1 :	Feuille Excel donnant composition et résultats des essais sur BAP (CB1)	186

NOTATIONS ET ABREVIATIONS

A	Quantité d'air, (m3)
Ab	Coefficient d'absorption
A_{bs}	Coefficient d'absorption du sable
A_{bG}	Coefficient d'absorption du gravier
ACI	American Concrete Institute
BAN	Béton autonivellant
BAP	Béton Autoplaçant
BHP	Béton à Haute Performance
B_J	Différence d'Hauteurs de béton au J-Ring
BO	Béton ordinaire
BV	Béton Vibré
c	Compacité
C	Dosage en ciment
CaCO3	Calcite
CPJ, CEM II	Ciment Portland Composé
C-S-H	Silicate de calcium hydraté
C_3S	Silicates tricalciques (alite)
C_2S	Les silicates bicalciques (belite)
C_3A	Les aluminates tricalciques
C_4AF	Les alumino-ferrites tétracalciques
d	Petit diamètre des grains
D, Dmax	Diamètre maximal des grains
d/D	Classe granulaire
D.T.R	Document technique réglementaire
E	Poids d'eau dans le matériau
E/C	Eau/Ciment
E/L	Eau/Liant

Epr	Éprouvette
ES	Equivalent de sable
Eq	Equation
Fc_{28moy}	Résistance moyenne en compression à 28 jours
Fig	Figure
G	Gravier
G/S	Gravier/Sable
H.R	Humidité relative
j	Nombre de jours
LA	Coefficient Los Angeles
MAP	Mortier autoplaçant
m_e	Masse d'eau
m_g	Masse des granulats
Mf	Module de finesse du sable
P	Poudre (Ciment+ajout)
p	Coefficient d'élongation
p	Porosité
PC	Polycarboxylate
PNS	Polynaphtalène sulfonate
POE	Polyoxyétylène
Ps	Poids du matériau sec
Ph	Poids du matériau humide
q	Coefficient d'aplatissement
q(t)	Chaleur d'hydratation
R_b	Risque de blocage
Rc	Résistance à la compression
R_t	Résistance à la traction
R_{cmin}	Résistance minimale à la compression
R_{cmoy}	Résistance moyenne à la compression

R_{cmax}	Résistance maximale à la compression
S	Affaissement final
SCC	Self-Compacting Concrete
S/M	Sable/Mortier
SO3	Sulfates
Sp	Superplastifiant
Sp/L	Superplastifiant/Liant
Sp/C	Superplastifiant/Ciment
T	Schiste calciné
T_{20}	Temps mis après ouverture de la trappe pour atteindre la ligne des 20 cm (sec)
T_{40}	Temps mis après ouverture de la trappe pour atteindre la ligne des 40 cm (sec)
T_{50}	Temps d'écoulement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 50 cm (sec)
T_{VF}	Temps d'écoulement à l'entonnoir (sec)
VB	Valeur de bleu de méthylène
W	Teneur en eau d'un matériau
V	Volume totale
V_i	Proportion volumique des granulats de taille i
V_p	Volume de pâte (m^3)
V_{vides}	Volume des vides (m^3)
V_w	Volume d'eau (m^3)
P	Masse volumique
γ_{abs}	Masses volumiques absolue
γ_{app}	Masses volumiques apparente
γ_r	Masse volumique réelle
ν	Coefficient du poisson

Introduction Générale

Introduction Générale

1/ Contexte général

Le béton est actuellement l'un des matériaux de construction les plus utilisés à travers le monde. La simplicité de sa fabrication et de sa mise en œuvre, son faible cout de revient et les performances mécaniques et de durabilité qu'il assure ont légitimé son utilisation pour réaliser des ouvrages les plus divers, notamment des bâtiments, des immeubles d'habitation, bureaux, des ponts, des routes, des barrages, des centrales thermiques et nucléaires, etc.

Plusieurs types de bétons sont apparus ces dernières années ; les bétons ordinaires (BO), les bétons à hautes performances (BHP), les bétons à très hautes performances (BTHP), les bétons de fibres métalliques (BFM), les bétons de poudre réactive (BPR) et les bétons autoplaçants et autonivellants (BAP et BAN).

Les bétons autoplaçants sont des bétons spéciaux très fluides, homogènes et stables, dont la spécification est de se mettre en place sous l'effet de leur propre poids à l'aide de sa fluidité et homogénéité sans apport de vibration externe ou interne.

Les bétons autoplaçants possèdent une plage d'utilisation très large, des résistances couvrant la gamme des bétons ordinaires aux bétons à hautes performances et ils peuvent être coulés dans des zones très ferraillées ou dans des zones d'architecture complexe et difficilement accessibles. La suppression de la phase de vibration présente également l'intérêt d'améliorer les conditions de travail sur site, ainsi que le confort acoustique au voisinage du chantier plus particulièrement en zone urbaine.

D'une manière générale les contraintes de mise en œuvre des BAP sont nettement plus faibles que celles des bétons mis en œuvre par vibration, grâce à sa facilité de coulage sur de longues distances et de grandes hauteurs.

En effet, la qualité de matériau autoplaçant confère au béton plusieurs avantages techniques et socio-économiques par rapport au béton ordinaire ce qui donne aujourd'hui au béton autoplaçant une grande importance dans la recherche scientifique.

2/ Objectif de travail

Pour le but d'utiliser des granulats concassés algériens dans la confection des bétons autoplaçants, et de connaitre le facteur principal dominant dans le choix du squelette granulaire dans une formulation optimale du béton autoplaçant à base des granulats locaux, ce projet de recherche consiste à étudier l'influence des caractéristiques, types, classe, et la nature des

granulats locaux de la région de Médéa sur les propriétés physiques et mécaniques ainsi que la durabilité du béton autoplaçant à travers un nombre d'essais en laboratoire.

3/ Plan de travail

- En premier lieu on représente une introduction générale qui montre l'historique du BAP et leur utilisation en Algérie ainsi que la problématique et l'objectif de cette recherche.

- Le premier chapitre consiste au revenu bibliographique et se devise en deux parties, une première permet d'avoir une idée générale sur l'activité granulat dans la wilaya de Médéa ainsi qu'une importante connaissance sur les granulats concassés utilisés dans le béton, puis une deuxième partie vise une familiarité sur le béton autoplaçant en présentant ces avantages, constituants, propriétés, formulation et les différents essais sur le BAP à l'état frais et à l'état durci.

- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de l'ensemble des matériaux utilisés dans le cadre de ce travail tout en justifiant leurs caractéristiques et différentes propriétés, puis on exposera la formulation qui a été choisie et le mode de confection du mortier et pour le béton, ainsi que les différents essais nécessaires durant cette étude expérimentale et les dispositifs expérimentaux mise en service pour ces essais effectués au laboratoire de Génie Civil de l'université de Médéa, en donnant pour chaque essai le principe de base et en décrivant le mode opératoire.

- Le dernier chapitre consiste a donné une analyse et une interprétation des résultats obtenu au laboratoire avec une conclusion générale et plusieurs recommandations.

Chapitre I :

Revenu Bibliographique

Chapitre I : Revenu Bibliographique

Introduction

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

I.1/ Activité granulat

I.1.1/ Présentation de l'activité minière dans la wilaya de Médéa

L'activité minière dans la wilaya de Médéa concerne l'exploitation des substances non métalliques utilisée à grande échelle dans le secteur de la construction [1].

Cette exploitation est constituée de l'extraction du calcaire pour la production des granulats de différentes dimensions.

I.1.2/ Carrières (implantation, production et réserve) Situation 2014

Le nombre de carrières pour l'extraction d'agrégat au niveau de la wilaya de Médéa, est de dix-neuf (19), la capacité théorique de production globale d'agrégats installée, des carrières opérationnelles est de 3 318 000 m3/an (destiné aux travaux de constructions et de routes) [1].

La wilaya compte aussi :

- Quatre (04) unités d'extraction de sable au niveau de la sablière d'Ensairet (commune de Boughezoul) dont Trois (03) sont en activité (destiné aux travaux de constructions) ;
- Une unité d'extraction d'Argile au niveau d'Oued El Maleh commune de Boughezoul avec une capacité annuelle de production de 140000 m3/an (destiné à la production de la brique) ;
- Une unité d'extraction de Gypse au niveau de la commune de Médéa Lieu-dit Ghezarza, avec une capacité de 100 000 t/an exploitée par SCAL- ERCC (destiné aux travaux de constructions) ;
- Onze (11) carrières pour l'extraction de tuf destiné aux travaux routiers au niveau des communes de chahbounia, K.E.B, Ouled maaref et Seghouane.

Pour les granulats concassés, le Tableau I.1 suivant présente les capacités de production installées dans chaque gisement recensées en 2014 [1].

Tableau I.1 : Les gisements de la wilaya de Médéa et capacité de production en granulats (Situation 2014) [1].

1- Agrégats											
N°	**Entreprise**	**Statut Juridique**	**Superficie (Ha)**	**Lieu-dit**	**Commune**	**Substance extraite**	**Destination**	**Réserves du gisement (M^3)**	**capacité installée (M^3)**	**Production (M^3)**	**Réserves extraites (M^3)**
1	TITTERIE	SARL	45	Kef Assel	Guelb El Kabir	Calcaire	**Construction – Routes**	4918775	350000	**324775**	2535848
2	ESSALEM	SARL	19	Kef Assel	Guelb El Kabir	Calcaire		1050000	72000	**16290**	167919
3	ESSALEM	SARL	24	Krabib	Zoubiria	Calcaire		5000000	400000	**45010**	227780
4	NTP SALLALI	EURL	3	Kodiet Rsaifia	Guelb El Kabir	Calcaire		600000	150000	**82449**	275051
5	MAASKRI	SNC	5.1075	Kef El Ghoula	Boughezoul	Grés		835000	72000	**4566**	70960
6	MORSLI	SNC	3.4355	Kef El Ghoula	Boughezoul	Grés		680000	20000	**10740**	154766
7	BATI SUD	SPA	8	Metlag	Zoubiria	Calcaire		1500000	70000	**45716**	152454
8	NATIONAL A+	SARL	20	Gaadet Mraguib	Zoubiria	Calcaire		3936653	154000	**59173**	767154
9	ZOUBIRIA AGREGAT	EURL	9	Ain El Kherba	Zoubiria	Calcaire	**Construction – Routes**	1106368	72000	**74375**	526130
10	AKHOUA	SARL	15	Matlag	Zoubiria	Calcaire		900000	1500000	**60253**	388597
11	CARRIERE BOUKHARI	EURL	14.17	Sidi Meslem	Hannacha	Calcaire		900000	60000	**29120**	267918
12	ISO AGREGAL	SARL	17	Maizia	Hannacha	Calcaire		3723469	26000	**133700**	385934
13	SEGHOUANE	EURL	6	Oued Elhad	Bouaichoune	Calcaire		608437	150000	**31975**	171768
14	TAIHI FRERES	SNC	18	Kef El Karia	Hamdania	Calcaire		329894	72000	**13490**	256400
15	Méga agrégat	EURL	10	Zoubiria – 3	Zoubiria	Calcaire		2666860	150000	**81304**	93547
16	BATI SUD	SPA	3	Kef El Ghoula	Boughezoul	Grès		650000	/	**72969**	125085
17	HYDROTECHNIQUE	Epe.spa	5	Kef lagueb	Souagui	Calcaire	Construction barrage	/	/	**non déclarée**	-
18	COSSIDER TP	GROUPE	0.6	Kef El Ghoula	Boughezoul	Grès	Dédoublement de la RN 01 (chiffa -Berouaguia)	/	/	**11428**	11428
19	CSCEC – ENGOA - SAPTA	GROUPE	5	DJBEL ELNEHAL	TAMAZGUIDA	Calcaire		/	/	**non déclarée**	-

2- Sable											
N°	**Entreprise**	**Statut Juridique**	**Superficie (Ha)**	**Lieu-dit**	**Commune**	**Substance extraite**	**Destination**	**Réserves du gisement (M^3)**	**capacité installée (M^3)**	**Production (M^3)**	**Réserves extraites (M^3)**
1	Bousbia Nadji	EGTBH	5	Ensairet	Boughezoul	Sable	Construction	520000	/	**1085**	8351
2	Boussahoua B	EBT	5					600000	/	**2750**	13722
3	Bousbia Rabeh	SARL	5					480000	/	**4393**	14099

3- Argile											
N°	**Entreprise**	**Statut Juridique**	**Superficie (Ha)**	**Lieu-dit**	**Commune**	**Substance extraite**	**Destination**	**Réserves du gisement (M^3)**	**capacité installée (M^3)**	**Production (M^3)**	**Réserves extraites (M^3)**
1	SOTBAF	SARL	65	Oued El Maleh	Boughezoul	Argiles	Briques	21400000	140000	**88719**	133719

4- Gypse											
N°	**Entreprise**	**Statut Juridique**	**Superficie (Ha)**	**Lieu-dit**	**Commune**	**Substance extraite**	**Destination**	**Réserves du gisement (M^3)**	**capacité installée (M^3)**	**Production (M^3)**	**Réserves extraites (M^3)**
1	SCAL	SPA	18	Ghezarza	Médéa	Gypse	Construction	10281322	100000	**159126**	2783089,3

5- Tuf											
N°	**Entreprise**	**Statut Juridique**	**Superficie (Ha)**	**Lieu-dit**	**Commune**	**Substance extraite**	**Destination**	**Réserves du gisement (M^3)**	**capacité installée (M^3)**	**Production (M^3)**	**Réserves extraites (M^3)**
1	ETRHB	Groupe	4	Rjamgmar	chahbounia	Tuf	Routes		/	**139600**	139600
2			4	Faid Lahmer	K.E.B				/	**64450**	64450
3			4	Rjamgmar	chahbounia				/		
4	COSIDER TP	Groupe	3	Blad boukaroucha	chahbounia				/	**28909**	28909
5			5						/	**non déclarée**	/
6			5	Elmaaref 01	Chahbounia				/	**non déclarée**	
7			3	Elmaaref 02	chahbounia				/	**non déclarée**	
8	Engineering study	EURL	20	Kef Lasfer	Chahbounia			/	/	**non déclarée**	/
9	Sykan TPH	EURL	21	Ouled Hdim	Seghouane			/	/	**non déclarée**	/
10	G.C.B	Groupe	4	Elsoutra	chahbounia				/	**non déclarée**	/
11			4	Draa El Ghouzlan					/	**non déclarée**	/

Dans la figure I.1 on représente sur une carte la localisation des gisements d'agrégats sur les différentes communes de la wilaya.

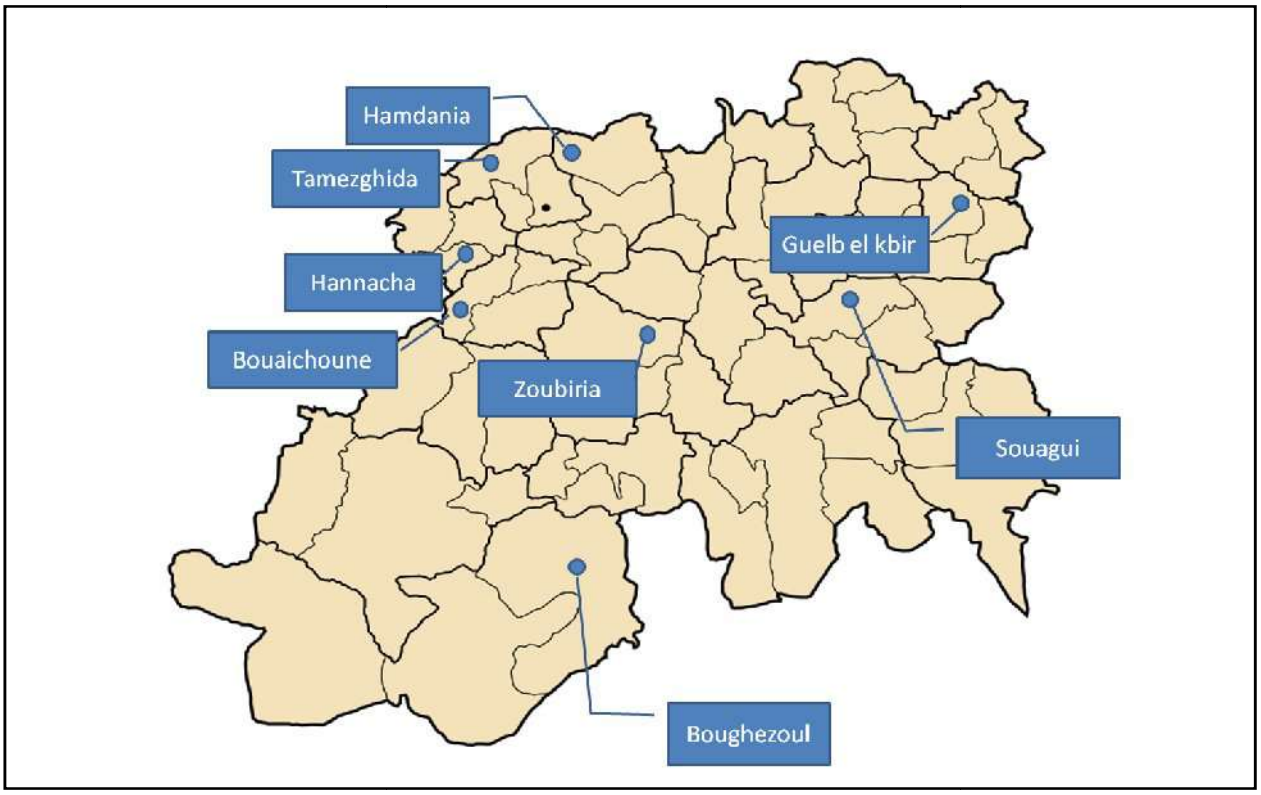


Figure I.1 : Carte des carrières d'agrégat dans la wilaya de Médéa [1].

I.1.3/ Résumé des usages nationaux

Les granulats alimentant principalement le secteur du BTP, leur production suit, par voie de conséquence, l'évolution générale des commandes de ce secteur. En effet, aux différents types d'usage des granulats correspondent des exigences spécifiques en termes de caractéristiques de ces matériaux. Si la réalisation de remblais peut être faite avec à peu près tous les types de matériaux sols ou roches, à condition d'une mise en œuvre adaptée, il n'en va pas de même pour les autres usages. Les granulats doivent alors répondre à un niveau d'exigence minimum s'ils sont destinés aux sous couches routières ou aux bétons, croissant pour des matériaux de structure ordinaires, voire très strictes lorsqu'ils doivent être inclus dans des ouvrages tels que des ponts, des ballasts de voies ferrées ou des couches de roulement autoroutières.

I.1.4/ Prospective pour les granulats concassés et les sables

Les besoins en granulats, particulièrement ceux nécessaires pour la mise en œuvre de la décision du gouvernement d'engager des travaux d'infrastructures de base de grande envergure, obligent les opérateurs à investir pour une augmentation de capacité de l'ordre de 60 millions de tonnes par an dont 20 à 25 millions de tonnes de sable. Pour réaliser cette augmentation de capacité, il serait judicieux d'agir :

I.1.4.1/ Sur le plan quantitatif

-La contrainte des délais oblige à proposer dans l'ordre :

- L'extension des capacités sur les sites existants ;
- L'investissement dans la fabrication de sables de concassage dans les sites existants ou sur des sites indépendants des carrières et alimentés par des granulats propres ;
- L'investissement sur les nouveaux sites.

-L'augmentation des quantités peut être obtenue par les actions suivantes :

- Renouvellement et complément d'équipements de carrière ;
- Facilitation de l'obtention et de la bonne utilisation des explosifs ;
- Réhabilitation des installations de concassage ;
- Augmentation du temps de travail ;
- Formation du personnel technique ;
- Favoriser et encourager la réalisation d'installations de sables : sur les sites actuels, mais aussi, et surtout, sur des sites indépendants alimentés par des produits propres en provenance des carrières ;
- Favoriser et encourager l'utilisation des sables de concassage pour la fabrication des bétons ;
- Favoriser et encourager l'utilisation des mélanges de concassage et de sables de dunes.

I.1.4.2/ Sur le plan qualitatif

L'amélioration sensible de la qualité des produits nécessite :

- Une maîtrise rigoureuse des différentes étapes du processus d'élaboration des granulats et particulièrement : une bonne exploitation de la carrière en réduisant au minimum la présence d'argile dans les tout-venants, mettre en œuvre les méthodes actuelles de scalpage (scalpeuses à doigts, à disque, à haute énergie…), fixer les règles techniques de cette qualité,

- Exiger des producteurs de granulats, un contrôle de qualité et d'élaboration de fiches techniques des produits ;

-Responsabiliser les entreprises de réalisation, clientes des producteurs de granulats pour :

- exiger les fiches techniques des produits ;
- procéder au contrôle des produits.

I.1.4.3/ Aspect environnemental

Au-delà de l'aspect géologique qui pilote la répartition géographique des gisements, la notion de ressource est aussi subordonnée à des aspects économiques. En effet, pour qu'un massif rocheux soit potentiellement exploitable, il est nécessaire que la production correspondante réponde à un besoin, et qu'elle puisse satisfaire ce besoin à des coûts compétitifs. En d'autres termes, les caractéristiques d'une carrière dépendent de celles des marchés qu'elle dessert.

Les produits élaborés en carrière se présentent sous forme de classe granulaire standard, leur évaluation environnementale est complètement liée au type de gisement et à l'organisation de l'exploitation. De ce fait, la prise de conscience de l'importance de la protection de l'environnement et des impacts potentiels associés à l'élaboration des matériaux de construction nécessite le développement de méthodes destinées à mieux comprendre et à réduire les impacts engendrés lors de la production de cette ressource. Parallèlement, pour répondre aux nouveaux enjeux environnementaux, les entreprises ont besoin de maîtriser les effets de leurs activités ou produits sur l'environnement et donc de les évaluer. La mise au point d'indicateurs pertinents d'un point de vue scientifique, adaptables et évolutifs d'un point de vue temporel, est un enjeu essentiel afin de pouvoir mesurer et contrôler l'état d'avancement vers une gestion durable de la ressource en granulats naturels.

I.2/ Granulat pour Béton

I.2.1/ Définition des granulats

Le granulat est constitué d'un ensemble de grains minéraux qui selon sa dimension (comprise entre 0 et 125 mm) se situe dans l'une des 7 familles suivantes : *fillers, sablons, sables, graves, gravillons, ballast, enrochements.*

Les granulats sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire terrestre ou marine, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives) ou encore par le recyclage de produits tels que les matériaux de démolition. Leur nature, leur forme et leurs caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production.

La nature minérale des granulats est un critère fondamental pour son emploi, chaque roche possédant des caractéristiques spécifiques en termes de résistance mécanique, de tenue au gel et des propriétés physico-chimiques. Les granulats les plus usuels pour la fabrication des mortiers et des bétons sont élaborés à partir de roches d'origine alluvionnaire (granulats roulés ou semi-concassés) ou à partir de roches massives (granulats concassés).

La taille d'un granulat répond à des critères granulométriques précis. Les granulats sont classés en fonction de leur granularité (distribution dimensionnelle des grains) déterminée par analyse granulométrique à l'aide de tamis.

Le granulat est désigné par le couple d/D avec :

d : dimension inférieure du granulat

D: dimension supérieure du granulat

Les intervalles d/D et O/D sont appelés classes granulaires.

Les granulats utilisés pour la confection des bétons sont :

– les fillers ;

– les sables ;

– les gravillons ;

– les graves.

Tableau I.2 : Les granulats les plus utilisés dans le Béton.

Les granulats les plus utilisés		
Familles	***Dimensions***	***Caractéristiques***
Fillers	0/D	D < 2 mm avec au moins 85 % de passant à 1,25 mm et 70 % de passant à 0,063 mm
Sables	0/D	d = 0 et D ≤ 4 mm
Graves	0/D	D ≥ 6,3 mm
Gravillons	d/D	d ≥ 2 mm et D ≤ 63 mm
Ballasts	d/D	d = 31,5 mm et D = 50 ou 63 mm

Les granulats sont considérés comme courants lorsque leur masse volumique est supérieure à 2 t/m3 et léger si elle est inférieure à 2 t/m^3. Les granulats doivent répondre à des exigences et des critères de qualité et de régularité qui dépendent de leur origine et de leur procédé d'élaboration. Les granulats sont donc spécifiés par deux types de caractéristiques.

Des caractéristiques intrinsèques

Liées à la nature minéralogique de la roche et à la qualité du gisement, telles que, par exemple :

– la masse volumique réelle ;

– l'absorption d'eau et la porosité ;

– la sensibilité au gel ;

– la résistance à la fragmentation et au polissage ;

Des caractéristiques de fabrication

Liées aux procédés d'exploitation et de production des granulats telles que, en particulier :

– la granularité ;

– la forme (aplatissement) ;

– la propreté des sables.

Les caractéristiques des granulats sont fonction de leurs familles (gravillons, sables, fillers) et font l'objet de méthode de détermination adaptée.

I.2.2/ Différents types de granulats

Un granulat, en fonction de sa nature et de son origine, peut être…

Naturel : d'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions) ou de roches massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage).

Artificiel : d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres.

Recyclé : obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments.

I.2.2.1/ Granulats naturels

Les granulats naturels sont issus de roches meubles ou massives. Les roches meubles (matériaux alluvionnaires) sont exploitées le long des fleuves et des rivières. Les roches massives calcaires constituent les bassins sédimentaires et les chaînes récentes ; les roches massives éruptives constituent les massifs anciens.

Origine minéralogique

Parmi les granulats naturels, les plus utilisés pour le béton proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques telles que les quartzs et quartzites ou de roches éruptives telles que les basaltes, les granites, les porphyres.

Granulats roulés et granulats de carrières

Indépendamment de leur origine minéralogique, on classe les granulats en deux catégories.

• Les granulats de roche meuble :

Dits roulés, dont la forme a été acquise par l'érosion. Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses, nuisibles à la résistance du béton et criblés pour obtenir différentes classes de dimension. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, les granulats utilisés pour le béton sont le plus souvent siliceux, calcaires ou silico-calcaires.

Ils sont exploités à proximité des cours d'eau, dans la nappe ou au-dessus de la nappe ou sur des fonds marins peu profonds. L'extraction est donc réalisée en fonction du gisement à sec ou dans l'eau.

• Les granulats de roche massive :

Sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Une phase de précriblage est indispensable à l'obtention de granulats propres.

Différentes phases de concassage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage.



Figure I.2 : Types des granulats.

I.2.2.2/ Granulats artificiels

Des granulats artificiels peuvent être employés pour réaliser des bétons à usages spécifiques.

Sous-produits industriels, concassés ou non

Les plus employés sont le laitier cristallisé concassé et le laitier granulé de haut fourneau obtenus par refroidissement à l'eau.

Granulats à hautes caractéristiques

Il s'agit de granulats élaborés industriellement pour répondre à certains emplois, notamment granulats très durs pour renforcer la résistance à l'usure de dallages industriels (granulats ferreux) ou granulats réfractaires.

I.2.2.3/ Granulats recyclés

Ce sont essentiellement des granulats obtenus pour recyclage de béton de démolition.

I.2.3/ Granulats et composants légers

I.2.3.1/ Les granulats légers usuels

Sont l'argile expansée, le schiste expansé ou le laitier expansé. D'une masse volumique variable entre 400 et 800 kg/m3 selon le type et la granularité, ils permettent de réaliser aussi bien des bétons de structure que des bétons présentant une bonne isolation thermique.

Les gains de poids sont intéressants puisque les bétons réalisés ont une masse volumique comprise entre 1200 et 2000 kg/m3.

I.2.3.2/ Les composants légers

Sont d'origine aussi bien végétale et organique que minérale. Le polystyrène expansé et le liège, d'origine non minérale, le bois, ainsi que la vermiculite sont également utilisés pour réaliser des bétons très légers en isolation ou pour des chapes. Très légers – de 20 à 100 kg/m3 – ils permettent de réaliser des bétons de masse volumique comprise entre 300 et 600 kg/m3. Ils sont donc particulièrement adaptés pour les bétons d'isolation, mais également pour la réalisation d'éléments légers : blocs coffrants, blocs de remplissage, dalles ou rechargements sur planchers peu résistants.

Tableau I.3 : Différents types de granulats issus de roches massives.

Différents types de granulats issus de roches massives	
Types de roches massives	***Exemple de famille de granulats***
Roche magmatique Roche éruptive	Granite, rhyolite, porphyre, diorite, basalte, etc.
Roche sédimentaire	Grès, grès quartziques, silex, calcaires, etc.
Roche métamorphique	Gneiss, micaschistes, quartzites, etc.

I.2.4/ Production des granulats

La production des granulats à partir de roches meubles ou massives, nécessite les principales étapes suivantes.

-Le décapage : consiste à enlever les terres situées au-dessus de la zone à exploiter.

-L'extraction : s'effectue dans des carrières. Les techniques mises en œuvre dépendent du type de gisement :

- gisement de granulats alluvionnaires exploité en terrain sec (au moyen d'engins de terrassement) ou en site immergé (au moyen par exemple de drague) ;
- gisement compact de roches massives qui nécessite l'emploi d'explosif, l'abattage et la fragmentation des blocs.

-Le traitement : fait suite à l'extraction des matériaux, qui sont concassés et broyés (au moyen d'appareils travaillant par chocs ou écrasement) afin de réduire leur taille, criblés (au moyen de cribles vibrants) pour obtenir des granulats de tailles différentes, puis lavés (afin d'éliminer les éléments de pollution et les fines) ou dépoussiérés et enfin stockés. Les opérations de traitement permettent d'obtenir des granulats répondant à des spécifications précises quant à leurs caractéristiques géométriques et physiques pour des usages particuliers.

-La remise en état du site a lieu après exploitation.

I.2.5/ Identification géologique des roches

On appelle roches les minéraux qui constituent le globe terrestre. Le granite, le calcaire, l'argile, le sable et l'ardoise sont des roches. Chaque roche possède des particularités propres. Le granite

par exemple, en contient principalement trois minéraux : le mica, le quartz et le feldspath. Le calcaire peut être composé d'une seule sorte de minéral : la calcite.

Un minéral a souvent une forme géométrique qui présente des facettes brillantes : on dit que c'est un cristal. Lorsqu'il n'y a pas de forme géométrique précise, le minéral est à l'état vitreux.

La minéralogie du point de vue économique permet de promouvoir l'utilisation des espèces minérales naturelles et de faire aussi la synthèse de celles qui sont nécessaires à la demande industrielle [3].

I.2.5.1/ Minéraux de base et classifications

Les roches sont constituées par des assemblages de minéraux. Les minéraux les plus répandus dans l'écorce terrestre sont des silicates (environ 90 %). Le reste comprend des carbonates, des oxydes métalliques, des sulfates, des sulfures, etc [4].

Il n'est pas toujours facile d'observer un minéral isolé. Comme pour les roches, les géologues ont établi des critères pour comparer les minéraux et les reconnaître. Ils en observent : La couleur, la transparence, l'éclat, la composition chimique, la forme de leurs cristaux, le clivage, c'est-à-dire la façon dont ils se fissurent, et enfin la dureté : On la mesure en soumettant le minéral à sa résistance à être rayé par d'autres minéraux, ou à rayer lui-même d'autres minéraux.

Les minéraux sont classés selon une échelle de dureté qui varie de 1 à 10 (échelle F.Mohs). Le chiffre 1 est attribué aux minéraux très tendres, le chiffre 10 aux minéraux très durs.

1- Talc : se laisse décaper à l'ongle.
2- Gypse : rayable à l'ongle.
3- Calcite : rayable à l'aide d'une pièce de cuivre.
4- Fluorine : facilement rayée au canif.
5- Apatite : rayable au canif.
6- Feldspath : rayable à l'aide d'une lime en acier.
7- Quartz : raye le verre à vitre (mais est rayable par d'autres minéraux).
8- Topaze : raye le quartz.
9- Corindon : raye la topaze
10- Diamant : non rayable, mais peut rayer tous les autres

I.2.5.2/ Propriétés des roches

Pour étudier une roche, on doit prélever un échantillon et le casser. En observant la cassure, on peut classer la roche selon ses différentes propriétés :

Sa couleur, Sa cohérence (cohérente, friable ou meuble), Sa ténacité (fragile ou tenace), Son aspect (formée : de grains, de feuillets superposés ou de cristaux), Sa malléabilité, Sa porosité (poreuse ou imperméable), Sa solubilité dans l'eau, Sa réaction à l'acide, La roche contient-elle des fossiles ? La roche brûle-t-elle (comme le charbon, le pétrole) ?

I.2.6/ Normes de référence

Les granulats comme la grande majorité des matériaux de construction doivent être conformes à des normes. Les granulats constituent le squelette du béton, la régularité de leurs caractéristiques conditionne donc celles du béton. Les granulats pour bétons font l'objet de deux principales normes de référence.

I.2.6.1/ La norme NF EN 12620 (août 2003) Granulats pour béton

Cette norme définit les termes relatifs aux granulats pour béton relevant de la Directive des Produits de Construction (DPC 89/106/CE). Elle définit des catégories pour chaque caractéristique des granulats et des fillers utilisés dans la fabrication des bétons. Les constituants du béton peuvent être élaborés à partir de matériaux naturels, artificiels ou recyclés. Elle concerne en particulier les bétons conformes à la norme NF EN 206-1, les granulats entrant dans la composition des produits préfabriqués en béton et les bétons routiers. Elle spécifie les caractéristiques (physiques et chimiques) relatives à l'évaluation de la conformité des granulats et au système de maîtrise de la production.

I.2.6.2/ La norme XP P 18-545 (février 2004) Granulats : éléments de définition, conformité et codification

Cette norme définit les règles générales permettant d'effectuer les contrôles des granulats. Elle regroupe en codes les catégories définies dans la norme NF EN 12620 pour les divers usages possibles : granulats pour chaussées (couches de fondation, de base et de liaison, couche de roulement utilisant des liants hydrocarbonés et bétons de ciment), granulats pour bétons hydrauliques et mortiers, granulats pour voies ferrées (assises et ballast). Elle précise les critères de régularité et de conformité et fournit les Fiches Techniques Produit.

I.2.7/ Caractéristiques des granulats

Les granulats sont les principaux composants du béton (70% en poids). Les performances mécaniques des granulats vont donc conditionner la résistance mécanique du béton et leurs caractéristiques géométriques et esthétiques, en particulier, l'aspect des parements des ouvrages. Le choix des caractéristiques des granulats (roulés ou concassés, teintes, dimensions) est déterminé par les contraintes mécaniques, physico-chimiques et esthétiques du projet à réaliser et de mise en œuvre du béton (critère de maniabilité, enrobage).

I.2.7.1/ Caractéristiques géométriques

I.2.7.1.1/ Classe granulaire

Les granulats sont désignés selon leur classe granulaire d/D (avec d : dimension inférieure et D : dimension supérieure). L'intervalle d/D est appelé classe granulaire. Les classes granulaires sont spécifiées en utilisant des séries de dimensions de tamis (en mm).

Série de base : 1 / 2 / 4 / 8 / 16 / 31,5 /63

Série de base + série 1 : 1 / 2 / 4 / 5,6 / 8 / 11,2 /16 / 22,4 / 31,5 / 45 / 63

Série de base + série 2 : 1 / 2 / 4 / 6,3 / 8 / 10 /12,5 / 14 / 16 /20 / 31,5 / 40 / 63

I.2.7.1.2/ Granularité

La granularité représente la distribution dimensionnelle des grains contenus dans un granulat. Elle est déterminée par tamisage (avec une série de tamis, de dimensions d'ouvertures décroissantes) et exprime le pourcentage massique de granulats passant au travers d'un ensemble spécifié de tamis. La proportion de particules retenues par un tamis s'appelle le refus, son complément le passant. Elle est représentée par une courbe granulométrique représentant les dimensions de tamis en abscisses et en ordonnées les pourcentages dépassants cumulés à travers les tamis successifs (en poids de grains).

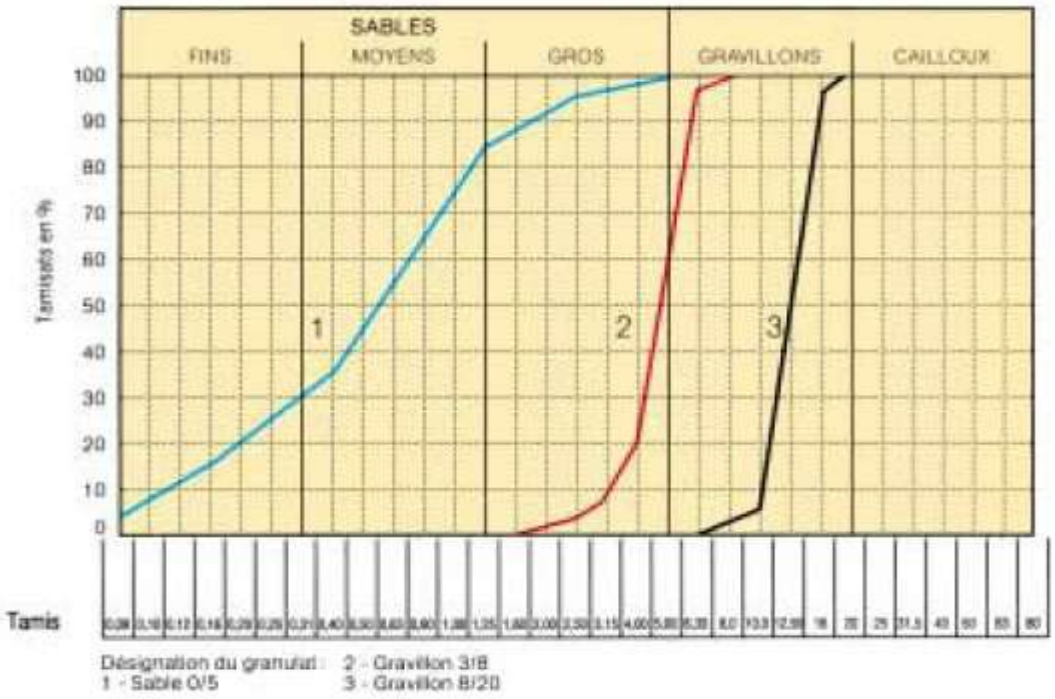


Figure I.3 : La courbe granulométrique.

I.2.7.2/ Forme des gravillons

I.2.7.2.1/ Coefficient d'aplatissement

La forme des gravillons est déterminée par l'essai d'aplatissement (A). Le coefficient d'aplatissement caractérise la forme du granulat à partir de sa plus grande dimension et de son épaisseur. Plus A est élevé, plus le gravillon contient d'éléments plats. Une mauvaise forme à une incidence sur la maniabilité et favorise la ségrégation.

I.2.7.2.2/ Module de finesse

Les sables sont caractérisés par le module de finesse (MF). Le module de finesse d'un granulat est égal au 1/100e de la somme des refus cumulés exprimés en pourcentages, sur différents tamis. Le module de finesse surtout utilisé pour les sables permet de caractériser leur granularité par une seule valeur. Celle-ci dépend surtout de la teneur en grains fins du sable. Plus le module de finesse est faible, plus le sable est fin. Un module de finesse élevée caractérise un sable grossier.

Nota

La composition du béton fait appel en général à une granularité discontinue. La plupart des bétons sont composés à partir de deux classes : un sable de type 0/5,6 et un gravillon 5,6/12,5 ; 5,6/16 ou 5,6/20. Cette formule permet de limiter les stockages d'un trop grand nombre de classes granulaires, en ne nécessitant que deux classes courantes chez les producteurs de granulats. La granulométrie continue (par exemple à partir de trois granulats 0/5,6, 5,6/16, 16/22,4) nécessite des dosages plus précis et des installations qui ne peuvent se concevoir que pour des chantiers importants ou des centrales de fabrication de béton prêt à l'emploi. Il est courant d'utiliser pour formuler les bétons des granulats concassés associés à des sables alluvionnaires.

I.2.7.3/ Caractéristiques physico-chimiques

I.2.7.3.1/ Propreté des granulats

Les impuretés peuvent perturber l'hydratation du ciment ou entraîner des défauts d'adhérence granulats- pâte, ce qui peut avoir une incidence sur la résistance du béton. La propreté traduit l'absence d'éléments fins indésirables dans les granulats. Elle désigne essentiellement la teneur en fines argileuses, dont la valeur doit être limitée. Dans le cas des gravillons, elle est donnée par le pourcentage de passant au tamis de 0,5 mm (tamisage effectué sous eau). Dans le cas des sables, la propreté (SE) est fournie par l'essai appelé « équivalent de sable » qui permet de mesurer la fraction argileuse du matériau. L'essai consiste à séparer le sable des matières

argileuses ou fines, qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette où l'on a effectué le lavage (plus la valeur de SE est grande, plus le sable est propre). Elle peut également être évaluée par l'essai au bleu de méthylène (VB) – plus la valeur de VB est petite, plus les sables sont propres. Le bleu de méthylène est adsorbé préférentiellement par les argiles, les matières organiques et les hydroxydes de fer. La valeur de bleu (VB) exprime la quantité de bleu de méthylène adsorbée par 100 g de fines. Il faut souligner l'importance de la propreté des granulats sur la qualité du béton. La présence de particules argileuses est en effet défavorable, autant à la mise en œuvre du béton qu'à ses performances finales, en abaissant l'adhérence de la pâte de ciment sur les granulats. D'autres impuretés telles que les particules organiques sont susceptibles de nuire aux qualités du béton et perturber son durcissement. Les sels tels que les sulfates ou les sulfures, peuvent être à l'origine de phénomènes de gonflement ou de tâches. Les corps étrangers (lignites ou scories) sont à proscrire.

I.2.7.4/ Caractéristiques physiques et mécaniques

Les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats sont déterminées par des essais visant à reproduire certaines sollicitations propres à des usages spécifiques des granulats. Elles sont donc spécifiées en fonction de leur emploi.

I.2.7.4.1/ Résistance à l'usure des gravillons

La résistance à l'usure des granulats est déterminée par l'essai Micro-Deval en présence d'eau. Cet essai consiste à reproduire dans un cylindre en rotation des phénomènes d'usure par frottements. Cette résistance est caractérisée par le coefficient Micro-Deval MDE qui représente la proportion d'éléments fins produits pendant l'essai. Plus le coefficient MDE est faible, plus la résistance à l'usure des gravillons est élevée.

I.2.7.4.2/ Résistance à la fragmentation des gravillons

La résistance à la fragmentation est déterminée par le coefficient Los Angeles. Le principe de cet essai est la détermination de la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques. L'essai consiste à faire tourner les granulats dans un tambour fermé contenant des boulets métalliques. Le coefficient Los Angeles représente la proportion d'éléments finis produits au cours de l'essai. Plus le coefficient LA est faible, plus la résistance des gravillons est élevée.

I.2.7.4.3/ Résistance au polissage des gravillons

Cette caractéristique concerne les granulats utilisés pour la réalisation de couches de roulement. Plus le coefficient de polissage accéléré (CPA) est élevé, plus la résistance au polissage est importante.

I.2.7.4.4/ Résistance des gravillons au gel-dégel

La vulnérabilité du granulat dans le béton à l'action du gel-dégel est fonction de sa nature, de son utilisation, des conditions climatiques et de la formulation du béton (utilisation par exemple d'air entraîné).

I.2.7.4.5/ Porosité

La porosité représente le rapport du volume des vides contenus dans les grains au volume des grains, exprimé en pourcentage.

$$P=\text{volume des vides / volume total} \qquad \text{(Eq I.1)}$$

On peut aussi définir la porosité comme le volume de vide par unité de volume apparent.
La porosité des granulats courants est en général très faible. Elle est importante dans le cas des granulats légers.

I.2.7.4.6/ Compacité

La compacité est le rapport du volume des pleins au volume total.
Ou volume des pleins par unité de volume apparent.

$$c = \text{plein} / (\text{vide} + \text{plein}) \qquad \text{(Eq I.2)}$$

$$p = \text{vide} / (\text{vide} + \text{plein}) \qquad \text{(Eq I.3)}$$

La porosité et la compacité sont liées par la relation :

$$p+c=1 \qquad \text{(Eq 1.4)}$$

La porosité et la compacité sont souvent exprimées en %. La somme des deux est alors égale à 100%.
Si l'on connaît la masse volumique D et la masse spécifique g d'un matériau, il est aisé de calculer sa compacité et porosité.

$$c = \text{volumes des pleins / volume totale} \qquad \text{(Eq I.5)}$$

Donc :

$$\begin{cases} c\ (\%)= 100\ \Delta / \gamma & \text{(Eq I.6)} \\ p\ (\%)= 100\ (1- \Delta / \gamma) & \text{(Eq I.7)} \end{cases}$$

Δ : volumes des pleins

γ : volume totale

I.2.7.4.7/ L'absorption d'eau

La plupart des granulats stockés dans une atmosphère sèche pendant un certain temps, peuvent par la suite absorber de l'eau. Le processus par lequel le liquide pénètre dans la roche et l'augmentation de poids qui en résulte sont appelés absorption. L'absorption peut varier dans de très larges mesures suivant la nature du granulat. Elle peut varier de 0 à plus de 30 % du poids sec pour granulat léger.

En général, les granulats naturels utilisés pour la confection du béton sont peu poreux et n'absorbent pratiquement pas d'eau lorsqu'ils sont gâchés avec le ciment et l'eau. Par contre, des granulats artificiels, tels le LECA (Light expanded clay aggregate = agrégats légers expansés d'argile), sont poreux. Il faut alors tenir compte de l'absorption de l'eau par les granulats lorsque l'on détermine la quantité d'eau requise pour fabriquer le béton.
Lorsque les granulats sont légèrement poreux, il faut travailler, lors de l'étude de la composition d'un béton, avec des matériaux saturés à surface sèche. On obtient cet état en conservant les granulats dans l'eau pendant plusieurs heures et en les laissant sécher juste avant emploi jusqu'à ce que leur surface devienne roulante [6].

I.2.7.4.8/ Teneur en eau

La teneur en eau d'un matériau est le rapport du poids d'eau contenu dans ce matériau au poids du même matériau sec. On peut aussi définir la teneur en eau comme le poids d'eau W contenu par unité de poids de matériau sec [12].

$$W = E / Ps = Ph-Ps / Ps \qquad \text{(Eq I.8)}$$

E : poids d'eau dans le matériau

Ps : poids du matériau sec

Ph : poids du matériau humide

A partir des définitions données plus haut, on peut écrire les relations :

$$E= (W\% / 100).Ps \qquad \text{(Eq I.9)}$$

$$E= (W\% / 100 +W\%). Ph \qquad \text{(Eq I.10)}$$

Il faut disposer de moyens pour mesurer combien il y a d'eau dans les granulats.

I.2.7.4.9/ Masse volumique en vrac ou apparente

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse du granulat sec pris en tas occupant l'unité de volume, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules, elle dépend du tassement des grains. Elle est comprise entre

1400 kg/m3 et 1600 kg/m3 pour les granulats roulés silico-calcaires. La masse volumique réelle du granulat (vides entre grains exclus) est nettement plus élevée : de 2500 à 2600 kg/m3.
La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté. La densité apparente à l'état compacté ou non compacté sera obtenue en établissant le rapport de la masse apparente d'une unité de volume du matériau à température donnée à la masse d'une même quantité d'eau distillée à même température.
La masse volumique apparente d'un granulat dépend de la forme et de la granulométrie des grains ainsi que le degré de compactage et d'humidité. La valeur apparente est utilisée dans le cas où l'on effectue les dosages en volume des différentes composantes du béton [6].

I.2.7.4.10/ La masse volumique absolue

La masse volumique absolue d'un matériau est la masse d'un mètre cube de ce matériau, déduction faite de tous les vides, aussi bien des vides entre les grains que des vides à l'intérieur des grains. La densité absolue est le rapport de la masse absolue d'une unité de volume du matériau à température donnée à la masse du même volume d'eau distillée à la même température [6].

I.2.7.4.11/ La masse volumique réelle

La masse volumique réelle d'un matériau est la masse d'un mètre cube de ce matériau déduction faite des vides entre particules. La déduction ne concerne pas les vides compris dans le matériau mais seulement ceux entre les particules. La densité réelle est le rapport de la masse réelle d'une unité de volume du matériau sec dans l'air à température donnée à la masse d'un égal volume d'eau distillée à la même température [6].

I.2.7.5/ Caractéristiques chimiques

I.2.7.5.1/ Teneur en ions chlorures

Les chlorures modifient la cinétique d'hydratation du ciment et provoquent la corrosion des armatures. La teneur en chlorure issu de l'ensemble des constituants du béton est donc limitée.

I.2.7.5.2/ Réactivités aux alcalis

Dans des conditions défavorables (granulats contenant une fraction significative de silice soluble réactive dans un environnement riche en alcalin) et en présence d'humidité, les phénomènes d'alcaliréaction peuvent provoquer un gonflement du béton. Les granulats sont désignés comme

étant non réactifs (NR), potentiellement réactifs (PR) ou potentiellement réactifs à effet de pessimum (PRP).

I.2.7.5.3/ Teneur en soufre et en sulfates

Les granulats peuvent contenir de faibles quantités de sulfates et de sulfures sous réserve que leur teneur en soufre total S n'excède pas 0,4% en masse. La teneur en sulfates (SO3) doit être inférieure à 0,2%. On la détermine si S est supérieure à 0,08%. Les sulfures présents dans les granulats peuvent en s'oxydant se transformer en sulfates qui risquent de générer des phénomènes de gonflement. Il faut donc limiter la teneur en soufre pour se prémunir de ce phénomène. Les sulfates peuvent perturber la prise et les actions des adjuvants d'où la nécessité de limiter leur teneur dans le béton.

I.2.7.6/ Caractéristiques esthétiques

Les granulats contribuent à la teinte des parements des bétons. Ils sont mis en valeur en fonction du traitement de surface appliqué. On utilise indifféremment en fonction des disponibilités et de l'aspect recherché des granulats roulés, concassés ou semi-concassés. Les sables et les gravillons sont disponibles dans une large variété de teintes naturelles. La teinte des bétons ayant subi un traitement de surface (béton lavé, béton désactivé, béton bouchardé, béton poli) est liée à la couleur des gravillons et des gros grains de sable. La teinte du mortier peut s'harmoniser avec celle des granulats ou au contraire créer un contraste faisant ressortir la couleur des gravillons. Le traitement de surface peut aussi faire apparaître, de façon plus ou moins marquée, la teinte des grains fins du sable ou celle des gros grains. La taille et la forme des granulats ont aussi un impact déterminant sur la texture des bétons traités. La granulométrie doit donc être compatible avec l'aspect recherché. En règle générale, pour les bétons bruts de décoffrage, la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 25mm. Pour les bétons à traiter, la granulométrie sera fonction de l'aspect de surface recherché et de l'épaisseur du parement. La dureté des granulats doit être adaptée aux traitements de surface. Suivant leur origine, les gravillons offrent différentes qualités :

– calcaires (marbres, pierres marbrières) : bonne adaptation aux traitements par grésage ou polissage ;

– siliceux (quartz, quartzites) : bonne résistance à l'abrasion ;

– éruptifs et métamorphiques (basaltes, granites, diorites, porphyres) : très grande variété de coloration.

Tableau I.4 : Teintes des granulats en fonction de leur nature minéralogique.

Teintes des granulats en fonction de leur nature minéralogique	
Nature minéralogique des granulats	***Teintes***
Calcaires durs	Noir, bleu, rose, beige, blanc, vert
Granites	Jaune, rose, gris, vert
Basaltes	Noir ou bleu-noir
Grès	Gris, rouge, beige
Diorites	Bleu ou rose
Quartzites	Rose, gris, blanc
Silex	Beige ou bistre

I.3/ Le béton autoplaçant

I.3.1/ Généralité

La mise en œuvre d'un béton traditionnel nécessite une phase de vibration afin de remplir correctement les coffrages. Cette étape conditionne la qualité de la structure finale, mais c'est également un travail pénible qui demande un savoir-faire particulier.

La solution proposée a été d'utiliser un matériau très fluide, capable de se compacter sous son propre poids, sans vibration extérieure. Ces matériaux initialement appelés Bétons Hautes performances, sont aujourd'hui connus sous le nom de bétons autoplaçants, bétons autocompactants, ou bétons autonivellants, selon les applications.

Ce sont des bétons très spéciaux, ils sont

- très fluides et très déformables
- homogènes et stables
- ils se mettent en place par l'unique effet de la gravité, sans l'utilisation de moyen de vibration
- ils épousent parfaitement les formes des coffrages plus complexes.
- Ils ne doivent pas subir de ségrégation et doivent présenter une compacité comparable avec celle des bétons vibrés.

Le BAP est un béton capable de se mettre en place dans les coffrages les plus complexes et très encombrés uniquement sous le seul effet de la gravité, ainsi que ce type de béton ne requiert aucun moyen de vibration pour consolider le mélange pour obtient un produit très homogène [7].

Un BAP doit être apte à passer à travers les armatures les plus serrées grâce à sa viscosité. Pour assurer cette condition, le béton doit être très fluide, c'est à- dire très déformable.

Seulement, la fluidité n'est pas la seule propriété recherchée, car il faut bien s'assurer de l'homogénéité de l'ensemble pâte-granulats. De façon corollaire, le mélange du BAP doit être très cohésif et très stable lors de la mise en place et cela jusqu'à son durcissement. Ceci implique que le BAP doit présenter le minimum de tassement et de sédimentation des un particules solides et éviter de présenter ressuage trop fort, car cela génère une hétérogénéité des propriétés mécaniques, telle qu'une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées par rapport à celles situées en zone inférieure lors du coulage [8].

Il faut s'assurer de la stabilité du mélange et éviter, par conséquent, la ségrégation [9,10].

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires notamment par leurs propriétés à l'état frais. Ces propriétés se caractérisent principalement par :

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

Afin de pouvoir répondre à ces caractéristiques, la composition d'un BAP doit être soigneusement mise au point.

Son développement a commencé au Japon à la fin des années 1980 pour des raisons économiques (réduction de la main d'œuvre, rapidité de mise en place) et s'est progressivement répandu dans le reste du monde. Cet intérêt peut s'expliquer du fait que les chercheurs et les industriels japonais n'ont commencé à publier leurs recherches que depuis peu, étant maintenant dans une phase de valorisation de leur produit.

En effet, la qualité de matériau autoplaçant confère au béton plusieurs avantages techniques et socio-économiques par rapport au béton ordinaire :

I.3.1.1/ Avantages techniques

- Facilité et rapidité dans la mise en œuvre du béton (coulage en un seul point, augmentation du débit de béton pompé).
- Bétonnage en milieux fortement ferraillés.
- Amélioration de la qualité des parements et de l'enrobage des aciers.
- Réalisation d'éléments de forme plus complexe avec une meilleure qualité des parements.

I.3.1.2/ Avantages socio-économiques

- Réduction du coût de la main d'œuvre.
- Absence de systèmes de vibration (intérieurs ou extérieurs) réduisant ainsi les coûts et les nuisances sonores dans et au voisinage du chantier.

- Réduction du temps de bétonnage et des besoins de ragréage.

Toutefois, certains points restent à surveiller dans l'utilisation du béton autoplaçant:

- Augmentation du coût des matières premières, par la présence des nouveaux adjuvants, et des différentes additions minérales.
- Compatibilité des matériaux.
- Etanchéité des coffrages.

I.3.1.3/ Historique des bétons autoplaçants

Beaucoup de structures actuelles se caractérisent par la complexité de leur architecture (formes variables et courbures multiples), ainsi que par une forte concentration en armatures, ce qui rend souvent difficile l'utilisation des bétons de plasticité conventionnelle.

Afin d'adapter les bétons à ces ouvrages, des recherches ont été menées au cours des dernières années dans le but de développer des formulations de bétons se caractérisant par une haute ouvrabilité, tout en étant stables (ségrégation, ressuage et tassement faibles), avec de bonnes caractéristiques mécaniques et de durabilité.

Ces bétons désignent des bétons très fluides, homogènes et stables, mis en place sans vibrations, leur compactage s'effectue par le seul effet gravitaire.

On parle de béton autonivellant (BAN) pour les dalles et toutes les parois horizontales et de béton autoplaçant (BAP) pour les murs et toutes les parois verticales.

Les BAP (SCC) ont été développés dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon, leur objectif était d'augmenter la cadence des travaux en réduisant l'effectif du personnel sur chantier et le temps de mise en œuvre.

De nombreuses études actuelles ont pour objectif de trouver la bonne formulation des BAP, obtenue par l'ajout d'un superplastifiant dont l'excès peut entraîner la ségrégation. Cette dernière peut être évitée par l'ajout d'un agent de viscosité et l'introduction d'un volume de fine nettement supérieur à celui d'un béton ordinaire.

Le faible ressuage des bétons autoplaçants présente, dans le cas des dallages, l'avantage de réduire le temps entre la fin de la mise en œuvre et la fin de l'opération de finition du béton.

Ces bétons connaissent un essor important au Japon, de par leurs deux principaux intérêts technico-économiques, à savoir :

- La diminution du temps des travaux et du nombre des ouvriers lors de la mise en place du béton sur chantier. Cela est d'autant plus important qu'elle devient de plus en plus

coûteuse et génératrice de délais, étant donné la complexité croissante des coffrages (formes, ferraillages) ;

- L'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.

L'intérêt des autres pays pour ces bétons n'est apparu que récemment, mais il est en plein augmentation, comme le montre la multiplication du nombre d'équipes de recherche dans ce domaine afin d'obtenir un gain maximum de résistance, d'ouvrabilité, de durabilité et d'optimiser la productivité des constructions en béton.

Cet intérêt tardif peut s'expliquer du fait que les chercheurs et les industriels japonais n'ont commencé à publier leurs recherches que depuis peu, étant maintenant dans une phase de valorisation de leur produit.

I.3.1.4/ Utilisation des bétons autoplaçants en Algérie

En Algérie, il existe très peu de rivières, ce qui diminue considérablement la disponibilité des agrégats alluvionnaires et donc roulés, qui sont à la base de la confection d'un bon béton autoplaçants, alors qu'il existe des centaines de carrières qui produisent des milliers de tonnes de granulats concassés.

Il est connut que jusqu'à présent il n'y a pas de normes techniques certifiées par les autorités algérienne pour l'utilisation du béton autoplaçant, sauf des recherches scientifiques dans les universités, même chose en Europe, mais ils ont quelques exceptions législatives leur permettent d'utiliser ces nouveaux types de matériaux sans normes techniques pour le bénéfice de l'intérêt public.

A notre connaissance et à ce jour aucun ouvrage n'a été construit en utilisant le BAP sachant qu'au niveau de la réglementation ce dernier n'est pas encore normalisé. Néanmoins, il peut y avoir quelques cas de construction où le béton adjuvanté a été utilisé en introduisant soit des plastifiants soit des superplastifiants mais pas pour autant que ça soit du béton autoplaçant [11].

I.3.2/ Définition et caractéristiques d'un BAP

I.3.2.1/ Définition d'un BAP [11]

Les bétons autoplaçants (BAP), sont encore à l'heure actuelle qualifiés de « nouveaux bétons » car leur utilisation reste modeste bien qu'ils possèdent un fort potentiel de développement.

La spécificité des BAP par rapport aux bétons traditionnels réside dans le fait qu'ils sont extrêmement fluides et qu'ils ne nécessitent pas de vibration pour être mis en œuvre. Se

compactant sous l'effet de leur propre poids, ils peuvent être coulés dans des zones très ferraillées ou dans des zones d'architecture complexe et difficilement accessibles. La suppression de la phase de vibration présente également l'intérêt d'améliorer les conditions de travail sur site, ainsi que le confort acoustique au voisinage du chantier plus particulièrement en zone urbaine.

Les essais, mis au point pour caractériser le matériau à l'état frais, concernent deux propriétés essentielles et indissociables des BAP : la fluidité et l'homogénéité. Apparaissant comme contradictoires, elles sont toutes deux nécessaires pour l'obtention d'une construction finale d'une qualité esthétique indéniable, mais également conforme aux exigences techniques préconisées.

Les différentes approches visant à concevoir des bétons autoplaçants ont abouti à des formulations de bétons ayant un volume de pâte plus important que celui des bétons ordinaires (pour des résistances mécaniques égales). En effet, la présence de la pâte (mélange du ciment, des adjuvants, de l'eau efficace et des ajouts minéraux) remplit les vides et écarte les granulats, minimisant ainsi les frictions et les frottements. Ceci a pour conséquence d'améliorer l'ouvrabilité et l'écoulement du béton. Les BAP contiennent donc une quantité moins importante de gravier, et beaucoup plus de fines (particules inférieures à 80 microns). Les ajouts minéraux de type filler calcaire, cendre volante, fumée de silice, laitier, etc. ont gardé leur rôle comme substituant partiel du ciment dans les BAP. Différents matériaux sont de plus utilisés dans la réalisation d'un béton autoplaçant, comme les entraîneurs d'air, les retardateurs ou accélérateurs de prise, et les réducteurs d'eau.

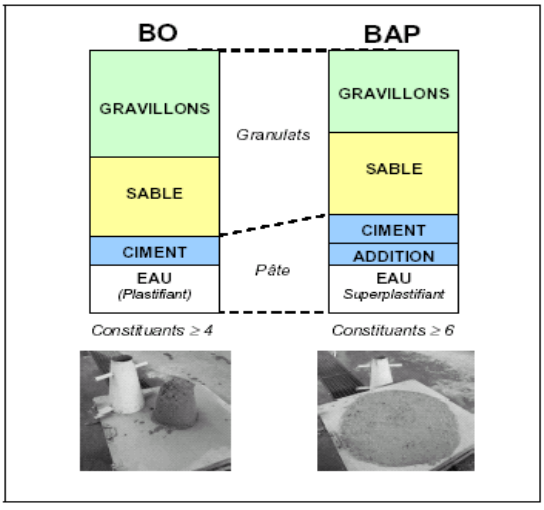


Figure I.4 : Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP

Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP.

I.3.2.2/ Domaine d'emploi [11]

Les caractéristiques des BAP laissent entrevoir de nombreuses possibilités techniques du fait de leur grande fluidité :

- possibilité de coulage de zones fortement ferraillées,
- possibilité de coulage de zones d'architecture complexe et difficilement accessibles,
- obtention de très bonnes qualités de parement.

La formulation des BAP est particulière à cause de l'utilisation d'adjuvants et d'additions minérales. Leur sensibilité en ce qui concerne le dosage et la teneur en eau, la qualité et la régularité des composants ainsi que les conditions de malaxage, nécessite donc la mise en place d'un suivi plus important.

Par ailleurs, on rappelle que la réglementation n'est pas encore adaptée au cas des BAP. En effet, la norme NF EN 206 ne définit que cinq classes de consistance (ferme → fluide). Actuellement, tous les BAP sont donc regroupés dans la classe 5 (fluide).



Figure I.5 : Domaines d'emploi des BAP.

I.3.2.3/ Mise en œuvre

La principale différence, entre un BAP et un béton traditionnel, réside dans le comportement du matériau à l'état frais et donc dans sa mise en œuvre. La spécificité d'un BAP est d'être extrêmement fluide. Il se compacte sous l'effet de son propre poids et ne nécessite donc pas de vibration pour être mis en place. Par ailleurs, le matériau doit être stable pour assurer l'homogénéité de la structure finale.

En termes de mise en œuvre, les BAP offrent des conditions plus souples que le béton traditionnel du fait de la suppression de la vibration. Un des avantages majeurs des BAP, que nous aborderons également dans la partie traitant de leur impact économique, est la réduction de la durée de la phase de coulage : la vidange de la benne se fait plus rapidement, l'écoulement du

matériau est bien évidemment plus aisé, la phase de vibration est supprimée et l'arase supérieure est plus facile à réaliser.

La méthode traditionnelle de remplissage par le haut du coffrage peut être utilisée avec une hauteur de chute plus importante. Il convient cependant de la limiter à 5m, pour éviter des problèmes de ségrégation dus à la chute du béton dans le coffrage. L'utilisation d'un tube plongeur peut être une alternative pour limiter la hauteur de chute du matériau.

La fluidité des BAP permet par ailleurs l'injection du matériau en pied de coffrage, même pour des éléments verticaux.

Quel que soit le mode de remplissage retenu, il convient de limiter la longueur de cheminement horizontal dans les coffrages. Une perte d'homogénéité peut en effet se manifester lorsque ce cheminement est trop important. Ainsi, la longueur de cheminement maximale préconisée est de 10 m.

La mise en œuvre d'un BAP est plus simple que celle d'un béton traditionnel du fait de la suppression de la vibration. Certaines précautions supplémentaires sont à prendre, lors de la préparation des coffrages par exemple (propreté, étanchéité…), mais globalement les consignes restent similaires à celles définies pour les bétons traditionnels.

I.3.2.4/ Impacts socio-économiques

Nous avons vu que la fluidité des BAP est telle qu'il n'est plus nécessaire de les vibrer pour les mettre en œuvre. La suppression de la phase de vibration est particulièrement bénéfique pour les personnes chargées de la mise en place, puisque cela implique :

- une diminution du bruit sur site

- une diminution de la pénibilité des tâches

- une réduction des risques d'accident

L'utilisation d'un BAP peut s'avérer plus économique que celle d'un béton ordinaire, et ce malgré un surcoût de formulation. Ce surcoût est principalement lié à l'adjuvantation puisque la fluidité doit être instantanée, mais également se maintenir dans le temps, dans le cas où les lieux de fabrication et de coulage ne seraient pas les mêmes. Cependant, ces frais supplémentaires peuvent rapidement être compensés par la diminution des coûts de main d'œuvre (réduction du nombre d'intervenants pendant la mise en place du béton), du temps de coulage, des délais de fabrication, etc.

Les BAP montrent en effet tout leur potentiel lorsque le chantier est considéré dans son ensemble, frais direct et indirect, donc par « l'approche globale ».

Même si l'utilisation des BAP nécessite certaines précautions en matière de formulation ou de préparation du matériel, l'évaluation de leurs avantages techniques mais également socioéconomiques montre que ces bétons devraient être de plus en plus utilisés à l'avenir.

I.3.3/ Constituants d'un BAP

Toute formulation passe par la compréhension de l'influence de chaque constituant sur les propriétés d'écoulement du béton. Le rôle d'un constituant dépend essentiellement de son état (fluide, solide) et de sa nature minéralogique, chimique et morphologique. Ainsi, nous allons décrire, dans cette partie, les caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition du béton autoplaçant (ciment, agrégats, eau, ajouts minéraux et adjuvants), et les paramètres influents.

Les constituants de base d'un béton ordinaire sont le ciment, l'eau et les granulats. En effet, si l'un de ces constituants n'est pas présent, le béton n'existait pas. Les bétons autoplaçants, par contre, sont possibles grâce aux ajouts d'adjuvants et d'additions minérales à la composition de base du béton.

Les différents constituants proposées pour composer les bétons autoplaçants, en plus du ciment et de l'eau dosés de manière à obtenir une résistance mécanique donnée, sont : les granulats, les fines, le superplastifiant et parfois l'agent de viscosité.

I.3.3.1/ Ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue qui, mélangée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite du processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium. Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le processus de durcissement.

Le ciment est obtenu à partir de la cuisson de mélanges approprié de calcaire et d'argile en proportion moyenne de 80% et 20%. Le mélange obtenu, appelé le cru est ensuite calciné dans un four rotatif porté à la température d'environ 1450˚C. Les matériaux s'agglomèrent et fusionnent partiellement pour former des nodules durs et noirs de 5 à30 mm de diamètre : le clinker. Celui-ci est constitué de quatre phases principales :

– le silicate tricalcique ($SiO2 - 3\ CaO$), noté C3S

– le silicate bicalcique ($SiO2 - 2\ CaO$), noté C2S

– l'aluminate tricalcique ($Al2O3 - 3\ CaO$), noté C3A

– le ferro-aluminate tétracalcique (Al2O3 - Fe2O3 − 4 CaO), noté C4AF

Le clinker est alors broyé finement et du gypse est généralement rajouté afin de contrôler la vitesse de prise. On obtient alors le ciment Portland. D'autres types de ciment peuvent être obtenus en mélangeant le clinker broyé avec d'autres constituants broyés qui, eux aussi, présentent des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques.

Le ciment généralement utilisé pour la confection d'un béton autoplaçant est soit le ciment Portland CPA-CEM I 42,5 qui contient au moins 95% de clinker et éventuellement un constituant secondaire, soit le ciment Portland composé CPA-CEM II/A et B 42,5 dont l'apport en clinker est de 65 à 94 %, le reste étant composé d'un ou de plusieurs ajouts.

Dans notre recherche Le ciment utilisé est un CPJ-CEM II/B, Un ciment Portland ordinaire dont la résistance minimale à la compression à 28 jours est de 42,5 MPa, produit par la cimenterie de la Farge (M'sila) dont l'ajout est le calcaire qui est conforme à la norme NA 442 [72].

I.3.3.2/ Granulats

Les granulats sont définis comme l'ensemble de grains minéraux et doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air, compris entre 0 mm et 40 mm (sable, graviers et cailloux) dont l'origine peut être naturelle ou artificielle. La nature des roches constituant les gisements est responsable des propriétés intrinsèques (masse volumique, résistance, porosité, réactivité, etc.) des granulats.

Nous distinguons les granulats roulés extraits de ballastières naturelles ou de rivières, et les granulats concassés, obtenus à partir des roches concassées exploitées en carrières. Les granulats sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent et la courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage, des poids des matériaux passants dans des tamis de dimensions normalisées.

La granularité et la forme des granulats sont fonction du processus d'élaboration. Les granulats permettent tout d'abord de réduire considérablement le coût global du béton (cinq fois moins chers que le ciment), mais leur influence est déterminante sur la résistance mécanique du béton à l'état durci. La résistance mécanique du béton dépend fortement de la nature des granulats, de la compacité du squelette global, ainsi que de l'adhérence entre les granulats et la pâte du béton.

La granularité et la compacité du squelette granulaire sec, ont cependant une influence sur le comportement du béton à l'état frais. Le dosage des granulats peut avoir une influence sur les propriétés d'ouvrabilité des bétons. Pour obtenir un béton autoplaçant, le volume du gravier et la taille maximale des granulats ont été réduits pour réduire les frictions et éviter les blocages dans des zones confinées.

L'importance des gros granulats sur la fluidité des bétons autoplaçants a pu être mise en évidence de même qu'il est recommandé d'utiliser des granulats roulés. En effet, les granulats roulés permettent de diminuer le risque de ségrégation. Il est considéré que le volume des gros granulats, dans le béton, est l'un des facteurs les plus importants à prendre en considération. En effet ils ont constaté que plus la teneur en gros granulats augmente, plus la capacité de remplissage diminue, contrairement au rapport sable sur pâte qui lui n'influence pas sur le coefficient de remplissage. Le volume des gros granulats est donc limité et le rapport gravillon/sable est proche de 1 [11].

La taille maximale D_{max} des granulats, étant un facteur non négligeable, peut provoquer un blocage. Il apparaît que le risque de blocage, pour un ferraillage donné, augmente lorsque le diamètre maximum des granulats augmente, il est conseillé donc que le diamètre maximal D_{max} des granulats reste, de préférence, dans la limite de 20 mm.

La quantité de sable contenue dans le mortier doit également être contrôlée. Les essais montrent que pour un rapport $V_{sable}/V_{mortier}$ supérieur à 50%, la capacité de remplissage, mesurée à la U-Box, diminue nettement. Moins il y a d'interaction entre les particules, plus le béton s'écoule facilement quelle que soit la configuration d'essai.

I.3.3.3/ Eau de gâchage

L'eau potable sert de référence pour la formulation du béton à cause de sa disponibilité (distribuée par les services publics). L'eau utilisée ne doit pas présenter un excès d'impuretés qui peuvent détériorer les propriétés des bétons (résistance, propriétés esthétiques, corrosion des armatures, etc.). Une partie de l'eau ajoutée au béton est mobilisée par les granulats (absorption, adsorption), alors qu'une deuxième partie est consommée par l'hydratation, et une troisième partie reste libre dans la matrice du béton. Cette dernière est principalement responsable de la fluidité du béton.

L'eau de gâchage doit être propre et ne doit pas contenir de matière en suspension au-delà des tolérances réglementaires suivantes [42] :

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

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

- 15 g/l pour les bétons à haute résistance
- 30 g/l pour les bétons à faibles résistances

La pâte doit assurer une mobilité suffisante mais doit aussi inhiber tout risque de ségrégation et de ressuage.

Un BAP sera dès lors composé d'une quantité de fines élevée et d'une quantité d'eau relativement faible (le rapport E/C rarement supérieur à 0,55 voire 0,50). La fluidité souhaitée sera obtenue par l'utilisation de superplastifiants.

I.3.3.4/ Ajouts minéraux

Les BAP sont caractérisés par une fluidité importante et surtout une diminution de la ségrégation et du ressuage. Pour obtenir ces propriétés, on ajoute de fortes teneurs en ajouts minéraux: fumées de silice, laitiers, cendres volantes, pouzzolanes et aditions calcaires.

En effet la combinaison de plusieurs matériaux cimentaires ayant des granularités différentes permet également d'améliorer de façon générale la compacité du béton. D'autres parts les ajouts minéraux sont moins réactifs à court terme que le ciment, ce qui permet de disposer d'un temps prolongé d'ouvrabilité. Ils ont aussi pour effet de réduire la chaleur d'hydratation.

La plupart des ajouts minéraux sont des sous-produits provenant de l'industrie et leur coût est souvent égal au coût du transport et de manipulation (broyage par exemple). Ainsi l'incorporation des ajouts minéraux à la formulation de béton comme substituant du ciment (produit plus cher), contribue à réduire le coût du béton. Par ailleurs, l'utilisation généralisée des ajouts minéraux dans le monde contribue aussi à réduire la production du ciment qui nécessite une chaleur importante, donc à réduire la quantité de combustible utilisée pour l'industrie du ciment, ainsi que l'émission du CO_2 de l'industrie cimentière dans la nature [11].

L'ouvrabilité du béton contenant des ajouts minéraux est largement améliorée par rapport au béton au ciment ordinaire. Cette amélioration est souvent attribuée à la grande finesse et à la caractéristique des surfaces de leurs grains qui crée des zones de glissement dans la pâte. En plus, la pâte de liant est augmentée par la présence d'un ajout plus léger ce qui engendre une faible cohésion entre les particules favorisant leur dispersion.

En général, les ajouts minéraux influencent fortement les propriétés des bétons à l'état durci, elles permettent d'améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons. En raison de leurs petites dimensions, les particules de la poudre se glissent entre les grains plus gros (sable par exemple), contribuant ainsi à avoir un squelette solide plus compact et réduisant l'espace libre pour l'eau [12].

Cette optimisation de la granulométrie du squelette total, aide aussi à limiter le ressuage du béton et à augmenter la cohésion de l'ensemble. Par ailleurs, les ajouts minéraux réduisent la chaleur dégagée du béton lors de l'hydratation, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

Différents types d'ajouts minéraux

Les ajouts minéraux substituant le ciment peuvent être classés en fines pouzzolaniques telles que la fumée de silice et la pouzzolane et fines inertes telles que le calcaire. Une autre classification est basée sur la source de chaque produit d'où on trouve :

Les produits artificiels

- le laitier des Hauts Fourneaux
- les cendres volantes,
- la fumée de silice,
- l'argile calcinée (méta kaolin)
- les déchets d'incinération
- les déchets de briques concassées

Les produits naturels

- la pouzzolane naturelle (cendres volcaniques, scories)
- le calcaire
- l'argile opaline
- les additions siliceuses (sable)

I.3.3.5/ Superplastifiant -Haut réducteur d'eau-

Les superplastifiants sont des produits organiques qui, ajoutés à de faibles proportions (de 0,2 à 2% environ) au béton frais permettent d'en modifier les propriétés rhéologiques durant une période plus ou moins longue.

Les superplastifiants sont des formes avancées de plastifiants. Ce sont des produits qui peuvent être ajoutés au béton en plus grande quantité que les plastifiants (10 fois plus), soit plus de 1% du poids du ciment, sans pour autant créer des effets secondaires (effet retardateur excessif, entraînement d'air).

L'ajout de superplastifiant et l'augmentation de son dosage apporte une meilleure dispersion des grains de ciment mais favorise également le ressuage. D'après des résultats expérimentaux, ces superplastifiants ont un effet bénéfique sur la zone de transition interfaciale. En conséquence, l'utilisation des superplastifiants comme réducteurs d'eau peut améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité du béton.

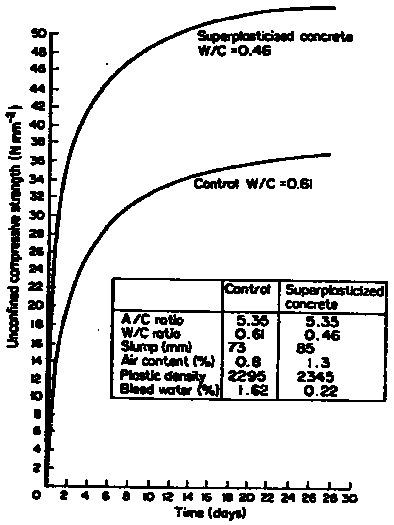


Figure I.6 : Relation entre la Résistance et le rapport E/C pour des Bétons avec et sans superplastifiant avec le temps.

Classification des superplastifiants

Il existe plusieurs générations de superplastifiants, correspondant à différents polymères ou différentes conformations de ces polymères, qui ont été élaborées au cours des dernières années. Bien que leurs modes d'action ne soient pas totalement compris, ils sont utilisés fréquemment dans l'industrie cimentaire. Leurs rôle est de fluidifier les matériaux cimentaires et par conséquent de pouvoir travailler à des concentrations massiques de ciment plus importantes. Ce point est important car les propriétés de résistance du matériau une fois durci en sont améliorées. De plus, certains ont un effet retard sur la prise du ciment qui a pour but de maintenir une ouvrabilité suffisante pour sa mise en place. Pour les autres, cette propriété est obtenue en ajoutant des retardateurs de prise (produits d'origine chimique différente des superplastifiants).

Les superplastifiants sont regroupés de la manière suivante:

- Le polymère de mélamine sulfonate (PMS)
- Le polymère de naphtalène sulfonate (PNS)
- Les lignosulfonates modifiés (LS)
- Les superplastifiants à base de polyacrylate, polycarboxylate ou de polyéthylène.

Principe d'action des superplastifiants

Un coulis (ciment+eau) est composé (au moment du mélange) de particules minérales électriquement chargées, qui sont dispersées dans une solution d'électrolytes. Le comportement rhéologique de ce coulis dépendra donc des propriétés de ces particules (concentration, dimensions, charges) et des électrolytes qui sont dans la solution.

Les phénomènes électrostatiques sont donc prédominants pour le comportement rhéologique d'un coulis. En raison de leurs compositions chimiques différentes, les particules de ciment

peuvent présenter des charges différentes. Les charges opposées vont s'attirer les unes des autres. Les particules de ciment vont floculer et augmenter la viscosité du coulis.

Par adsorption à l'interface solide-liquide, les plastifiants neutralisent les différentes charges des particules et donnent la même charge électrostatique à chaque grain de ciment. Ces charges de même signe vont créer des forces répulsives entre les particules. Par ailleurs, le fait que ces polymères sont adsorbés sur la surface des particules va créer un encombrement stérique qui va rendre encore plus difficile le contact entre les particules.

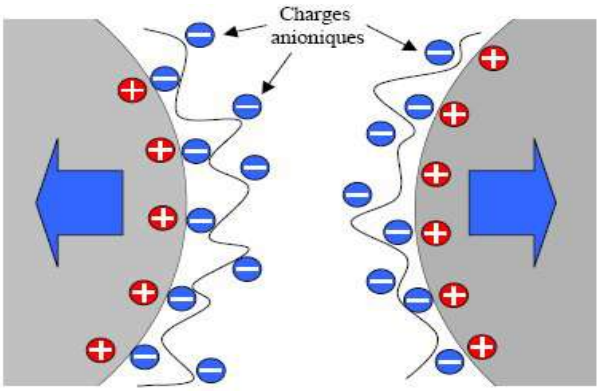


Figure I.7 : Répulsion électronique entre deux particules de ciment [14].

I.3.3.6/ Agent de viscosité

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

L'utilisation d'un agent de viscosité a pour but de stabiliser le béton en fixant l'eau dans le mélange, ce qui diminue le phénomène de ressuage et donne une plus grande cohésion au béton.

Autrement dit, Les agents de viscosité possèdent un rôle très important pour maintenir la stabilité des mélanges cimentaires. Ils assurent une cohésion entre les différentes phases d'un mélange, augmentant ainsi la résistance à la ségrégation des mélanges, et empêchent les mouvements libres d'eau, réduisant le ressuage [15].

Au niveau rhéologique, ils agissent en augmentant à la fois le seuil de cisaillement et la viscosité des mélanges [16].

En général les agents de viscosité utilisés sont des polysaccharides hydrosolubles. En fait il y a 3 catégories générales pour les agents de viscosité : les polymères naturels, semi-synthétiques et synthétiques. Les polymères naturels ou biopolymères regroupent des produits tels que la gomme welan, la gomme xanthane et la gomme guar. Les polymères semi-synthétiques regroupent des produits tels que les dérivés cellulosiques comme ceux à base d'hydroxypropylméthyl cellulose

(HPMC), d'hydroxylethyl cellulose (HEC) et de carboxyméthyl cellulose (CMC). Les polymères synthétiques regroupent les polymères à base de polyéthylène, de polyacrylamide et de vinyle.

En général, pour une ouvrabilité donnée, la quantité de superplastifiant croit avec celle de l'agent de viscosité.

Un dosage trop important en agent de viscosité empêche la pâte de se déformer et entraine une perte de fluidité, il peut conduire aussi à un entraînement d'air excessif. Les agents de viscosité permettent un maintien de la fluidité et de la capacité de remplissage au cours du temps estimé à environ une heure.

I.3.4/ Propriétés d'un BAP à l'état frais

Le BAP et le béton vibré se différencient par les propriétés du béton frais et le mode de mise en œuvre. Le béton autoplaçant est un béton qui se compacte de lui-même par effet gravitaire, sans aucun apport d'énergie de compactage (par ex. vibration, damage). Les propriétés caractéristiques de ce béton sont les suivantes:

- fluidité et viscosité élevées, sans aucune tendance à la ségrégation (comme du miel) ;
- désaération du béton pendant son écoulement ;
- excellente aptitude au remplissage des moindres recoins du coffrage par un béton homogène, même en présence de réservations, d'incorporés et de ferraillage dense. Le dispendieux et fastidieux travail de vibration est ainsi supprimé.

La composition d'un BAP doit offrir un rapport équilibré entre les propriétés recherchées sur béton frais ou durci et les coûts de fabrication. Les principales propriétés recherchées sur béton frais sont l'autocompaction, la fluidité, la viscosité et la stabilité envers la ségrégation. La formulation du BAP repose sur les mêmes bases technologiques que celles d'un béton vibré. Dans le cas du béton vibré, il s'agit de remplir les vides entre les granulats avec la pâte de ciment composée de ciment, d'additions et d'eau, afin d'obtenir un béton offrant les qualités requises (ouvrabilité et compacité). Par contre dans le cas du BAP, la pâte de ciment doit non seulement remplir les vides intergranulaires, mais il faut en plus prévoir un volume excédentaire d'environ 65 à 100 l/m3. Dans le cas d'un mélange constitué exclusivement de granulats concassés, cette valeur peut même s'élever jusqu'à 100 à 120 l/m3. Cet excédent constitue une condition indispensable aux propriétés de fluidité exceptionnelles des BAP. Étant donné que le volume des vides du mélange varie en fonction de la nature et de la provenance des granulats, ceci peut entraîner des adaptations et modifications de la composition d'un BAP dans chaque cas particulier [11].

Les guides Européens pour le BAP, répartissent les BAP à l'état frais en quatre (04) propriétés essentielles suivantes, et propose des essais à réaliser pour chacune d'elles (Tableau I.5) :

- la Capacité au Remplissage
- la Capacité de Passage
- la résistance à la Ségrégation
- la Rhéologie

Tableau I.5 : Essais relatifs aux BAP.

Propriétés	Essais à réaliser
Capacité au Remplissage	• Etalement au Cône d'Abrams (Slump-Flow) • Temps à T_{50} au cône d'Abrams (T_{50}Slump-Flow) • Temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel) • Etalement au Tube Orimet (Orimet)
Capacité de Passage	• Etalement au cône d'Abrams en présence d'anneau de bars (J-Ring test) • Différence d'hauteurs au J-Ring • Essai de la Boite en L (L-Box test) • Essai de la boite en U (U-Box test) • Essai du caisson (Fill Box)
Résistance à la Ségrégation	• Essai au Tamis de 5 mm
Mesures Rhéologiques	• Essai au cône d'Abrams modifié • Essais au Rhéomètres

I.3.4.1/ Capacité au remplissage

La capacité au remplissage du béton est définie comme l'habilité du béton à entreprendre un changement dans sa forme sous l'effet de son poids propre, même dans le cas de présence d'obstacles qui peuvent interférer avec son écoulement. Cette capacité au remplissage peut être mesurée à l'aide des deux essais, d'étalement au cône d'Abrams et à l'Orimet.

I.3.4.2/ Capacité de passage

La capacité de passage décrit la capacité du mélange de béton frais à l'étalement à travers des espaces confinés sans ségrégation, sans perte d'uniformisation et sans blocage. En définissant la capacité de passage, il est nécessaire de considérer, la géométrie et la densité du ferraillage, la capacité de remplissage du mélange ainsi que la dimension maximale du granulat.

La dimension à définir est l'espacement entre les barres, cet espacement doit permettre l'écoulement normal du béton. L'espacement entre la barre de ferraillage et le coffrage n'est pas à

considérer car le béton peut contourner la barre et n'aura pas besoin de s'étaler continuellement à travers cet espace.

I.3.4.3/ Résistance à la ségrégation

La résistance à la ségrégation est fondamentale pour l'homogénéité et la qualité sur site du béton autoplaçant. Le BAP peut souffrir de la ségrégation durant la mise en place et après mais avant son durcissement. La ségrégation qui se produit après la mise en place est la plus défavorable surtout pour les longs éléments et même pour les éléments minces comme les dalles, ça peut mener vers des dégradations de surface comme sa fissuration.

La résistance à la ségrégation devient un paramètre important dans le cas de classe élevée de fluidité ou de faible viscosité, ou bien dans le cas où les conditions de mise en place encouragent la ségrégation. Si aucun de ces cas ne se présente, il n'est généralement pas nécessaire de spécifier la classe de la résistance à la ségrégation.

I.3.4.4/ Caractéristiques rhéologiques d'un BAP

Définition de la rhéologie

La rhéologie est une branche de la mécanique qui étudie l'écoulement des matériaux et l'interaction entre les états de sollicitations (contraintes) et les déformations, en fonction de leurs caractéristiques de viscosité, d'élasticité et de plasticité [11].

Comme certains matériaux ne répondent pas exactement à la théorie de l'élasticité et de la mécanique des fluides, le vocable « rhéologie » a été inventé par des physiciens spécialistes de l'étude des matériaux dirigés par E.C. Bingham. Entre le solide parfait et le liquide parfait newtonien, il est apparu nécessaire d'élaborer cette discipline nouvelle. L'intérêt de la rhéologie grandit chaque jour depuis son apparition en 1928 avec l'apparition de nouvelles substances au comportement complexe tel que : pâtes, boues, suspensions, émulsions, polymères, etc. Pour le cas du béton, on s'intéressera à l'étude de l'écoulement du béton alors qu'il est encore à l'état frais et maniable.

Comportement rhéologique du béton frais

Le béton frais est constitué de granulats et d'autres particules solides dispersées dans la pâte de ciment. La pâte de ciment elle-même est une suspension de particules de ciment dans de l'eau. Le rôle de la pâte de ciment est de lier les granulats et, paradoxalement, de les séparer.

Il est généralement admis que le comportement du béton frais est bien représenté par le modèle binghamien après qu'un cisaillement ait été imposé pendant un certain temps.

L'affaissement donné par l'essai au cône d'Abrams est relié au seuil de cisaillement. L'essai au cône d'Abrams est un essai où le taux de cisaillement est quasistatique, ce qui explique la relation avec le seuil de cisaillement (contrainte alors que le taux de cisaillement est nul).

Les propriétés déjà mentionnées sont obtenues grâce à une teneur très élevée en farines (≤ 0,125 mm) qui, ensemble avec l'eau et l'adjuvant fluidifiant, constituent le coulis de ciment, sous forme d'une suspension colloïdale à viscosité élevée, dans laquelle nagent les granulats plus grossiers sans aucune tendance à la ségrégation. A cet égard, il est en principe indifférent que les farines proviennent du ciment, de cendres volantes, de fumée de silice ou de fillers minéraux, dans la mesure où les interactions entre la suspension et le fluidifiant permettent d'atteindre les caractéristiques rhéologiques nécessaires.

Lors de la fabrication du béton autoplaçant, on s'efforce par conséquent d'ajuster sa fluidité et sa viscosité de manière à permettre une mise en œuvre optimale. La viscosité du béton est généralement caractérisée par le temps d'écoulement nécessaire, par exemple lors de l'essai d'entonnoir, ou le temps nécessaire à l'obtention d'un diamètre fixé lors de l'essai d'étalement.

I.3.5/ Formulation et Composition d'un BAP

Les différentes propriétés des bétons autoplaçants (fluidité, viscosité, résistance à la ségrégation, aptitude au remplissage, etc.) rendent leur formulation relativement compliquée. Même si de nombreuses études ont été effectuées pour comprendre les principes qui régissent le comportement de ces bétons en milieux confinés, aucune méthodologie pratique de formulation ne semble avoir été établie, permettant à un chercheur ou à un ingénieur de fabriquer un béton autoplaçant à partir de données de base sur les matériaux locaux et un cahier de charges précis [17].

Réaliser un béton autoplaçant est une opération complexe qui nécessite de trouver une bonne combinaison de matériaux compatibles, et le dosage convenable de chacun de ces constituants afin d'obtenir une formulation répondant aux propriétés des BAP.

Il existe une très grande variété de matériaux dans le monde, et il est clair que les matériaux utilisés ont des influences variées sur l'écoulement du béton. Ceci implique qu'il est impossible de réaliser une formulation universelle de béton autoplaçant; chaque chantier utilisant ses propres matériaux (matériaux locaux) doit mettre au point sa propre formulation. La variété de matériaux peut conduire aussi à des comportements différents à tous les niveaux (ouvrabilité, rhéologie, résistance).

De multiples approches se sont développées à travers le monde pour la formulation d'un béton autoplaçant. Nous rapportons un exposé général sur les approches principales.

I.3.5.1/ Formulation OKAMURA « la Méthode Générale » (Japon) **[18]**

Considérée comme la méthode générale de formulation, la formulation OKAMURA a été développée à l'Université de Tokyo par Okamura. Cette méthode consiste d'abord à fixer le dosage de gravier dans le béton et celui du sable dans le mortier, ensuite de procéder à l'optimisation de la pâte de ciment afin de donner au béton résultant les meilleures performances.

Le volume de gravier est fixé à la hauteur de 50% du volume des solides contenus dans le béton. Ce pourcentage permet d'éviter les risques de blocages, à condition que le mortier du béton réponde correctement aux critères d'ouvrabilité testés. En effet, pour assurer une bonne ouvrabilité, le volume du sable est fixé à 40% du volume total de mortier. L'optimisation des dosages des constituants de la pâte de ciment est donc nécessaire pour s'assurer que le mortier obtenu (en associant le volume du sable) satisfasse les critères d'ouvrabilité de l'essai d'étalement au cône d'une part, et de l'essai de l'écoulement à l'entonnoir en V d'autre part.

Le principe de cette méthode est le suivant:

- La teneur volumique G en gravillons du béton est fixée à 50% du volume du solide:

$$G = \frac{50}{100} G_{\lim} (1 - A) \qquad \text{(Eq I.11)}$$

Où: A = quantité d'air choisie en fonction de la résistance au gel-dégel

G_{lim} = volume absolu d'un mètre cube de gros agrégats

- Le volume du sable est fixé à 40% du volume total de mortier:

$$S = \frac{40}{100} \frac{(1 - A - G)}{(1 - K_{sf})} \qquad \text{(Eq I.12)}$$

Où: K_{sf} = taux de fines particules (<0.09 mm) dans le sable

- L'optimisation de la pâte s'effectue sur un mortier dont la teneur volumique en sable est égale à 40%
- L'eau, le superplastifiant et les fines sont ajustés pour les mortiers pour obtenir une viscosité suffisante (mesurée par le temps d'écoulement par l'entonnoir en V) et une fluidité importante (mesurée par l'étalement au cône)
- Les auteurs définissent alors deux grandeurs: étalement relatif et vitesse relative d'écoulement.

La fluidité du mortier, donnée par:

$$\Gamma_m = \frac{\left(r_1 r_2 - r_0^2\right)}{r_0^2} \qquad \text{(Eq I.13)}$$

Avec r_1 et r_2 les diamètres d'étalement selon deux médianes.

La viscosité du mortier, donnée par:

$$R_m = \frac{10}{t} \qquad \text{(Eq I.14)}$$

Avec t le temps d'écoulement à l'entonnoir en V exprimé en secondes

Ces deux grandeurs représentent la fluidité (plus la valeur de Γ m est élevées, plus le mortier est fluide) et la viscosité (plus la valeur de Rm est faible, plus la viscosité est élevée) du mortier. Le dosage du superplastifiant et le rapport E/C sont optimisés pour obtenir simultanément Γ m=5 et Rm=1±0,1. Le béton obtenu est testé pour vérifier les propriétés d'ouvrabilité, et le dosage du superplastifiant peut être réajusté si nécessaire pour obtenir un béton autoplaçant satisfaisant.

I.3.5.2/ Formulation CBI (Suède)

La méthode de formulation suédoise est développée par CBI (Cement och Betong Institutet) et se caractérise par la prise en compte des conditions des chantiers. En effet, cette approche est basée sur l'évaluation des risques de blocage des granulats dans les milieux ferraillés. Elle permet d'optimiser la taille maximale des granulats par rapport à l'espacement entre les armatures, et le volume des granulats dans le béton [19,20].

Le principe de cette méthode s'appuie sur des tests effectués sur des mélanges de pâte de ciment et de granulats de différentes tailles, passant à travers différents espacements d'armatures. Pour chaque taille de granulats, ils ont montré qu'il existe une teneur volumique critique de granulats en deçà de laquelle le risque de blocage est nul et au-dessus de laquelle le blocage est systématique. Cette teneur volumique critique est fonction de l'espacement entre les armatures (par rapport à la taille des granulats), et de la forme des granulats (roulés ou concassés). Cette méthode suppose que le phénomène de blocage est indépendant de la nature de la pâte, pourvu que celle-ci soit suffisamment fluide.

Ainsi, dans la formulation d'un béton, la méthode CBI consiste à déterminer le risque de blocage Rb par la relation :

$$R_b = \sum_i \frac{V_i}{V_{crit,i}} \qquad \text{(Eq I.15)}$$

V_i la proportion volumique des granulats de taille i, par rapport au volume total du béton.

$V_{crit,i}$ la teneur volumique critique de cette fraction granulaire de taille i

La valeur du coefficient du risque de blocage Rb doit être inférieure ou égale à 1 pour obtenir un béton satisfaisant. Ainsi, en utilisant cette approche pour évaluer le risque de blocage de bétons, on réécrit l'équation du risque de blocage:

$$R_b = \left(1 - V_p\right) \cdot \sum_i \frac{y_i}{V_{crit,i}} \qquad \text{(Eq I.16)}$$

y_i la proportion volumique de granulats de taille i rapportée au volume total des granulats

V_p le volume de la pâte dans un volume unité de béton

A partir de cette relation, on peut déduire, pour chaque rapport gravier sur sable (G/S), le volume minimal de pâte pour éviter le risque de blocage, en écrivant Rb=1. Le rapport E/C de la pâte et le type du ciment sont choisis en fonction de la gamme de résistance visée, le dosage du superplastifiant est optimisé pour obtenir un écoulement autoplaçant caractérisé essentiellement par le cône d'Abrams (un étalement de 700 mm est jugé adéquat) et la boite en L (un rapport d'hauteurs H2/H1 doit rester au-dessus de 0,8).

I.3.5.3/ Formulation LCPC (France)

L'approche développée en France au LCPC par de Larrard et Sedran [21] est basée sur le modèle d'empilement compressible qui passe par l'optimisation de la porosité du système formé par les grains solides. D'après les auteurs, un arrangement optimal du squelette granulaire permet d'obtenir une meilleure résistance et une plus grande ouvrabilité. Le modèle permet de prévoir la compacité du squelette granulaire à partir des caractéristiques des constituants telles que la densité apparente, les proportions du mélange, les distributions granulaires et la compacité propre. Les auteurs ont modélisé le comportement à l'état frais du béton à partir de la compacité de son squelette granulaire.

Cette approche, basée sur la synthèse d'une quinzaine d'années de recherches est simplifiée par la mise en œuvre d'un logiciel (Béton labpro 2) prenant en compte tous les paramètres de calcul de cette démarche, et permettant de déterminer des formulations de différents types de bétons (bétons à haute performance, bétons ordinaires, bétons secs pour démoulage immédiat, bétons autoplaçants). Pour un béton autoplaçant, les grandeurs exigées à l'état frais sont un étalement au cône d'Abrams supérieur à 600 mm, un seuil de cisaillement inférieur à 500 Pa, et une viscosité plastique comprise entre 100 et 200 Pa.s (grandeurs rhéologiques mesurées au BTHREOM). Ces critères correspondent selon les auteurs à un béton assez fluide et qui ne présente pas de ségrégation.

Une proportion de liant (ciment + addition) est fixée à priori, pour laquelle on détermine le dosage à saturation du superplastifiant utilisé. Selon l'expérience des auteurs, le dosage de saturation pourrait conférer au béton une viscosité élevée, par conséquent la moitié de ce dosage serait plus pertinente. Le besoin en eau du liant en présence du superplastifiant est déterminé, et conduit au calcul de la compacité propre du liant, qui est une donnée d'entrée nécessaire. Grâce au logiciel, les dosages des constituants sont déterminés, en prenant en compte tous les paramètres de calcul, et de l'effet de paroi. Le dosage du superplastifiant peut être ajusté pour obtenir les critères d'ouvrabilité désirés, celui de l'eau pour obtenir la résistance à la compression ciblée.

I.3.6/ Essais relatifs au mortier à l'état frais

Des tests sur les mortiers sont réalisés car :

- Le BAP a un volume en gros granulats moins important que le béton ordinaire, et donc les propriétés du mortier sont dominantes.
- L'évaluation des propriétés du mortier est une partie intégrale de la formation des BAP, et donc la connaissance des propriétés du mortier est utile.
- Tester un mortier est beaucoup plus commode que tester un béton.

Dans le BAP, la phase du mortier fournit la lubrification entre les particules des gros granulats, et la stabilité globale du béton. Les propriétés du mortier sont semblables à celle du BAP lui-même, c'est-à-dire un faible seuil de cisaillement pour assurer l'écoulement sous le seul effet de la gravité et une viscosité plastique suffisante afin d'assurer la non ségrégation du béton durant l'écoulement.

Quelques auteurs ont proposé, d'après des expériences réalisées avec des matériaux japonais, que l'obtention simultanée d'une valeur d'étalement comprise entre 250 et 280 mm et un temps d'écoulement compris entre 6 et 10 sec produisent un BAP réussi. Tandis que d'autres qui ont travaillé avec des matériaux anglais, ont suggéré une valeur d'étalement minimale de 300 mm et un temps d'écoulement compris entre 2 et 10 sec.

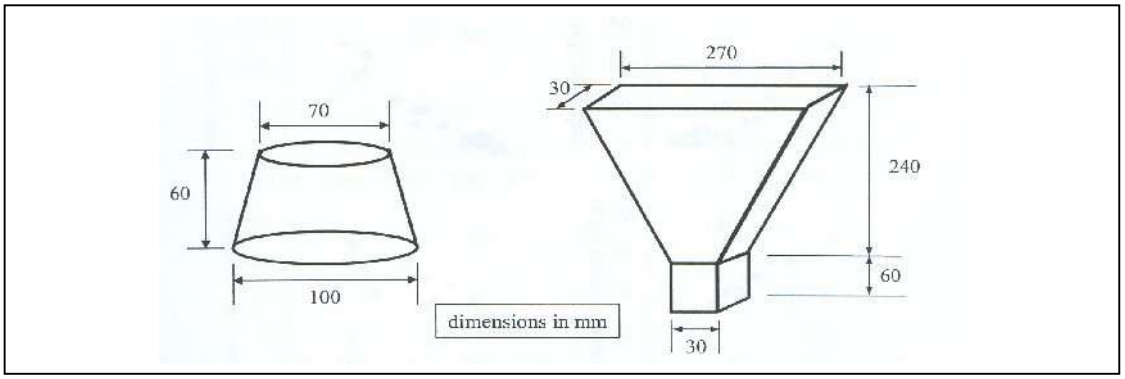


Figure I.8 : Mini-Cône et Mini V-Funnel pour mortier.

I.3.6.1/ Essai d'étalement au mini-cône

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur plaque en verre, une fois le moule soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est retenu.



Figure I.9 : Essai d'étalement pour mortier.

I.3.6.2/ Essai à l'entonnoir en V (Mini V-Funnel test)

Dans l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), l'entonnoir est rempli de 1.1 litre de mortier, et un temps d'écoulement est calculé entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir.

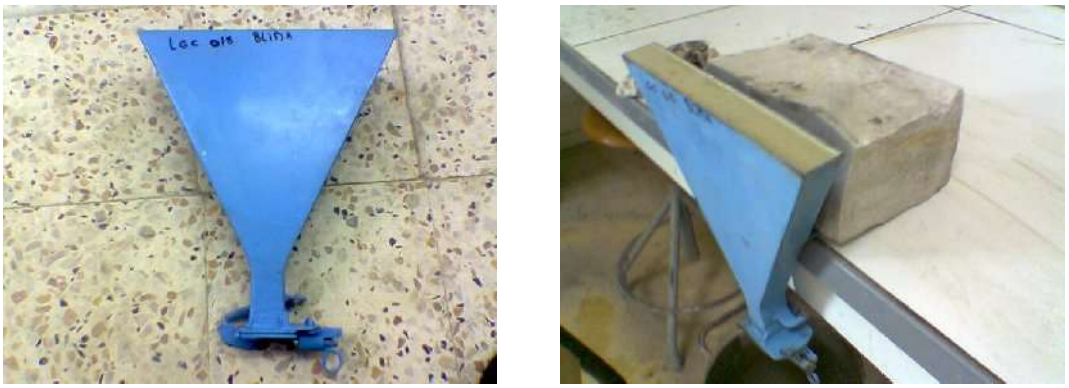


Figure I.10 : Essai à l'entonnoir V pour mortier.

I.3.7/ Essais relatifs au BAP à l'état frais

De nombreux tests simples et empiriques ont été mis au point dans le but de mieux caractériser le comportement du BAP et de valider son utilisation. Il existe actuellement presque autant de tests ou de version de tests que d'équipes de recherche qui ont étudié la question de caractérisation du BAP à l'état frais c'est-à-dire : la capacité au remplissage, la capacité de passage et la résistance à la ségrégation.

I.3.7.1/ Essai d'étalement (Flow test) et T_{50}

C'est l'essai le plus courant pour évaluer la fluidité du béton, car il est très simple à réaliser sur chantier. Ce test nécessite un cône d'Abrams et une plaque métallique plane graduée à un diamètre de 50 cm (Figure I.11).

L'essai d'étalement est effectué à l'aide d'un cône d'Abrams. Ce dernier est un cône sans fond, dont le diamètre de base inférieur est de 203 mm et le diamètre de base supérieur est de 102 mm. Il a une hauteur de 305 mm. Le cône d'Abrams est habituellement utilisé pour caractériser les bétons conventionnels par une mesure d'affaissement. Dans le cas des bétons autoplaçants, l'essai de l'affaissement au cône d'Abrams n'est pas significatif car ils sont trop fluides. On utilise donc une mesure de l'étalement. Le principe de l'essai reste cependant le même.

On remplit le cône de l'échantillon de béton à tester, puis on soulève le cône lentement pour permettre au béton de s'étaler. Cette opération de soulèvement du cône doit durer 5 secondes environ. On mesure ensuite la taille de la galette de béton obtenue (Voir figure I.12). Sa dimension correspond à la moyenne de deux diamètres mesurés. A cause de la nature visqueuse du BAP, les lectures des mesures d'étalement doivent se faire après stabilité de la galette, soit environ 60 secondes après soulèvement du cône.

Le diamètre de la galette de béton est le paramètre qui caractérise la fluidité, plus il est grand plus le béton est fluide (capacité de remplissage élevée). L'étalement final d'un béton autoplaçant peut varier entre 50 cm et 80 cm en fonction de l'utilisation du béton.

Cet essai permet aussi de détecter visuellement les premiers signes de ségrégation du béton (présence d'une épaisseur de laitance en périphérie de la galette, accumulation de gravier au centre d'une galette de mortier).

Avec le même essai, on mesurera le T_{50} temps d'écoulement, qui correspond au temps mesuré, à partir du commencement de l'étalement de la galette jusqu'à atteindre un diamètre de 500 mm. Ce T_{50} temps d'écoulement peut donner des informations concernant l'uniformité et la résistance à la ségrégation du mélange.

Le temps de passage de la galette de béton à un diamètre de 50 cm donne une idée sur la vitesse de déformation du béton. Cette mesure, le T_{50}, est une valeur qualitative. En général, des valeurs élevées de T_{50} traduisent un béton de vitesse de déformation faible (viscosité élevée). Toutefois, le T_{50} est une valeur difficile à mesurer, surtout pour le cas des bétons très fluides ; lancer et arrêter le chronomètre au moment où le cône est levé et où le béton passe au diamètre de 50 cm est une estimation subjective. En général un temps de 2 à 5 s est acceptable pour obtenir un BAP.

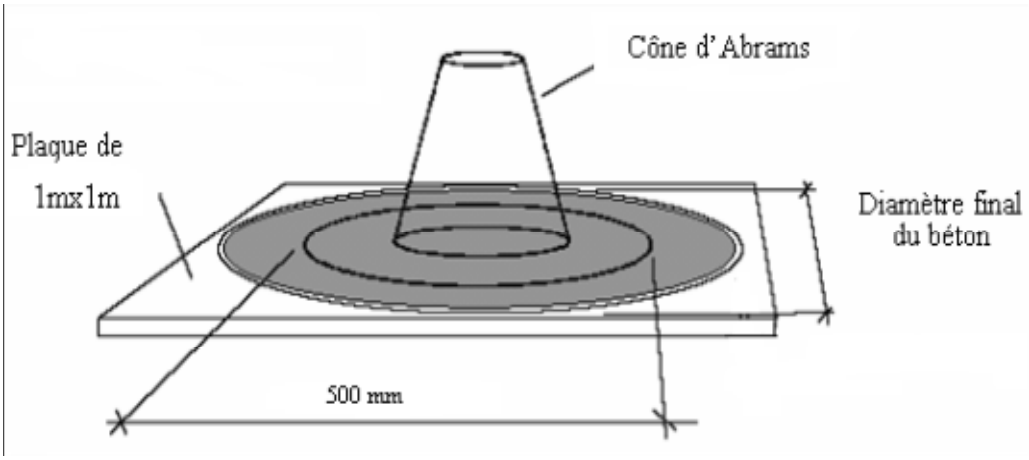


Figure I.11 : Essai d'étalement (Slump).



Figure I.12 : Mesure du diamètre d'étalement pour BAP [11].

La mesure de l'étalement au cône d'Abrams, peut être divisée en trois (03) classes. Le tableau suivant défini ces trois classes selon le domaine d'utilisation du BAP:

Tableau I.6 : Classification des BAP selon domaine d'utilisation [11].

Classe	Etalement (en mm)	Domaine d'utilisation du BAP
SF1	550 – 650	• Structures non ou peu ferraillées. Béton coulé à partir du haut (ex. les Dalles) • Coulage par système de pompage du BAP (ex. tunnels) • Petites sections (ex. les piles et les fondations profondes)
SF2	660 – 750	La majorité des applications
SF3	760 - 850	• Applications verticales • Structures trop ferraillées • Coulage à partir du dessous du coffrage • Structures de forme complexe

La classe SF3 est typiquement produite avec les petites dimensions maximales de granulats (Dmax<16 mm), et donne généralement une meilleure finition de surface que la classe SF2, mais la résistance à la ségrégation est difficile à contrôler. Des valeurs d'étalement dépassant les 850 mm peuvent être spécifiées pour des cas spéciaux mais grande attention doit être faite quant à la résistance à la ségrégation, et la dimension maximale des granulats doit être normalement inférieure à 12 mm.

I.3.7.2/ Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

L'essai de l'entonnoir mis en place par Okamura et Ozawa en 1995 permet d'évaluer la capacité du béton à passer à travers les zones confinées grâce à la mesure du temps d'écoulement à l'entonnoir (en secondes).

Le V-funnel est destiné à imposer un écoulement du même type que celui imposé entre deux armatures parallèles. Le plus souvent, la partie inférieure de l'entonnoir est rectangulaire de dimensions 7,5 cm x 6,5 cm. Elle est équipée d'une trappe.

On remplit l'entonnoir de béton, puis on laisse reposer pendant 1 minute (Voir figure I.13). L'essai consiste à observer l'écoulement du béton à travers l'entonnoir et à mesurer le temps d'écoulement entre le moment où la trappe est libre et le moment où on aperçoit le jour par l'orifice.

Comme l'essai de la capacité de remplissage, l'essai de l'entonnoir en V nous renseigne sur la stabilité, c'est-à-dire s'il existe de la ségrégation, ainsi que sur la viscosité du mélange étudié. S'il y a de la ségrégation, on observera un amoncellement de granulats au goulot de l'entonnoir, ou si le mélange est trop visqueux, le temps d'écoulement du béton à travers l'entonnoir sera plus important [22].



Figure I.13 : Essai à l'entonnoir en V pour BAP [11].

Le temps d'écoulement du béton autoplaçant à l'entonnoir doit être généralement inférieur à 12 secondes. Quelques recommandations visent un temps compris entre 5 et 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisante.

I.3.7.3/ Essai à la couronne J (J-Ring test)

L'essai à la couronne J (J-ring test) consiste à investiguer les deux propriétés, la capacité au remplissage et la capacité de passage du béton autoplaçant. Il peut aussi être utilisé pour étudier la résistance à la ségrégation d'un BAP en comparant les résultats de deux essais différents. L'essai J-ring mesure trois paramètres : l'étalement, le temps d'écoulement T_{50J} et le blocage.

On l'appelle aussi l'essai d'étalement modifié (J-Ring). Il fut développé au Japon et consiste à faire écouler le béton au travers de barres d'armature afin de pouvoir 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 300 mm de diamètre sont soudées des barres d'armature ϕ16 à 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. Le béton BAP satisfait pleinement aux performances 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 lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau.

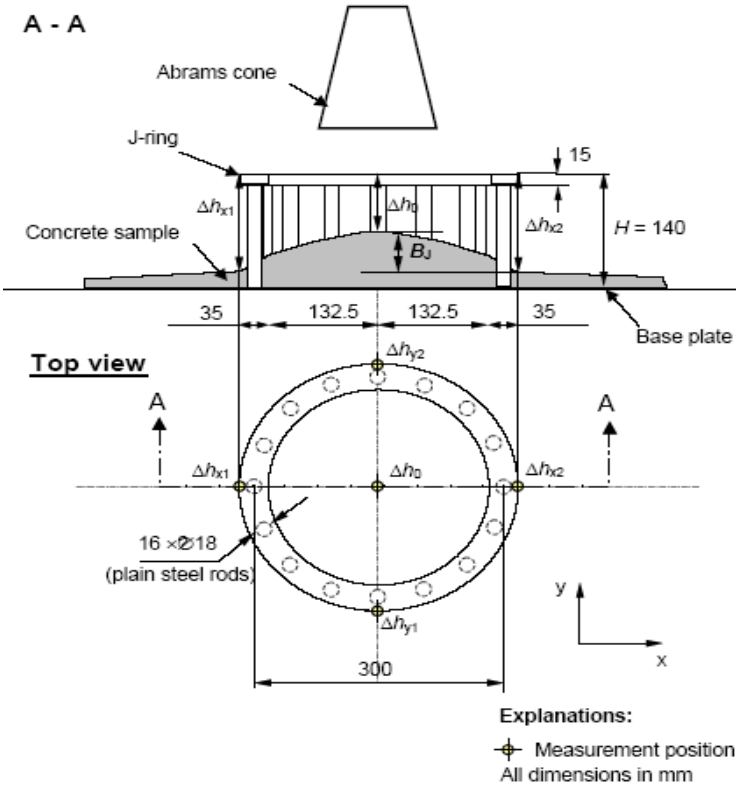


Figure I.14 : Dimensions du J-Ring et positions pour mesure de différence de hauteurs [11].



Figure I.15 : Essai à la couronne J pour BAP.

I.3.7.4/ Essai à la boite en L (L-Box test)

Avec l'essai à la boite en L, il est possible de tester la capacité au remplissage et la capacité de passage du béton autoplaçant. Cet essai consiste à mesurer l'écoulement du béton dans une boîte en L. On place le béton dans la « tour » de l'appareil (hauteur de 600 mm), soit environ 12,7 L de béton. On peut éventuellement laisser le béton au repos 1 minute pour voir s'il y a de la ségrégation. Ensuite on retire la trappe et on mesure le temps (en secondes) que met l'échantillon de béton à s'écouler sur la longueur horizontale.

Ce test permet de caractériser la viscosité du mélange. De plus, la présence de barres simulant des armatures d'un coffrage renseigne sur la capacité de remplissage du mélange.

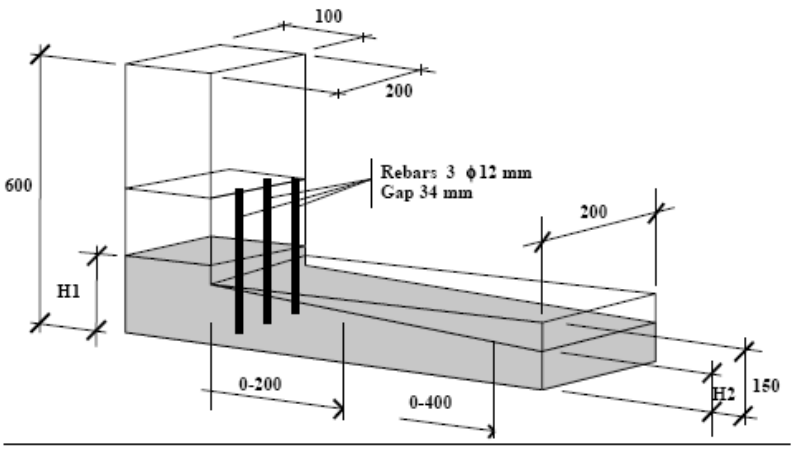


Figure I.16 : La boite en L.

Mesures à prendre :

Après avoir soulevé la trappe, les paramètres suivants peuvent être mesurés :

- Le temps d'écoulement du béton T_{20} pour arriver à la distance 200 mm (dans la partie horizontale).
- Le temps d'écoulement du béton T_{40} pour arriver à la distance 400 mm (dans la partie horizontale).

- Une fois l'écoulement du béton achevé, on mesure les hauteurs H_1 et H_2 (voir figure I.16).

On peut alors calculer le rapport H_2/H_1. Pour une bonne capacité de passage, une valeur du rapport entre 0,8 et 0,85 est acceptable. Les deux, la capacité de passage et la résistance à la ségrégation, peuvent être détectées visuellement, si on observe un résidu de granulats dans la partie verticale du L (avant les barres de ferraillage), on pourra conclure qu'il y a soit blocage soit ségrégation. Si, par contre, on observe une bonne distribution des gros granulats tout au long de la partie horizontale du L, on pourra dire que ce béton est homogène. Certains auteurs recommandent des valeurs inférieures à 1.5 secondes pour T_{20} et inférieures à 3.5 secondes pour T_{40} afin de rester dans un domaine autoplaçant.

I.3.7.5/ Essai à la boite en U (U-Box test)

De principe identique à l'essai de l'écoulement à la boite en L, l'essai du tube en U permet de tester la capacité de passage du béton à travers des armatures, et le taux de remplissage du béton. Le dispositif d'essai (Figure I.17) est composé de deux compartiments R_1 et R_2, séparés par une grille d'armatures et une trappe coulissante. Différentes dimensions et espacements existent pour les armatures entre les deux compartiments (variation selon les types de chantier, et les spécifications des différents pays).

Le béton est versé dans la partie R_1 de façon continue, on ouvre la trappe laissant passer le béton à travers la grille d'armatures, jusqu'à l'arrêt de l'écoulement (équilibre atteint). La hauteur de remplissage atteinte correspond à la facilité du béton à se mettre en place dans un milieu confiné. Si le béton coule aussi librement que l'eau, au repos on aura une surface horizontale (h_2-h_1=0).

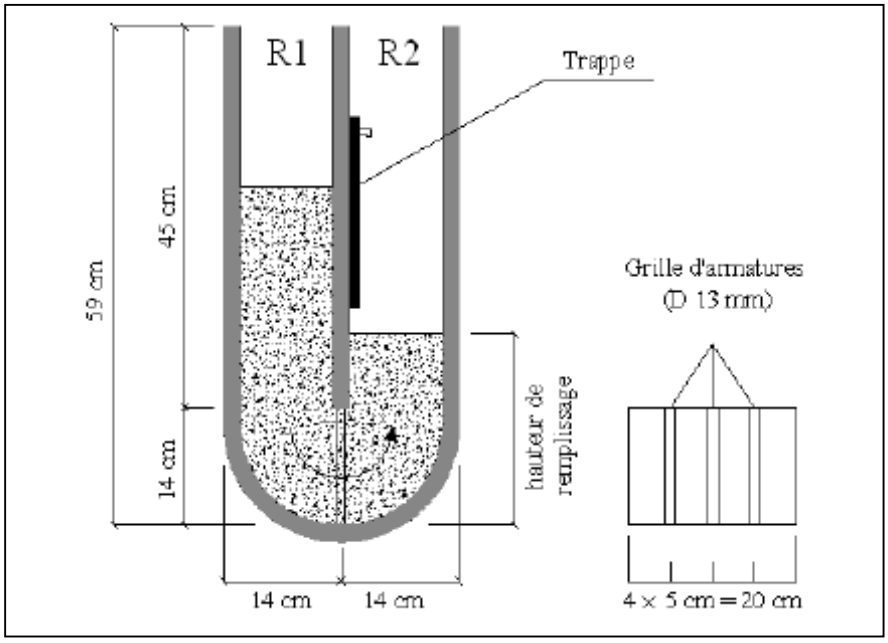


Figure I.17 : Schématisation de l'essai du tube en U.

Un béton peut être considéré comme autoplaçant si cette différence de hauteur se rapproche le plus cette valeur nulle. Pour le béton autoplaçant, la hauteur de remplissage est généralement supérieure ou égale à 30 cm.

I.3.7.6/ Essai de résistance à la ségrégation par tamisage (Sieve segregation resistance test)

L'essai de stabilité au tamis permet de qualifier le BAP vis-à-vis du risque de ségrégation. Cet essai nécessite un seau de 10 litres avec couvercle, un tamis de 5 mm de maille, de diamètre 315 mm et un fond (Figure I.18). Le test consiste à remplir le seau de 10 litres, laisser le béton couvert et au repos pendant 15 minutes. Un échantillon de ce béton (4,8 kg ± 0,2 kg) et versé à travers le tamis de 5 mm posé sur le fond, et laissé deux minutes, avant de peser la masse de la laitance traversant le tamis [23].



Figure I.18 : Essai de la stabilité au tamis.

Le critère de stabilité de cet essai est :

- $0 \leq \Pi \leq 15\%$, alors la stabilité est satisfaisante
- $15 < \Pi \leq 30\%$, la stabilité est critique
- $\Pi > 30\%$, la stabilité est très mauvaise.

I.3.8/ Propriétés mécaniques d'un BAP à l'état durci

Lorsque le béton a durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois (voire des années), les propriétés mécaniques recherchées sont :

- La compacité d'un béton (ou sa faible porosité) est un avantage déterminant pour sa durabilité ;
- Une bonne résistance à la compression est la performance souvent recherchée pour le béton durci ;
- Les phénomènes de retrait sont une caractéristique prévisible dans l'évolution du béton ;
- Les caractéristiques de déformations sous charge du béton sont connues et peuvent être mesurées.

I.3.8.1/ Résistance à la compression

Les BAP se caractérisent par un rapport E/C bas, ce qui amène à des bonnes résistances mécaniques. L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges.

Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite. Zhu et Gibbs ont montré que la résistance du BAP utilisant la poudre de pierre à chaux augmente de 50 à 80% de celle de référence à 7j et de 20 à 40% à 28j, ils ont expliqués cette augmentation par la poudre à pierre à chaux accélère l'hydratation de ciment et augmente la résistance aux jeunes âges.

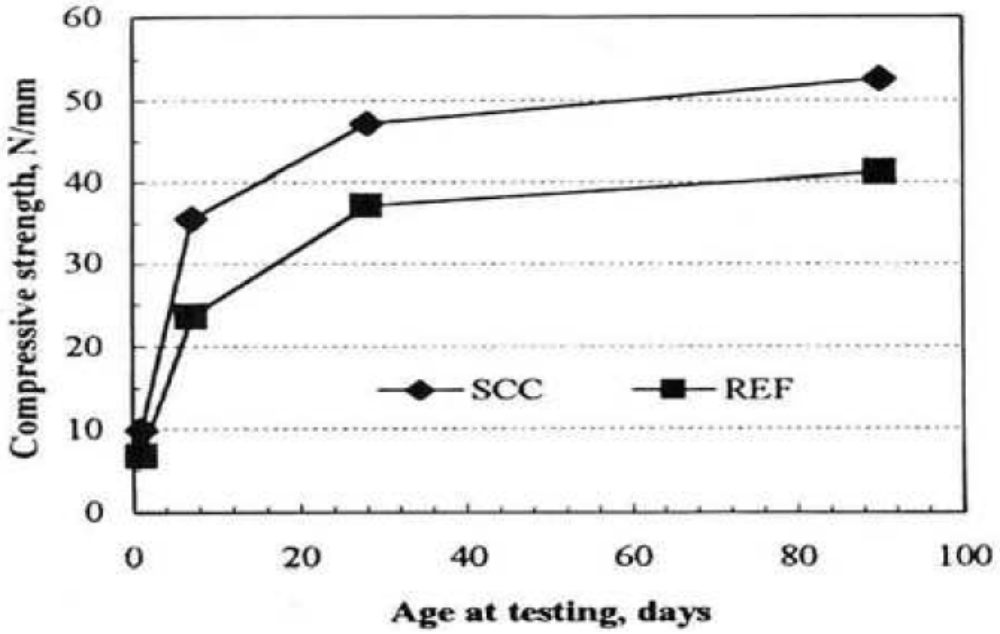


Figure I.19 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) [11].

I.3.8.2/ Résistance à la traction

Pour une résistance à la compression donnée d'un BAP, la résistance à la traction peut être assumée à être la même que celle d'un béton ordinaire comme le volume de pâte (ciment + fines + eau) n'a aucun effet significatif sur la résistance à la traction.

En comparant des mélanges de BAP ont le même E/C on trouve que le type et la finesse de poudre affecte peu la résistance en traction.

I.3.8.3/ Module de déformation longitudinale et coefficient de poisson

Comme la grande masse du volume de béton est représentée par les agrégats, le type et la quantité de ces derniers ainsi que les modules d'élasticité ont la plus grande influence sur le module d'élasticité du béton.

En choisissant des agrégats ayant un module élevé augmentera le module d'élasticité du béton. Par contre, un béton ayant un grand volume de pâte pourrait affaiblir la valeur du module d'élasticité du béton. Parce que les bétons autoplaçants ont un grand volume de pâte, leurs modules d'élasticités peuvent être, en quelque sorte, plus faibles que ceux des bétons ordinaires.

En général cette tendance peut être attribuée à la faible quantité de gros granulats et la grande quantité de la pâte.

I.3.8.4/ Retraits

Entre la fabrication et le début de prise, le béton ne présente pas de cohésion et se trouve en phase dite plastique. Pendant cette période, le béton subit une contraction de volume appelée premier retrait ou retrait plastique. Celui-ci est le résultat de plusieurs phénomènes chimiques ou physiques qui ont lieu dans un matériau en perpétuelle évolution.

La prise constitue la transition entre le moment où le béton ne présente pas de cohésion et celui où il commence à devenir résistant. Avant la prise, les déformations libres du béton sont dues à la gravité, aux réactions d'hydratation et aux échanges thermiques avec le milieu extérieur.

Juste après le coulage, le béton est un mélange de particules solides, d'eau et d'air en suspension. Etant donné les différences de masse volumique, les grains de ciment et les granulats ont tendance à ségréger et contraignent l'eau et les bulles d'air à percoler vers la surface. Ce phénomène, appelé ressuage, engendre une couche d'eau superficielle et un tassement de la matrice cimentaire (Figure I.20).

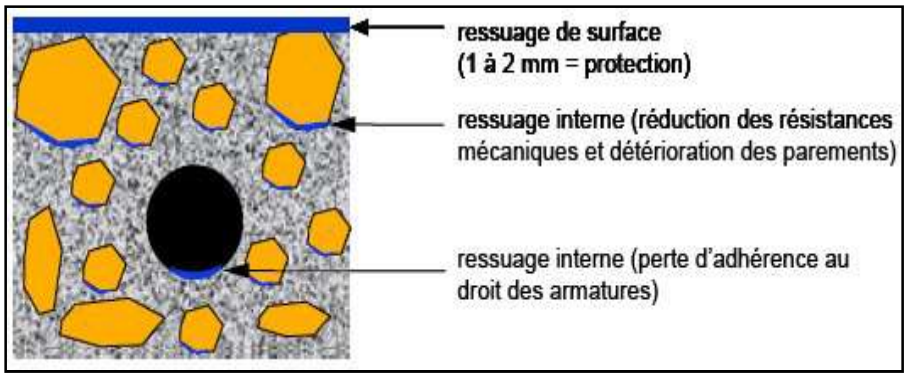


Figure I.20 : Phénomène de ressuage [11].

a/ Le Retrait plastique

Pour les déformations au jeune âge, autrement dit le retrait plastique, plusieurs travaux se sont attachés à les expliciter en étudiant notamment les différences potentielles de comportement entre BAP et béton vibré BV [24, 25]. Les premiers auteurs observent des retraits plastiques deux à trois plus grands pour les BAP que pour les bétons vibrés (voir Figure I.21). Pour Turcry [24] l'amplitude maximale du retrait plastique des BAP est environ cinq fois supérieure à celle des bétons vibrés (Figure I.22). Ces différences semblent pouvoir s'expliquer par deux paramètres de formulation qui changent d'un type de béton à l'autre : un rapport eau/fines (E/F) plus faible pour les BAP et un dosage en superplastifiant des BAP plus fort qui retarde leur prise. Par conséquent, pour minimiser ce retrait plastique, il est préférable de choisir une addition dont la demande en eau est faible afin de limiter le dosage en superplastifiant. Selon ces mêmes

données, les fillers calcaires employés dans certaines proportions n'ont presque pas d'effet sur le retrait plastique.

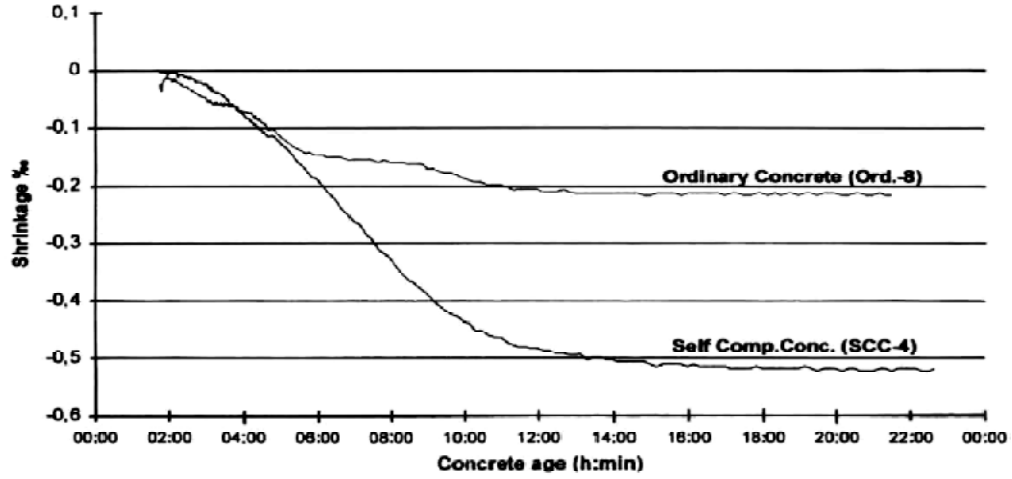


Figure I.21 : Retrait plastique de BAP et de BV de structure (T = 20°C, 50% HR) [25].

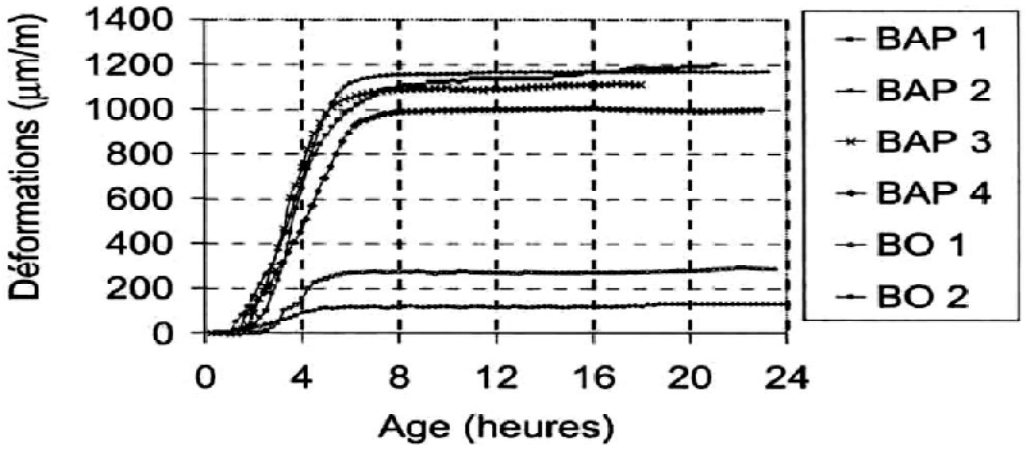


Figure I.22 : Retrait plastique des formules de BAP et de BV [24].

b/ Le Retrait Endogène ou d'Autodessiccation

L'hydratation du ciment s'accompagne d'une diminution de volume. Après la prise, l'hydratation se poursuit. Le retrait endogène est la conséquence macroscopique de la contraction d'origine chimique.

Les BAP présentent des déformations comparables à celles des bétons vibrés. En effet, même si certains auteurs [73] attribuent aux BAP un retrait endogène inférieur ou égal à celui des bétons vibrés (voir Figure I.23), d'autres [74] contestent cette tendance et soutiennent l'idée de comportements différés équivalents pour les deux types de béton.

L'évolution des réactions d'hydratation, à l'origine du retrait endogène, dépend de la quantité d'eau disponible dans le béton pour faire réagir les différents réactifs. Par conséquent, l'amplitude de ce retrait chimique va être directement liée au rapport E/C (autrement dit à la résistance mécanique). Le retrait endogène d'un béton sera d'autant plus fort que son rapport E/C sera faible (ou sa résistance en compression élevée). Ce phénomène existe pour tout type de béton, en particulier les BAP qui ne se distinguent pas des bétons vibrés sur ce point. De plus, pour des bétons à faible rapport E/C, le retrait endogène des BAP est comparable à celui des bétons vibrés [74].

Persson [75] montre aussi que les BAP sont sujets à des déformations libres (retraits endogène et de dessiccation) équivalentes à celles des bétons vibrés pour un grand domaine de résistance.

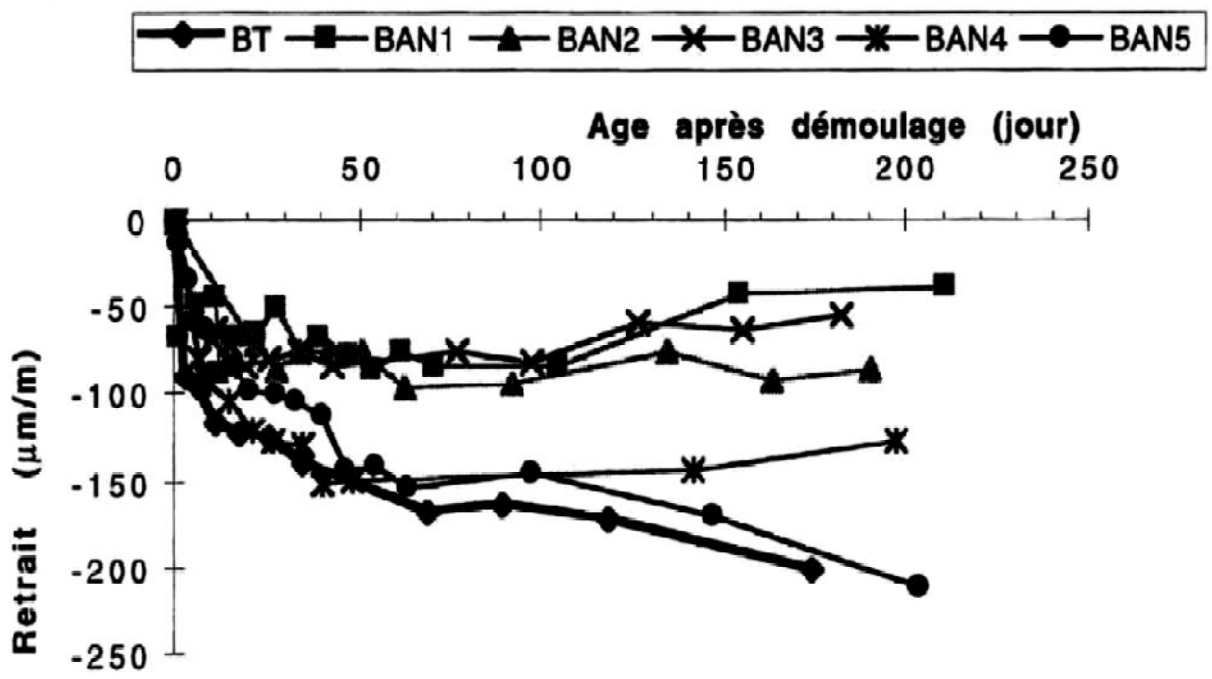


Figure I.23 : Comparaison des retraits endogènes d'un béton vibré et de cinq BAP [73].

c / Le Retrait de Séchage ou de Dessiccation

Est la déformation volumique créée par le séchage à la surface du béton. Le moteur de la dessiccation est un déséquilibre hydrique après la prise, l'humidité relative est plus élevée au sein du béton que dans l'air ambiant.

Les données de la littérature sur le retrait de dessiccation des BAP sont très contradictoires. Certains auteurs [73] trouvent des déformations pour ces bétons plus importantes que celles mesurées sur des bétons vibrés (voir Figure I.24). Ce retrait apparaît être d'autant plus faible que le rapport G/S des BAP est élevé.

D'autres auteurs annoncent des retraits équivalents pour les deux types de béton à résistance mécanique constante [75, 76]. D'après ces données, l'ordre de grandeur du retrait de dessiccation des BAP varie de 550 à 700 μm/m (à 180 jours).

Enfin, d'autres auteurs [65] observent des retraits de séchage des BAP moins importants que ceux des bétons vibrés auxquels ils sont comparés (quantité de ciment et rapport E/C équivalents, volume de pâte différent). Le phénomène est attribué à l'effet du volume de pâte et au rapport E/L car, d'après [77], augmenter le volume de pâte pour une même quantité d'eau et diminuer le rapport E/L conduit à diminuer le retrait de séchage.

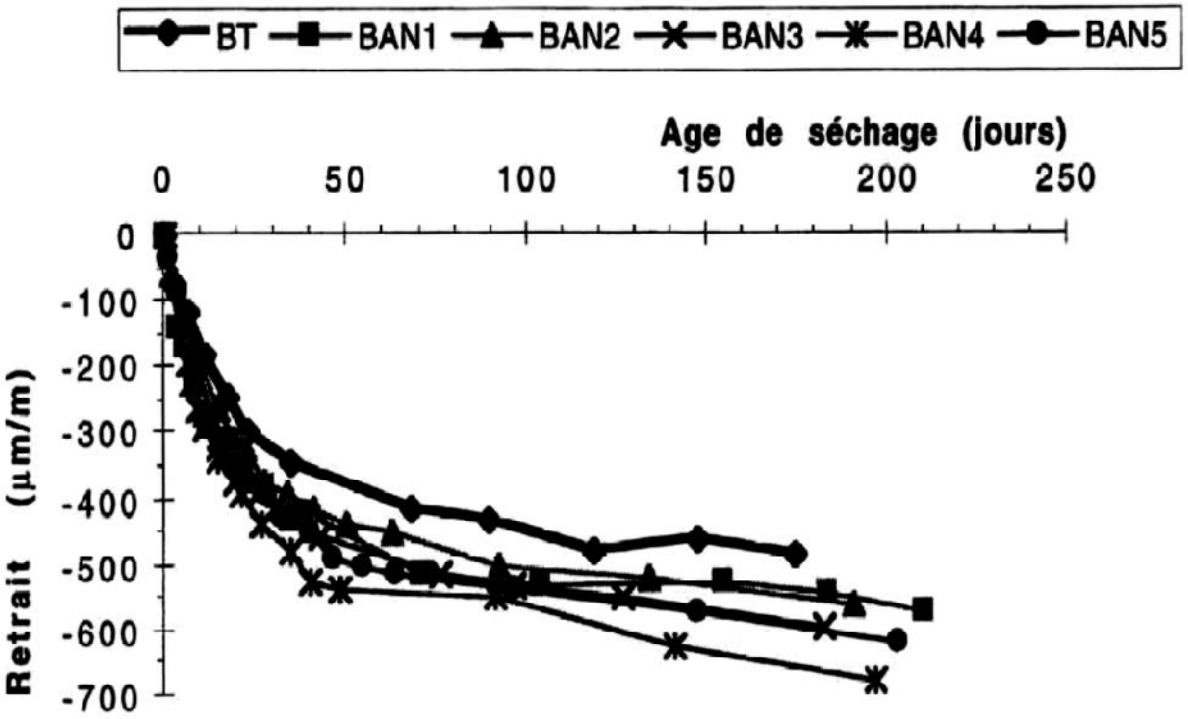


Figure I.24 : Comparaison des retraits de dessiccation d'un BV et de cinq BAP [73].

Comme expliqué précédemment, le retrait de dessiccation provient de l'évaporation de l'eau contenue dans les pores du béton vers le milieu extérieur. Le dessèchement est d'autant plus fort que la quantité d'eau initiale dans le matériau est grande et les tensions créées par cette perte en eau s'amplifient également. Contrairement au retrait endogène, le retrait de dessiccation décroît donc avec la diminution du rapport E/C et les BAP ne font pas exception à cette règle

Enfin, étant donné sa présence fréquente dans les BAP, il est intéressant de connaître l'effet du filler calcaire sur le retrait de ces bétons. D'après Bui et Montgomery [78], le filler calcaire peut avoir un effet positif en limitant le retrait de séchage des BAP, s'il est utilisé avec une finesse et

une proportion adéquates. Cependant, la prépondérance de cet effet n'est pas toujours affirmée [79].

d/ Déformations sous charge (fluage)

Le fluage peut être défini comme une augmentation de la déformation sous une contrainte constante. Comme cette augmentation de la déformation peut être plusieurs fois supérieure à la déformation sous l'application d'une charge, la prise en compte du fluage est d'une importance considérable lors de calcul des structures de bétons.

Le phénomène de fluage dépend de la distribution des efforts au sein de la structure et aussi de type de matrice de ciment.

Proust trouve des valeurs de même ordre de grandeur de BAP et pour BV. Ces résultats sont confirmés par Turcry, où il indique qu'en compression, le fluage total du BAP est identique à celui de BV [80].

D'après les résultats présentés par Proust [80], les comportements des bétons autoplaçants peuvent différer d'une formulation à l'autre (voir figure I.25). Globalement, les BAP subissent des déformations sous charge équivalentes ou légèrement supérieures à celles des bétons vibrés correspondants. Les vitesses de développement des déformations diffèrent peu d'un type de béton à l'autre. Ainsi, l'augmentation des déformations différées attendue en raison du volume de pâte plus important, ne semble pas avérée. D'après ces données, quel que soit le mode de conservation, les BAP possèdent des comportements différés sous charge semblables à ceux des bétons vibrés.

Cette concordance des comportements différés sous charge est confirmée par d'autres auteurs [81, 82, 83].

Ces différents résultats concernent des formulations de BAP proches de celles des bétons vibrés, notamment avec des quantités de ciment équivalentes et des rapports E/C voisins. L'influence du volume de pâte sur les déformations sous charge des bétons n'est pas réellement confirmée. Cette éventualité n'est pas exclue mais les comportements différés des BAP paraissent comparables à ceux des bétons vibrés. L'explication de cette observation n'est pas pour le moins évidente et appelle encore à quelques interrogations quant aux phénomènes impliqués dans le fluage du béton. Des études récentes [84] ont toutefois proposé certains mécanismes qui expliquent convenablement ce phénomène.

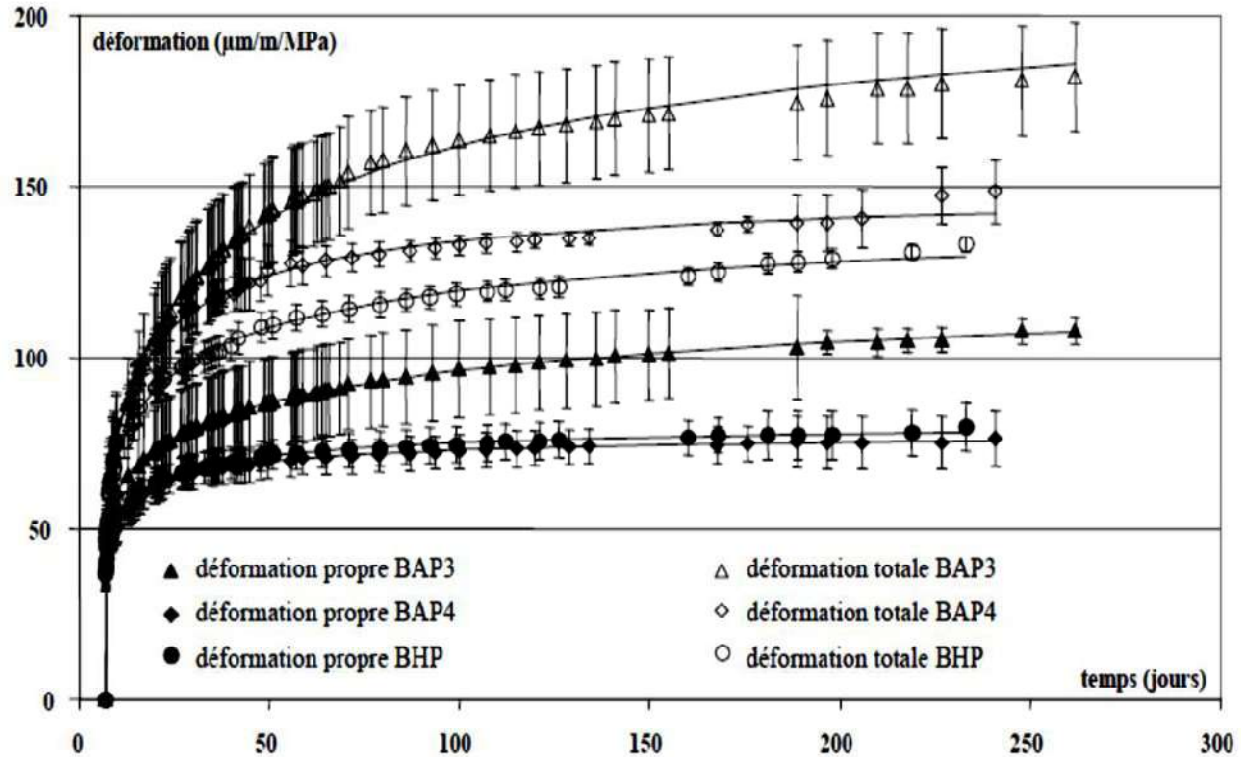


Figure I.25 : Déformations sous charge unitaire pour des bétons de résistance supérieure à 40 MPa [80].

I.3.8.5/ Perméabilité à l'eau

Selon Hou et al [27] l'invasion de substances nocives dans le béton est une question de fluidité. Ceci est gouverné par la loi de Darcy. La perméabilité à l'eau est étroitement liée aux dimensions des pores dans le mélange, plus les pores sont larges plus grande est la perméabilité. Si le rapport Eau/Ciment est en dessous de 0,32 et l'hydratation est complète, il n'y aura pas de pores capillaires. Pour une cure de 90 jours, plus le rapport E/C est faible plus la perméabilité du béton est faible. Pour les bétons contenant du laitier, les pores capillaires (diamètre supérieure à 100 A°) sont transformés en pores gélives (diamètre inférieure à 100 A°), ceci est dû à la réaction pouzzolanique qui améliore la densification du béton.

I.3.8.6/ Absorption d'eau

L'absorption d'eau à l'intérieur du béton sec est connue pour dépendre de deux paramètres majeurs à savoir la porosité effective du béton et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (absorptivité). En pratique, l'absorption se mesure en faisant sécher une éprouvette de béton, à masse constante, puis en l'immergeant dans l'eau et en mesurant l'augmentation de sa masse (exprimée en %) de la masse sèche. Une autre méthode pour évaluer l'absorption d'eau consiste

à mesurer le taux d'absorption d'eau par succion capillaire à l'intérieur d'une éprouvette de béton. Cet essai permet d'exprimer la vitesse d'absorption par remontée capillaire.

L'absorptivité est influencée en premier lieu par le rapport E/C. D'autre part, plus le taux d'humidité du béton est élevé, plus la valeur mesurée d'absorptivité est faible. Comme pour les propriétés de transfert déjà mentionnées (perméabilité et diffusion), la formulation particulière des BAP (volume de pâte plus important, additions minérales) pourrait les entraîner à posséder une absorption d'eau différente de celles des bétons vibrés.

Cependant, d'autres résultats démontrent que l'absorption capillaire des BAP est inférieure à celle des bétons vibrés (Figure 1.26) et elle est d'autant plus faible qu'ils contiennent des fillers calcaires ou des cendres volantes.

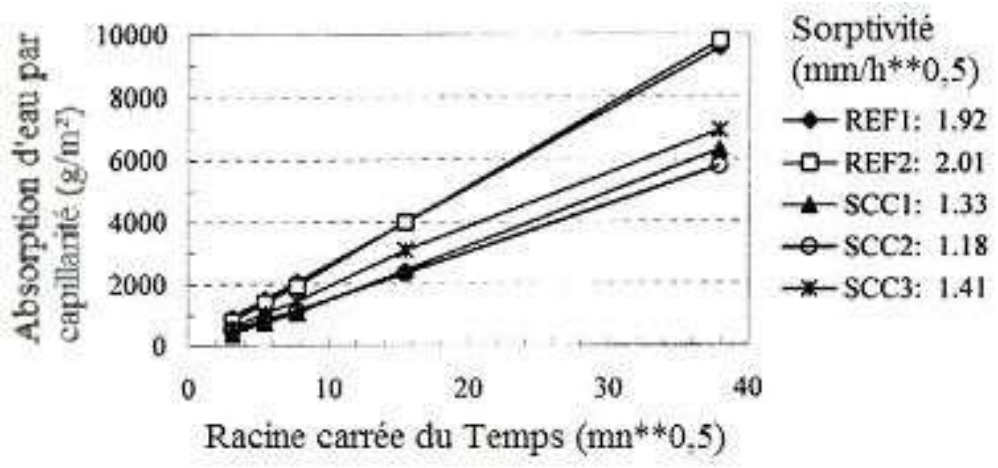


Figure I.26 : Résultats d'absorption d'eau par capillarité de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés.

I.3.8.7/ Gel-Dégel des BAP

Selon Ramachandran et al [28] L'action de gel du béton est définie comme le gel et dégel de l'humidité dans les matériaux constituant le béton. Une bonne résistance au gel peut être obtenue avec un bon choix et proportionnément des matériaux. En plus du rapport E/C, la qualité des agrégats et la quantité d'air dans le mélange, la résistance du gel dépend des conditions de cure. Un béton sec supporte bien le gel/dégel, par contre un béton saturé d'eau peut être sévèrement endommagé par quelques cycles de gel/dégel. En général, la meilleure approche pour la prévention contre l'attaque du gel dans le béton est l'utilisation d'un adjuvant entraineur d'air. Toujours selon les mêmes auteurs, l'essai le plus largement utilisé pour déterminer la résistance au gel/dégel du béton est l'essai « ASTM C 666 » (résistance du béton au gel/dégel rapide), qui comporte deux procédures A et B, pour la procédure A, le gel et le dégel se passent avec un

spécimen entouré d'eau, tandis que pour la procédure B, le spécimen est gelé dans l'air et dégelé dans de l'eau.

Khayat et Assaad [29] ont trouvé que l'addition d'un adjuvant haut réducteur d'eau peut déstabiliser les bulles d'air entrainées dans le béton durant le transport, ce qui peut affecter le système des vides, mais malgré ça une résistance au gel/dégel peut toujours être obtenue avec des adjuvants haut réducteurs d'eau. Les résultats de leurs essais ont montré que les caractéristiques des poches d'air d'un BAP peuvent être similaires à celles d'un béton vibré. Ils ajoutent aussi qu'en général une plus grande stabilité des poches d'air est obtenue quand le mélange du BAP contient une plus grande proportion de pâte de ciment et un plus faible rapport eau/ciment, sauf si un agent de viscosité est incorporé au mélange.

Conclusion

La présente recherche bibliographique montre que le béton Autoplaçant est un matériau spécial dont le choix des composantes est en fonction des critères qui lui sont recherché. Ces critères sont essentiellement les propriétés à l'état frais notamment la capacité de passage, la capacité de remplissage, la résistance à la ségrégation et la rhéologie, ainsi que les propriétés à l'état durci : les résistances mécaniques et la durabilité, qui elles dépendent de la qualité et la quantité des composants du béton c-à-d une bonne formulation qui basé essentiellement sur l'optimisation des rapports E/C, S/M et Sp/C.

Pour les BAP, la qualité des granulats revête une grande importance. Non seulement les granulats peuvent limiter la résistance du béton, mais selon leurs propriétés, ils affectent la durabilité et les performances structurelles du béton. L'étude a montré que la nature, la quantité, la forme, la granulométrie, la propreté, l'état de surface et le type de granulats sont des facteurs ayant une influence sur les caractéristiques des BAP, aussi bien à l'état durci qu'à l'état frais.

Différentes méthodes de formulation ont été proposées à partir d'une optimisation du mortier, une optimisation de la quantité de pâte ou une optimisation du squelette granulaire. On signale ici que les approches de formulation des bétons autoplaçants n'ont pas été développées pour des BAP contenant des agents de viscosité. Cet adjuvant peut en effet modifier les propriétés d'écoulement du béton, et entraîne le changement des dosages des autres constituants des BAP.

Le but de ce projet est justement d'adopter une méthode de formulation, pour la fabrication d'un bon BAP en utilisant par variété les granulats locaux de la région de MEDEA.

Chapitre II :

Etude Expérimentale :

Matériaux, Formulation et Essais

Chapitre II : Etude Expérimentale

Matériaux, Formulation et Essais

Introduction

Le travail expérimental mené a été établi dans le but d'observer et d'évaluer l'effet des granulats sur le comportement (physique et mécanique) et la durabilité du béton autoplaçant.

Dans ce chapitre, on s'intéresse, dans une première partie à la présentation de l'ensemble des matériaux utilisés dans le cadre de ce travail tout en justifiant leurs caractéristiques et différentes propriétés ainsi que les différents essais nécessaires durant cette étude expérimentale.

Dans une seconde partie, on exposera la formulation qui a été choisie ainsi que le mode de confection du mortier et béton.

La formulation doit être définie avec le plus grand soin et les grandeurs caractéristiques sont classiques et bien connues à savoir :

- La granularité ou le fuseau du squelette granulaire.
- Les dosages en sable, gravier, ciment, eau, superplastifiant.

Dans la dernière partie on présente les différents essais expérimentaux de notre recherche à l'état frais et à l'état durci.

Programme expérimental

L'étude expérimentale effectuée a porté sur une variété de bétons (15 mélanges au total) pour lesquels les paramètres variables étaient la nature et le type du squelette granulaire. Trois types de sables et cinq types de graviers (Figures II.1 et II.4) à travers la région de Médéa ont été utilisés.

Trois familles de mélanges du BAP sont réalisées dont chacune est représentée par un type de sable (Tableau II.1). Pour chaque sable on fait varier le gravier.

Dans le tableau II.1, on résume les différents mélanges réalisés. La nomenclature utilisée est la suivante :

Les lettres (C), (B) et (Z) désignent respectivement le type du sable : Corrigé (sable de Hassi bahbah et sable concassé), Bayazid (sables siliceux) et Boughezoul (sables siliceux), suivies de la lettre (B), (H), (K), (Z) ou (M) désignant les graviers concassés utilisés selon la zone de provenance : Bouaichoune, El Hamdania, Kaf El Assel, Boughezoul et Mont Guorno. Le chiffre 1 ,2 ou 3 renseigne sur la famille du mélange.

Tableau II.1 : Différents mélanges de béton autoplaçant utilisées dans ce travail.

Famille de BAP	Notations	Les Différents mélanges du BAP	
		Granulats	
		Sable	Gravier
Famille 01	CB1	Corrigé	Bouaichoune
	CH1	Corrigé	El Hamdania
	CK1	Corrigé	Kaf El Assel
	CZ1	Corrigé	Boughezoul
	CM1	Corrigé	Mont Guorno
Famille 02	ZB2	Boughezoul	Bouaichoune
	ZH2	Boughezoul	El Hamdania
	ZK2	Boughezoul	Kaf El Assel
	ZZ2	Boughezoul	Boughezoul
	ZM2	Boughezoul	Mont Guorno
Famille 03	BB3	Bayazid	Bouaichoune
	BH3	Bayazid	El Hamdania
	BK3	Bayazid	Kaf El Assel
	BZ3	Bayazid	Boughezoul
	BM3	Bayazid	Mont Guorno

NB : la nomenclature utilisé est XYZ avec :

X= Sable: (C: Corrigé, Z: Boughezoul, B:Bayazid) ;

Y= Gravier : (B: Bouaichoune, H: El Hamdania, K: Kaf El Assel, Z: Boughezoul, M: Mont Guorno) ;

Z= Numéro de la famille (1, 2, 3).

II.1/ Identification et Caractérisation des Constituants

Les différents essais réalisés pour l'identification et la caractérisation physique et mécanique des différents constituants rentrant dans la composition de nos mélanges sont les suivant :

Pour les Graviers

-Analyse Granulométrique;
-La masse volumique apparente et absolue;
-Compacité, porosité et Indice des vides;
-Résistance mécanique (dureté) Essai de Los-Angeles;
-L'absorption d'eau;
-Essai de la Propreté superficielle;
-Forme des grains et état de surface.

Pour les Sables

-Essai de la propreté et détermination des fines (L'équivalent de Sable);
-Analyse Granulométrique et Module de Finesse;
-L'absorption d'eau;
-La masse volumique apparente et absolue;
-Compacité, porosité et Indice des vides.

Pour le Ciment

-Analyse chimique;
-Masse volumique apparente et absolue;
-Consistance normale;
-Prisométrie: début et fin de prise;
-Classe de résistance;
-Retrait;
-Finesse.

II.1.1/ Graviers

Pour la confection de nos mélanges de béton autoplaçant (avec D_{max}=20mm), deux classes de graviers de chaque carrière de concassage ont été utilisés (3/8 et 8/15).

Gravier de Bouaichoune (B) : de nature calcaire et de couleur grise bleu.



Gravier 3/8



Gravier 8/15

Gravier de Hamdania (H) : de nature calcaire et de couleur grise noir.



Gravier 3/8



Gravier 8/15

Gravier de Kaf el assel (K) : de nature calcaire et de couleur grise bleu.



Gravier 3/8



Gravier 8/15

Gravier de Boughezoul (Z) : de nature grés et de couleur marron gris.



Gravier 3/8



Gravier 8/15

Gravier de Mont Guorno (M) : de nature calcaire et de couleur grise souris.



Gravier 3/8



Gravier 8/15

Figure II.1 : Différents graviers utilisés.

II.1.1.1/ Analyse granulométrique

Conformément à la Norme Algérienne NA 2607(1992) [30], l'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau (de masse M (kg) $\geq 0.2\ D_{max}$ (mm)) en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les masses des différents refus ou celles des différents tamisas sont rapportées à la masse initiale du matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous une forme graphique (courbe granulométrique). Les résultats des essais sont portés sur la figure II.2 :

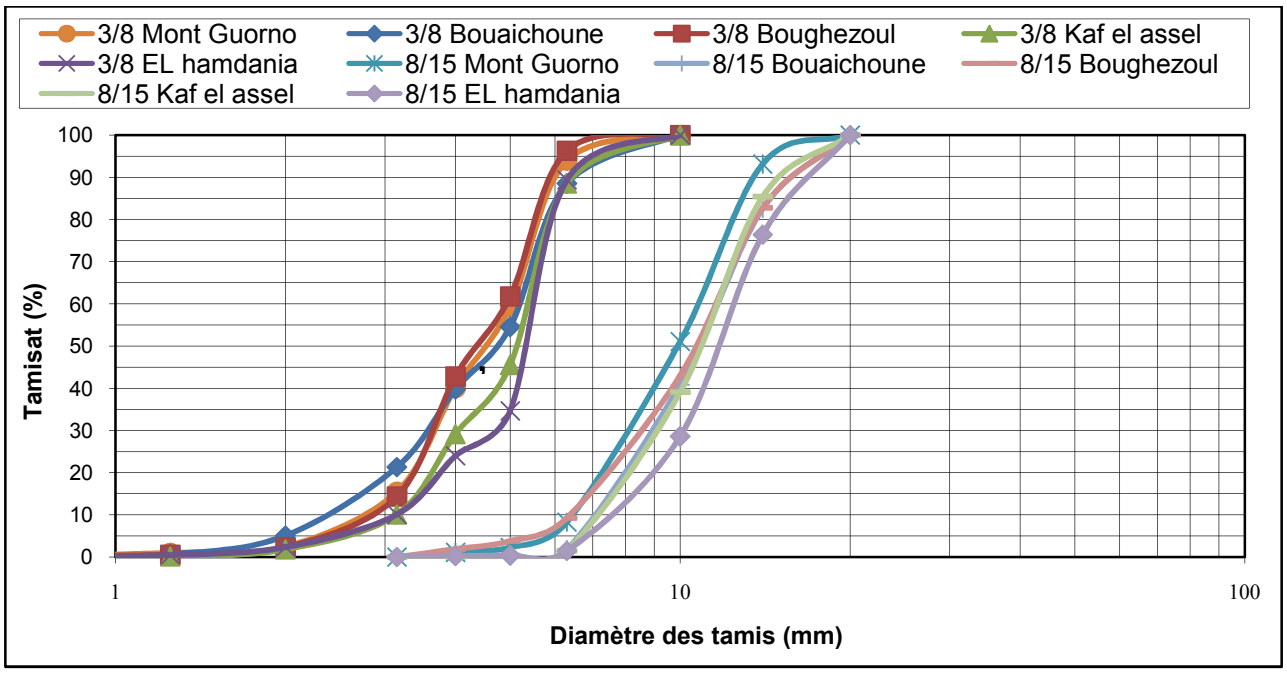


Figure II.2 : Courbes granulométriques des différents graviers étudiés.

II.1.1.2/ Masse volumique, Compacité, Porosité et Indice des vides

Les masses volumiques apparente (ρ_a) et absolue (ρ_s) ainsi que la compacité (C), la porosité (P) et l'indice des vides (e) des différents granulats utilisés sont calculés d'après la norme NA 255 (2006) [31].

II.1.1.3/ Résistance mécanique (Essai de Los-Angeles)

La dureté (Los-Angeles) des granulats a été mesurée conformément à la norme Algérienne NA 458/1990 [32]. Cet essai consiste à mesurer la résistance des granulats à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements, le résultat est exprimé en pourcentage LA.

Les granulats sont qualifiés comme suit :

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

II.1.1.4/ Absorption d'eau

L'absorption d'eau des granulats est mesurée suivant la Norme Algérienne NA 255 (2006), pour les granulats entrant dans la composition des bétons, une valeur d'absorption d'eau inférieure à 5% [33].

II.1.1.5/ Essai de la propreté superficielle (Pr)

Cet essai est effectué selon la Norme Algérienne NA.463/1990 [34].

Les résultats des essais d'identification et de caractérisation des différents graviers utilisés sont résumés dans le tableau II.2 suivant :

Tableau II.2 : Caractéristiques des différents types de graviers utilisés.

	Différents Types de Graviers									
	Bouaichoune (B)		**Hamdania (H)**		**Kaf el assel (K)**		**Boughezoul (Z)**		**Mont Guorno (M)**	
Propriétés	**3/8**	**8/15**	**3/8**	**8/15**	**3/8**	**8/15**	**3/8**	**8/15**	**3/8**	**8/15**
ρ_a (kg/l)	1,425	1,405	1,323	1,344	1,363	1,423	1,331	1,443	1,258	1,325
ρ_s (kg/l)	2,632	2,618	2,611	2,591	2,604	2,695	2,674	2,646	2,695	2,618
C (%)	54,14	53,68	50,67	51,88	52,35	52,78	49,78	54,55	46,65	50,60
P (%)	45,86	46,32	49,33	48,12	47,65	47,22	50,22	45,45	53,35	49,40
e	0,85	0,86	0,97	0,93	0,91	0,89	1,01	0,83	1,14	0,98
LA %	23,62	26,54	23,84	26,48	25,38	23,10	37,08	34,92	22,92	26,28
Ab %	1,45	0,91	0,94	0,90	1,74	0,64	2,50	2,09	1,99	1,16
Pr %	0,55	0,50	1,06	0,60	0,30	0,25	0,46	0,45	0,91	0,43

D'après les résultats du tableau II.2, on constate que :

- Les masses volumiques apparentes et absolues des différents types de graviers utilisés sont ordinaires et réglementaires.
- Tous les graviers utilisés présentent un coefficient de dureté LA< 30% ce qui est acceptable pour la fabrication du béton sauf le gravier de Boughezoul (Z) donne un résultat médiocre (LA> 30%).
- Des valeurs du coefficient d'absorption d'eau inférieure à 5%, ce qui est acceptable pour les granulats entrant dans la confection des bétons.
- Un taux de propreté acceptable.

II.1.1.6/ Forme des grains et état de surface

La forme des grains et leur état de surface dépendent, en grande partie, de la technologie de concassage, ces caractéristiques ont une influence considérable sur les propriétés physiques et mécaniques du béton.Elles peuvent être caractérisées par les coefficients ou paramètres suivants :

- *coefficient de cubicité* : plus il est élevé, plus régulière est la forme des granulats;
- *coefficient d'aplatissement* : il tient compte du pourcentage des éléments plats (doit être inférieur à 30 % selon la norme française NF P 18-541);
- *angularité* : elle représente l'état des sommets et des arrêtes des grains;
- *sphéricité* : elle correspond à l'écart entre la forme d'une particule et celle de la sphère équivalente;
- *rugosité* : les grains sont lisses ou rugueux, l'appréciation est qualitative.

La forme des granulats est caractérisée par un indice de forme (IDF), mesuré par la méthode du pied à coulisse selon la norme anglaise BS 812 [35] ; quatre catégories (cubique 'équidimensionnelle', plate, allongée, plate et allongée) sont définies en fonction du coefficient d'aplatissement (p=e/l) et du coefficient d'élongation (q=l/L), avec e = épaisseur (petit axe),
l = largeur (axe intermédiaire) et L = longueur (grand axe).
La figure II.3 illustre en gros cette caractérisation.

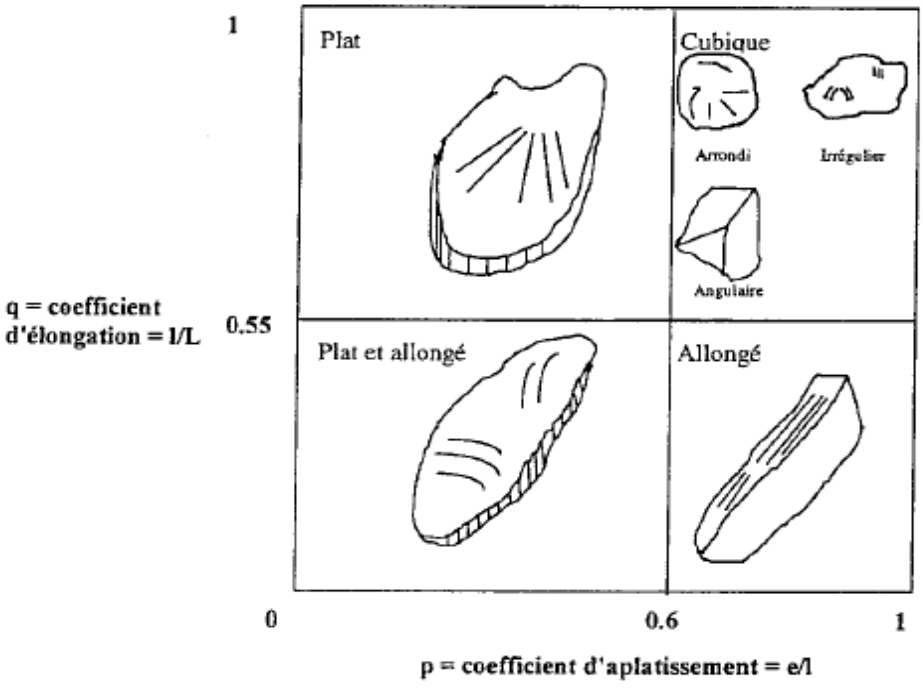


Figure II.3 : Caractérisation de la forme des granulats en fonction du coefficient d'aplatissement et celui d'élongation.

L'analyse est faite sur trois échantillons de 100 pierres pour chaque calibre, on mesure pour chaque pierre sa plus grande épaisseur E, sa plus grande longueur L et sa plus grande largeur l et, pour chaque échantillon, la somme des E sur la somme des l nous donne P et la somme des l sur la somme des L nous donne q. la mesure de p et q finale pour chaque calibre est, la moyenne de mesures sur les trois échantillons.

Les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau II.3 : Caractérisation de la forme des granulats utilisés.

	Différents Types de Graviers									
	Bouaichoune (B)		**Hamdania (H)**		**Kaf el assel (K)**		**Boughezoul (Z)**		**Mont Guorno (M)**	
	3/8	**8/15**	**3/8**	**8/15**	**3/8**	**8/15**	**3/8**	**8/15**	**3/8**	**8/15**
Coefficient d'élongation (p)	0.635	0.627	0.619	0.573	0.500	0.579	0.598	0.644	0.533	0.559
Coefficient d'aplatissement (q)	0.698	0.637	0.590	0.738	0.778	0.795	0.688	0.739	0.564	0.586

II.1.2/ Sable

Les sables utilisés dans le cadre de ce travail, sont les sables les plus utilisés pour la confection du béton dans la région de Médéa, notamment le sable de concassage et le sable roulé de Hassi Bahbah, Boughezoul et Bayazid.



Sable Concassé :
de nature calcaire
et de couleur grise



Sable de Hassi Bahbah :
de nature siliceuse
et de couleur marron

Sable Corrigé (C) : Bahbah+Concassé



Sable de Boughezoul (Z) :
de nature siliceuse
et de couleur marron claire



Sable de Bayazid (B) :
de nature siliceuse
et de couleur marron

Figure II.4 : Différents sables utilisés.

II.1.2.1/ Propreté (Equivalent de sable)

L'analyse de la propreté des sables utilisés permet de déceler la présence d'éléments fins et est caractérisée par une valeur numérique appelée Equivalent de Sable (ES), l'essai est réalisé conformément au mode opératoire défini dans la Norme Algérienne NA 455 (2006) [35].

II.1.2.2/ Granulométrie et Module de finesse

L'analyse granulométrique a été effectuée sur les différents sables suivant la Norme Algérienne NA 2607 (1992) [30]. Les sables passent à travers une série de mailles décroissantes (avec la série de rapport d'ouverture égale à deux) dont on pèse le refus pour chaque tamis puis on trace la courbe granulométrique.

L'analyse granulométrique des sables utilisés est présentée sur la figure II.5 suivante :

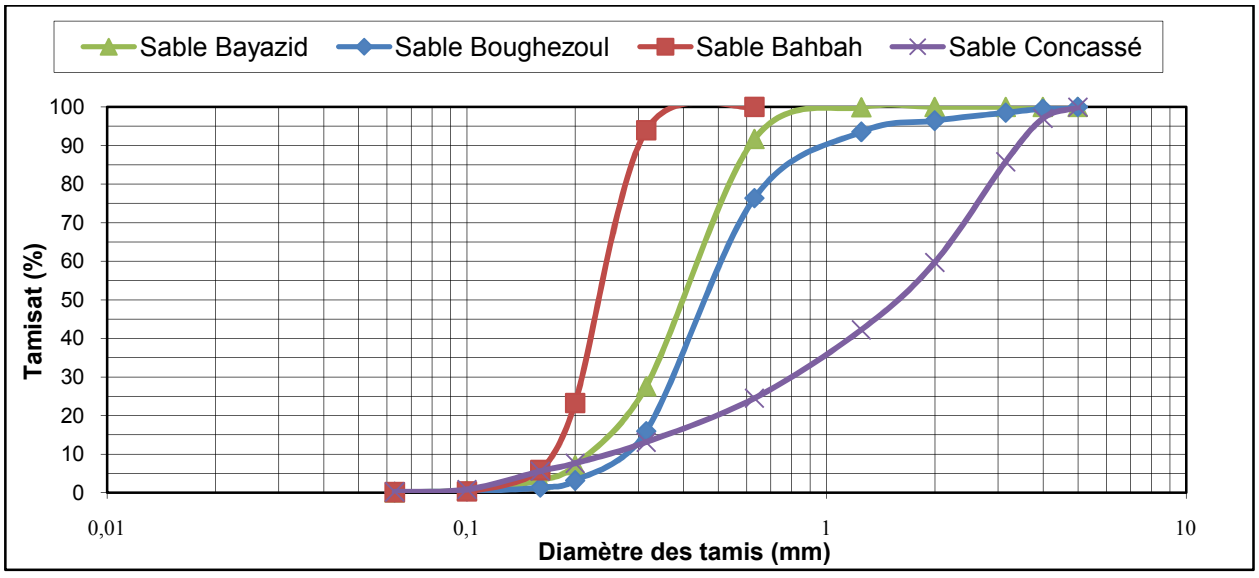


Figure II.5 : Courbes granulométriques des différents sables étudiés.

Le Module de finesse est un facteur très important qui nous permet de juger la grosseur du sable. Le module de finesse (Mf) est égal à 1/100 de la somme des refus totaux, exprimés en pourcentage, sur les tamis de la série suivante : 0.08 – 0.160 – 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5 – 5 – 10 – 20 – 40 – 80.

N.B : *Les sables contenant un pourcentage important de fines (comme le sable de Hassi Bahbah Mf=1,00) ne pouvaient pas donner un bon mortier autoplaçant [11], ce qui nécessite la correction par un sable grossier.*

II.1.2.3/ Absorption d'eau

Comme on a déjà vu dans les graviers, la même Norme Algérienne utilisée (NA 255-2006) et le même mode opératoire est suivi pour la détermination du coefficient d'absorption d'eau dans les sables mais avec précautions et plus de soin.

II.1.2.4/ Masse volumique, Compacité, Porosité et Indice des vides

Comme on a déjà vu dans les graviers, la même Norme Algérienne utilisée (NA 255-2006) et le même mode opératoire est suivi pour la détermination des masses volumiques absolue et apparente ainsi que la compacité, la porosité et l'indice des vides des différents sables utilisés.
Les résultats des différents essais effectués sont résumés dans le tableau II.4 suivant :

Tableau II.4 : Caractéristiques des différents types de sables utilisés.

Sables	Ab %	ESV%	ESP %	Mf	ρ_a (kg/l)	ρ_s (kg/l)	C (%)	P (%)	e
Bahbah	1.50	87.96	68.58	1,00	1.447	2.710	53.39	46.61	0.87
Concassé	0.55	87.45	83.92	3,55	1.511	2.653	56.98	43.02	0.76
Corrigé (C)	1.05	87.72	75.78	2,20	1.477	2.683	55.06	44.94	0.82
Boughezoul (Z)	1,44	70.14	60,70	2,20	1,439	2,587	55,60	44,40	0,80
Bayazid (B)	0,72	85.76	77,53	1,80	1,494	2,793	53,49	46,51	0,87

D'après les résultats du tableau II.4, on constate que :

- Afin d'obtenir un sable corrigé (C) de module de finesse Mf = 2,20 comme le sable S2 de Boughezoul (Z), on va mélanger le sable fin de Hassi bahbah de module de finesse Mf_1= 1,00 avec le sable 0/3 de concassage de module de finesse Mf_2 = 3,55 selon la règle d'Abrams [13].

  Nous avons opté les proportions suivantes:

- Proportion de sable Hassi bahbah= 53%
- Proportion de sable 0/3 de concassage= 47%

❖ D'après les résultats de l'équivalent de sable, il parait clair que tous les sables utilisés convient pour fabriquer un béton de bonne qualité ESP > 60 %.

❖ On peut dire qu'on a deux sables de même module de finesse (sable de Boughezoul (Z) et sable corrigé (C) Mf=2.20) et un sable de Bayazid (B) de Mf=1.80.

❖ Selon la norme utilisée [33] la limite supérieure du coefficient d'absorption des granulats est fixée à 5 %. Dans notre cas on constate que tous les sables utilisés absorbent moins d'eau que la limite préconisée et par suite peuvent être utilisés sans soucis.

❖ Les masses volumiques apparentes et absolues des différents types de graviers utilisés sont ordinaires et réglementaires.

II.1.3/ Ciment

II.1.3.1/ Composition chimique et minéralogique du ciment

Le ciment utilisé dans la confection des différent mélanges du BAP est un ciment portland composé de type CPJ-CEM II/42,5 fabriqué par la cimenterie de CIBA–LAFARGE à M'sila en Algérie. Ce ciment pour béton exigeant « Matine » est couramment utilisé en Algérie dans les constructions nécessitant des résistances moyenne ou particulièrement élevées ce qui justifie son utilisation dans le cadre de cette recherche. Le constituant principal est le clinker portland (K) (de 80% à 94%) avec l'ajout du calcaire tout en respectant les notions et les exigences de la norme NA 442. La composition chimique et minéralogique du ciment sont données au tableau II.5 :

Tableau II.5 : Composition chimique et minéralogique du ciment.

	Eléments	**Résultats %**
Analyse chimique du ciment	Perte au feu (%) (NA 5042)	8.25
	Résidus insolubles (%) (NA 5042)	2.00
	Teneur en sulfates SO3 (%) (NA 5042)	2.25
	Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	2.10
	Teneur en chlorures (%) (NA 5042)	0.02
Composition hypothétique du clincker	Silicates tricalciques C_3S (%)	61.00
	Aluminates tricalciques C_3A (%)	7.00



Figure II.6 : Le ciment utilisé.

II.1.3.2/ Essais physiquo-mécaniques

Conformément aux Normes Algériennes NA229/1990 [37], NA230/1990 [38], NA.231 (2006) [39], NA.440/1989 [40] sur les ciments, des essais physiques de consistance normale, de temps de prise, de finesse, et de retrait ainsi que des essais de résistances mécaniques, NA234/1990 [41], ont été réalisés. Les résultats de ces différents essais sont portés sur tableau II.6 :

Tableau II.6 : Caractéristique physique et mécanique du ciment.

Caractéristiques	**Unité**	**valeur**
Masse volumique apparente	g/cm^3	0,99
Masse volumique absolue	g/cm^3	3,04
Consistance normale	%	27,00
Prisométrie - Début de prise - Fin de prise	Min	 60 240
Classe de résistance	MPa	≥ 42,5
Retrait	(µm/m)	< 1 000
Finesse (BALAINE)	cm2/gr	4 300 – 4 800

II.1.4/ Superplastifiant

Pour cette étude, nous avons utilisé un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération fabriqué par la société Granitex-NP et commercialisé sous le nom suivant : **MEDAFLOW 145,** Il est à base de polycarboxylates d'ether (PC), sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0,5% à 2% du poids de ciment.



Figure II.7 : Superplastifiant MEDAFLOW 145.

Ses caractéristiques sont :

- Aspect ……. Liquide
- Couleur ……... Marron foncé
- PH …… 5-6
- Densité …… 1.065 ± 0.016
- Teneur en chlore …… < 1 g/l
- Extrait sec …….. 30 ± 1.5%

II.1.5/ Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la confection des différents bétons est l'eau potable.

En référence à la norme NF EN 1008 [42], l'eau de gâchage doit être vérifiée par les critères chimiques et physiques, si elle présente un doute. Pour éviter tout risque nous avons opté pour une eau de gâchage qui est l'eau potable de distribution exempte d'impuretés avec un PH = 7,9 ; et conforme aux exigences de la norme suscitée.

II.2/ Formulation du béton Autoplaçant

II.2.1/ Formulations adoptées

L'objectif de la formulation est de déterminer la quantité nécessaire de chaque matériaux du gâchée, afin d'obtenir le béton qui aura les propriétés souhaitées. Le paramètre important considéré dans la formulation est le rapport Eau/Ciment.

Lors de la formulation, la caractérisation du béton autoplaçant est nécessaire. Cela consiste à connaître son comportement à l'état frais à partir des tests mis en place depuis son développement. Évidemment, un béton est qualifié d'autoplaçant, non pas par rapport à sa composition, mais parce qu'il possède certaines propriétés à l'état frais : la capacité de remplissage, la capacité de passage et la résistance à la ségrégation. La formulation du BAP requiert une étude précise notamment dans le choix de ses constituants, et l'optimisation des paramètres influant en particulier les rapports eau/ciment (E/C), le rapport Sable/Mortier (S/M), le dosage en superplastifiant, le volume de pâte et le diamètre maximal des gravillons. Les principaux tests réalisés sont empiriques, et ont pour objectif de vérifier les différentes propriétés définies ci-dessus. Ils sont destinés à caractériser le béton avec les termes qualitatifs de fluidité, hétérogénéité et absence de blocage [11].

Dans notre étude nous nous étions fixés comme but essentiel l'influence des caractéristiques des granulats locaux de la région de Médéa sur les Performances du béton autoplaçant, Pour cela, on a fixé tous les autres paramètres, à savoir la quantité de sable dans le mortier donc le rapport Sable/Mortier, le rapport Eau/Ciment et on varie seulement le pourcentage en superplastifiant par rapport au ciment pour obtenir un BAP pour les trois types de sable.

La formulation que nous avons adoptée est basée sur la formulation proposée par le japonais OKAMURA et appelée la méthode générale, avec quelques modifications concernant la sélection de la quantité de sable dans le mortier, le rapport eau/ciment ainsi que le rapport superplastifiant/ciment. Ces derniers ont été évalués expérimentalement de manière à avoir des valeurs de l'étalement au cône d'Abrams acceptables. Pour la sélection des quantités d'air et de graviers, la méthode OKAMURA a été maintenue.

II.2.2/ Formulation du Mortier

Dans le BAP, la phase du mortier est une phase très importante car elle fournit la lubrification entre les particules des gros granulats, la viscosité et la mobilité du béton ainsi que la stabilité globale du béton.

Le béton et son mortier correspondant présentent les mêmes propriétés rhéologiques, tels qu'un faible seuil de cisaillement pour assurer l'écoulement sous le seul effet de la gravité et une viscosité plastique suffisante, afin d'assurer une bonne résistance à la ségrégation du béton durant l'écoulement.

Les propriétés requises pour que le mortier puisse être considéré comme autoplaçant, une fluidité élevée et une résistance suffisante aux ségrégations statiques et dynamiques. En termes de rhéologie, cela revient à abaisser le seuil de cisaillement du mortier, tout en maintenant la viscosité plastique du mélange. La fluidité élevée du mortier autoplaçant (MAP) peut être obtenue en ayant recours à des superplastifiants sans augmenter le rapport eau/ciment. L'ajout d'un superplastifiant peut provoquer une diminution significative du seuil de cisaillement mais n'aura qu'une influence limitée sur la viscosité plastique. Ces mortiers présentent alors l'avantage d'être plus facile à tester, les volumes de matériau requis étant plus faibles du fait de la diminution du volume représentatif, en d'autres termes, effectuer des essais sur un mortier est beaucoup plus commode et simple que de les effectuer sur un béton. Par conséquent, l'évaluation des propriétés du mortier est une partie intégrale de la formulation des bétons, donc la connaissance des propriétés du mortier est utile. Pour la formulation du mortier autoplaçant, on s'est basé sur la méthode OKAMURA avec une amélioration au niveau de la teneur en sable, le rapport eau/ciment (E/C) et le rapport Superplastifiant/Ciment (Sp/C) pour s'adapter aux propriétés des matériaux locaux et en particulier le sable. La sélection du rapport Sable/Mortier et du rapport Sp/C est ajustée par l'essai d'étalement, dont le diamètre de la galette obtenu doit être compris entre 270 mm $\leq$ d $\leq$ 330 mm [43].

II.2.2.1/ Rapport Eau/Ciment (E/C)

Boukendakdji [11] a testé des BAP à base de matériaux locaux. Il a montré qu'un rapport E/C égal à 0,40 est adéquat pour obtenir un bon BAP.

Les essais préliminaires ont montré qu'il faut aller jusqu'au rapport 0,40 afin d'avoir un mortier autoplaçant satisfaisant ayant un étalement supérieur à 270 mm surtout dans le cas de faibles dosages en superplastifiant.

Pour tous les essais de mortier nous avons fixé le rapport eau/ciment à 0,40.

II.2.2.2/ Rapport Sable/Mortier (S/M)

L'optimisation du rapport Sable/Mortier consiste à développer les meilleures caractéristiques du mortier à l'état frais pour assurer par la suite de bonnes caractéristiques du béton autoplaçant à l'état frais et durci. Le principe de la méthode consiste à rechercher la composition optimale pour

les rapports Sable/Mortier de 0.40, 0.45 et 0.50 tout en faisant varier le rapport superplastifiant/ciment (Sp/C), Boukendakdji [11] a choisi un rapport S/M=0,50.

D'après les essais préliminaires qui ont été faits, on a choisi un rapport S/M=0,45 afin d'avoir un mortier autoplaçant satisfaisant ayant un étalement supérieur à 270 mm.

Pour tous les essais de mortier nous avons fixé le rapport Sable/Mortier à 0,45.

II.2.2.3/ Variation du rapport Superplastifiant/Ciment (Sp/C)

Afin d'obtenir un mortier autoplaçant pour les trois sables étudies (3 mélanges de MAP) avec des rapports E/C et S/M fixes, Nous avons effectué beaucoup d'essais préliminaires avec un Sp/C variable ajusté par l'essai d'étalement dont le diamètre de la galette obtenu doit être compris entre 270 mm ≤ d ≤ 330 mm [43] afin de prendre pour chaque mélange du MAP son propre dosage en Sp. Les dosages optimaux en superplastifiant Sp/C obtenus sont :

1% pour le MAP1 établi par le sable Corrigé ;

1.4% pour le MAP2 établi par le sable de Boughezoul ;

1% pour le MAP3 établi par le sable de Bayazid.

Les différentes proportions ont été calculées selon la procédure donnée en annexe A.

Les compositions des différents MAP sont représentées dans le tableau II.7 suivant :

Tableau II.7 : Formulation des différents mortiers obtenus.

Composantes	**MAP1 (Sable corrigé)**		**MAP2 (Sable de Boughezoul)**	**MAP3 (Sable de Bayazid)**
	Sp/C=1%		**Sp/C=1.4%**	**Sp/C=1%**
Ciment (kg/m^3)	764.89		764.89	764.89
Sable (kg/m^3)	SC=561.26	SH=633.42	1147.39	1247.80
Eau (kg/m^3)	313.96		315.90	310.33
Sp (kg/m^3)	7.65		10.71	7.65

II.2.3/ Formulation du Béton

En suivant la procédure d'exécution de la méthode générale, on remarquera que l'étape des essais sur mortier est une étape primordiale car elle permet de fixer les rapports E/C (eau/ciment), S/M (sable/mortier) ainsi que Sp/C (superplastifiant/ciment). Du moment que le mortier, dans les bétons autoplaçants, occupe un volume important dans le mélange, les résultats des essais sur mortier seront concluants. A étape suivante, on cherchera la formulation optimale

du BAP en se basant sur les résultats des essais sur mortier, si nécessaire les rapports surtout E/C et Sp/C seront ajustés afin d'aboutir aux résultats adéquats pour un bon étalement sans ségrégation ni ressuage. Une fois que les rapports seront déterminés, on procèdera aux différents essais sur béton frais et sur béton durci. Pour la confection du béton autoplaçant, les proportions du mélange (ciment, gravier, sable, eau et superplastifiant) ont été calculés d'après l'exemple de composition du béton donné à l'annexe B.

II.2.3.1/ Fixation des rapports Sable/Mortier (S/M) et Eau/Ciment (E/C)

Afin de minimiser le nombre de variables pour le béton autoplaçant, nous avons jugé judicieux de maintenir fixe les deux rapports S/M et E/C trouvés lors des essais effectués sur le mortier, et chercher la meilleure formulation du BAP de référence en ajustant le rapport Sp/C.

II.2.3.2/ Fixation du rapport Superplastifiant/Ciment (Sp/C)

Comme point de départ, on prendra le résultat des essais sur mortiers, du rapport Sp/C. Il suffit de quelques mesures d'étalement (au cône d'Abrams) et de temps d'écoulement à l'entonnoir en V, pour trouver le meilleur rapport Sp/C donnant un bon béton autoplaçant sans ségrégation ni ressuage. Une fois que le BAP est obtenu on procèdera à tous les essais sur béton frais. Le tableau II.8 présente les différentes compositions des bétons confectionnés. Ces bétons contiennent des gros granulats de diamètre maximum 15 mm.

Tableau II.8 : Compositions des différents BAP étudiés (pour 1m^3 de béton).

Dosage en Sp%	Mélanges	Composition (kg/m^3)						
		Ciment	Sable		Gravier		Eau	Sp
			Concassé	H Bahbah	3/8	8/15		
Sp=1%	CB1	518	384,20	433,60	410	410	222,35	5.18
	CH1	516	382,96	432,20	409	409	219,50	5.16
	CK1	520	385,27	434,80	412	412	223,05	5.19
	CZ1	520	385,72	435,31	412	412	232,42	5,20
	CM1	520	385,52	435,08	412	412	226,37	5.20
Sp=1,4%	ZB2	524	797,00		400	400	225,81	7,33
	ZH2	522	795,00		399	399	223,14	7,31
	ZK2	525	800,00		402	402	226,59	7,36
	ZZ2	526	801,00		402	402	235,68	7,36
	ZM2	526	800,00		402	402	229,81	7,36
Sp=1%	BB3	511	840,00		422	422	217,44	5,11
	BH3	510	838,00		421	421	214,56	5,10
	BK3	513	843,00		423	423	218,23	5,13
	BZ3	514	844,00		424	424	227,77	5,14
	BM3	513	844,00		423	423	221,59	5,13

II.2.4/ Procédure de malaxage

II.2.4.1/ Pour le mortier

Pour la confection du mortier, les proportions du mélange (ciment, sable, eau et superplastifiant) ont été calculés d'après l'exemple de composition de mortier donné à l'annexe A.

Plusieurs auteurs décrivent la méthode de malaxage dans le but de couvrir la surface de tous les agrégats par la pâte de ciment et d'assurer le mélange le plus homogène possible des différents constituants. Dans nos essais nous avons opté pour la proposition de Domone et Jin [43] qui s'articulé sur les étapes suivantes :

- Malaxer à sec le ciment et le sable pendant environ 1 minute afin d'homogénéiser le mélange (on a utilisé un malaxeur à mortier de capacité de 5 litres) ;
- Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau (Eau1 = 60% Eau) ;
- Ajouter pendant 1 minute le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 40% Eau) mélangé avec le superplastifiant ;
- Malaxer le mélange pendant 3 minutes.

La séquence de malaxage est la même pour tous les mélanges du mortier.



Figure II.8 : Malaxeur à mortier.

II.2.4.2/ Pour le béton

En général, pour un faible rapport eau/ciment et un fort dosage en superplastifiant, le mélange nécessite un temps de malaxage plus prolongé [44]. Un malaxage intensif disperse mieux les particules de poudres. Dans le cas de mauvais malaxage ces particules de poudres restent dans la phase pâte et rendent le béton plus visqueux [45]. De Larrard et al [46] ont montré que l'étalement et la résistance à la compression sont les plus influencés par le temps de malaxage.

Le superplastifiant est plus efficace lorsqu'il est ajouté après le mouillage des composantes du béton (environ 60% de l'eau de gâchage).

La séquence de malaxage et la composition du béton ont un rôle important pour avoir une hydratation correcte, ce qui conduit à un béton performant et durable.

Les mélanges ont été confectionnés dans un malaxeur à béton d'une capacité de 50 litres. Selon les caractéristiques souhaitées et les composants du béton, les auteurs suivent plusieurs séquences.
Pour notre cas, la séquence adoptée est celle proposée par Domone et Jin, elle suit les étapes suivantes :

- Calculer l'eau efficace que l'on introduit dans le malaxeur en prenant en compte la teneur en eau et l'absorption des granulats ainsi que l'eau contenue dans l'adjuvant. La quantité d'eau efficace est donnée par la formule suivante :

$$E_{eff} = E_{totale} - E_{teneur\ en\ eau} - E_{adjuvant} + E_{absorbée\ par\ granulats}$$

- Mettre dans le malaxeur le gravier puis le ciment et en suite le sable pour assurer la pénétration des particules fins de ciment dans les vides du gravier avant que le malaxage commencé ;
- Malaxer les composantes à sec pendant 30 secondes pour homogénéiser le mélange ;
- Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau (Eau1 = 60% Eau) ;
- Ajouter pendant 1 minute le superplastifiant dilué dans le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 40% Eau) ;
- Malaxer pendant 5 minutes ;
- Arrêter le malaxeur et laisser le mélange au repos pendant 2 minutes ;
- Remalaxer le mélange pendant 30 secondes.

Cette séquence de malaxage est la même pour tous les mélange de bétons. En ce qui concerne le remalaxage il se fait juste avant chaque essai.



Figure II.9 : Malaxage du béton autoplaçant.



Figure II.10 : Malaxeur de béton.

II.3/ Méthodes d'essais (Mortier et Béton)

La formulation adoptée est modifiée de telle manière que les matériaux locaux puissent donner un bon mortier autoplaçant et un bon béton autoplaçant qu'il possède certaines propriétés à l'état frais : la capacité de remplissage, la capacité de passage et la résistance à la ségrégation.

On procèdera donc à quelques essais relatifs au mortier afin de pouvoir fixer les dosages en eau, en sable et en superplastifiant. Nous réaliserons également des essais sur le béton à l'état frais afin de pouvoir étudier l'ouvrabilité et la rhéologie du béton. Cette série sera suivie par des essais sur le béton durci pour déterminer les résistances mécaniques des mélanges à l'état durci. On notera que tous les essais mentionnés ci-dessous seront réalisés au laboratoire de Béton de l'Université de Médéa.

II.3.1/ Essais relatifs au Mortier

II.3.1.1/ à l'état frais

Les propriétés du mortier (étalement et temps d'écoulement) sont caractérisées à l'aide des essais sur mortiers. L'étalement est déterminé à l'aide de l'essai au mini-cône et le temps d'écoulement est déterminé par un essai au mini V-funnel pour mortier.

Les mortiers ont les mêmes propriétés des BAP sur le plan rhéologique. Toutefois les BAP possèdent un faible volume en gros granulats par rapports aux bétons ordinaire ce qui implique un volume de pate important et donc l'utilité des essais de convenance sur ces mortiers.

Les essais de convenance les plus couramment utilisés sont :

II.3.1.1.1/ Essai d'étalement au Mini-Cône

L'essai consiste à remplir un moule tronconique de mortier autoplaçant placé sur une plaque métallique lisse et humidifiée, une fois le moule soulevé, le mortier sort en formant une galette qui s'élargit sous son propre poids, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaires, la moyenne est retenue. Pour un bon mortier autoplaçant on doit avoir un diamètre d'étalement compris entre 270 mm et 330 mm, et il ne doit présenter ni ségrégation ni ressuage, ces deux derniers paramètres peuvent être détectée visuellement. La Figure II.11 montre le dispositif de l'essai d'étalement pour les mortiers.



Figure II.11 : Développement de l'essai d'étalement pour mortier.

II.3.1.1.2/ Essai à l'entonnoir en V (Mini V-funnel)

Cet essai n'est pas effectué à cause de l'absence d'un mini V-funnel normalisé dans le laboratoire de Béton de l'Université de Médéa, le dispositif disponible présente des obstacles à la base du V à cause de male exécution de la soudure qui empêche l'écoulement réelle du mortier autoplaçant et donc donne des faux résultats.

II.3.1.2/ à l'état durci

Les essais relatifs au MAP à l'état durci se limitent à la détermination des résistances mécaniques à la compression et à la traction par flexion pour les trois âges 7j, 28j et 90j.



Figure II.12 : Remplissage des moules en mortier

II.3.1.2.1/ Résistance à la compression

Les essais de résistance à la compression ont été effectués sur des tronçons des éprouvettes prismatiques (4×4×16) cm^3 à l'aide d'une presse de capacité de 2000 kN (Figure II.14). L'éprouvette est placée et centrée entre les deux plateaux de la presse puis chargée progressivement jusqu'à la rupture.



Figure II.13 : Essai de compression



Figure II.14 : Presse hydraulique (2000 kN).

II.3.1.2.2/ Résistance à la traction par flexion

Cet essai de traction par flexion en trois points est réalisé sur des éprouvettes prismatiques (4×4×16) cm^3. La résistance à la traction par flexion est calculée par la formule suivante :

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2a^3} \qquad \text{(II.1)}$$

On affecte un coefficient de 0,6 aux valeurs trouvées pour tenir compte de plastification du béton on déduit les résistances à la traction (σt) :

$$\sigma_t = \frac{1.8PL}{2a^3} \qquad \text{(II.2)}$$



L'éprouvette avant l'essai



L'éprouvette après l'essai

Figure II.15 : Essai de traction par flexion.

II.3.2/ Essais relatifs au Béton

II.3.2.1/ à l'état frais

Pour accorder les deux caractéristiques contradictoires du béton autoplaçant (c'est-à-dire la fluidité et la résistance à la ségrégation), nous avons procédé dans le cadre de ce travail à la réalisation de plusieurs essais qui permettent de caractériser les principales propriétés du béton autoplaçant à l'état frais:

- La capacité de remplissage ;
- La capacité de passage ;
- La résistance à la ségrégation.

Les essais réalisés dans le cadre de ce travail sont résumée comme suit :

Tableau II.9 : Essais relatifs aux BAP.

Propriétés	Essais à réaliser
Capacité de remplissage	Etalement au Cône d'Abrams
	V-Funnel
Capacité de passage	J-Ring
	L-Box
Résistance à la ségrégation	Essai au tamis de 5 mm

II.3.2.1.1/ Essais d'étalement au cône d'Abrams et T_{50}

Cet essai est traditionnellement utilisé pour déterminer l'ouvrabilité des bétons, et est imposé comme l'essai le plus facile à réaliser, en se basant sur la mesure de l'affaissement de béton sous l'effet de son propre poids. dans le cas des bétons autoplaçant, cet essai permet d'évaluer l'écoulement en milieu non confiné, c'est-à-dire la capacité de remplissage à l'état libre sans obstacles ou la déformabilité du béton et de mesurer son étalement sous son propre poids, on mesure le diamètre moyen d'étalement (moyenne des deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute (Figure II.16), ainsi que le temps nécessaire (T_{50}) à l'obtention du diamètre d'une galette de 500 mm de diamètre qui correspond à la période limité entre le commencement de l'étalement de la galette (moment de soulèvement du cône) et le premier passage au cercle de 500 mm tracé sur la plaque. Cette dernière valeur (T_{50}) donne une indication sur la viscosité, l'uniformité et la résistance à la ségrégation du mélange, En général, des valeurs élevées de T_{50} traduisent un béton de vitesse de déformation faible (viscosité élevée). Et peut aussi donner des informations concernant l'uniformité et la résistance à la ségrégation du mélange, sa capacité à s'écouler en milieu non confiné et sans obstacle.

Equipement nécessaire

- Plaque métallique plane constituant un carré d'au moins 90 cm de côté et tracée au centre d'un cercle de 50 cm de diamètre pour la mesure du T_{50} ;
- Cône d'Abrams disposant d'un empattement à sa partie basse afin qu'il puisse être maintenu contre le plateau avec les pieds par l'opérateur ;
- Chronomètre ;
- Mètre ou règle de 90cm.

Mode opératoire

- Humidifier la surface de la plaque (éliminer l'eau en excès avec un chiffon) ;
- Placer au centre le cône d'Abrams sur la plaque en utilisant un entonnoir ;
- Remplir le cône en déversant de manière continue, jusqu'à l'arase supérieure du cône ;
- Retirer l'entonnoir et araser si nécessaire à l'aide d'une truelle ;
- Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées et lentement pour permettre au béton de s'étaler (pendant environ 5s);
- Lancer le chronomètre dès le soulèvement du cône jusqu'à ce que le béton atteigne le cercle de 50 cm tracé sur la plaque, cette mesure c'est le T_{50} ;
- Une fois que le béton s'est étalé sur la plaque (après 1mn environ), on mesure le diamètre final sur deux côtés perpendiculaires, Le résultat est exprimé en moyenne des deux valeurs obtenues. Plus le diamètre est grand, plus le béton est capable de remplir les coffrages.
- Détecter visuellement s'il y a des signes de ségrégation de béton ou ressuage (présence d'une bande de laitance à la périphérie de la galette et accumulation de gravier au centre d'une galette de mortier).



Figure II.16 : Développement de l'essai d'étalement.

Selon EFNARC [47], la mesure de l'étalement, peut être divisée le BAP en trois classes. Le Tableau II.10 définit ces trois classes selon le domaine d'utilisation du BAP :

Tableau II.10 : Classification des BAP selon l'étalement et le domaine d'utilisation.

Classe	Etalement (en mm)	Domaine d'utilisation de BAP
SF1	550 - 650	• structures nom ou peu ferraillées. béton coulé à partir du haut (ex. les dalles). • coulage par système de pompage du BAP (ex. tunnels). • petites sections (ex. les piles et les fondations profondes).
SF2	660 - 750	• La majorité des applications.
SF3	760 - 850	• applications verticales. • structures trop ferraillées. • coulage à partir du dessous du coffrage. • structures de forme complexe.

La classe SF3 est typiquement produite avec les petites dimensions maximales de granulats (D $<$ 16 mm), et donne généralement une meilleure finition de surface que la classe SF2, mais la résistance à la ségrégation est difficile à contrôler.

Des valeurs d'étalement dépassant les 850 mm peuvent être spécifiées pour des cas spéciaux mais une attention particulière doit être portée quant à la résistance à la ségrégation, et la dimension maximale des granulats doit être normalement inférieure à 12 mm.

Des valeurs cibles de l'ordre de 600 à 750 mm correspondent à l'étalement moyen sont conseillées d'un BAP [48]. Toutefois les recommandations Européennes proposent une classification des BAP en fonction des fourchettes d'étalement et une autre en fonction du temps d'étalement T_{50} donnant une indication sur la viscosité. Ces classements sont donnés par le tableau II.10 et II.11. Les recommandations européennes proposent un T_{50} compris entre 2 et 5 secondes pour un BAP [48].

Tableau II.11 : La classe de viscosité donnée par le temps T_{50}.

Classe	T_{50} (s)	Caractéristique
VS1	≤ 2	▪ Bonne capacité de remplissage, ▪ Sensibles au phénomène de ségrégation et ressuage.
VS2	> 2	▪ Bonne résistance à la ségrégation, ▪ Utile pour limiter la pression de coffrage, ▪ Un faible niveau de finition, ▪ Retard de reprise entre les couches successive.

II.3.2.1.2/ Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

D'autres essais permettent d'évaluer la mobilité et la capacité du béton à passer à travers les zones confinées comme celui de l'entonnoir en forme de V (V funnel) (Figure II.17) développé par Okamura et Ozawa en 1995.

Cet essai permet d'estimer le temps de vidange de béton par chute libre. Le temps mesuré indique la fluidité (plus le temps d'écoulement est court, plus le béton est fluide) et la capacité de béton a passé dans des orifices qui sont petites (capacité de passage / blocage).

Equipement nécessaire

- Entonnoir en V (V-Funnel) dont les dimensions sont indiquées dans la figure II.17
- Chronomètre
- Un seau de capacité de 12 litres

Mode opératoire

- Placer le V-Funnel dans un endroit stable et s'assurer que le clapet est bien fermé ;
- Prélever dans un seau un échantillon de béton représentatif d'environ de 12 litres ;
- Remplir l'entonnoir avec le béton, on laisse reposer pendant 1 minute ;
- Mettre le seau au-dessous de l'orifice de l'entonnoir et ouvrir le clapet ;
- Remplir l'entonnoir une deuxième fois de béton ;
- Mettre le seau au-dessous de l'orifice de l'entonnoir ;
- Après une attente de 10 secondes, ouvrir le clapet en laçant le chronomètre ;
- Arrêter le chronomètre quand la première lumière est apparue à travers l'orifice de l'entonnoir, cette mesure est le temps d'écoulement ;
- Refaire l'essai 3 fois ;
- Le résultat est exprimé en moyenne des trois valeurs du temps d'écoulement obtenues.

Le temps d'écoulement du BAP à l'entonnoir noté $T_{V\text{-}F}$ doit être généralement inférieur à 12 secondes. Quelques recommandations proposent un temps compris entre 6 et 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisante. Le guide européen propose une classification de la viscosité pour l'essai d'entonnoir en V (Tableau II.12). On note que les classes VF1 et VF2 (Tableau II.11) correspondent aux classes VS1 et VS2 (Tableau II.12) respectivement.

Tableau II.12 : Classes de viscosité donnée par le temps $T_{V\text{-}F}$.

Classe	$T_{V\text{-}F}$ (s)	Caractéristique
VF1	≤ 8	▪ Bonne capacité de remplissage, ▪ Sensibles au phénomène de ségrégation et ressuage.
VF2	$9 - 25$	▪ Bonne résistance à la ségrégation, ▪ Utile pour limiter la pression de coffrage, ▪ Un faible niveau de finition, ▪ Retard de reprise entre les couches successive.



Figure II.17 : Dispositif de l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel).

II.3.2.1.3/ Essai à la couronne J (J-Ring test)

L'essai à la couronne J (J-ring test) permet d'évaluer la mobilité du béton en milieu confiné. Cet essai consiste à investiguer les deux propriétés, la capacité au remplissage et la capacité de passage du BAP à travers une cage d'armatures. Il permet aussi d'étudier la résistance à la ségrégation d'un BAP en comparant les résultats de deux essais différents. L'essai J-ring mesure trois paramètres : l'étalement S_J, le temps d'écoulement T_{50J} et le blocage caractérisé par la

différence d'hauteurs B_J [49]. Dans cet essai un bon BAP c'est celui qui s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau sans présence de ségrégation à travers les armatures et lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau.

On l'appelle aussi l'essai d'étalement modifié (J-Ring). Il fut développé au Japon et consiste à faire écouler le béton au travers de barres d'armature afin de pouvoir 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 300 mm de diamètre sont soudées des barres d'armature ϕ16 mm à ϕ18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre.

Equipement nécessaire

- Plaque métallique plane constituant un carré d'au moins 90 cm de côté et tracée au centre d'un cercle de 50 cm de diamètre pour la mesure du T_{50J} ;
- Cône d'Abrams ;
- Dispositif J-Ring (Figure II.19) ;
- Chronomètre ;
- Mètre ou règle de 90cm.

Mode opératoire

- Humidifier la surface de la plaque (éliminer l'eau en excès avec un chiffon) ;
- Placer au centre le dispositif J-Ring et le cône d'Abrams sur la plaque et équiper la partie supérieure du cône d'un entonnoir ;
- Remplir le cône en BAP en déversant de manière continue, jusqu'à l'arase supérieure du cône ;
- Retirer l'entonnoir et araser si nécessaire à l'aide d'une truelle ;
- Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées et lentement pour permettre au béton de s'étaler (pendant environ 5s);
- Lancer le chronomètre dès le soulèvement du cône jusqu'à ce que le béton atteigne le cercle de 50 cm tracé sur la plaque, cette mesure c'est le T_{50J} ;
- Une fois que le béton s'est étalé sur la plaque (après 1mn environ), on mesure le diamètre maximal et celui perpendiculaire, Le résultat est exprimé en moyenne des deux valeurs obtenues ;
- Mesurer les différentes hauteurs du béton à l'intérieur au centre (h_0) et (h_1*et* h_2) suivant la direction X et (h_3*et* h_4) suivant la direction Y à l'extérieur du J-Ring ;

- Détecter visuellement s'il y a des signes de ségrégation de béton ou ressuage (présence d'une bande de laitance à la périphérie de la galette et accumulation de gravier au centre d'une galette de mortier ou un blocage à travers les armatures du J-Ring).



Figure II.18 : Protocole de l'essai du J-Ring.

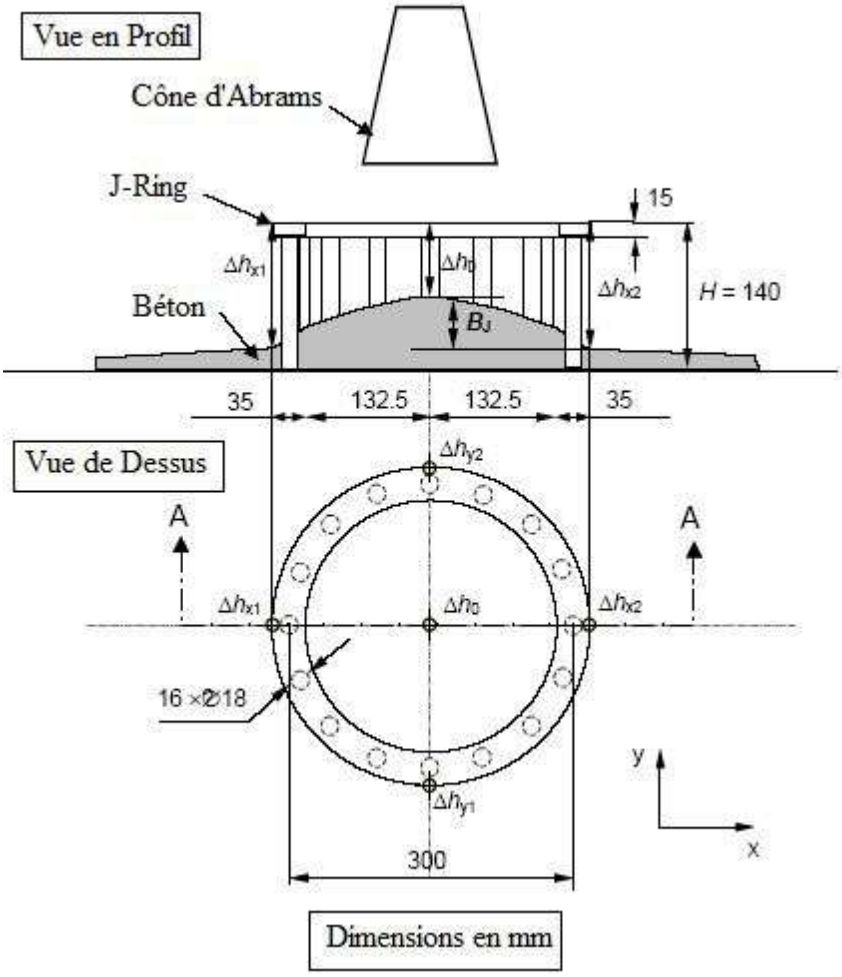


Figure II.19 : Dimensions du J-ring et positions pour mesure de différence de hauteurs.

L'essai J-ring permet de prendre trois mesures :

Etalement S_J

On mesurera en premier lieu le plus grand diamètre de la galette du BAP d_{max}, puis le diamètre perpendiculaire d_{perp}, et on calculera l'étalement à partir de la formule suivante :

$$S_J = \frac{(d \quad + d \quad)}{2} \qquad \text{(II.3)}$$

Temps d'Ecoulement T_{50J}

Le temps d'écoulement T_{50J} est la période entre le moment où le cône est soulevé et le moment où le BAP touche le cercle de diamètre 500 mm tracé sur la plaque métallique.

Différence d'hauteurs B_J

Cette mesure consiste à mesurer la différence d'hauteurs B_J du BAP entre l'intérieur et l'extérieur du J-ring pour pouvoir confirmer ou infirmer le blocage. Les hauteurs sont montrées sur la Figure II.19. D'après Jin et Domone [50] Pour un bon BAP sans risque de blocage, la différence d'hauteurs B_J ne doit pas dépasser 10 mm. B_J est calculée avec la formule suivante :

$$B_J = \frac{(\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2})}{4} - \Delta h_0 \qquad \text{(II.4)}$$

Avec : Δh est la profondeur mesurés au centre et à partir du sommé du J-Ring.
Δh Sont les profondeurs mesurés selon l'axe x à partir du sommé du J-Ring.
Δh Sont les profondeurs mesurés selon l'axe y à partir du sommé du J-Ring.

Les profondeurs Δh , Δh , Δh sont illustrées par la figure II.19.

II.3.2.1.4/ Essai à la boite en L (L-Box test)

L'essai de la boîte en L permet d'évaluer la mobilité du béton autoplaçant en milieu confiné, de contrôler le risque de blocage et la ségrégation dynamique. Cet essai est réalisé en utilisant une boite ayant une forme en L (Figure II.20), il permet de caractériser la viscosité du mélange, de plus la présence de barres simulant des armatures d'un coffrage renseigne sur la capacité de passage du mélange.

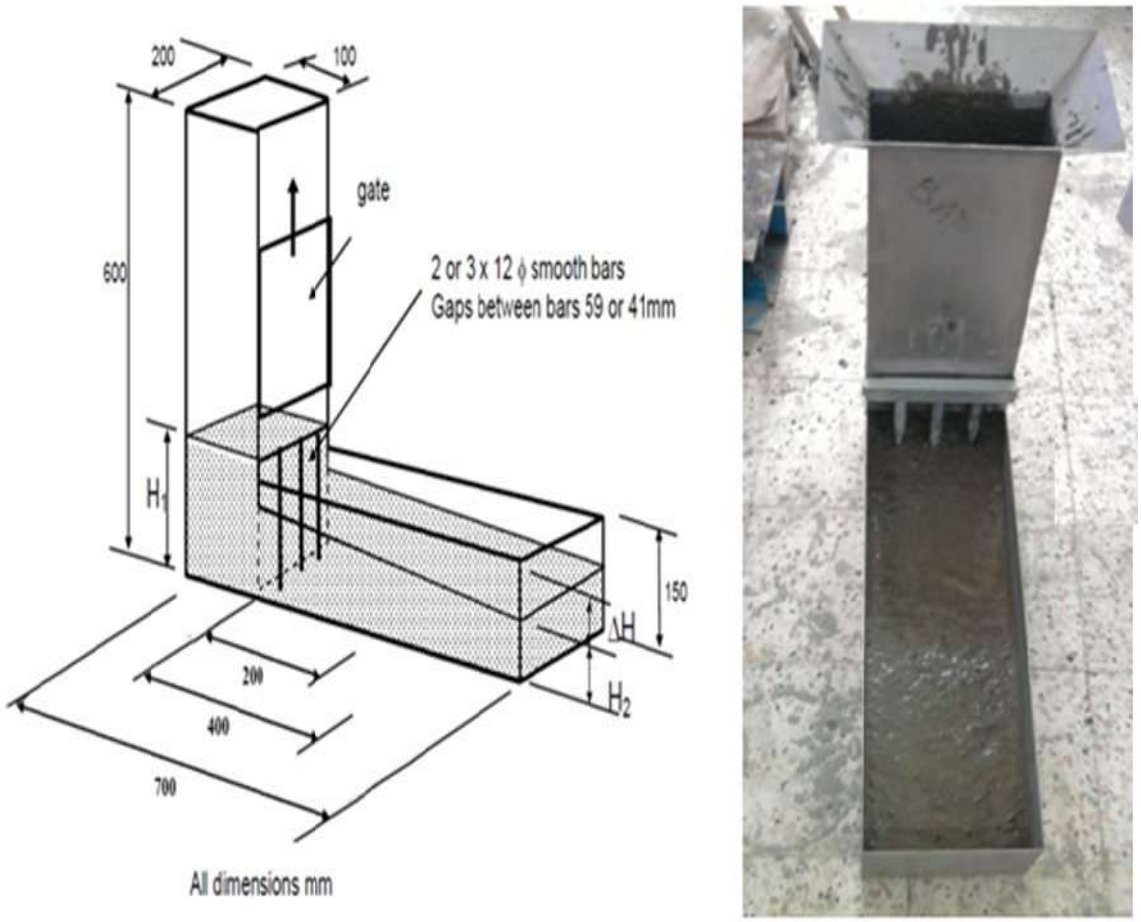


Figure II.20 : La boite en L (L-Box).

Matériel nécessaire

- La boîte en L, dont les dimensions sont définies sur la figure II.20 ;
- Un seau de capacité de 14 litres ;
- Mètre ou règle de 90cm.

Mode opératoire

- Remplir entièrement en BAP la partie verticale de la boîte en béton en déversant de manière continue (le volume nécessaire est d'environ 13 litres) ;
- Après arasement, laissé le béton reposer pendant une minute ;
- Soulever la trappe verticalement et rapidement;
- Laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferraillage, la distance libre entre les barres est de 39 mm ;
- Une fois l'écoulement du béton achevé, on mesure les hauteurs H1 et H2 (Figure II.21) ;
- On exprime le résultat en terme de taux de passage H2/H1 qui renseigne sur la capacité du BAP à cheminer en milieu confiné, pour une bonne capacité de passage, une valeur du rapport entre 0,8 et 0,85 est acceptable.



Figure II.21 : Protocole de l'essai de la boîte en L (L-Box).

La capacité de passage et la résistance à la ségrégation, peuvent être détectées visuellement, si on observe un résidu de granulats dans la partie verticale du L (avant les barres de ferraillage), on pourra conclure qu'il y a soit blocage soit ségrégation, lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferraillage et qu'il se produit un amoncellent de granulats en aval de la grille c'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation, si par contre, on observe une bonne distribution des gros granulats tout au long de la partie horizontale du L, on pourra dire que ce béton est homogène.

II.3.2.1.5/ Essai de résistance à la ségrégation par tamisage (Sieve segregation resistance test)

Cet essai permet de caractériser l'amplitude du BAP à rester homogène après sa mise en place et jusqu'au début de prise (Figure II.22). Le BAP doit demeurer stable sous l'effet de la gravité et ne doit pas présenter des signes de ressuage.

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

Cet essai est proposé dans les Recommandations Provisoires de l'Association Française de Génie Civil (AFGC) [51].

Matériel nécessaire

- Seau de 10 litres de capacité + couvercle ;
- Tamis 5 mm + fond ;
- Balance : précision minimale 20 gr, portée minimale 20 kg ;

Mode opératoire

- Prélever un échantillon de béton de 10 litres juste après le malaxage ;
- mise au repos le prélèvement pendant 15 min ;
- Peser le fond seul ;
- Poser le tamis + fond sur la balance et faire la tare ;
- Verser sur le tamis un poids de béton égal à 4.8 kg (tolérance ± 0.2 kg), verser ce béton au centre du tamis d'une hauteur de chute de 50 cm ± 5 cm ;
- Noter le poids de l'échantillon ;
- Attendre 2 mn ;
- Peser le fond avec la laitance : on a $P_{laitance} = P_{fond+laitance} - P_{fond}$;
- Calculer le pourcentage de laitance par rapport au poids de l'échantillon par l'expression suivante:

$$\Pi = \frac{P \quad * 100}{P_{é}} \qquad \text{(II.5)}$$

Avec :

$P_{é}$: est le poids d'une partie d'un échantillon de béton mis au repos versé sur le tamis de 5 mm.

P : est le poids de la laitance passant par le tamis de 5 mm.

Le critère de stabilité de cet essai est :

- $0 \leq \Pi \leq 15\%$: alors la stabilité est satisfaisante ;
- $15 < \Pi \leq 30\%$: la stabilité est critique ;
- $\Pi > 30\%$: la stabilité est très mauvaise.

Lorsque $0 \leq \Pi \leq 5\%$, 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 [52]. La conclusion de cet essai est qu'il est sensible aux variations de dosage en superplastifiant ou en eau.



Figure II.22 : Protocole de l'essai de stabilité au tamis.

Remplissage des moules

Après faire les essais de béton à l'état frais, on remplit les moules pour la conservation des éprouvettes pour les essais à l'état durci sans oublier le huilage des moules par l'huile de décoffrage pour la facilite de démoulage, pour cela on a besoin de :

- Moules 10x10x10 cm pour l'essai de compression.
- Moules 7x7x28 cm pour les essais de retrait, gonflement et la traction par flexion
- Moule 32x16 cm pour l'essai de module d'élasticité



Figure II.23 : Protocole de remplissage des moules.

Démoulage et conservation des éprouvettes

Après 24 heures de le remplissage des moules en béton, on démoule les éprouvettes et on les place dans un bac rempli d'eau à une température d'environ 20°C jusqu'à faire les essais, pour maintenir La cure humide satisfaisante et la température favorable durant la période d'hydratation du ciment pour éviter l'évaporation rapide de l'eau de gâchage, afin d'assurer un bon mûrissement du béton.



Figure II.24 : Conservation des éprouvettes.

II.3.2.2/ à l'état durci

Les essais relatifs au BAP à l'état durci consistent à la détermination de:

- Résistances mécaniques à la compression et à la traction par flexion ;
- Auscultation dynamique (Ultrason) ;
- Module d'élasticité ;
- Taux de retrait et de gonflement ;
- l'absorption d'eau par capillarité.

II.3.2.2.1/ Résistance à la compression

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression qui correspond à la contrainte moyenne d'écrasement effectués sur deux éprouvettes cubiques $(10\times10\times10)$ cm^3 (norme NF EN 12390-3 [57], NA 427 [53]) à chaque âge d'essai 7, 28 et 90 jours à l'aide d'une presse de capacité de 2000 kN (Figure II.25). L'éprouvette est placée et centrée entre les deux plateaux de la presse puis chargée progressivement jusqu'à la rupture.



Figure II.25 : Presse hydraulique (2000 kN).

La conduite de l'essai est la suivante :

On inverse l'éprouvette de façon que le sens de compression soit perpendiculaire au sens de confection.

L'éprouvette doit être centrée sur la presse d'essai avec une erreur inférieure à 1% de son dimension.

La charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

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

$$\sigma = \frac{P}{S} \qquad \text{(II.6)}$$

Avec :

σ : Contrainte de rupture (MPa) ;

P : Charge de rupture (MN);

S : Section de l'éprouvette.



Figure II.26 : Essai de compression.

II.3.2.2.2/ Résistance à la traction par flexion

Cet essai est homologué de norme NF P 18-407 [58], NA 428 [54], ASTM C293 [59], et permet de déterminer la résistance à la traction par flexion du béton étudié. C'est l'essai le plus couramment utilisé. Il consiste à rompre en flexion des éprouvettes prismatique normalisées de côté a et de longueur L= 4a (7 x 7 x 28) à chaque âge d'essai 7, 28 et 90 jours. Les mesures sont faites sur une presse qui répond aux normes NF P 18-411 munie d'un banc de flexion 3 points (Figure II.27).

La résistance à la traction par flexion est calculée par la formule suivante :

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2a^3} \qquad \text{(II.7)}$$

On affecte un coefficient de 0,6 aux valeurs trouvées pour tenir compte de la plastification du béton en on déduit les résistances à la traction (σt) :

$$\sigma_t = 1.8\frac{PL}{2a^3} \qquad \text{(II.8)}$$





L'éprouvette avant l'essai. L'éprouvette après l'essai.

Figure II.27 : Essai de traction par flexion.

II.3.2.2.3/ Auscultation sonique (Ultrason) [55, 60]

C'est un essai non destructif permet d'avoir une idée sur la compacité, l'homogénéité et la porosité du béton.

Il consiste à mettre les deux sondes (émettrice et réceptrice) de l'ultrason entre les deux extrémités d'une éprouvette prismatique (10×10x10) cm âgée de 28 jours.
Avant de procéder aux essais à l'ultrason, on a pris le soin de vérifier le bon fonctionnement par étalonnage de l'appareil en utilisant le barreau de calibrage (Fig. II.28).
Pour chaque éprouvette, les essais à l'ultrason ont été effectués en deux sens selon la méthode par transmission directe de telle façon que le sens de mesure du temps de transit soit perpendiculaire au sens de confection. Sur les faces opposées de l'éprouvette on a placé les deux transducteurs en interposant entre eux une couche mince de vaseline (Fig II.29), puis l'enregistrement du temps de transit en micro seconde est réalisé (Fig II.30).



Figure II.28 : Etalonnage de l'ultrason à l'aide du barreau de calibrage.



Figure II.29 : Graissage des faces d'éprouvette avec la vaseline.



Figure II.30 : Mesure du temps de parcours des ondes Ultrasonores.

Le résultat d'essai à l'ultrason correspondant à chaque éprouvette est la valeur médiane de deux mesures effectuées selon les deux sens, et par conséquent la vitesse des ultrasons calculée est exprimée à 0,01 km/s prés, selon la norme NF EN 12504-4 [60], NA 5027 [55] À partir du temps de propagation des ondes soniques à travers la masse de béton, on calcule la vitesse de propagation des ondes à partir de la formule suivante :

$$V = \frac{L}{t} \times 10^6 \qquad \text{(Eq II.9)}$$

Avec :

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

L : la distance entre les deux sondes en m (pour l'éprouvette testée L = 0.10 m) ;

t : le temps de propagation des ondes (µs).

II.3.2.2.4/ Le module d'élasticité

Installation de l'étrier

Pour installer l'étrier correctement, on doit suivre les étapes suivantes :

- Passer les 2 couronnes de l'étrier autour d'une éprouvette cylindrique dont les extrémités ont été préalablement rectifiées (au disque ou au souffre) ;
- Centrer l'éprouvette sur le plateau de la presse ;
- Placer les piges autour de l'éprouvette et poser la couronne inférieure sur les piges ;
- Lorsque sa position est calée (couronne située à 1/3 de la hauteur de l'éprouvette), serrer les 2 vis de serrage de la couronne inférieure, puis celle de la couronne supérieure ;

- Retirer les 3 entretoises en dévissant pour chaque entretoise les 2 vis situées aux extrémités ;
- Fixer le comparateur sur la couronne supérieure au-dessus de la vis d'appui. La pointe du comparateur doit être en contact avec la vis d'appui mais ne doit pas être en butée (course possible).

Mode opératoire de l'essai

Avant de faire cet essai, il est recommandé de déterminer la force de compression maximale f_{cm} (Force avant rupture) sur une éprouvette de la même série que celle utilisée pour la détermination du module.

- Mettre en marche la presse et amener le plateau supérieur de la presse en contact avec l'éprouvette habillée par l'étrier ;
- Fixer le taux de charge de la presse à 240 kPa ± 30 kPa. Durant l'essai, la presse doit fonctionner en continu avec un taux de charge constant ;
- Mettre en marche le comparateur et l'initialiser : la valeur affichée par le comparateur doit être nulle ;
- Charger l'éprouvette une $1^{ère}$ fois sans noter les résultats jusqu'à obtenir un déplacement du comparateur E = 0.01 mm. Si le comportement du comparateur et les valeurs affichées de déplacement semblent anormales, revoir la position et la fixation du comparateur. Décharger l'éprouvette ;
- Réaliser un tableau comme ci-dessous pour noter le déplacement du comparateur e en fonction de la charge F.



Figure II.31 : L'essai du module d'élasticité.

II.3.2.2.5/ Retrait et Gonflement

En l'absence de toute charge, le béton se déforme avec le temps. Ces déformations sont dues essentiellement à une perte d'eau de gâchage par évaporation, qui se traduit par un rétrécissement des éléments en béton, c'est le retrait.

Le gonflement est l'augmentation du volume de béton due à leur saturation d'eau qui provoque un gain de masse et de longueur.

Le retrait et le gonflement dépendent non seulement aux conditions de conservation (humidité, température) mais dépend aussi aux constituants du béton.

Les mesures du retrait et du gonflement ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28cm) conformément à la norme NF P 15-404 [62].

On mesure le retrait total libre dû à l'évaporation de l'eau contenue dans le béton, les éprouvettes sont conservées sans moyen de protection dans une salle à température de 20 ± 2°C et une humidité relative de 65 ± 5% et en absence de vent.et pour le gonflement la conservation des éprouvettes est faite dans un bac d'eau de température de 25 à 30°C.

Ces éprouvettes sont placées dans un Rétractomètre (Fig. II.33) munis d'un comparateur qui permet la mesure du retrait et gonflement à tout moment.

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

On compare, à différents temps (cours terme, moyenne terme et à long terme du 1jourjusqu'à 90 jours) la variation de longueur d'une éprouvette par rapport à sa longueur initiale et la variation de masse par rapport à la masse initiale à un temps t_0 pris pour origine.



Figure II.32 : Protocole de l'essai de retrait et de gonflement.

a/ Mesure des variations de longueur

La mesure a lieu, l'axe longitudinal de l'éprouvette étant vertical. Éliminer toutes causes provoque des faux résultats : poussière, mauvais contact de scellement des plots, etc. Et si elle ne peut être éliminée, l'éprouvette doit être rebutée.

Avant chaque sérié de mesures, l'appareil est étalonné avec une tige de métal de 280 mm de longueur et dont les extrémités reproduisent la forme des plots de l'éprouvette (la tige est réalisée en métal Invar ou protégée contre les variations de température qu'elle est appelée à subir au cours des manipulations) même métal que l'appareil.



Figure II.33 : Réctractomètre.



Figure II.34 : Etalonnage de l'appareil.

b/ Mesure des variations de masse

Si, en plus de retrait, on désire mesurer la variation de masse, pesé à 0.1g près l'éprouvette à chacun des temps ou est effectuée une mesure de longueur.



Figure II.35 : Mesure de la variation de masse.

c/ Expression des résultats

Pour chaque éprouvette, sont calculés les rapports :

Δl : Variation de longueur par apport à la longueur origine ;

l_0 : Longueur de base, prise égale à 280mm ;

Δm : Variation de masse par apport à la masse au moment du démoulage ;

m : Masse de l'éprouvette au moment du démoulage.

Le compte rendu donne les valeurs de ces rapports pour les différents âges et pour les différentes éprouvettes mesurées. Les moyennes arithmétiques de ces 3 valeurs à un âge déterminé caractérisent la valeur du retrait et celle du gonflement à cet âge de l'échantillon (éventuellement, de la variation de masse).

d/ Conduite de l'essai

Au moment de la mesure, le comparateur est mis au zéro sur la tige étalon en Invar de longueur l = 280 mm. Soit dl(t) la valeur lue sur le comparateur au temps t, l'éprouvette aune longueur au temps considéré : $l=l+dl(t)$

Soit l (t_0) la longueur de l'éprouvette au temps t_0 choisi d'origine. En général, cette origine est prise au moment du démoulage, 24 h après la confection des éprouvettes. La variation de longueur au temps t sera: $\Delta l(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl(t_0)$

La variation relative de longueur est généralement désignée par ε et a pour expression:

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{l} = \frac{dl(t) - dl(t_0)}{l} \qquad \text{(Eq II.10)}$$

Δl(t) est obtenu en faisant la moyenne sur les 3 éprouvettes issues du même moule. Lorsque les éprouvettes sont conservées dans l'air Δl(t) est généralement négatif et l'on parle alors de retrait de l'éprouvette. Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau, Δl(t) peut être positif: il y a alors un gonflement.

II.3.2.2.6/ Absorption d'eau par capillarité

Dans cet essai de mesure d'absorption de l'eau de béton, on prend un morceau d'éprouvette de béton déjà sécher a 105°C et on le pesé (m_0), après on introduire le dans un bac remplir de 1 cm d'eau (Fig II.36), pendant chaque intervalle de temps (15 min, 30 min,1h, 2h, 4h, 24h) on remesure les masses des morceaux (m_i), la différence de poids c'est le poids de l'eau absorbé (m_i- m_0) (NE 13057) [56]. Et doit être sciées sur une face puis recouvertes d'une résine époxy sur les autres faces, pour empêcher toute évaporation d'eau, elles sont ensuite posées sur la face sciée dans un bac rempli de sable saturé d'eau. On mesure en fonction du temps l'accroissement du poids de l'éprouvette dû à la montée capillaire de l'eau par la formule suivante :

Avec : $$AC = \frac{100 \times P}{S\sqrt{t}} \qquad \text{(Eq II.11)}$$

P : Poids d'eau absorbée (g)

S : Surface sciée en contact avec l'eau en (cm^2)

t : Temps en heures (72 heures).

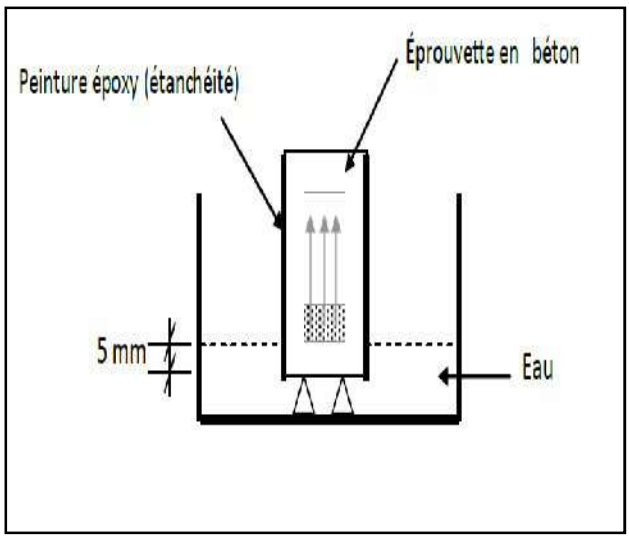




Figure II.36 : Absorption d'eau par succion capillaire.

Conclusion

En conclusion de ce chapitre, on dira que la décision du choix de la formulation n'était pas chose facile à prendre, elle dépendait essentiellement de la qualité des matériaux utilisés. L'utilisation des matériaux locaux dans la fabrication du béton est constitué une alternative économique et technologique importante dans certains pays en voie de développement. Cette recherche présente une contribution à l'étude de l'effet des différents granulats locaux sur les propriétés rhéologique, mécaniques et la durabilité des bétons autoplaçants. Cinq types de graviers calcaires à l'exception du gravier Boughezoul est de nature grés et Trois types de sables de caractéristiques différentes, ont été utilisés, il s'agit du sable corrigé (sable concassé+sable Bahbah), sable Boughezoul et sable Bayazid.

Cette partie de l'étude a successivement traité les points suivants :

- Caractérisation et identification des matériaux utilisés dans les compositions des BAP ;

- La méthode de formulation utilisée, cette méthode appelée « Méthode Générale » proposée par le Japonais OKAMURA, à partir de cette formulation se sont découlés plusieurs formulations à travers le monde entier dans le but d'étudier la possibilité de confectionner un BAP en utilisant les matériaux disponibles localement.

- L'objectif de cette méthode est d'optimiser les dosages en superplastifiant et en sable à l'échelle du mortier avant de passer à l'échelle du béton ;

- Pour ce qui est des essais sur mortiers, il était impératif de faire plusieurs essais préliminaires afin d'optimiser les dosages en eau, en sable et surtout en superplastifiants.

- Les procédures expérimentales et les essais réalisés sur les mortiers et les bétons à l'état frais et à l'état durci au cours de cette étude.

Dans le chapitre suivant sont exposés les différents résultats des différents essais sur mortiers et sur béton suivis d'interprétations et comparaisons avec ceux obtenus par la littérature.

Chapitre III :

Résultats Expérimentaux : Analyse, Discussion et Interprétations

Chapitre III : Résultats Expérimentaux Analyse, Discussion et Interprétations

Introduction

Dans ce chapitre nous exposerons et analyserons les résultats des différents essais effectués à l'état frais et à l'état durci en les confrontant aux résultats de la bibliographie, ainsi, on envisage à mettre en évidence l'effet de quelques paramètres relatif au squelette granulaire sur les performances et la qualité des bétons autoplaçants confectionnés à base des granulats locaux de la région de Médéa.

L'étude des résultats des essais effectués sur les différents mélanges du BAP après avoir fixé tous les paramètres de la formulation (E/C, S/M et %Sp) avec variation du squelette granulaire. On étudiera l'influence de cette variation sur l'ouvrabilité et les caractéristiques rhéologiques du BAP à l'état frais, ainsi que ses caractéristiques mécaniques et de durabilité du béton à l'état durci. L'analyse de ces résultats nous conduira à des recommandations.

La résistance mécanique en compression et en traction, les variations de dimensions et de masse due au retrait et gonflement, le module d'élasticité ainsi que l'absorption d'eau peuvent être considérés comme des propriétés physiques et mécaniques. Les résultats présentés dans cette partie sont les moyennes de mesures effectuées sur deux échantillons.

III.1/ Essais relatifs au Mortier

III.1.1/ à l'état frais

À l'état frais, le mortier autoplaçant est caractérisé par l'essai d'étalement au mini-cône.

III.1.1.1/ Essai d'étalement au Mini-Cône

Le principe vise à déterminer le dosage optimal du superplastifiant (Sp/C) capable de donner un maximum d'ouvrabilité au mortier sans ségrégation et ressuage, en étudiant la variation du l'étalement au mini-cône du mortier en fonction du dosage du superplastifiant (de 0.6 % jusqu'a 1.4%), avec un rapport de S/M fixé à 0,45 et E/C fixé à 0,40.

Pour un bon mortier autoplaçant on doit avoir un diamètre d'étalement compris entre 270 mm et 330 mm [43], et il ne doit présenter ni ségrégation ni ressuage, ces deux derniers paramètres peuvent être détectés visuellement. Le Tableau III.1 montre les résultats de l'essai d'étalement pour les mortiers.

Tableau III.1 : Optimisation du dosage en superplastifiant.

MAP	Etalement (mm)								
Superplastifiant (%)	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4
MAP1 (Sable Corrigé) Mf=2.20, Ab=1.05%	202	228	264	292	**307**	-	-	-	-
MAP2 (Sable de Boughezoul) Mf=2.20, Ab=1.44%	/	/	/	/	205	252	278	293	**305**
MAP3 (Sable de Bayazid) Mf=1.80, Ab=0.72%	224	241	265	288	**310**	-	-	-	-

(/) : Pas d'étalement (mortier ferme)

(-) : Ressuage



Mortier Ferme Phénomène de ressuage

Figure III.1 : Essai d'étalement au Mini-Cône.

III.1.1.2/ Effet de superplastifiant sur l'étalement des mortiers

La figure III.2 montre les résultats d'étalement au mini-cône pour les mortiers autoplaçant en fonction du dosage en superplastifiant. On note que la valeur maximale d'étalement est obtenu par le MAP3 confectionnés à base du sable Bayazid Mf=1.80 (D=310mm avec un Sp/C=1%), c'est un sable roulé qui assure l'écoulement et la fluidité du mortier [85]. Donc, il est possible de contrôler la fluidité et la ségrégation des mortiers à travers la taille des granulats fins. Pour le mortier MAP2 confectionné à base du sable de Boughezoul Mf=2.20 et pour être autoplaçant on

a augmenté le dosage en superplastifiant jusqu'à 1.4% (a cause de leur taux d'absorption d'eau élevé par rapport aux autres sables ce qui nécessite un dosage en superplastifiant élevé) pour assurer une bonne fluidité au mortier et d'obtenir un étalement au mini-cône de 305mm. Le sable corrigé Mf=2.20 donne un étalement de 307mm pour le MAP1 avec un Sp/C=1% (c'est un sable mélange du sable concassé et sable fin), Benchaa [86] a trouvé que les mortiers à base de sable mélange (concassé-alluvionnaire) présentent une bonne fluidité.

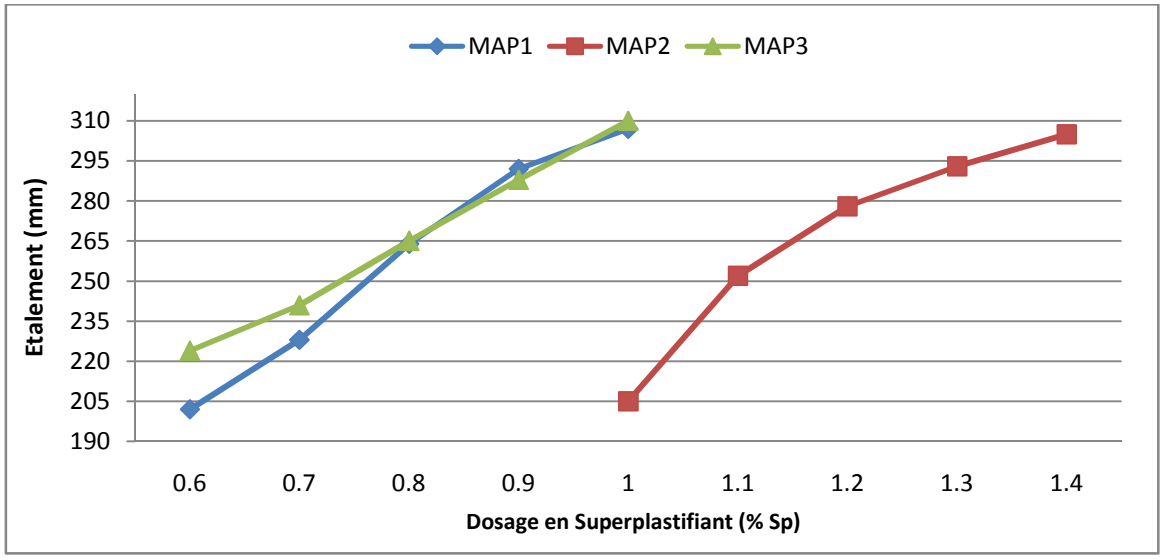


Figure III.2 : Effet de superplastifiant sur l'étalement au Mini-Cône des mortiers étudiés**.**

Les résultats d'essais d'étalement sur les mortiers, nous permettent de faire les conclusions suivantes :

- Un rapport S/M égale à 0.45 et un rapport E/C égale a 0.40 seront utilisés dans la suite de travail pour tous les mortiers, car ils donnent des mortiers fluides et homogènes ;

- Un dosage en superplastifiant égale à 1% est utilisé pour les mortiers MAP1 et MAP3;

- Un dosage en superplastifiant égale à 1.4% est utilisé pour le MAP2.

III.1.2/ à l'état durci

Les essais relatifs au MAP à l'état durci se limitent à la détermination des résistances mécaniques à la compression et à la traction par flexion pour les trois âges 7j, 28j et 90j.

Le tableau III.2 donne les résultats des essais de résistances à la compression et à la traction pour les trois MAP étudiés aux âges 7, 28, et 90 jours.

Tableau III.2 : Résistances mécaniques sur les mortiers étudiés.

	Résistance à la Compression (MPa)			**Résistance à la Traction (MPa)**		
MAP	**7 J**	**28 J**	**90 J**	**7 J**	**28 J**	**90 J**
MAP1 (Sable Corrigé)	46,01	53,20	58,40	8,55	8,95	9,02
MAP2 (Sable de Boughezoul)	43,09	48,83	53,89	4.18	5.36	5.96
MAP3 (Sable de Bayazid)	32.36	43.52	47.94	5,70	6,04	6,85

Du tableau III.2, il apparait clairement l'apport positif du sable corrigé sur la résistance du mortier équivalent, cette influence positive de ce sable est aussi confirmé dans le temps : il donne les meilleurs résultats à 7j, 28j et 90j.

III.1.2.1/ Résistance à la compression

La figure III.3 montre les résultats de la résistance à la compression à différents âges pour chaque MAP, on remarque que la résistance à la compression augmente toujours avec le temps (à travers les trois âges étudies) due à la continuité de la réaction d'hydratation thermique du ciment grâce à la disponibilité d'eau dans le béton (la cure du béton) [13].

A partir de ces résultats, on peut noter que les résistances les plus élevées sont obtenues dans le MAP1 formulés avec du sable corrigé grâce à la présence des gros particules calcaire de concassage, Benchaa [86] a trouvé que l'utilisation des sables mélanges calcaires et siliceux a un effet positif sur l'amélioration des résistances mécaniques des mortiers. Aussi le MAP2 confectionné à base du sable moyen de Boughezoul Mf=2,20 donne des bonnes résistances à la compression et cela était dû à la rugosité du sable [13]. Les faibles résistances sont constaté dans le MAP3 confectionné à base du sable de Bayazid Mf=1,80.

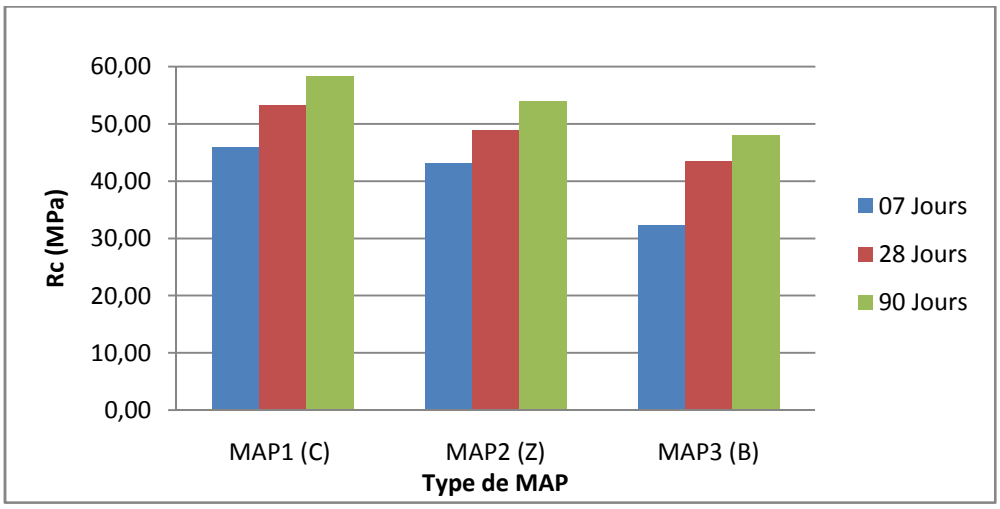


Figure III.3 : Résistances à la compression des mortiers étudiés.

III.1.2.2/ Résistance à la traction par flexion

Les résultats de la résistance à la traction des differents MAP réalisés à différents âges sont illustrés dans la figure III.4.

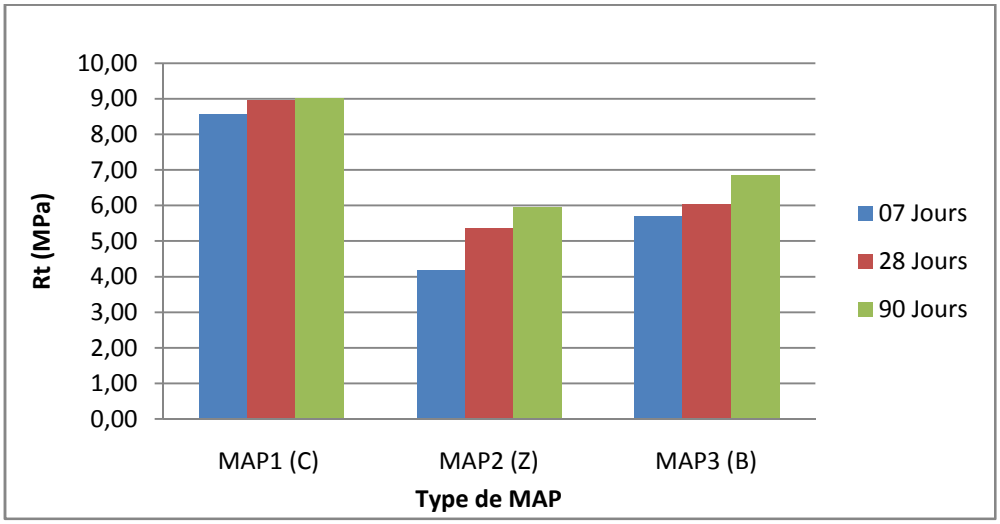


Figure III.4 : Résistances à la traction des mortiers étudiés.

A partir des résultats, on peut dire que pour les mortiers de sable mélange calcaire et siliceux, on remarque des résistances importantes en comparaison avec les mortiers confectionnés avec des sable siliceux. La résistance à la traction la plus élevée est obtenu par le MAP1 formulés avec du sable corrigé avec une faible augmentation a travers les trois ages, puis par le MAP3 formulés a base du sable de Bayazid et dernierement le MAP2 formulés à base du sable de Boughezoul.

Le sable corrigé contient un pourcentage important du sable roulé fin (sable de Hassi Bahbah Mf=1.00), ce qui donne au MAP1 une bonne adherence grace à la surface de contacte importante entres les particules du sable et la pate du ciment(augmentation de la surface spécifique des particules des sables) d'une part, et d'autre part, grace à la forme concassé du sable qui contient

qui donne au mortier aussi une bonne adherence, donc on obtient une bonne résistance à la traction. La meme interpretation a constaté pour le MAP3 à base du sable de Bayazid fin moyen Mf=1.80 et ensuite le MAP2 à base du sable moyen de Boughezoul Mf=2.20.

III.2/ Essais relatifs au Béton

Rappel de nomenclature

- *Famille 01* : BAP à base du sable corrigé **(C)** : CB1, CH1, CK1, CZ1 et CM1 ;

- *Famille 02* : BAP à base du sable Boughezoul **(Z)** : ZB2, ZH2, ZK2, ZZ2 et ZM2 ;

- *Famille 03* : BAP à base du sable Bayazid **(B)** : BB3, BH3, BK3, BZ3 et BM3.

Avec : **(B)** gravier de Bouaichoune, **(H)** gravier de Hamdania, **(K)** gravier de Kaf El Assel, **(Z)** gravier de Boughezoul et **(M)** gravier de Mont Guorno.

III.2.1/ à l'état frais

Le tableau III.3 présente les différents essais effectués à l'état frais pour la caractérisation des bétons étudiés :

Tableau III.3 : Essais rhéologiques et d'ouvrabilité des BAP.

Type d'essai	Grandeurs mesurées
Étalement au Cône d'Abrams	-Diamètre moyen final atteint par la galette : $\mathbf{D_{moy}}$ **(mm).** - Temps mis pour atteindre une galette d'étalement de 50 cm de diamètre :$\mathbf{T_{50}}$ **(sec).**
Entonnoir en V (V-funnel)	- Temps d'écoulement $\mathbf{T_{VF}}$ **(sec)** entre le moment où on libère la trappe et le moment où on voit le jour à travers la trappe depuis la partie supérieure de l'entonnoir.
Boîte en L (L-Box)	-Le taux de remplissage: Rapport H2/H1 : 0,80 – 1,00
Etalement à la Couronne J (J-Ring test)	-Diamètre moyen final atteint par la galette : $\mathbf{S_J}$ **(mm).** - Temps d'Ecoulement $\mathbf{T_{50J}}$ **(sec).** - La différence de hauteur du BAP entre l'intérieur et l'extérieur du J-ring : $\mathbf{B_J}$ **(mm).**
Stabilité au tamis	-Pourcentage de laitance $\boldsymbol{\pi}$ **(%).**

Les résultats de chaque essai sont présentés dans le tableau III.4 :

Tableau III.4 : Résultats obtenus sur les BAP étudiés à l'état frais.

		Etalement		V-Funel	L-Box	J-Ring			Ségrégation
% S_p	BAP	D (mm)	T_{50} (s)	$T_{V\text{-}Funel}$ (s)	H2/H1 %	T_{50J} (s)	S_J (mm)	B_J (mm)	π (%)
1	CB1	685	1,32	3,05	85,11	2,70	578,00	10,25	4,15
1	CH1	701	1,30	3,10	84,13	2,35	663,50	13,55	4,01
1	CK1	755	1,10	2,55	95,88	1,57	688,75	8,85	7,32
1	CZ1	670	1,38	2,75	80,48	1,62	562,50	13,44	4,94
1	CM1	615	1,62	3,20	66,54	3,98	524,65	18,65	2,79
1,4	ZB2	663	1,11	2,62	80,91	2,02	569,00	14,00	3,94
1,4	ZH2	660	1,15	3,05	79,55	1,97	561,80	14,50	2,43
1,4	ZK2	694	1,08	2,81	81,82	1,69	602,50	12,50	6,11
1,4	ZZ2	683	1,10	2,18	79,05	1,43	595,00	12,75	7,75
1,4	ZM2	630	1,42	2,81	71,17	3,75	577,50	20,00	3,44
1	BB3	712	0,85	2,14	88,78	2,24	630,00	11,00	8,04
1	BH3	663	1,22	2,45	82,00	1,52	586,35	12,75	4,54
1	BK3	729	0,82	2,39	89,00	0,97	671,00	9,50	7,17
1	BZ3	730	0,59	2,09	90,82	1,04	668,00	11,00	8,49
1	BM3	625	1,31	2,51	68,70	3,10	568,55	18,75	2,24

III.2.1.1/ Essais d'étalement au cône d'Abrams et T_{50}

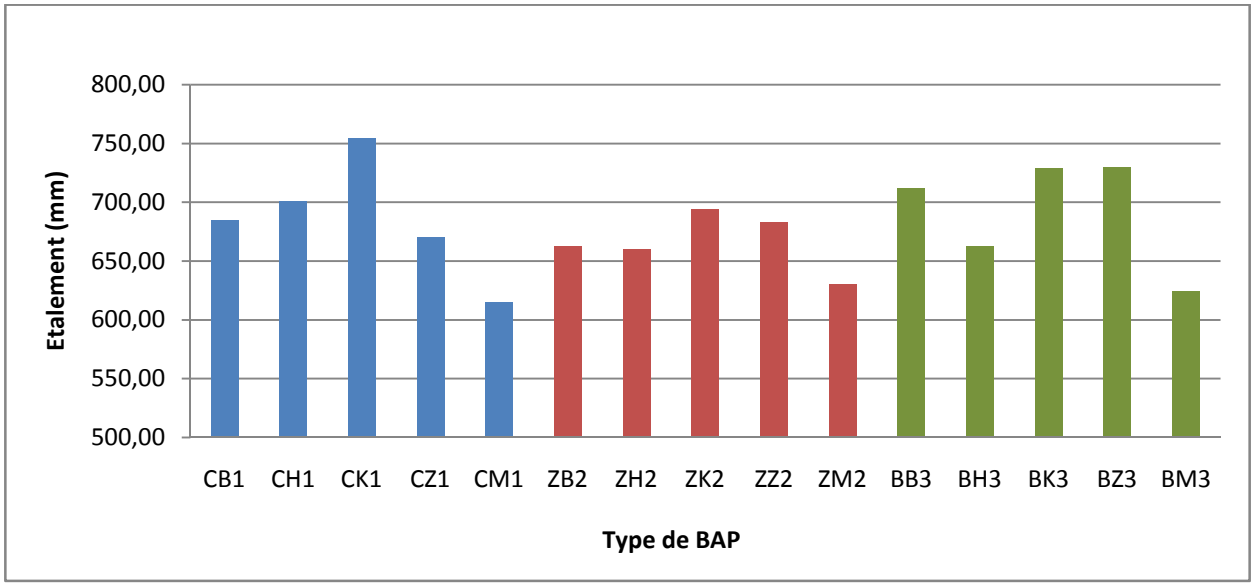


Figure III.5 : Résultats d'étalement au cône d'Abrams des différents BAP réalisés.

Les résultats d'étalement et temps d'écoulement T_{50} pour les différents mélanges du BAP sont traduits en histogrammes de la figure III.5 et III.6 respectivement.

Il faut rappeler qu'un béton qui forme une galette d'un diamètre compris entre 550 et 850 mm à l'essai d'étalement est considéré comme un béton autoplaçant selon les recommandations d'EFNARC [47]. D'après la Figure III.5, on constate que tous les BAP ont des valeurs d'étalement comprises entre 615 mm et 755 mm (inclus dans la fourchette cité ci-avant), et par conséquent sont situées à l'intérieur du domaine des BAP classe SF2 (660 à 750 mm) définie par les recommandations de l'AFGC [9] qui sont caractérisé par une bonne déformabilité sauf les mélanges du BAP confectionnés à base du gravier de Mont Guorno présentent des valeurs d'étalement moins de 660 mm et plus que le minimum 600 mm et ceci peut être justifié par leur forme plate.

Aarre et Domone [63] proposent un étalement entre 650 mm et 700 mm pour obtenir un bon béton Autoplaçant.

On note que les valeurs d'étalement pour les mélanges du BAP de la famille 03 (confectionnés à base du sable Bayazid Mf=1.80) notamment BB3, BK3 et BZ3, ont dépassées 700 mm, c'est un sable roulé qui assure l'écoulement et la fluidité du BAP [85], Miyazawa et al [87] ont remarqué que la fluidité et la résistance à la ségrégation augmentent avec la diminution de la taille des particules.

A l'exception du CK1 confectionnés à base du sable corrigé (Famille 01) Mf=2.20 qui donne le meilleur étalement dépasse 755 mm. Benchaa [86] a trouvé une augmentation de l'étalement dans les BAP avec le mélange sable de concassage + sable alluvionnaire.

Gristsada et Natt [89] ont utilisé un sable calcaire pour améliorer les propriétés des bétons autoplaçants. Ils ont remarqué une augmentation de l'étalement avec l'augmentation de dosage en sable calcaire. Un taux de substitution de 60% a donné les meilleurs étalements des bétons testés.

Pour les BAP de la famille 02 on observe des valeurs d'étalement moyennes du au taux d'absorption d'eau important du sable de Boughezoul.

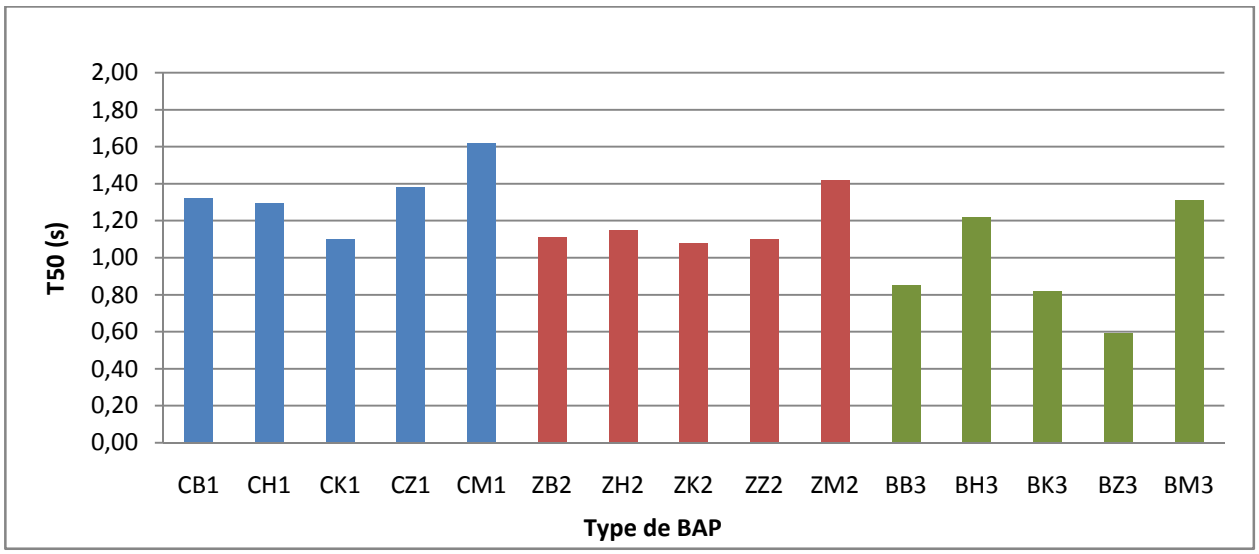


Figure III.6 : Résultats du T_{50} des différents BAP réalisés.

Le deuxième paramètre saisi à travers l'essai de l'étalement au cône d'Abrams, T_{50} c'est le temps nécessaire pour atteindre un diamètre de 50 cm.

La figure III.6 montre les résultats du temps d'écoulement T_{50}. Nous remarquons que les valeurs de T_{50} sont plus basses que celles proposées par Aarre et Domone [63] (2 à 4 sec), Benchaa [86] aussi trouver la même chose. Ceci peut être expliqué par la viscosité élevée des mélanges et les valeurs d'étalement élevées (Figure III.5).

Les valeurs du T_{50} les plus bas sont trouvés dans les mélanges du BAP de la famille 03 confectionnés à base du sable Bayazid Mf=1.80 (notamment BB3, BK3 et BZ3) et ceci peut être justifié par leurs étalements qui dépasses 700 mm, c'est un sable roulé qui donne une bonne fluidité au mélange du BAP [85]. Nous remarquons ici que les valeurs les plus élevées de T_{50} sont celles obtenues par les mélanges du BAP confectionné à base du gravier de Mont Guorno.

Les mélanges du BAP de la famille 01 confectionnés à base du sable corrigé Mf=2.20 donnent des temps d'écoulement T_{50} proche à la fourchette proposées par Aarre et Domone [63] (2 à 4 sec), Le mélange CK1 donne une valeur de T_{50} de 1.08 sec.

Omar et al. [88] ont étudié l'influence de substitution de sable concassé avec différents pourcentage de 25%, 50% et 75% sur les propriétés des bétons. Ils ont remarqué que l'utilisation du sable concassé comme granulats fins améliore l'étalement du béton et ceci grâce l'existence de fines.

Les deux figures ci-dessus nous permettent de conclure que le mélange CK1 est optimal du point de vue ouvrabilité.

III.2.1.2/ Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

En plus de l'essai étalement au cône d'Abrams, l'essai à l'Entonnoir en V (V-Funnel test) a été également réalisé pour évaluer la fluidité et la stabilité du BAP, c'est un autre essai qui indique la capacité de remplissage du BAP.

Les résultats de la variation du temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir (V-Funnel) pour les différents mélanges du BAP sont représentés sur la figure III.7.

Les valeurs les plus bas de $T_{V\text{-}Funnel}$ sont celles obtenues par les mélanges du BAP de la famille 03 confectionnée à base du sable Bayazid avec des valeurs plus hauts pour les BAP de la famille 01 à base de sable corrigé et les BAP de la famille 02 de Boughezoul. Domone [64] propose des valeurs entre 2 et 10 secondes, ce qui nous permettre de dire que tous les mélanges du BAP présentent des bons résultats avec des temps d'écoulement $T_{V\text{-}Funnel}$ varient entre 2.09s et 3.20s. Le temps d'écoulement $T_{V\text{-}Funnel}$ le plus bas est obtenu par le mélange BZ3 (2,09).

Sonebi et Bartos [65], ont pu obtenir un temps T_{50} inférieur à 2 secondes avec un mélange de BAP contenant environ 40% de pâte en plus par rapport à un béton ordinaire.

Gristsada et Natt [89] ont étudié les propriétés des bétons autoplaçants avec sable calcaire. Ils ont remarqué que le temps d'écoulement augmente avec l'augmentation de la teneur en sable calcaire. Ceci est expliqué par l'augmentation de la compacité du mélange et par conséquent l'augmentation de la viscosité.

Le mélange CK1 présente un temps d'écoulement $T_{V\text{-}Funnel}$ (2,55).

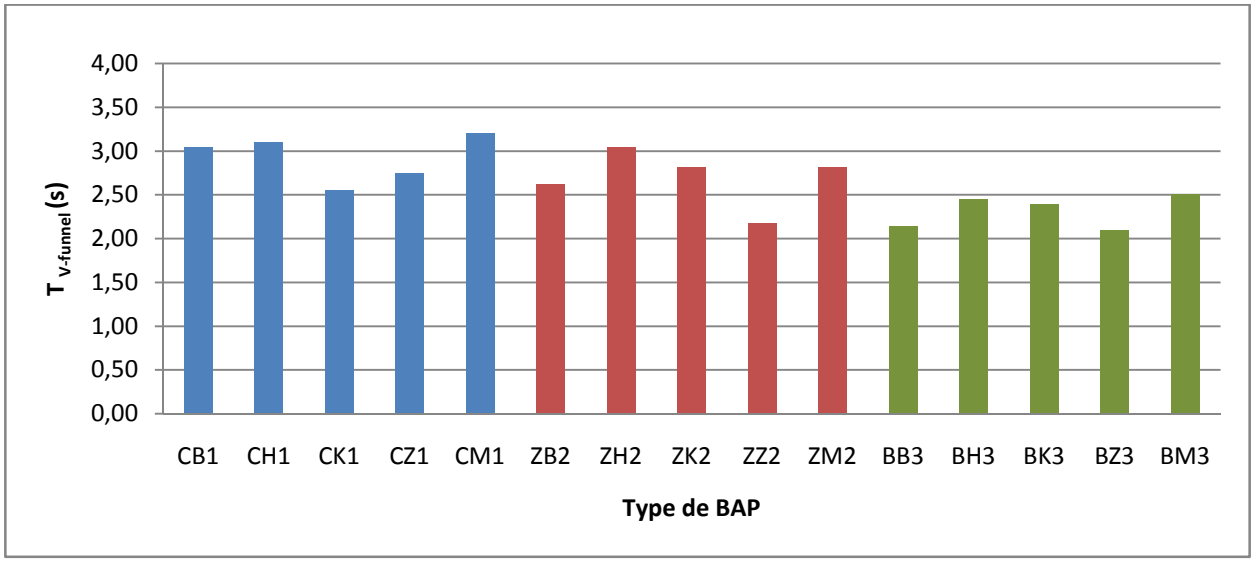


Figure III.7 : Temps d'écoulement $T_{V\text{-}Funnel}$ (V-Funnel test) des différents BAP réalisés.

III.2.1.3/ Essai à la couronne J (J-Ring test)

L'essai J-Ring est facile à utiliser et fournit une bonne mesure de la perte d'ouvrabilité en présence d'obstacles. Pour cela Daczko [66] recommande de faire la comparaison entre les mesures d'étalement sans et en présence du J-Ring. Ajouté à cela, nous avons jugé utile d'étendre cette comparaison au temps d'écoulement T_{50}. D'après l'EFNARC [47], la différence entre les étalements obtenus (avec et sans J-Ring) ne doit pas être supérieure à 50 mm.

Etalement S_J

Les résultats d'étalement $S_{J\text{-Ring}}$ pour les différents mélanges du BAP sont traduits en histogrammes de la figure III.8, les BAP de la famille 01 confectionné à base du sable corrigé présentent des valeurs importantes d'étalement $S_{J\text{-Ring}}$ notamment pour le CH1 et le CK1 qui donne la valeur maximale (688mm), Benchaa [86] a remarqué une augmentation de l'étalement de J-Ring dans les BAP avec le sable mélange : sable de concassage + sable alluvionnaire. Nanthagopalan et Santhanam [90] ont étudié les propriétés à l'état frais du BAP préparé avec un sable concassé. Ils ont remarqué que l'étalement du BAP augmente avec l'utilisation du sable concassé en comparaison avec un BAP fabriqué avec un sable naturel.

Les BAP de la famille 02 présentent un faible étalement $S_{J\text{-Ring}}$ par contre les BAP de la famille 03 donnent des valeurs plus élevées.

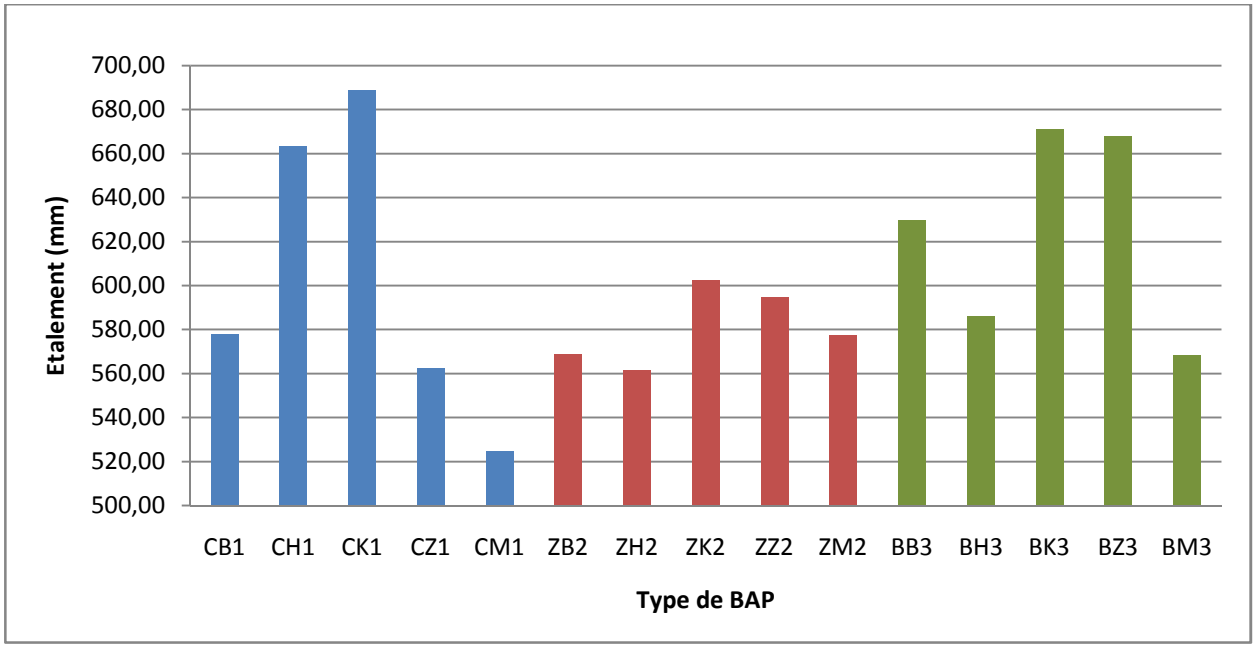


Figure III.8 : Résultats d'étalement $S_{J\text{-Ring}}$ des différents BAP réalisés.

La figure III.9 montre la variation de l'étalement sans et avec le J-Ring pour les différents mélanges du BAP, on remarque la nette différence des valeurs d'étalement des mélanges entre l'absence et la présence du J-Ring pour tous les mélanges avec la même allure, cette différence est interprétée par le blocage au moyen des obstacles crées par le J-Ring dont le taux de réduction de l'étalement est évalué d'une moyenne de 11%. La ségrégation est présente et visible par le blocage des gros granulats à l'intérieur de l'anneau (J-Ring) ainsi que par des valeurs minimales de l'étalement S_J (moins de 580 mm) pour les mélanges des BAP confectionnés à base du gravier Mont Guorno.

La différence entre les étalements avec et sans J-Ring est de l'ordre de 50 mm [47] pour les BAP de la famille 03, cette différence est importante pour les BAP de la famille 02 (presque 100 mm) et variable pour les BAP de la famille 01.

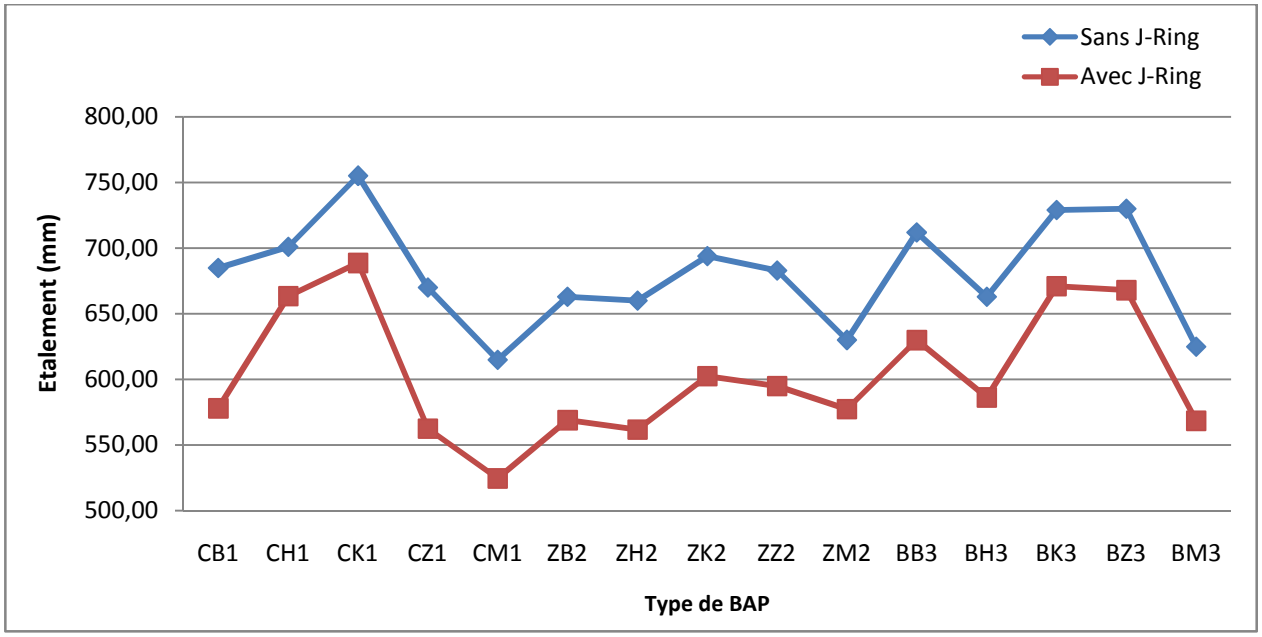


Figure III.9 : Variation de l'étalement sans et avec le J-Ring des différents BAP réalisés.

Temps d'Ecoulement T_{50J}

Les résultats du temps d'écoulement $T_{50J\text{-}Ring}$ pour les différents mélanges du BAP sont traduits en histogrammes de la figure III.10.

La figure montre des valeurs de $T_{50J\text{-}Ring}$ proches entres elles (1,00s-2,50s) à l'exception des BAP confectionnés à base du gravier Mont de Guorno qui donnent des valeurs élevés presque 4,00s.

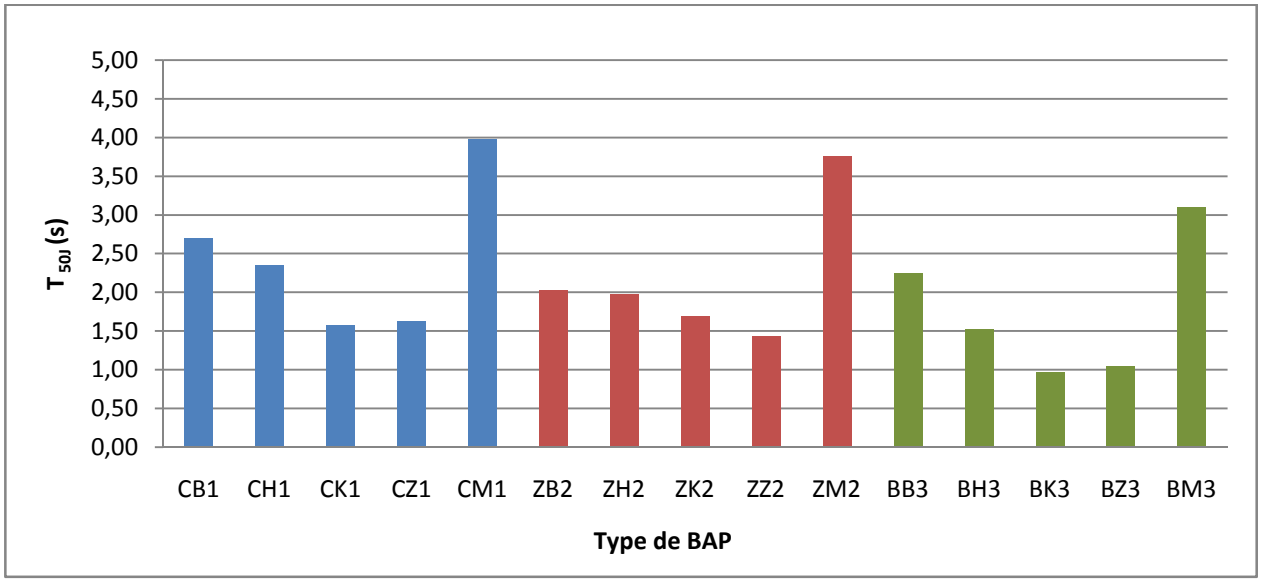


Figure III.10 : Temps d'écoulement $T_{50J\text{-}Ring}$ des différents BAP réalisés.

La figure III.11 montre la variation du temps d'écoulement T_{50}, sans et avec le J-Ring pour les différents mélanges du BAP. Le temps d'écoulement T_{50} en présence du J-Ring accuse un retard acceptable par rapport à celui en l'absence du J-Ring et ceci pour tous les types de BAP, donc la capacité de passage des BAP est acceptable pour toutes les compositions. Ce retard est considérable pour les mélanges des BAP confectionnés à base du gravier Mont de Guorno avec une grande différence entre les deux cas (sans et avec le J-Ring).

D'après ces résultats on peut conclure que, tous les BAP sauf les BAP confectionné à base du gravier de Mont Guorno (représentés par 3 pics sur le graphe de la figure III.11 et ceci est du à la forme plat et élongée), ont une adéquate capacité de passage et une résistance à la ségrégation suffisante dans les zones fortement ferraillées. Gristsada et Natt [89] ont remarqué que le remplacement du sable alluvionnaire par un sable concassé améliore la capacité de passage des bétons autoplaçants.

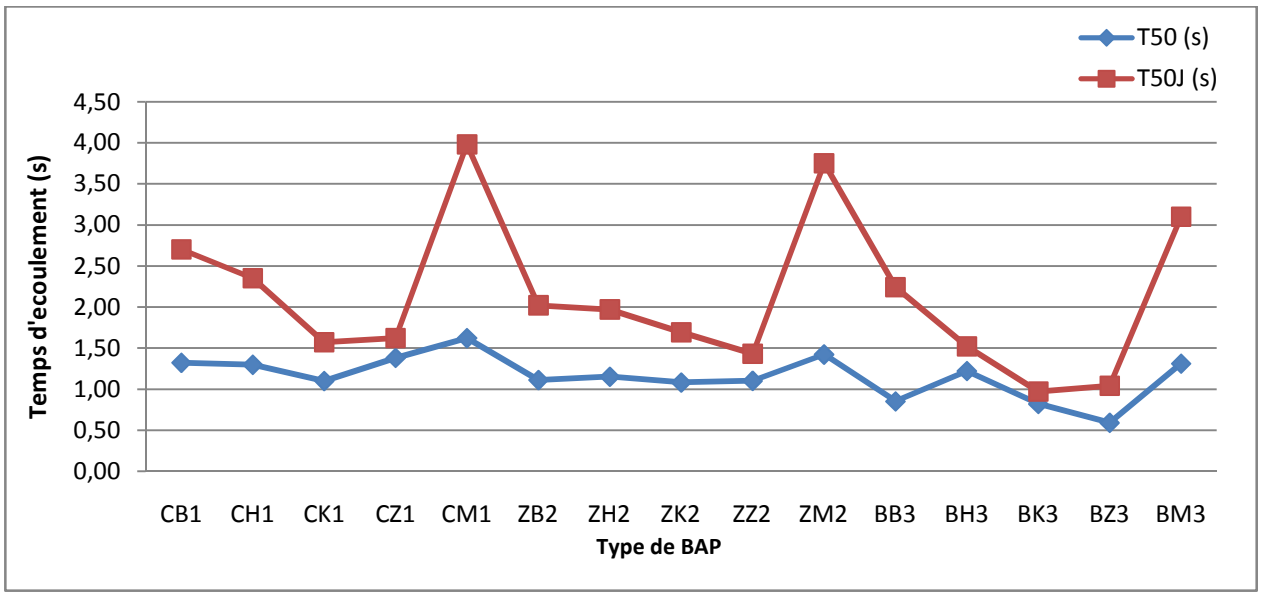


Figure III.11 : Variation du temps d'écoulement T_{50} sans et avec le J-Ring des différents BAP réalisés.

Différence d'hauteurs B_J

La figure III.12 montre les résultats de la différence de hauteurs en présence du J-Ring pour les différents mélanges du BAP. La mesure de la différence de hauteurs se fait uniquement en présence du J-Ring et on compare les hauteurs des mélanges à l'intérieur et à l'extérieur du J-Ring. Cette différence de hauteurs est maximale (plus de 15 mm) pour les mélanges des BAP confectionnés à base du gravier Mont Guorno. Dans la littérature la différence de hauteurs à ne pas dépasser 10 mm [67], cette différence n'a pas dépassé 10 mm pour les mélanges des BAP confectionnés à base du gravier Kaf el assel. Le mélange CK1 présente une différence de hauteurs B_J minimale par rapport aux autres mélanges (8.85 mm).

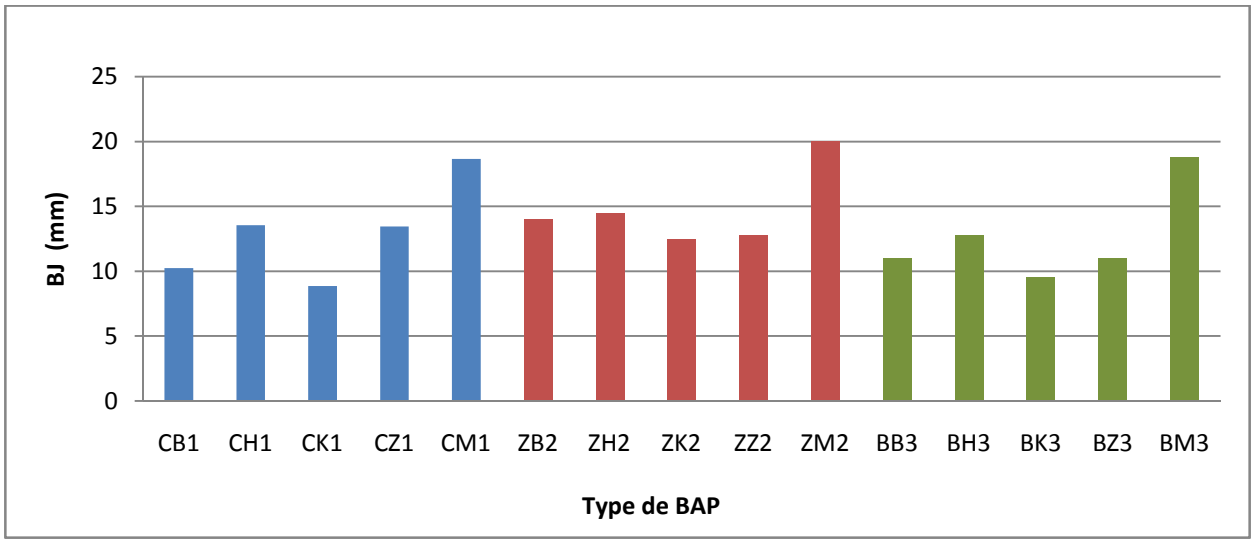


Figure III.12 : Différence de hauteurs $B_{J\text{-}Ring}$ des différents BAP réalisés.

III.2.1.4/ Essai à la boite en L (L-Box test)

L'essai de la boîte en L (L-Box) donne une bonne appréciation de la capacité de remplissage, de passage et de la résistance à la ségrégation. La figure III.13 montre la variation du rapport H2/H1 pour tous les mélanges du BAP, le rapport du blocage est situé entre 66% et 95%, ce rapport dépasse 80% (conformes aux exigences des recommandations de l'AFGC [51] H2/H1> 0.8) pour les mélanges des BAP de la famille 03 confectionnés à base de sable Bayazid et moins de 80% pour les mélanges des BAP confectionnés à base du gravier Mont Guorno.

Une valeur tend vers 100% pour le mélange CK1.

R'mili et Ben Ouezdou [91] ont étudié l'effet de l'incorporation du sable concassé et du sable du désert sur les propriétés des bétons autoplaçants. Les résultats montrent que la capacité de remplissage en boite L, est amélioré lorsque le sable concassé est partiellement remplacé par le sable de désert (dunaire).

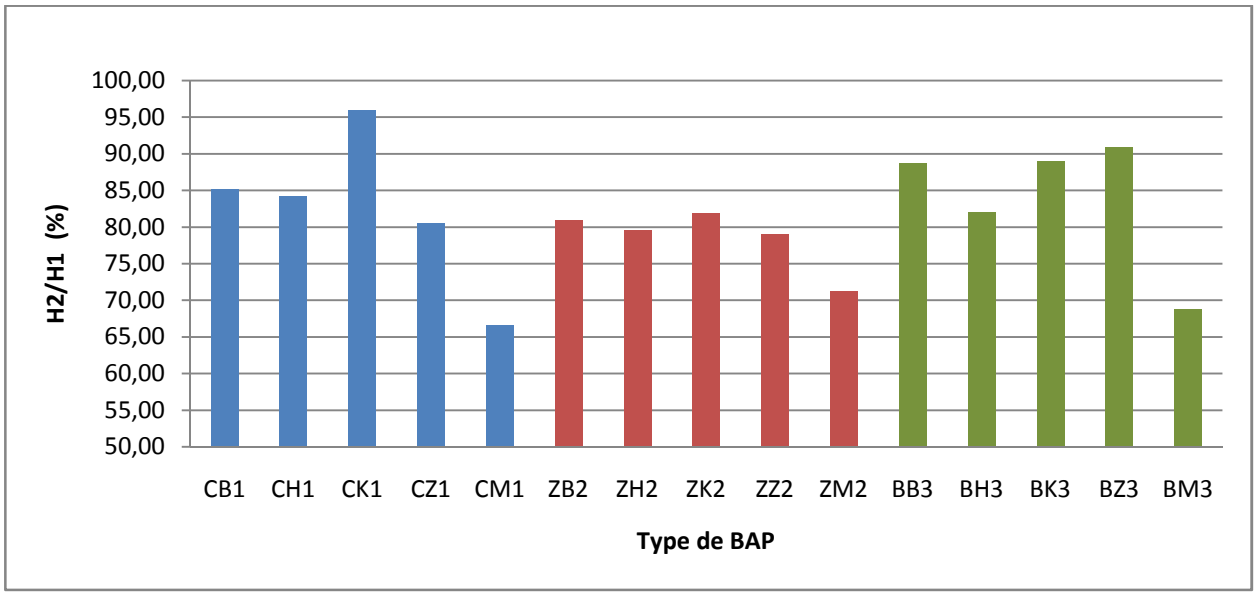


Figure III.13 : Résultats d'essai à la boite en L (L-Box test) des différents BAP réalisés.

Sonebi et Bartos [68] ont trouvé un rapport H_2/H_1 supérieur à 80% sans blocage. Un peu plus tard, Sonebi et al [69] ont démontré que le rapport H_2/H_1 est influencé par trois paramètres, le dosage en eau, le dosage en superplastifiant et la quantité de gros granulats dans le mélange. L'augmentation des deux premiers paramètres mène vers l'augmentation du rapport H_2/H_1 mais l'augmentation du dosage en granulats mène vers une diminution du rapport H_2/H_1 et augmente le risque de blocage des gros granulats derrière les bars d'aciers du L-Box.

III.2.1.5/ Essai de résistance à la ségrégation par tamisage

(Sieve segregation resistance test)

La figure III.14 montre les résultats des pourcentages de laitance passant à travers un tamis de 5 mm pour déterminer le degré de ségrégation des mélanges du BAP étudiés. D'après EUGC [70] une proportion de 5 à 15% de l'échantillon passant à travers le tamis donne une résistance optimale à la ségrégation. D'après cette figure on peut noter que les mélanges des BAP confectionnés à base du gravier Mont Guorno et Hamdania ainsi que les BAP de la famille 01 ont des pourcentages de laitance sous le minimum 5%, par contre, les mélanges des BAP confectionnés à base du gravier Kaf el assel et les BAP de la famille 03 confectionnés à base du sable Bayazid (notamment BB1, BK1 et BZ1) ont des pourcentages de laitance dans l'intervalle recommandé par EUGC.

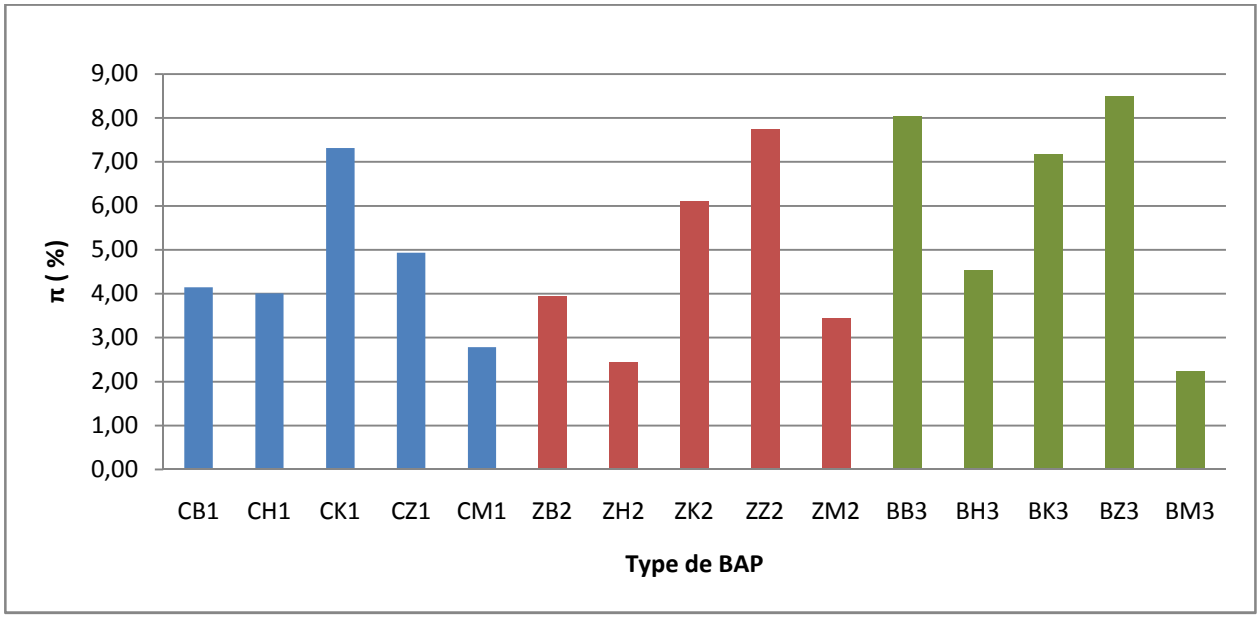


Figure III.14 : Résistance à la ségrégation par tamisage.

Safawi et al. [71] ont montré que le temps d'écoulement au V-Funnel est un outil adapté pour décrire la tendance de la ségrégation. Ainsi pour de très faibles temps d'écoulement (inférieures à 2 secondes) la tendance au béton à ségréguer est très élevée, ce qui implique que les mélanges à faible viscosité sont facilement ségrégués.

III.2.2/ à l'état durci

Les essais relatifs au BAP à l'état durci consistent à la détermination de:

- Résistances mécaniques à la compression et à la traction par flexion ;
- Auscultation sonique (Ultrason) ;
- Module d'élasticité ;
- Taux de retrait et de gonflement ;
- Absorption d'eau par capillarité.

III.2.2.1/ Résistances mécaniques

Les essais pour la détermination des résistances mécaniques sont effectués à l'âge de 7 jours, 28 jours et 90 jours.

Le tableau III.5 donne les résultats des essais de résistances à la compression et à la traction pour les quinze BAP étudiés aux âges 7, 28, et 90 jours.

Tableau III.5 : Résultats des résistances mécaniques des différents BAP réalisés.

	Résistance à la compression (MPa)			Résistance à la Traction (MPa)		
Mélanges	7 J	28 J	90 J	7 J	28 J	90 J
CB1	43,13	50,18	53,71	2.45	2.99	3.23
CH1	47,87	56,26	64,68	2.14	2.60	2.81
CK1	52,61	59,39	68,05	3.64	4.44	4.80
CZ1	46,74	58,48	61,53	2.23	2.71	2.93
CM1	43,92	48,14	59,04	1.82	2.21	2.39
ZB2	43,39	52,14	58,09	3.74	4.56	4.93
ZH2	41,50	50,62	57,56	3.30	4.03	4.35
ZK2	43,86	53,15	62,54	4.10	5.00	5.40
ZZ2	47,15	51,64	58,56	1.63	1.98	2.14
ZM2	40,02	46,87	48,79	1.87	2.28	2.46
BB3	46,11	47,44	59,35	3.09	3.77	4.07
BH3	47,32	51,56	52,37	3.40	4.15	4.48
BK3	50,93	50,65	59.55	4.44	5.42	5.85
BZ3	40,08	49,73	56,01	2.38	2.90	3.14
BM3	47,66	48,85	50,98	2.55	3.11	3.36

III.2.2.1.1/ Résistance à la compression

La résistance des bétons après durcissement dépend du rapport E/C, de la qualité et de nature des granulats, du mode de conservation et de l'échéance d'essai [86].

Les figures III.15, III.16 et III.17 montrent les résultats de la résistance à la compression à différents âges pour chaque famille du BAP. Toujours la résistance à la compression augmente avec le temps (à travers les trois âges étudies) du à la continuité de la réaction d'hydratation thermique du ciment grâce à la disponibilité d'eau dans le béton (la cure du béton) [13].

On peut remarquer que tous les BAP atteint entre 70% et 90% de sa résistance à la compression à 7 jours.

A partir de ces résultats, on peut noter que les résistances les plus élevées sont obtenues par les BAP de la famille 01 confectionné à base du sable corrigé (C), ce qui confirme les résultats obtenus sur les MAP à l'état durci (Tableau III.2) et présente l'influence des sables sur la résistance du béton. Ce sable contient un pourcentage important du sable fin (53%) ce qui donne au béton un bon remplissage des vides entre les grains, donc une bonne compacité du béton, et par conséquence une bonne résistance à la compression.

Dans ce sens, Benchaa [86] a trouvé que les meilleures résistances obtenues à 28 jours sont les résistances des BAP avec le mélange sable de concassage + sable alluvionnaire.

Kothai et Malthy [93] ont réalisé une étude sur l'influence de remplacement du sable naturel par un sable concassé sur la résistance mécanique du béton autoplaçant. Ils ont trouvé qu'un taux de substitution du sable naturel par un sable industriel ou concassé de 30% donne des bonnes résistances mécaniques en termes de compression, traction et flexion.

Le gravier de Kaf El Assel (K) et le sable corrigé (C) donne le meilleur résultat pour le BAP CK1 avec une résistance à la compression qui vaut $\approx$ 60 MPa à 28j.

Les BAP de la famille 03 confectionnés à base de sable de Bayazid présentent les plus faibles résistances à la compression (50.65 MPa) à 28j avec le gravier de Kaf El Assel. Le sable de Bayazid demande une quantité d'eau importante pour atteindre une meilleure consistance et une fluidité élevée (surface spécifique des particules importante par rapport aux autres sables), donc il va consommer une partie d'eau efficace et nécessaire pour la réaction d'hydratation, ce qui influe négativement sur le développement de la résistance mécanique du matériau. Benchaa [86] montre que le sable de dune diminue la résistance à la compression des BAP et cela dû à sa granulométrie fine et sa porosité élevée.

Les BAP de la famille 02 confectionnés à base de sable de Boughezoul présentent des résistances à la compression de l'ordre de (53.15 MPa) à 28j avec le gravier de Kaf El Assel. Le sable de Boughezoul (Mf=2.20) a une rugosité permettre de donner des résultats moyenne de la résistance à la compression.

Les différences de résistance entre bétons formulés avec sable de Boughezoul, Bayazid (siliceux) et sable corrigé (calcaire) peuvent provenir de la différence de compacité des squelettes granulaires, et de la grossesse des grains.

On observe également sur ces figures, pour tous les mélanges du BAP confectionné à base du gravier de Mont Guorno (M) des faibles résistances avec tous les sables.

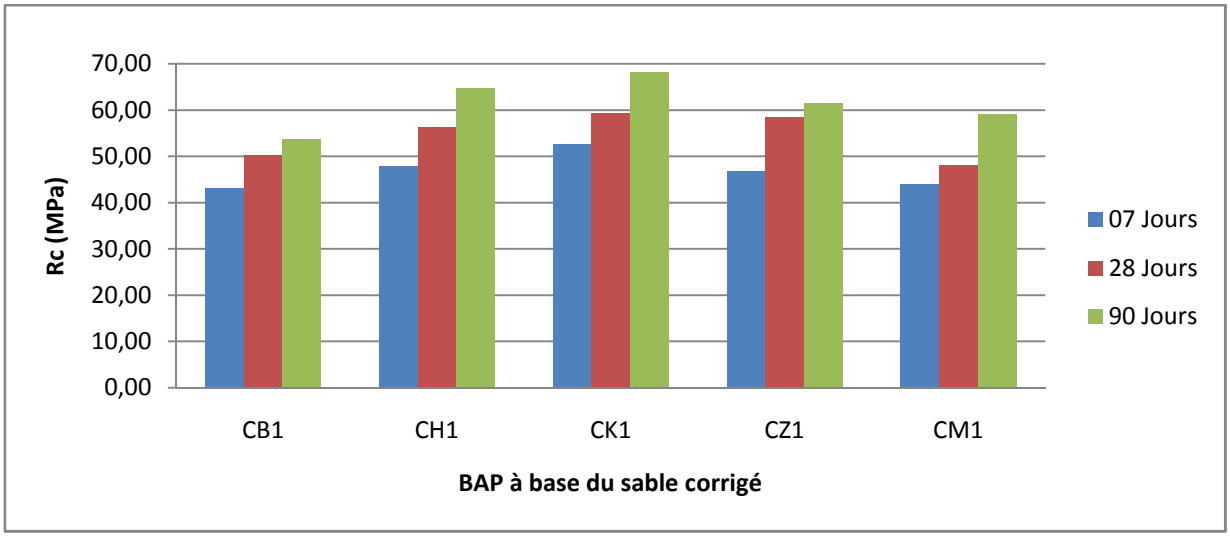


Figure III.15 : Résistance à la compression des BAP de la famille 01.

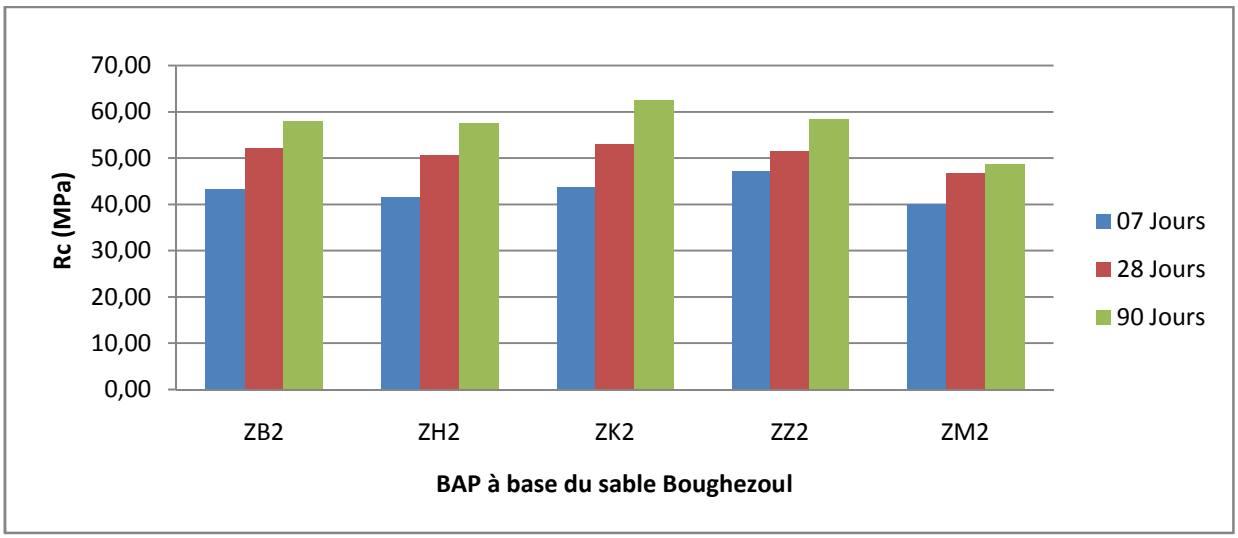


Figure III.16 : Résistance à la compression des BAP de la famille 02.

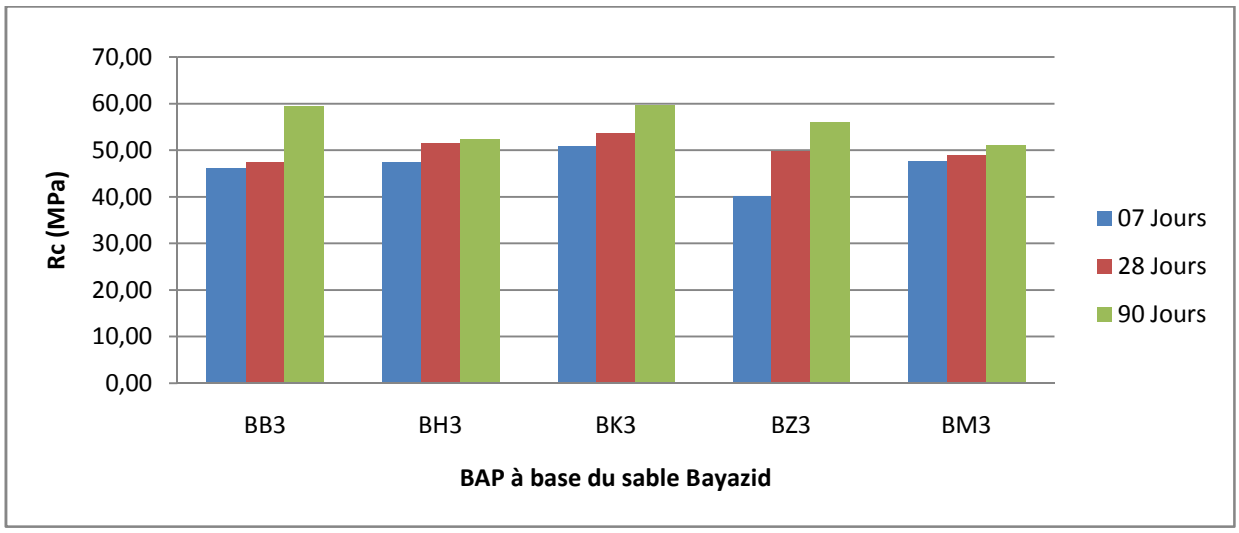


Figure III.17 : Résistance à la compression des BAP de la famille 03.

III.2.2.1.2/ Résistance à la traction par flexion

Les résultats de la résistance à la traction des differents BAP réalisés à différents âges sont illustrés dans les trois figures III.18, III.19 et III.20.

D'après ces figures, on peut noter que les meilleures résistances à la flexion sont obtenues par la famille 03 des BAP (confectionnés à base du sable de Bayazid) c'est un sable roulé et un peu fin Mf=1.80 ce qui donne une bonne adherence entre la pate du ciment et les grains de granulats grace à la surface de contacte importante des particules du sable (surface spécifique), donc on obtient une bonne résistance à la traction, la resistance maximale est obtenue par le melange BK3.

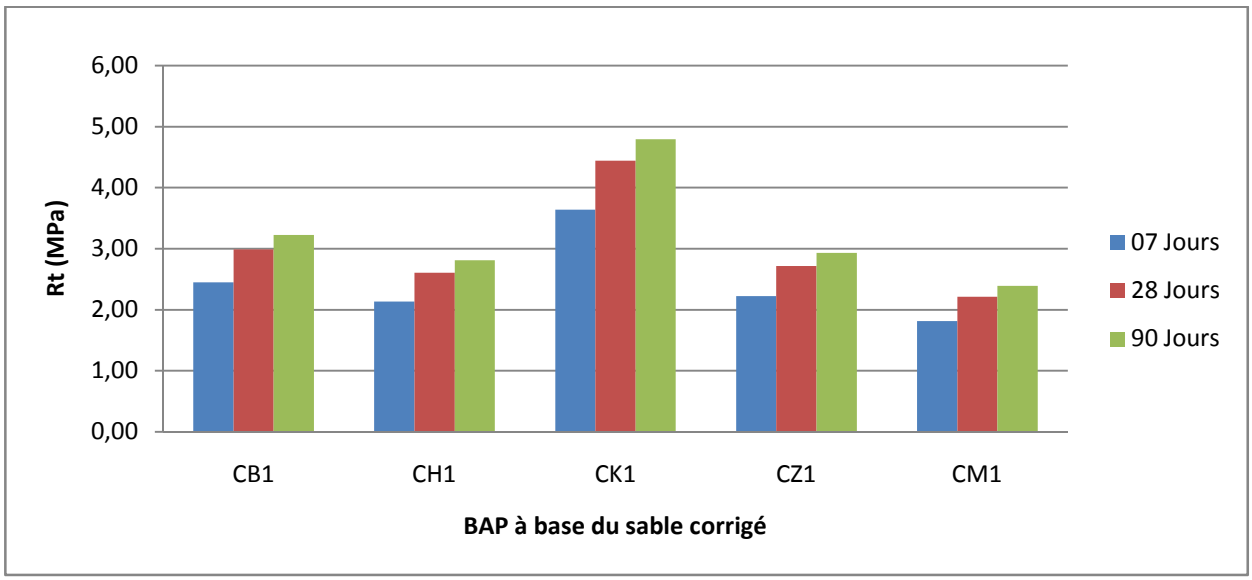


Figure III.18 : Résistance à la Traction des BAP de la famille 01.

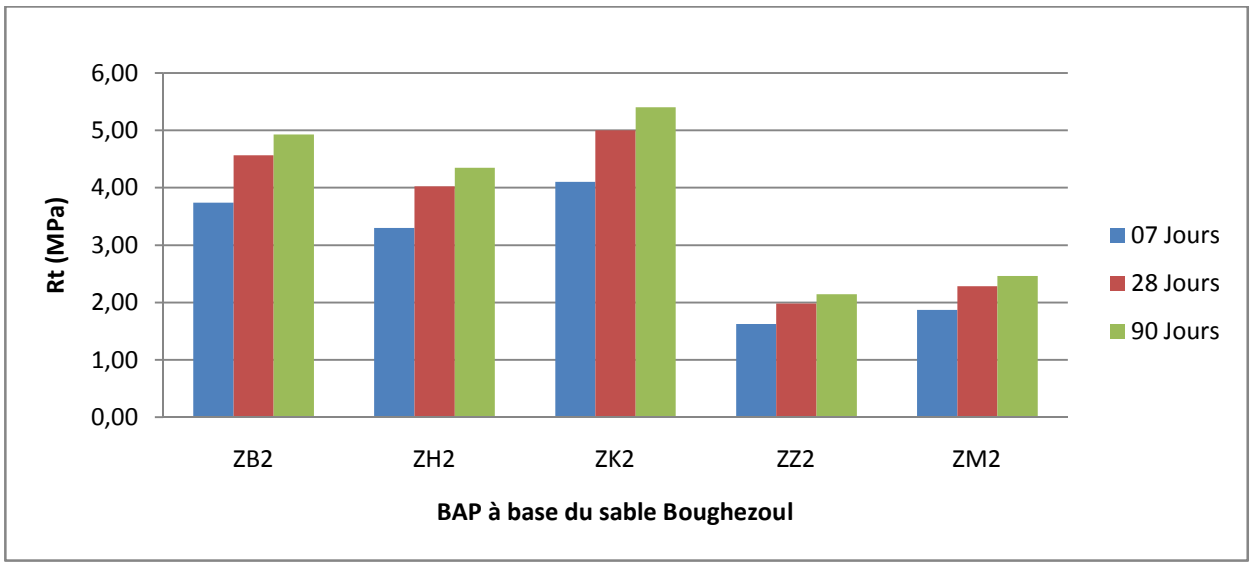


Figure III.19 : Résistance à la Traction des BAP de la famille 02.

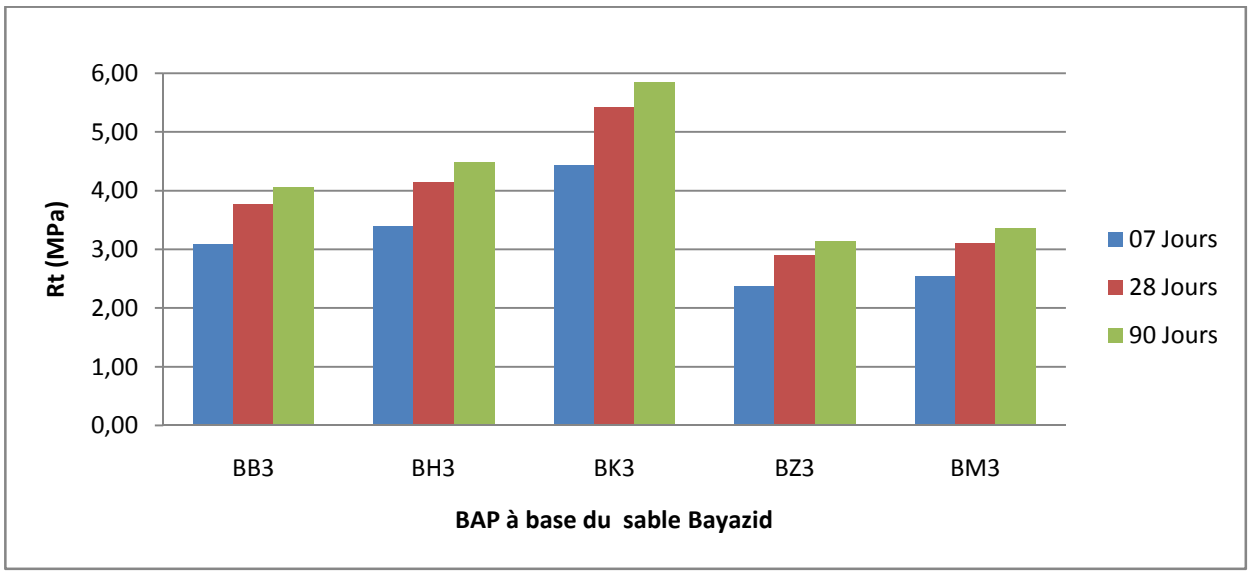


Figure III.20 : Résistance à la Traction des BAP de la famille 03.

Pour les trois familles de BAP, on remarque que le gravier de Kaf El Assel (K) presente les plus grandes valeurs de Résistance à la traction, ceci se justifie par la rugosité significative de la surface de ces particules.

La résistance à la traction des bétons est meilleure pour BK3, ZK2 et ZB2 ceci reflete la bonne adhérence pâte/granulat pour un béton à base de gravier de Kaf El Assel (K) et du sable de Bayazid ou de Boughezoul. Ce type de béton semble très interessant pour les élements structuraux travaillant plus en flexion comme les poutre.

Les BAP à base des gravier de Bouaichoune (B) et Hamdania (H) sont semblables et cela est du au fait qu'ils ont le même état de surface qui est plus lisse que celui des granulats de Kaf El Assel (K).

Felekoglu et al [94] ont montré que les mélanges de BAP présentent des résistances à la traction élevées comparées à celles des bétons traditionnels. Selon Klug et Holschemacher [95], la résistance à la traction des BAP est nettement supérieure à celle des bétons vibrés et peut aller jusqu'à 40% ce qui implique qu'il y a nécessité de revoir la section minimale de ferraillage). Behim et al [96] ont rapporté, à peu près, les mêmes conclusions que celles des resistances à la compression. D'après Domone [43] le rapport entre les résistances à la traction et à la compression pour le BAP est très similaire à celui des bétons ordinaires.

Les betons à base des gravier de Mont Guorno (M) et Boughezoul (Z) ont donnés les valeurs les plus faibles de la résistance à la traction.

III.2.2.2/ Auscultation sonique (Ultrason) [55, 60]

C'est un essai non destructif qui permet d'avoir une idée sur la compacité, l'homogénéité et la porosité du béton, lorsque la vitesse d'onde augmente, on peut dire que le béton est compacte et contient moins de vide [13]. Le Tableau III.6 présente les résultats obtenus pour tous les mélanges du BAP :

Tableau III.6 : Résultats d'auscultation sonique (Ultrason) des différents BAP réalisés.

	Vitesse ultrasonique (m/s)		
Mélanges	7J	28J	90J
CB1	4566,21	4728,13	5000,00
CH1	4535,15	4555,81	4608,29
CK1	4750,59	4807,69	4938,27
CZ1	4597,70	4819,28	4830,92
CM1	4545,45	4618,94	4716,98
ZB2	4587,16	4683,84	4796,16
ZH2	4255,32	4366,81	4651,16
ZK2	4618,94	4796,16	4796,16
ZZ2	4395,60	4662,00	4854,37
ZM2	4338,39	4405,29	4524,89
BB3	4618,94	4705,88	4773,27
BH3	4395,60	4395,60	4494,38
BK3	4705,88	4807,69	4938,27
BZ3	4415,01	4694,84	4728,13
BM3	4405,29	4597,70	4504,50

Les figures III.21, III.22 et III.23 montrent les résultats de la vitesse d'onde traversant l'éprouvette pour chaque famille du BAP à différents âges.

A partir de ces résultats, on peut observer que les BAP de la famille 01 présentent les vitesses ultrasoniques les plus élevées (elles atteignent 5000m/s à 90J) ce qui implique que cette famille du BAP présente une bonne compacité grâce au sable corrigé qui contient un pourcentage important du sable fin (53%) ce qui donne au béton un bon remplissage des vides entre les grains et par conséquence une bonne compacité du béton, ce qui confirme les résultats obtenus sur les résistances à la compression des BAP (Tableau III.5).

Abib [5] a trouvé une augmentation de la vitesse de propagation du son dans un BAP HP de 3.26% par rapport à celle du béton ordinaire (BO) et ceci est dû principalement à la différence de compacité qui existe entre les deux bétons, car les bétons autoplaçants à base de fumée de silice ont une très grande densité.

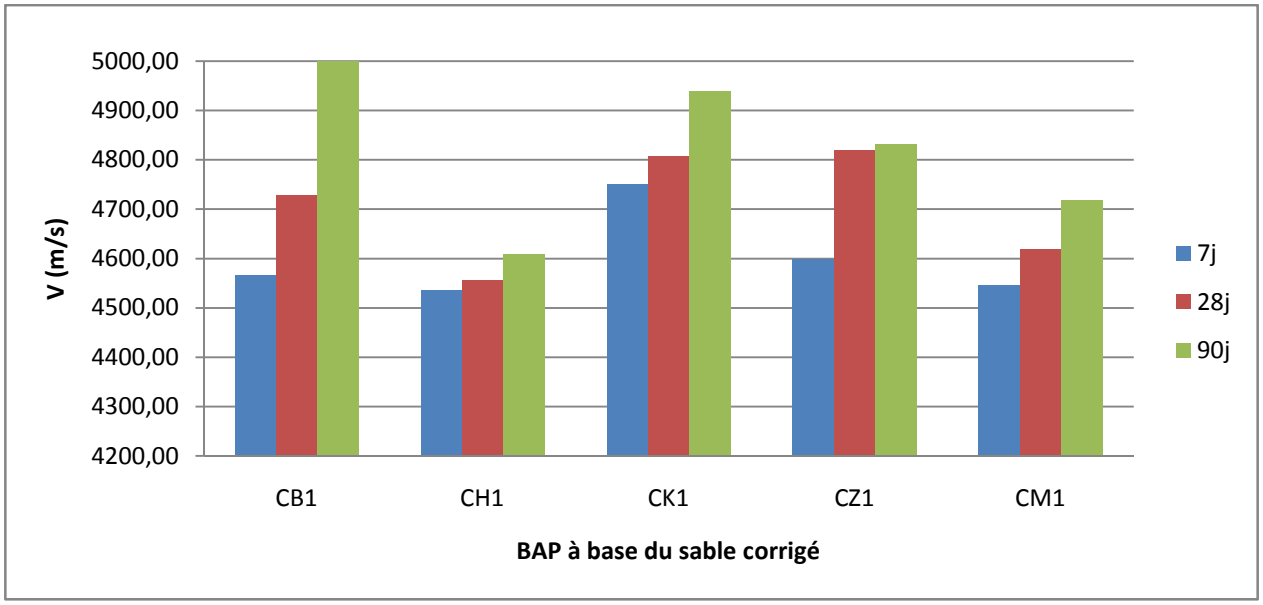


Figure III.21 : Résultats d'auscultation sonique pour les BAP de la famille 01.

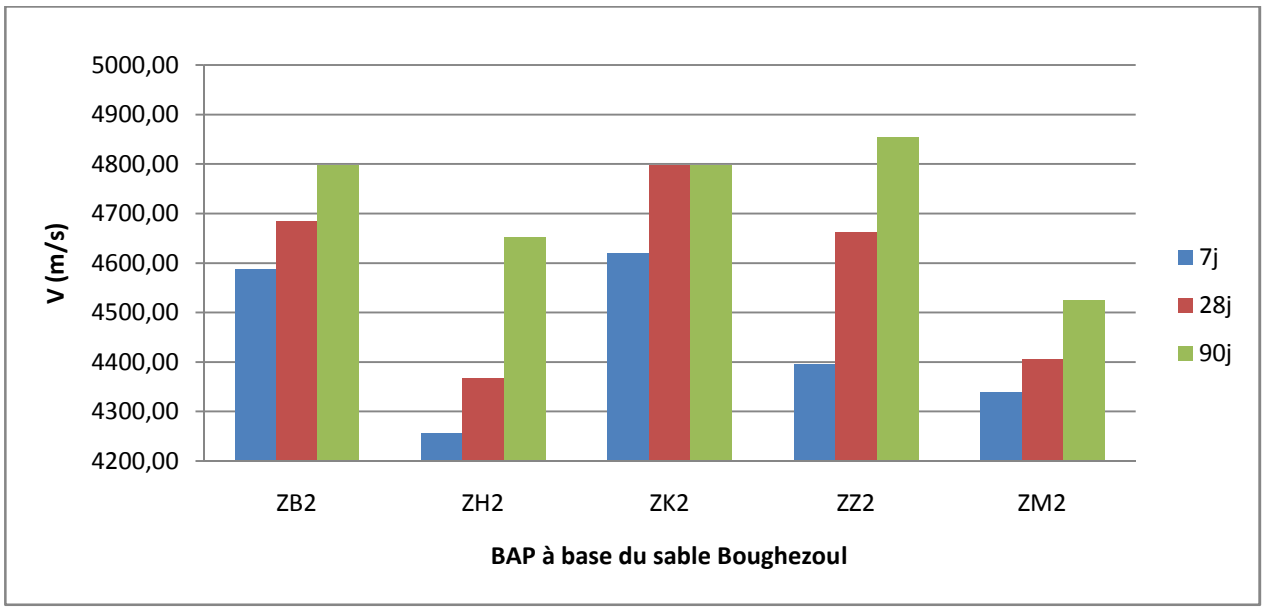


Figure III.22 : Résultats d'auscultation sonique pour les BAP de la famille 02.

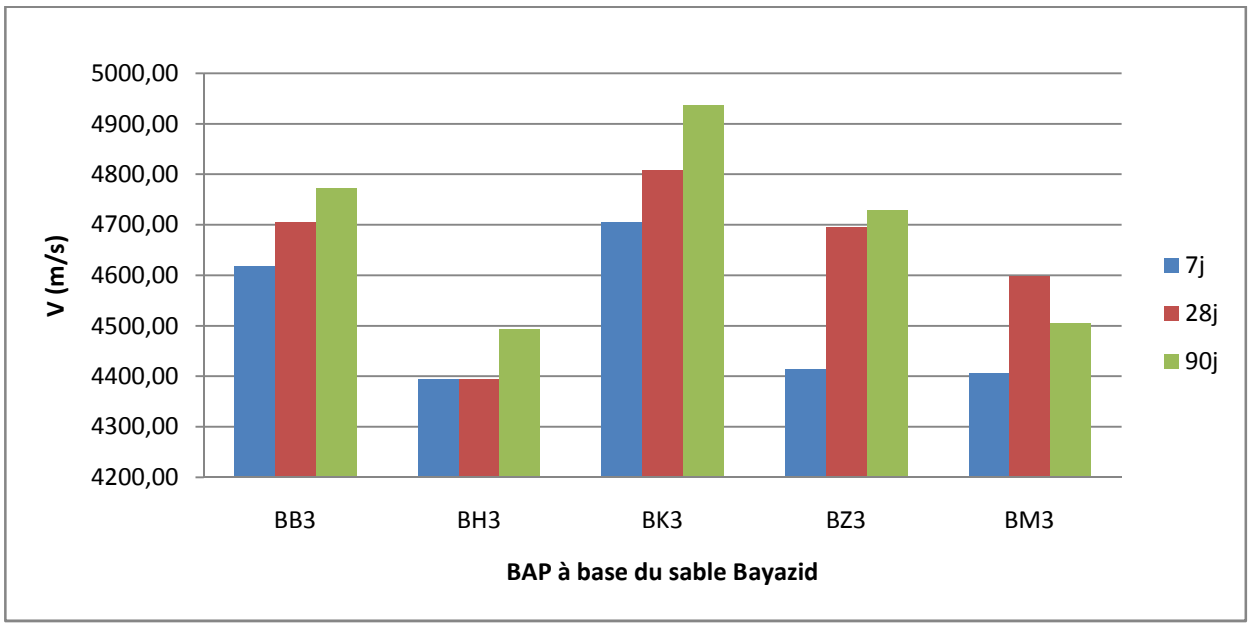


Figure III.23 : Résultats d'auscultation sonique pour les BAP de la famille 03.

Les BAP formulés à base du gravier de Kaf El Assel (K) donnent aussi des bons résultats avec les trois familles, les faibles résultats sont obtenus par les BAP à base du gravier de Mont Guorno (M) et Hamdania (H).

D'après ces résultats on peut dire que l'essai ultrasonique a une signification très importante sur la compacité du béton qui nous permet de prévoir une idée sur la résistance a la compression de ce béton.

III.2.2.3/ Module d'élasticité

Selon la norme ISO 6784, une éprouvette cylindrique de 320x160 mm de dimension a été coulée dans un moule en acier pour chaque mélange de BAP, ces échantillons ont été conservés dans l'eau à 20 ° C (EN 12390-2).

Le tableau suivant résume les résultats obtenus pour les trois familles du BAP :

Tableau III.7 : Résultats de module d'élasticité pour les trois familles du BAP.

BAP à base du sable corrigé -Famille 01-		***BAP à base du sable Boughezoul -Famille 02-***		***BAP à base du sable Bayazid -Famille 03-***	
	E (GPa)		E (GPa)		E (GPa)
CB1	38,61	ZB2	33,93	BB3	27,43
CH1	37,64	ZH2	40,28	BH3	26,54
CK1	40,52	ZK2	25,05	BK3	21,23
CZ1	34,79	ZZ2	40,58	BZ3	29,13
CM1	33,55	ZM2	29,68	BM3	23,67

D'après les résultats présentés dans le tableau III.7 et la figure III.24 on remarque que les BAP ZH2 et ZZ2 donnent les meilleurs résultats (plus de 40 GPa) ainsi que les BAP de la famille 01 formulés à base du sable corrigé (33,55 GPa – 40,52 GPa) et ceci grâce a sa compacité et sa densité qui sont assurées par la minimisation des vides dans le béton par les particules fines de sable de Hassi Bahbah, les faibles résultats sont obtenus par les BAP de la famille 03 formulés à base du sable de Bayazid (21,23 GPa – 29,13 GPa), et ceci est confirmé par les résultats de l'auscultation sonique (Ultrason) présentés sur les figures III.21, III.22 et III.23.

On constate une différence dans les résultats du Module d'élasticité d'ordre de 90% entre la valeur maximale obtenue par le mélange CK1 et la valeur minimale obtenu par le mélange BK3, Abib [5] a trouvé une amélioration de 10.08% du module d'élasticité dynamique d'un BAP HP par rapport à celui d'un béton ordinaire.

Pour tous les types de BAP, on remarque que le mélange CK1 donne les meilleurs résultats.

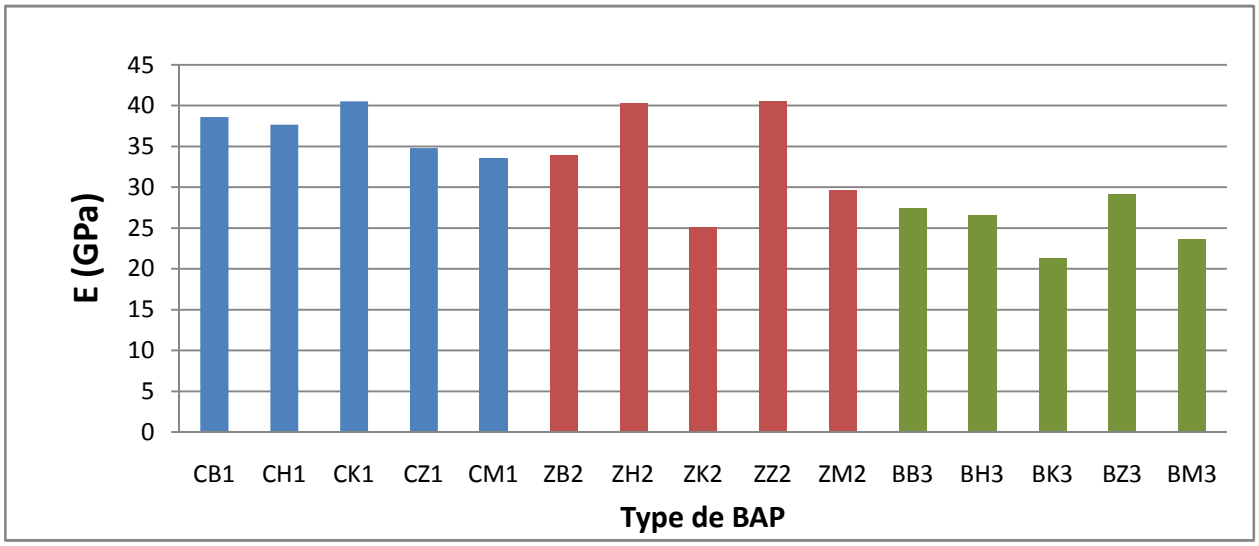


Figure III.24 : Module d'élasticité pour tous les BAP.

III.2.2.4/ Le Retrait

Afin de mieux mettre en évidence l'influence du squelette granulaire, nous avons reporté sur un même repère l'ensemble des résultats de retrait du béton à l'air libre au différent âge. Chaque courbe représente la mesure de chaque type de mélange. Les résultats sont représentés sous différentes formes pour les trois familles de BAP (figures III.25, III.26 et III.27) :

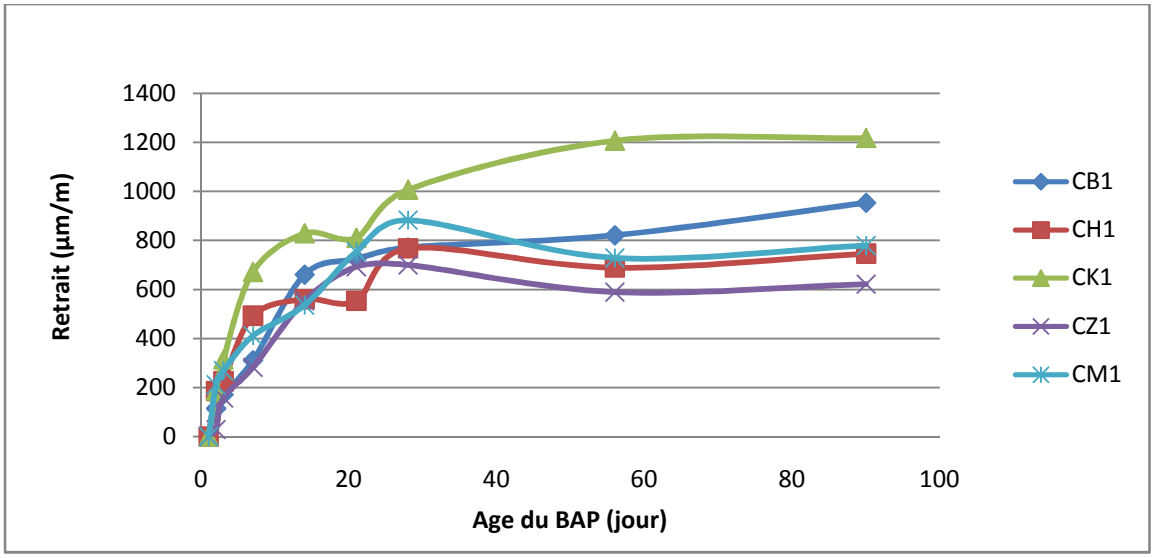


Figure III.25 : Evolution du retrait à l'air libre des BAP de la famille 01.

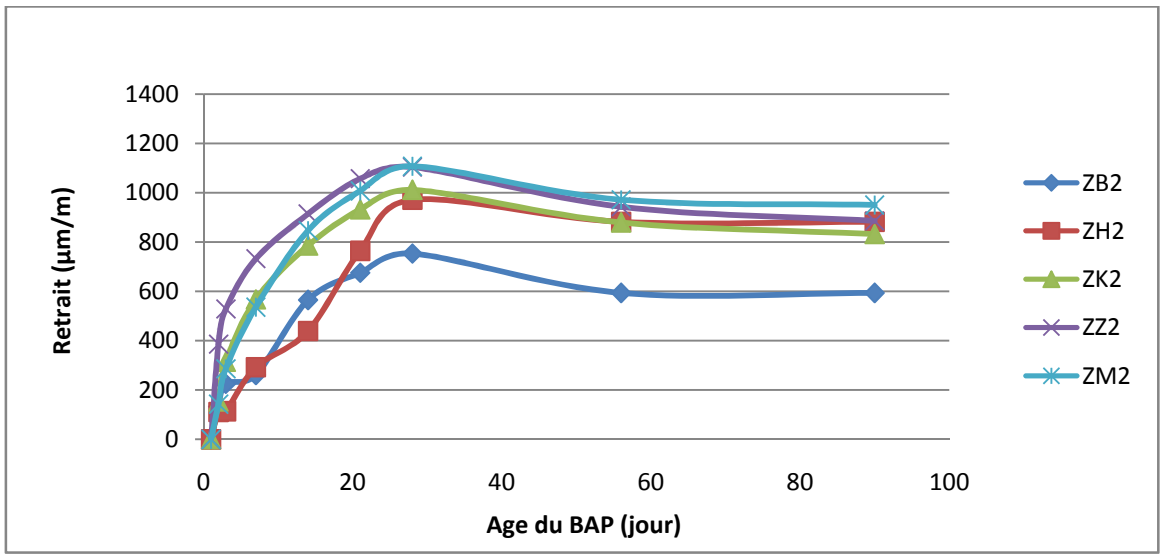


Figure III.26 : Evolution du retrait à l'air libre des BAP de la famille 02.

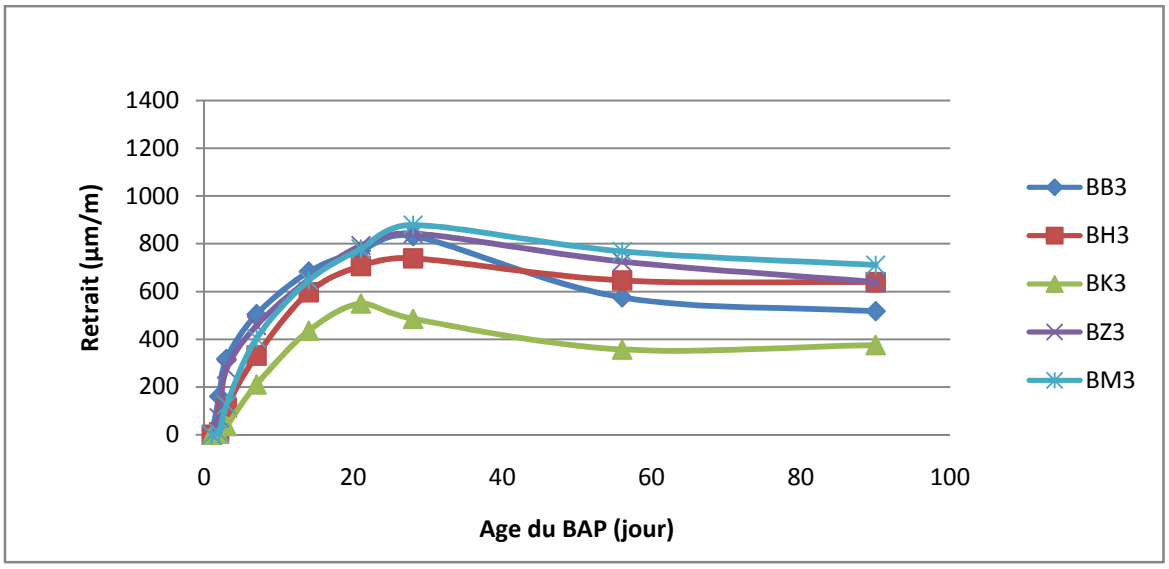


Figure III.27 : Evolution du retrait à l'air libre des BAP de la famille 03.

D'après Les trois figures III.25, III.26 et III.27 on remarque que le gravier de Hamdania (H) donne moins de retrait du béton avec les trois sables, le gravier de Kaf El Assel (K) donne moins de retrait du béton s'il est utilisé avec le sable de Bayazid (B) et le gravier de Bouaichoune (B) donne aussi moins de retrait du béton s'il est utilisé avec le sable de Bayazid (B) et de Boughezoul (Z), Zizine [92] a remarqué que les deux graviers de Hannacha (H) et de Kaf El Assel (K) donne moins de retrait du béton s'ils sont utilisé avec un sable de Boughezoul (G) ou de Baghlia (B).

Ce qui conclut que dans tous les cas c'est le gravier de Hamdania (H) qui donne moins de retrait du BAP et ceci quel que soit le sable.

Par contre, les BAP des familles 01 et 02 confectionnés à base des sables moyen (Corrigé (C) et Boughezoul (Z)) présentent un retrait élevé par rapport aux BAP de la famille 03 à base du sable de Bayazid (B).

Zizine [92] a remarqué que le sable corrigé (C) influe favorablement dans la diminution du retrait des bétons ordinaires, ce qui est inverse dans notre travail (pour les BAP).

D'une autre façon pour bien expliquer le retrait, on présente sur les figures III.28, III.29 et III.30 les résultats de variation massique des éprouvettes de béton durant ce phénomène.

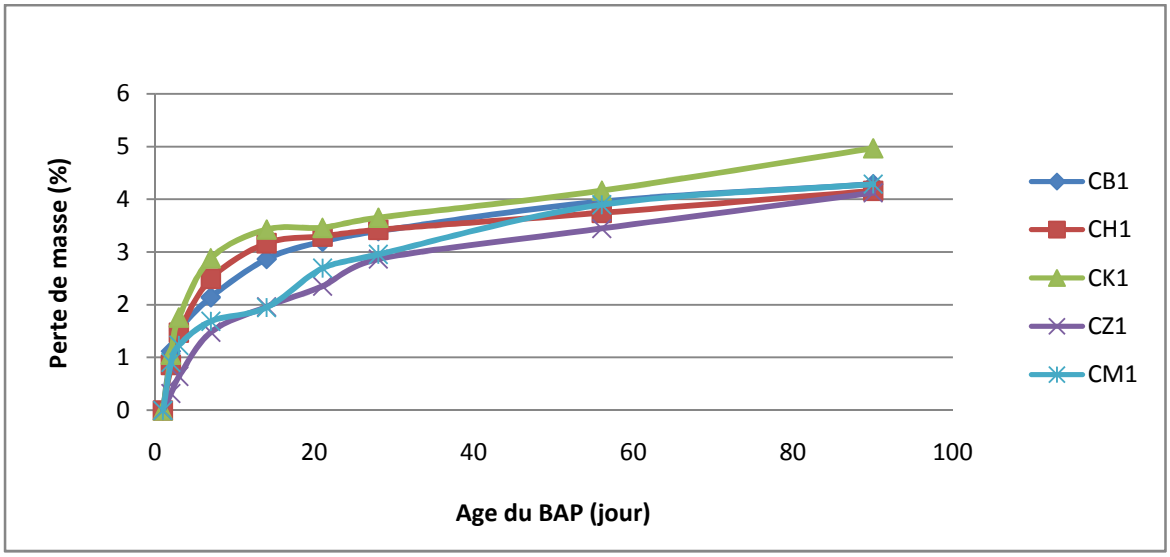


Figure III.28 : Evolution de la perte de masse des BAP de la famille 01.

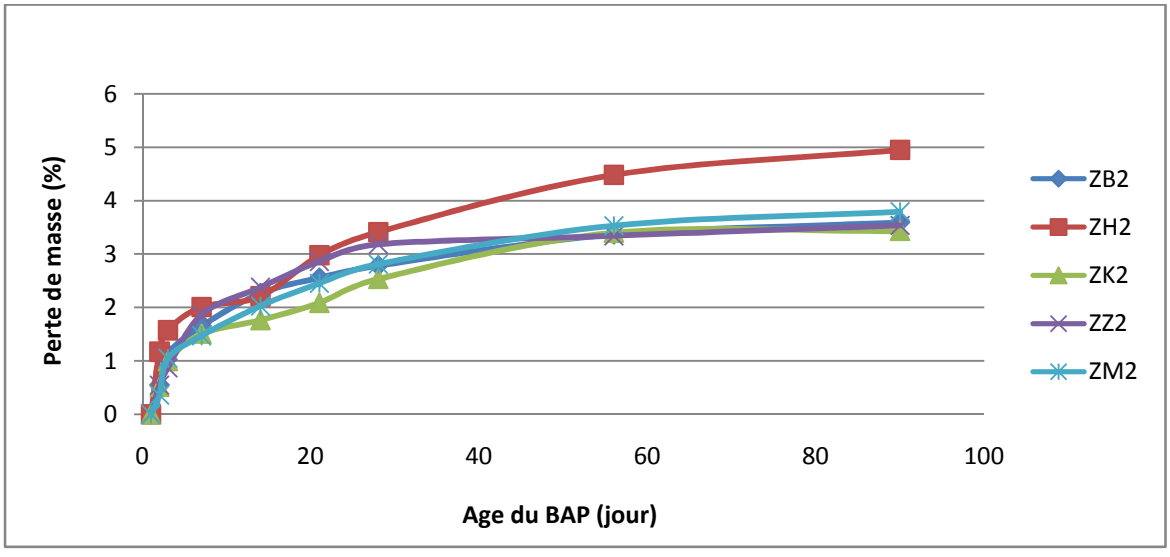


Figure III.29 : Evolution de la perte de masse des BAP de la famille 02.

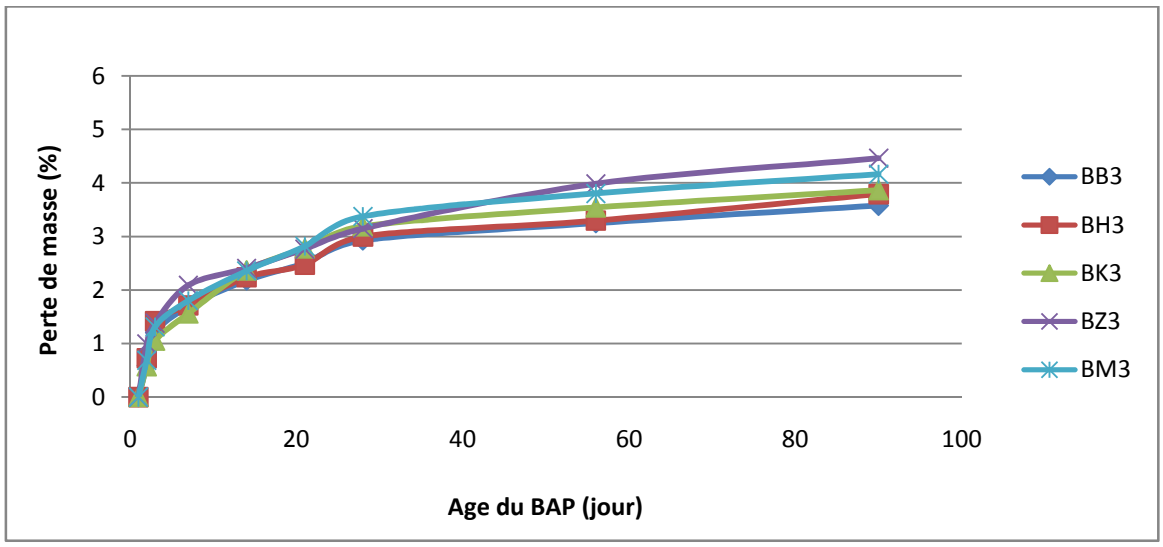


Figure III.30 : Evolution de la perte de masse des BAP de la famille 03.

D'après les figures III.28, III.29 et III.30 on constate qu'il y a une perte en masse d'environ 4% pour tous les BAP sauf les BAP ZH2 et CK3 qui ont une perte en masse de l'ordre de 5%.

Ce changement de volume du béton du au séchage et sans doute due à la perte de l'humidité qui dépend de l'environnement. De ce fait, les essais de retrait ont également démontré parfois des sauts dans les enregistrements. Par exemple, le rétrécissement pour tous les échantillons à environ 60 jours est caractérisée par une augmentation rapide, sur une période approximative de 15 jours, tel que présenté sur les figures III.28, III.29 et III.30 ; et ceci est due aux conditions climatique du laboratoire dans la saison estivale.

Alors sécher ou rétrécir est un changement du volume de béton et quand le béton est exposé au séchage, le rétrécissement se produit par suite de perte de l'humidité qui dépend de l'humidité relative de l'environnement. Des études antérieures [3, 2] ont rapporté que le changement de volume de béton en séchant n'est pas égal au volume de l'eau perdu.

L'évaporation trop rapide de l'eau de gâchage d'un béton frais génère des retraits qui, s'ils sont importants, provoquent la fissuration du béton aux endroits de plus faible résistance en traction, donc cause principale de l'affaiblissement de la dureté superficielle du béton [61].

III.2.2.5/ Le Gonflement

Les résultats obtenus sur le gonflement des BAP dans l'eau, sont résumés sur les figures III.31, III.32 et III.33 suivantes :

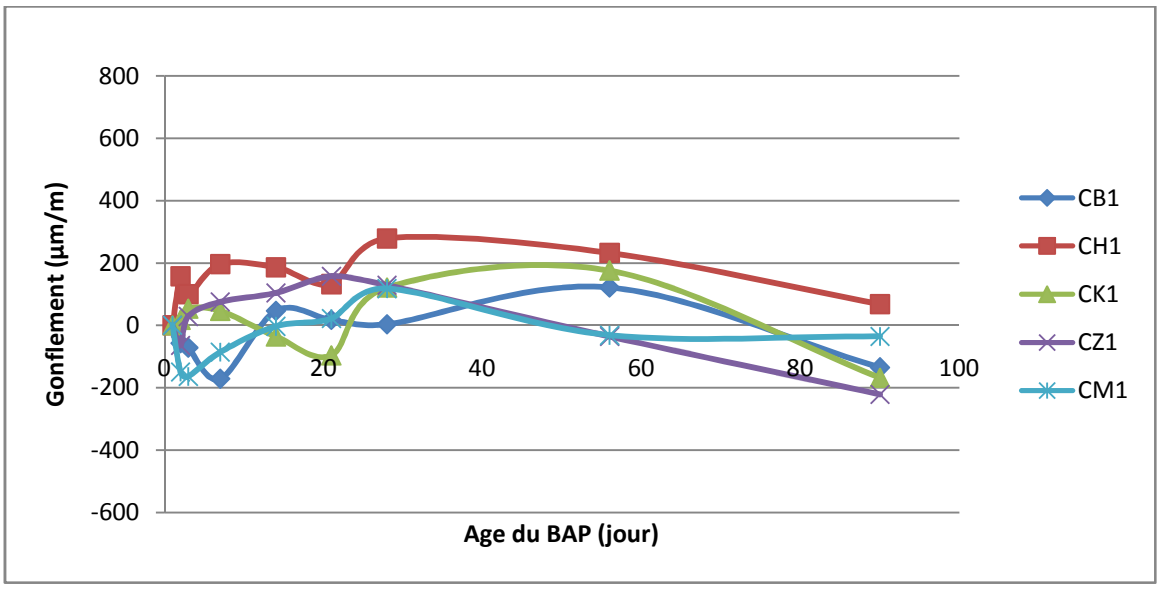


Figure III.31 : Evolution du gonflement dans l'eau des BAP de la famille 01.

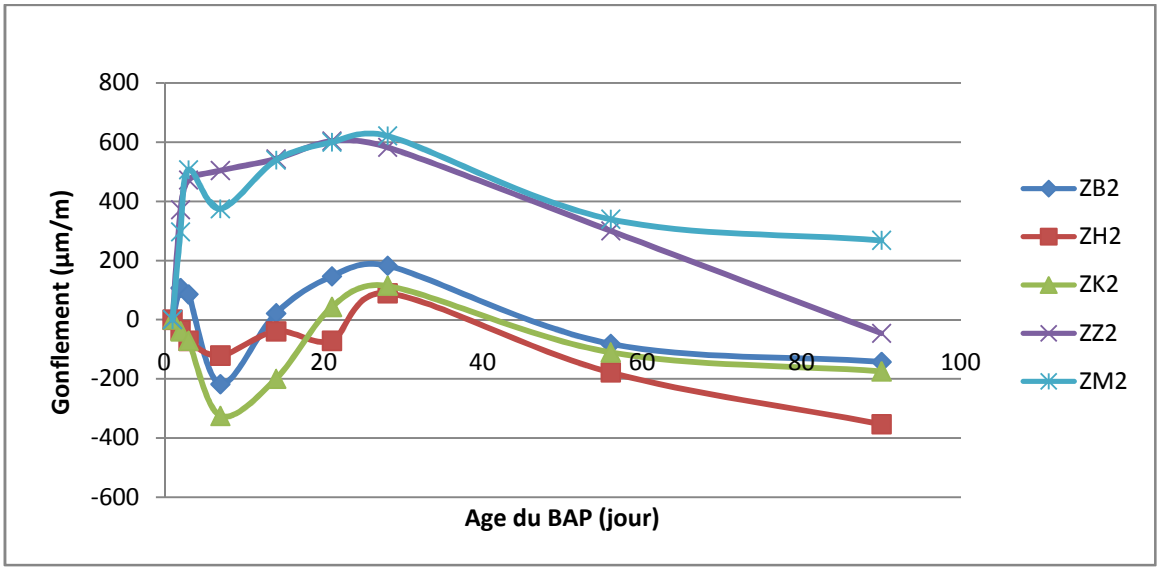


Figure III.32 : Evolution du gonflement dans l'eau des BAP de la famille 02.

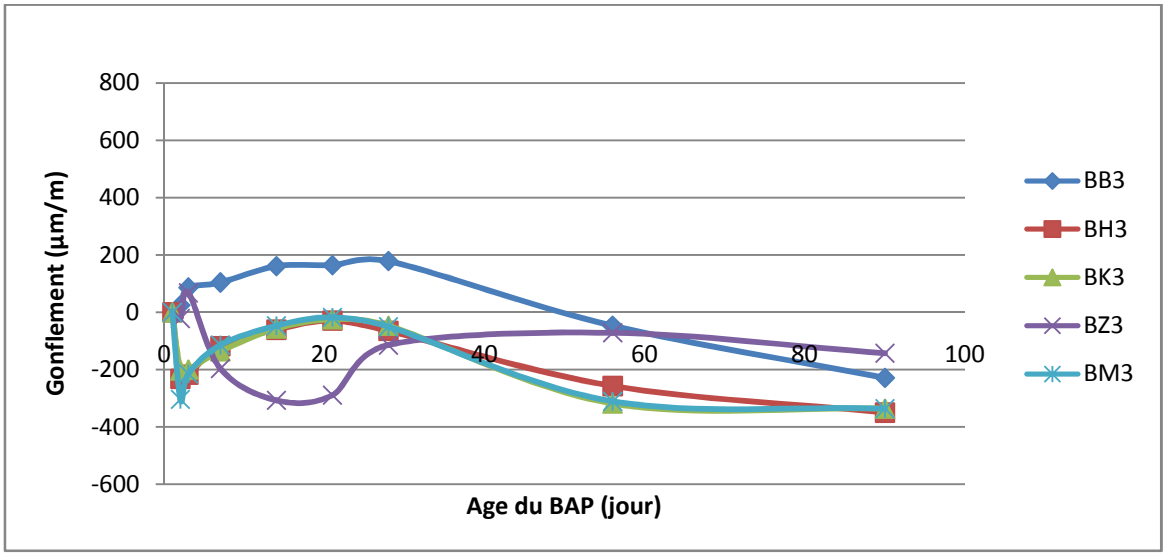


Figure III.33 : Evolution du gonflement dans l'eau des BAP de la famille 03.

D'après les figures III.31, III.32 et III.33, on remarque que dans une même famille du BAP (avec un seul sable), la nature du gravier utilisé influe d'une façon spectaculaire sur le gonflement du BAP dans l'eau. Surtout la famille 02 (confectionné à base du sable de Boughezoul).

Aussi dans tous les cas, la variation du gonflement est non stable, ceci est du probablement à la capacité d'absorption d'eau de chaque gravier, ainsi que son aptitude de relargation avec le temps.

D'une autre façon pour bien expliquer le gonflement, on présente dans cette partie les résultats de variation massique des éprouvettes de béton durant ce phénomène.

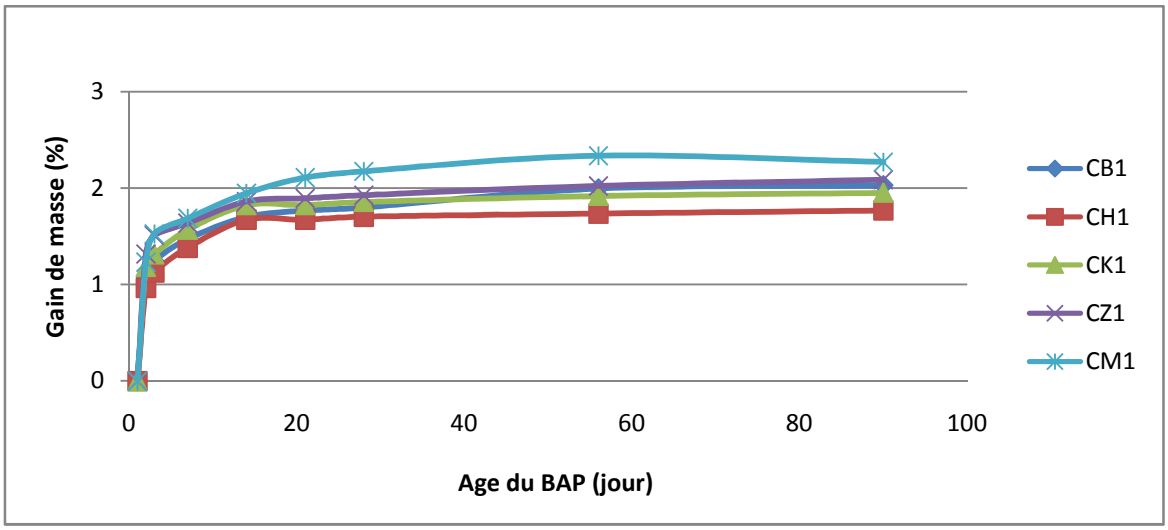


Figure III.34 : Evolution du gain de masse des BAP de la famille 01.

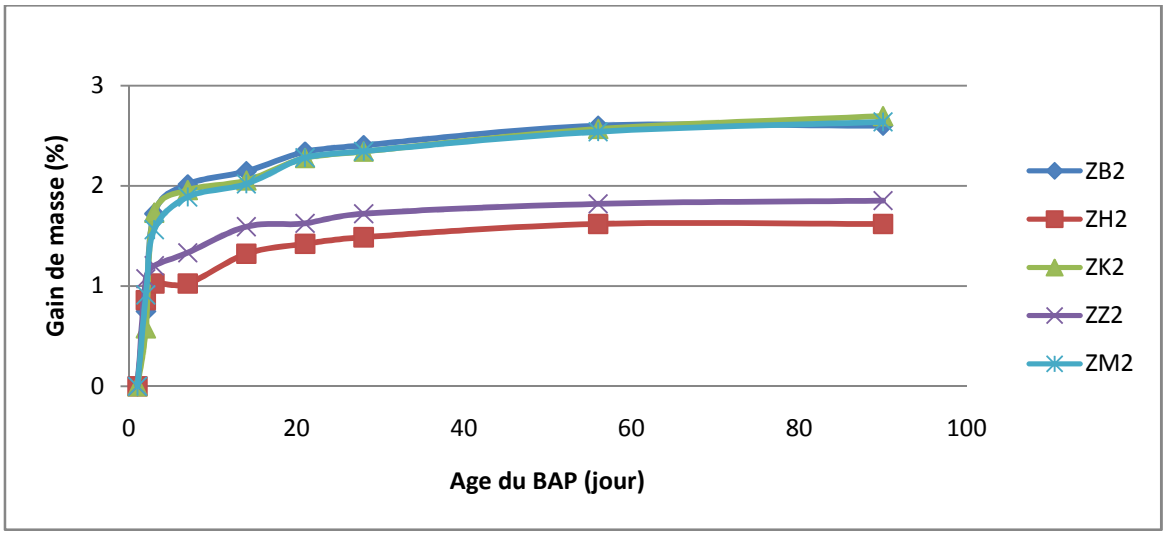


Figure III.35 : Evolution du gain de masse des BAP de la famille 02.

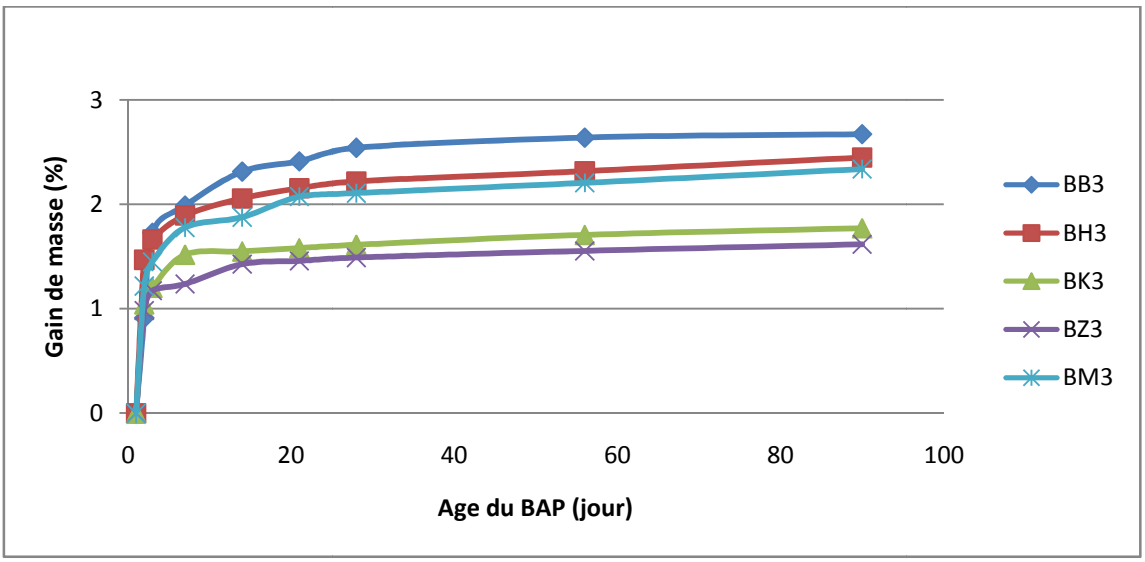


Figure III.36 : Evolution du gain de masse des BAP de la famille 03.

A partir des figures III.34, III.35 et III.36 on constate qu'il y a un gain de masse qui ne dépasse pas les 3% pour tous les BAP.

Ce gain de masse due à l'absorption d'eau qui remplit tous les vides dans le béton.

III.2.2.6/ Absorption d'eau par capillarité

Pour l'ensemble des essais, les courbes d'absorption semblent afficher deux régimes. Le premier régime est caractérisé par une absorption initiale rapide dont le taux d'absorption diminue jusqu'à environ 4 heures. Par la suite, le taux d'absorption se stabilise et l'absorption augmente de manière constante. Cette seconde partie des courbes d'absorption caractérise le second régime

L'évolution de l'absorption d'eau par capillarité dans le temps des différents bétons réalisés, sont regroupés et présentés pour les trois familles des BAP dans les figures suivantes :

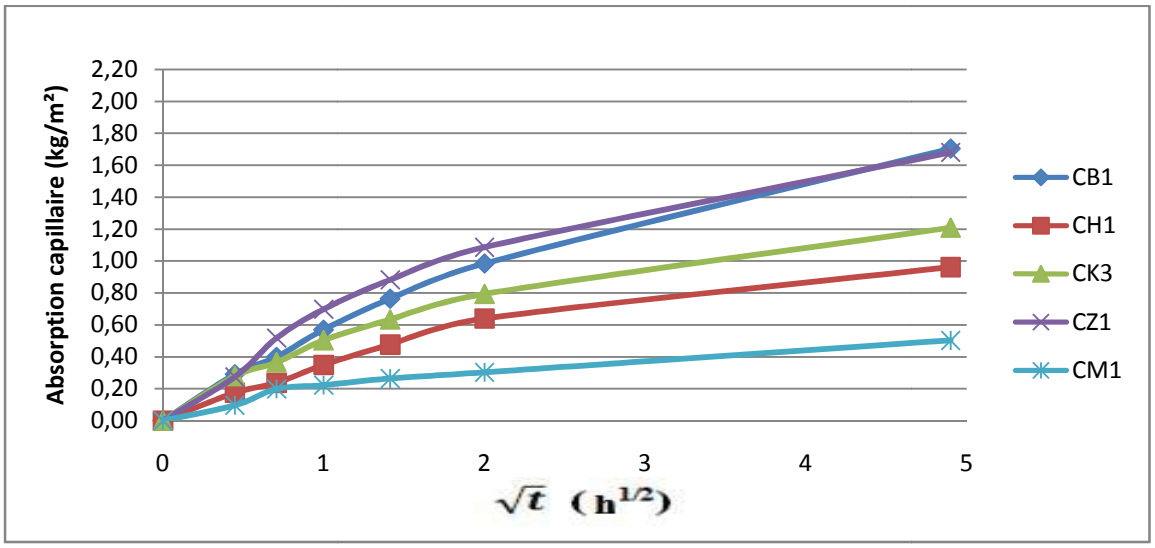


Figure III.37 : Absorption d'eau par capillarité des BAP de la famille 01.

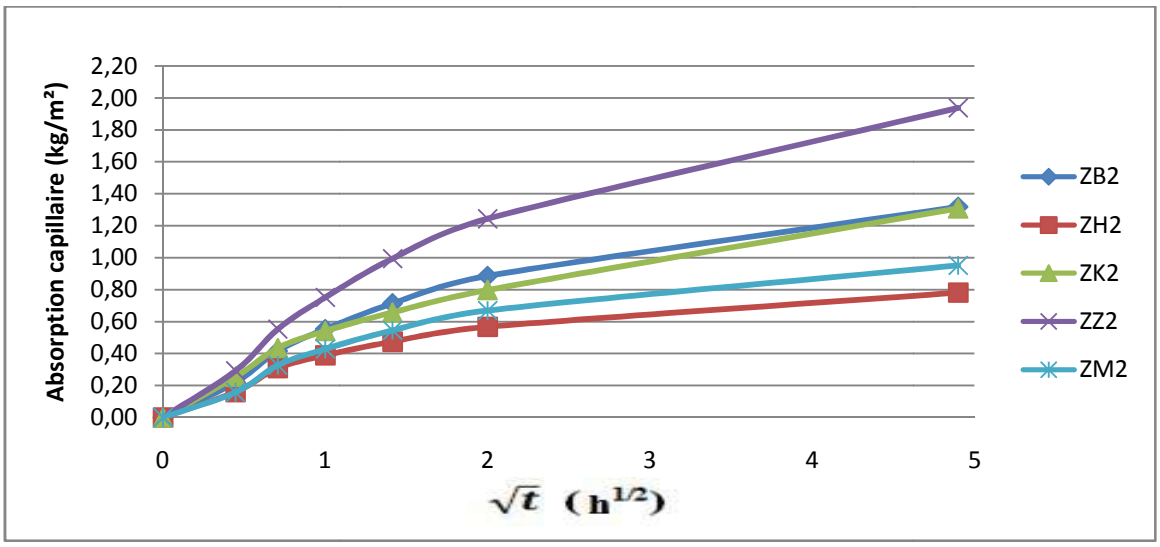


Figure III.38 : Absorption d'eau par capillarité des BAP de la famille 02.

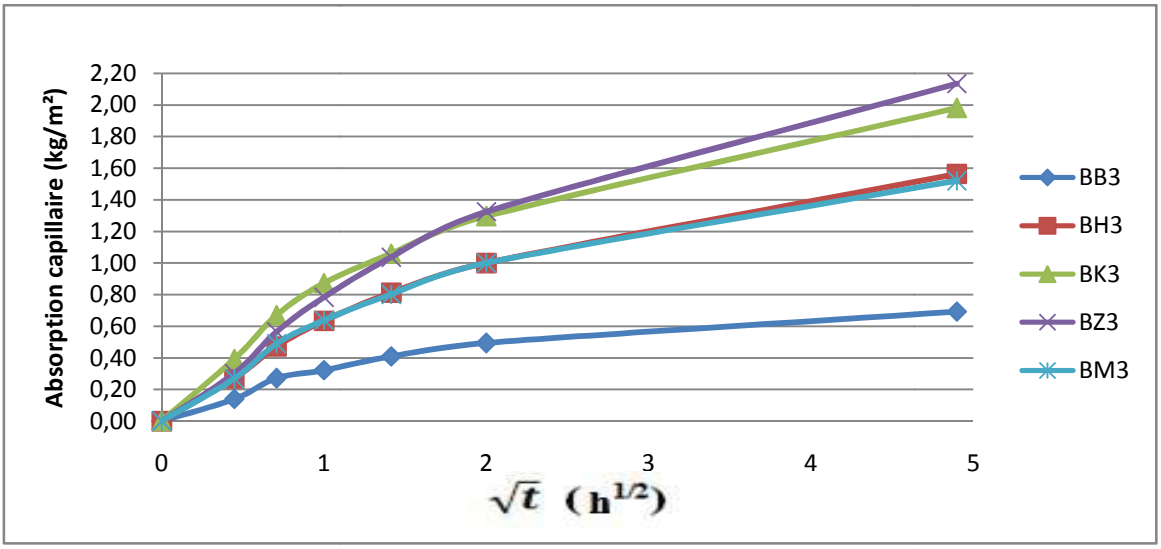


Figure III.39 : Absorption d'eau par capillarité des BAP de la famille 03.

D'après la première figure III.37, on remarque que les BAP de la famille 01 présente une capacité d'absorption d'eau faible par rapport à celle des BAP de la famille 02 et 03 avec une vitesse plus base, ceci peut être expliqué par la bonne compacité de ces BAP confectionnés à base du sable corrigé (présentent des résistance à la compression plus élevées que les autres) qui mélangé avec du sable fin capable de remplir les vides entres les petits grains du sable concassé et donc un squelette granulaire compacte (voir pages 150 et 155) et par la suite une faible capacité d'absorption d'eau par capillarité, ASSIÉ [4] a étudié la durabilité des BAP, et il a comparé l'absorption d'eau par capillarité des BAP avec les BV en fonction de la résistance à la compression, il a trouvé une relation inverse entre elles.

Les mélanges CM1, ZH2 et BB3 donnent les valeurs minimales de l'absorption capillaire. Zizine [92] a trouvé que le mélange qui absorbe le moins d'eau est celui fait avec le sable de Baghlia (sable grossier) ou corrigé.

On peut observer aussi que les BAP formulés à base du gravier de Boughezoul (Z) présente un taux d'absorption plus élèves à cause de son coefficient d'absorption d'eau important que les autres graviers (2.30%), le BAP BZ3 (sable de Bayazid et gravier Boughezoul) donne la valeur maximal de l'absorption capillaire qui dépasse 2kg/m².

D'autre part, on peut noter que les BAP de la famille 03 confectionné à base du sable de Bayazid, présentent des valeurs élevées de l'absorption capillaire et ceci est dû à la finesse de ce sable (Mf=1.80) qui absorbe plus d'eau que les autres sables (présence des vides).

Les BAP formulés à base du gravier de Bouaichoune (B) et Hamdania (H) donnent les valeurs les plus faibles de l'absorption d'eau par capillarité.

Conclusion

Cette partie a présenté les différents résultats des essais expérimentaux ainsi que leur interprétation à l'état frais et à l'état durci des MAP et les BAP afin d'étudier l'influence de type et de la nature des granulats sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des mortiers (MAP) et des bétons (BAP).

Pour les mortiers on a déterminé l'étalement au mini cône et les résistances mécaniques. La qualité du BAP à l'état frais a été vérifiée suivant les essais recommandés par l'AFGC [9] : étalement au cône, écoulement à la boite en L, essai V-funnel, essai J-Ring et la stabilité au tamis. A l'état durci on a déterminé les résistances mécaniques à la compression et à la traction par flexion, l'auscultation dynamique (Ultrason), le module d'élasticité, le retrait et le gonflement et on termine par l'absorption d'eau par capillarité.

Les résultats ont permis de conclure que la méthode Okamura pouvait être utilisée dans les formulations avec optimisation de la teneur en sable et en superplastifiant. Un pourcentage de 45% du sable a été utilisé dans les compositions des BAP.

A travers l'analyse de différentes propriétés des BAP, on a pu faire sortir l'effort de ses constituants, en particulier le squelette granulaire (sable et gravier) sur l'amélioration ou la diminution de ces performances et surtout le mélange optimal qui donne les meilleurs résultats.

De point de vue rhéologique, on a trouvé que le mélange CK1, et les BAP de la famille 03 (confectionné à base du sable de Bayazid) ainsi que les graviers de Kaf El Assel et de

Bouaichoune (de forme cubique) présentent une bonne ouvrabilité d'après les différents essais effectués à l'état frais.

A l'état durci, on peut conclure que les BAP de la famille 01 (confectionné à base du sable de Corrigé : Concassé+Hassi Bahbah) donnent des bon résultats de point de vue résistance mécaniques et durabilité.

Donc, on peut dire que dans la wilaya de Médéa, la qualité du béton est fortement liée à la variété des granulats utilisés de la région. Dans ce contexte, l'amélioration de cette qualité dépend du bon choix et du meilleur mélange des granulats.

Conclusions Générales et Recommandations

Conclusions Générales et Recommandations

A/ Conclusions générales

Les granulats représentent, en poids et en volume, la part la plus importante des bétons hydrauliques. De part ce fait, c'est assez largement à eux qu'il incombe d'assumer les performances mécaniques de ce matériau de construction, sans perdre de vue le rôle essentiel du liants qui est de les maintenir en place.

À travers la synthèse bibliographique on a montré que les caractéristiques des granulats dépendent de la nature et de la qualité du matériau d'origine d'une part, et de leurs conditions d'exploitation d'autre part. Les propriétés géométriques et de propreté peuvent être considérablement améliorées en mettant en œuvre des méthodes d'extraction, de fragmentation et de classement appropriées, alors que les propriétés intrinsèques ne peuvent être que peu influencées par le fabrication. L'homogénéité de toutes ces caractéristiques, c'est à dire la régularité des fournitures de granulats, constitue l'objectif prioritaire que tout producteur doit viser et que tout maitre d'ouvrage doit vérifier.

Les essais réalisés sur les granulats et les BAP ont rendu possible la mise en évidence de l'influence du facteur « type et nature du granulat ». Cette étude a permis de tiré les conclusions suivantes :

- Les granulats locaux utilisé dans ce travail répondent aux exigences des normes et règlements en vigueur, excepte celles relatives à la finesse du sable (sable de Hassi Bahbah), ce qui nous a obligé d'utiliser en plus un sable grossier (concassé), ainsi que la dureté faible du gravier de Boughezoul ;
- Le BAP (CK1) à base de sable corrigé et de gravier de Kaf El Assel présente la fluidité requise pour un béton autoplaçant (propriétés à l'état frais) ;
- Les résistances mécaniques en compression atteints varient de 46 MPa à 60 MPa et cela pour tous les BAP étudiés, avec des différences relatives au type de sable et de gravier ;
- La résistance à la compression à 28j du béton est optimale (≈ 60 MPa) pour les mélanges à base du sable corrigé et gravier de Kaf El Assel (CK1) ;
- Le gravier de Hamdania donne des bonnes résistances à la compression, ainsi qui a une dureté normale (LA=25.16%), ce qui réfute toutes les rumeurs qui ont lancé sur ce gravier (que ce gravier est de faible dureté) ;

- Le gravier de Boughezoul de nature grés, c'est un gravier médiocre, de faible dureté (LA=36%) ;
- La résistance à la traction à 28 j du béton est meilleure pour le béton à base de gravier de Kaf El Assel et sable de Bayazid (BK3) ou gravier de Kaf El Assel et sable de Boughezoul (ZK2) ;
- Le sable de Bayazid diminue considérablement le retrait du béton quel que soit la nature du gravier et donne le meilleur résultat pour le mélange si on l'associe au gravier de Kaf El Assel ;
- Quel que soit les granulats utilisés, la cinétique d'absorption d'eau par capillarité est la même pour tous les bétons réalisés.

B/ Recommandations

Cette recherche a été limitée à l'étude de l'influence des caractéristiques des granulats de la région de Médéa sur les performances du béton autoplaçant. Les analyses et les observations effectuées dans le cadre de ce travail pourraient mener à l'amélioration de la qualité du BAP dans la région de Médéa. D'autres aspects restent à élucider et à enrichir dans des futurs travaux de recherche, nous recommandons ce qui suit :

1/ Une étude de la rhéologie en utilisant un rhéomètre de mortier et du béton sera très intéressante afin de déterminer les caractéristiques rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité), ce qui permet de bien comprendre surtout l'effet du sable sur le comportement rhéologique des BAP ;

2/ Détermination d'autres propriétés mécaniques telles que le fluage, et le gel et dégel ;

3/ Etude d'autres propriétés de durabilité telles que les propriétés de transfert d'eau et du gaz, la carbonatation et la pénétration des ions chlore ;

4/ Etude de l'effet du mode et du retard de la cure sur les différentes caractéristiques des BAP ;

5/ Etude de l'effet de la nature minéralogique des gros granulats sur les propriétés des BAP ;

6/ De plus, il sera intéressant de faire une corrélation des résultats a fin de bien interpréter et discuter ces derniers ;

7/ Les granulats (gros et fins) peuvent contenir d'autres impuretés qui peuvent nuire aux performances et à la durabilité du béton. Des études sont donc nécessaires pour évaluer le risque que représentent ces impuretés sur le béton.

Enfin, le développement des bétons autoplaçants en Algérie n'en est qu'à ses débuts. Des études restent à mener sur d'autres types de béton (prêt à l'emploi, BHP, BTHP, …) à base des granulats de la région de Médéa.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

[1] Direction des mines wilaya de Médéa, 2014 « *Bilan des activités Année 2014* », Algérie.

[2] Boukhelkhal Dj., «Corrélations entre essais non destructifs et essais destructifs de la résistance à la compression du béton: essais au laboratoire» Mémoire de Magister, Institut Génie Civil, Université de Médéa.

[3] Gorka S. « Rapport de stage de DEA », université de Lille, 2002.

[4] Stéphan ASSIÉ, « DURABILITE DES BETONS AUTOPLAÇANTS » THESE Présentée devant l'institut national des sciences appliquées de Toulouse En vue de l'obtention du Doctorat INSA Spécialité Génie Civil, 2004.

[5] Abib Z., "formulations et caractérisation des bétons autoplaçants" Mémoire de Magister, Juillet 2004, U.S.T.H.B.

[6] Fiche technique édité par le centre d'information sur le ciment et ses applications : « *Les constituants des bétons et des mortiers* », Tome 1, Edition septembre 2005.

[7] Khayat K, «Les bétons autonivellants, Les bétons, bases et données pour leur formulation», p 479- 483, Eyrolles, 1997.

[8] Haddad O, 1er congrès international sur la technologie et la durabilité du béton à Alger, les 24,25 et 26 Mai 2004.

[9] AFGC, « Association Française de Génie Civil», Bétons autoplaçants – Recommandations provisoires, Juillet 2002, 63 pages.

[10] Ecoles Française du Béton (EFB), mis en ligne par le lycée du Bâtiment Saint- Lambert, Internet, 2004.

[11] Othmane BOUKENDAKDJI, «Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant : optimisation des conditions opératoires» Thèse de Doctorat d'état, Institut Génie Civil, Université de Blida, Algérie (2010).

[12] Lange F., Mörte H. and Rudert V. "Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties" Cement and Concrete Research, 1997, vol 27, pp. 1481-1488.

[13] Dreux G. et Festa J., « Nouveau guide du béton et de ses constituants », 8ème édition, Eyrolles, 1998.

[14] EL BARRAK M. « Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais » Thèse de Doctorat de l'université toulouse III – Paul Sabatier, Juillet 2005.

[15] Rols S., Ambroise J. and Péra J. "Effects of different viscosity agents on the properties of self-leveling concrete" Cement and Concrete Research, 1999, vol 29, pp. 261-266.

[16] Lachemi M., Hossain K.M.A., Lambros V., Nkinamubanzi P.C. and Bouzoubaâ N. "Self-consolidating concrete incorporating new viscosity modifying admixtures » Cement and Concrete Research, 2004, vol 34, pp. 917-926.

[17] Sedran T., "Les bétons autonivellants - Synthèse bibliographique", Bulletin liaison des laboratoires des ponts et chaussées N°169, mars-av 1995, pp. 53-60.

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

[19] Petersson O., Billberg P. and Van B.K. "A model for self-compacting concrete" Proceedings of RILEM International Conference on Production Methods and Workability of Fresh Concrete, Paisley, Ecosse, 1996.

[20] Billberg P. "Self-compacting concrete for civil engineering structures – the Swedish experience", Report 2:99, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 80 p., 1999.

[21] Sedran T. and De Larrard F. "Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model", Proceedings of the First International RILEM Symposium Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, 1999, pp.321-332.

[22] Sonebi M. and Bartos P.J.M. « Filling ability and plastic settlement of self-compacting concrete » Materials and Structures, 2002, Vol 35, pp. 462-469.

[23] Association française de Génie Civil (AFGC) « Bétons Autoplaçants Recommandations provisoires » juillet 2002, 63 pages.

[24] Turcry P. « Retrait et fissuration des bétons autoplaçants- influence de la formulation » Thèse de doctorat de l'Ecole centrale de Nantes, 2004, 213 pages.

[25] Gram H.E. and Piiparinen P. "Properties of SCC – Especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance" Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, 1999, pp. 211-225.

[26] Song H.W., Byun K.J., Kim S.H. and Choi D.H. "Early-Age creep and shrinkage in Self-Compacting Concrete incorporating GGBFS" Proceedings of the second International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, 2001, pp. 413-422.

[27] Hou W.M., Chang P.K., and Hwang C.L. « A study on anticorrosion effect in high-performance concrete by the pozzolanic reaction of slag » Cement and Concrete Research, 2004, vol 34, pp. 615–622.

[28] Ramachandran V.S., Malhorta V.M., Jolicoeur C. et Spiratos N. « Superplasticizers : Properties and applications in concrete » Materials Technology Laboratory, CANMET, Canada 1998

[29] Khayat K.H. and Assaad J. "Air-void stability in Self-Consolidating Concrete" ACI Materials Journal, 2002, V99, N°4, pp. 408-416.

[30] NA 2607 : «Granulats, Analyse granulométrique par tamisage» 1ère édition /01-08-1992.

[31] NA 255 :«Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau» 2ème édition/2006.

[32] NA 458 : «Granulats, Essai LOS-ANGELES» 1ère édition /1990.

[33] NF P18-554, (déc.1990) « *Granulats- Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et teneur en eau des gravillons et cailloux* »

[34] NA 463 : «Granulats, Détermination de la propreté superficielle» 1ère édition /1990.

[35] BS 812-100, «*Testing aggregates-General requirements for apparatus and calibration*», Norme anglaise, 1990.

[36] NA 455 : «Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats, Evaluation des fines, Equivalent de sable» 2ème édition /2006.

[37] NA229 : «Ciment, Détermination de la consistance normale de la pâte de ciment» 1ère édition /1990.

[38] NA230 : «Ciment, Détermination du temps de prise» 1ère édition /1990.

[39] NA231 : «Méthodes d'essais des ciments, Détermination de la finesse» 2ème édition /2006.

[40] NA440 : «Technique des essais, Essais de retrait et de gonflement» 1ère édition /1989.

[41] NA234 : «Ciment, essais mécanique» 1ère édition /1990.

[42] NF EN 1008 (Juill. 2003) « Eau de gâchage pour bétons- Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton » (indice de classement P 18-211).

[43] Domone, P.L., Chai, H.W. and Jin, J. "Optimum mix proportioning of self-compacting concrete" Proceeding on international conference on 'innovation in concrete structures: design and construction', University of Dundee, ed Dhir RK and Jones MR, Thomas Telford, London.

[44] Takada K., Pelova G.I., and Walraven J.C. "Influence of Mixing Efficiency on the Fresh Properties of Self-Compacting Concrete" Poceeding of International Symposium on Self-Compacting Concrete, Kochi, March 1999.

[45] Takada K., and Walraven J.C. "Influence of mixing efficiency on the properties of flowable cement pastes" Proceedings of the second International Symposium on Self Compacting Concrete, Japan in 2001, pp. 545-554.

[46] De Larrard F., Cazacliu B., Chopin D., and Château E. "Production of SCC" 3rd International Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 481-494.

[47] EFNARC, 2005, 'The European guidelines for Self -Compacting Concrete ', The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. WWW.efnarc.org, 68p.

[48] ACI-237R-07 American Concrete Institute «Self-Consolidating Concrete», First Printing April 2007

[49] De Schutter G. « Guidelines for testing fresh self-compacting concrete » European Research Project: Measurement of properties of fresh self-compacting concrete, Growth Contract No. GRD2-2000-30024, September 2005, 23 p, Available in www2.cege.ucl.ac.uk/research/oncrete/Testing-SCC.

[50] Jin J. and Domone P.L. "Relationships between the fresh properties of SCC and its mortar component" Proceedings of the first North American Conference on the design and use of Self-Consolidating Concrete, Centre for Advanced Cement Based Materials, North Western University, Chicago, November 2002, pp. 33-38.

[51] Association française de Génie Civil (AFGC) « Bétons Autoplaçants Recommandations provisoires » juillet 2002, 63 pages.

[52] Cussigh, Sonebi et De Schutter, Project testing SCC-segregation test method, Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik, Islande, pp. 311-322.

[53] NA 427: «Béton- Détermination de la résistance à la compression des éprouvettes» 1ère édition /1989.

[54] NA 428 : «Béton- Détermination de la résistance à la flexion des éprouvettes» 1ère édition /20-08-1992.

[55] NA 5027 : «Béton - Auscultation sonique - Mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton» 1ère édition /1997.

[56] EN 13057, « Produit et systèmes pour la protection des structures en béton – Méthodes d'essai – Détermination de l'absorption capillaire ».

[57] NF EN 12390-3 (fév. 2003) « Essai pour béton durci –Résistance à la compression des éprouvettes » (indice de classement P18-455).

[58] NF P 18-407 « Résistance à la traction »

[59] ASTM C293 « Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading) »

[60] NF P 18-418« Béton, Auscultation sonique, mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton » Décembre 1989.

[61] Hermide G., 2008, « Influence du volume de pâte et de la concentration en ciment sur la performance du béton : vers le développement d'un béton à contenu minimal en pâte », Thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan, France.

[62] NF P 18-404 « Essais d'études de convenance et de contrôle, confection et conservation des éprouvettes » AFNOR, paris 1981.

[63] Aarre T. and Domone P. "Reference concretes for evaluation of test methods for SCC" Proceedings of 3rd RILEM International Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland. 2003, pp. 495-505.

[64] Domone, P.L., Chai, H.W. and Jin, J. "Optimum mix proportioning of self-compacting concrete" Proceeding on international conference on 'innovation in concrete structures: design and construction', University of Dundee, ed Dhir RK and Jones MR, Thomas Telford, London, 1999, pp. 277-285.

[65] Sonebi M. and Bartos P.J.M. "Hardened SCC and its bond with reinforcement" Proceeding of First International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, 1999, pp. 275-289.

[66] Daczko J.A. "A comparison of passing ability test methods for Self-Consolidating Concrete" 3rd International Symposium on Self Compacting Concrete, 17-20 August 2003, Reykjavik,Iceland, pp. 335-344.

[67] De Schutter G. « Guidelines for testing fresh self-compacting concrete » European Research Project: Measurement of properties of fresh self-compacting concrete, Growth Contract No. GRD2-2000-30024, September 2005, 23 p, Available in www2.cege.ucl.ac.uk/research/oncrete/Testing-SCC.

[68] Sonebi M. and Bartos P.J.M. "Hardened SCC and its bond with reinforcement" Proceeding of First International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, 1999, pp. 275-289.

[69] Sonebi M., Grünewald S. and Walraven J. « Filling ability and passing ability of Self-Compacting Concrete » ACI Materials Journal, March/April 2007, pp. 162-170.

[70] European Union Growth Contract No. G6RD-CT-2001-00580 "Measurement of properties of fresh self-compacting concrete" Final Report – Project coordinator: ACM Centre, University of Paisley, UK. (2005).

[71] Safawi M.I., Iwaki I. and Miura T. « A study on the applicability of vibration in fresh high fluidity concrete » Cement and Concrete Research, 2005, vol 35, pp. 1834–1845.

[72] NA 442: «Ciment, composition, spécification et critères de conformité des ciments courants» 3ème édition /2006.

[73] Hu C., Barbieri B., Comparaison des retraits des bétons autonivellants et d'un béton fluide traditionnel, Science des matériaux et propriétés des bétons, 1ère Rencontre Internationale, Toulouse, 5 – 6 mars 1998, pp. 265 – 272.

[74] Pons G., Proust E., Assié S., Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete?, Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 645 – 645.

[75] Persson B., Creep, shrinkage and elastic modulus of self-compacting concrete, Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Edited by Å. Skarendahl and Ö. Petersson, Stockholm, Sweden, 1999, pp. 239 – 250.

[76] Sakata K., Durability of self-compacting concrete and low heat high performance concrete, International Conference CONSEC 98, Tromso, Norway, 1998, pp. 2057 – 2064.

[77] Nevillle A.M., Propriétés des bétons, Traduction de CRIB, Sherbrooke, Canada, Ed. Eyrolles, Paris, 2000, p. 806.

[78] Bui V.K., Montgomery D., Drying shrinkage of self-compacting concrete containing milled limestone, Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Edited by Å. Skarendahl and Ö. Petersson, Stockholm, Sweden, 1999, pp. 227 – 238.

[79] Hasni L., Bétons Autoplaçants: Synthèse Bibliographique, Rapport de Recherche N° 98-004 /98-006, CEBTP, présenté aux journées du PN BAP, 1999, p. 64.

[80] Proust E., Retraits et fluages des bétons autoplaçants: vers une meilleure compréhension des comportements différés, Thèse de doctorat, INSA de Toulouse, 2002, p. 230.

[81] Persson B., A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete, Cement and Concrete Research, 31, 2001, pp.193 – 198.

[82] Mortsell E., Rodum E., Mechanical and durability aspects of SCC for road structures, Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japan, 2001, pp. 459 – 468.

[83] Vieira M., Bettencourt A., Deformability of hardened SCC, Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 637 – 644.

[84] Acker P., Sur les origines du retrait et du fluage du béton, Revue Française de Génie Civil, Vol. 7, 2003, pp. 761 – 776.

[85] Maher EL BARRAK, «Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais» Thèse de DOCTORAT, DE L'UNIVERSITE TOULOUSE III – PAUL SABATIER Spécialité GENIE CIVIL.

[86] Benchaa BENABED, « Influence de la qualité et de la nature des sables sur les performances et la durabilité des bétons autoplaçants »Thèse de DOCTORAT, DE L'UNIVERSITE AMAR TELIDJI DE LAGHOUAT Spécialité GENIE CIVIL, 2014.

[87] Miyazawa A., Ozawa M., Morimoto H., Experimental study on fine grain sand effect on mortar flow in high--performance concrete, 2nd Int. Symposium on Design, Performance and Use of Self Consolidating Concrete, Editor(s): C. Shi, Z. Yu, K.H. Khayat and P. Yan, China, 2009, pp. 262 – 269.

[88] Omar M. Omar, Ghada D. Abd El-hameed, Mohamed A. Sherif, Hassan A. Mohamadien , Influence of limestone waste as partial replacement material for sand and marble powder in concrete properties, Journal of Housing and Building National Research Center ,8, 2012, pp. 193 – 203.

[89] Gritsada Sua-iam, Natt Makul, Utilization of limestone powder to improve the properties of self-compacting concrete incorporating high volumes of untreated rice husk ash as fine aggregate, Construction and Building Materials 38, 2013, pp. 455 – 464.

[90] Nanthagopalan P., SanthanamM., Fresh and hardened properties of self-compacting concrete produced with manufactured sand, Cement and Concrete Composites, 33, 2011, pp. 353 – 358

[91] R'mili A., Ben Ouezdou M., Incorporation du sable de concassage et du sable de désert dans la composition des bétons autoplaçants, Séminaire international, Innovation et Valorisation en génie civil et matériaux de construction, N10-271, Rabat, Maroc, 2011.

[92] ZIZINE Sihame, « Etude de l'influence du type et de la nature des granulats sur les performances du béton courant: Région de Médéa» Mémoire de Magister, de l'Université Dr Yahia Farès de Médéa spécialité Génie Civil, 2012.

[93] Kothai L., Malathy R., Strength Studies on Self Compacting Concrete with Manufactured Sand as Partial Replacement of Natural Sand, European Journal of Scientific Research, Vol. 89, N° 3, October 2012, pp. 490 – 496.

[94] Felekoglu B., Turkel S. and Baradan B. « Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete » Building and Environment, 2007, vol 42, pp. 1795–1802.

[95] Klug Y. and Holschemacher K. "Comparison of the hardened properties of Self Compacting and Normal Vibrated Concrete" 3rd International Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik,Iceland, 2003, pp. 596-605.

[96] Behim M., Clastres P., Habita M.F. et Carles-Gibergues A. "Etude d'un nouveau ciment à base de Laitier granulé d'El-Hadjar (Algérie)" Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, Avril 2004, pp. 21-29.

ANNEXE A :

EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU MORTIER

ANNEXE A :
EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU MORTIER

A.1/ Méthode et Formules de Calcul

A.1.1/ Calcul des quantités de chaque constituant

A.1.1.1/ Le ciment

Le pourcentage en volume du ciment %***C*** :

$$\%C_{vol} = \frac{(1-\mathrm{S/M})}{(1+\mathrm{E/C_{par\ volume}})} * 100$$

La quantité de ciment ***C*** en **kg** :

$$C(kg) = \frac{V \times \%C_{vol}}{100} \times \rho_c$$

A.1.1.2/ Le Sable

La quantité du sable en kg est S :

$$S(kg) = (1 - \frac{Absorption}{100}) \times (\frac{V \times S/M \times \rho_S}{100})$$

Le sable utilisé est à l'état sec, donc son humidité est nulle.

A.1.1.3/ Le superplastifiant

La quantité du superplastifiant est ***Sp*** :

$$Sp(kg) = \frac{\%Sp \times C}{100}$$

A.1.1.4/ L'eau

L'eau ajoutée au mortier (***E***) est divisée en deux partie une première partie E_1, qui est de 60% de la quantité d'eau globale, qu'on ajoute lors du malaxage durant la première minute et la deuxième quantité E_2 (40% de la quantité d'eau globale) est mélangée avec l'adjuvant est ajouté au mélange du mortier dans la deuxième minute du malaxage qui suit la première.

Le pourcentage d'eau en volume : $\%E_{vol}$

$$\%E_{vol} = \frac{(1 - S/M) \times 100 \times E/C_{\text{par volume}}}{(1 + E/C_{\text{par volume}})}$$

La quantité d'eau globale ***E*** en litre :

$$E = \left(\frac{V \times \%E_{vol}}{100} \times \frac{\rho_E}{1000}\right) - \left(\frac{Sp \times 70}{100}\right) + \left(\frac{V \times S/M \times \rho_S}{1000} \times \frac{Absorption}{100}\right)$$

Eau1 $E_1 = E \times 0.60$

Eau2 $E_2 = E \times 0.40$

A.2/ Résultats pour chaque MAP

A.2.1/ MAP1 à base du sable Corrigé

A.2.1.1/ Les Données

Pour un volume du mortier de **V=1.00 l**

- Les masses volumiques absolues des constituants :
  - Ciment : ρ_C=3143 kg/m^3
  - Sable : ρ_S=2683 kg/m^3
  - Superplastifiant : ρ_{Sp}=1065 kg/m^3
  - Eau : ρ_E=1000 kg/m^3
- Coefficient d'absorption du sable A_b= 1.05
- Rapport Sable/Mortier ***S/M*** = 0.45
- Rapport (par poids) ***E/C*** = 0.40 ou (par volume) ***E/C*** =1.26
- Le superplastifiant -MEDAFLOW 145- est de 30% extrait (contient 70% d'eau), le dosage en superplastifiant sera de : %**Sp** =1,00 % du poids de ciment.

Le sable corrigé est mélangé par les proportions suivantes:

- Proportion de sable fin de Hassi bahbah= 53%
- Proportion de sable grossier 0/3 de concassage= 47%

A.2.1.2/ Les Résultats

Essais sur Mortier					valeurs données dans cellules en rouge			
					valeurs calculées dans cellules en noir			
					Date : 15/05/2014			
Référence du mélange : MAP1								
Données :								
volume de mortier (litres)	1,00							
sable/mortier vol	0,45							
E/C vol	1,260							
% ciment vol	24,34							
% Eau vol	30,66							
E/C	0,4009							
Ciment CEM II 42,5 sans ajout	100							
% Sp/C (MEDAFLOW145)	1							
	absorption (%)		correction (%)					
humidité sable	1,05		-1,05					
Résultats :								
Materiaux/Type	vol litres	densité kg/m^3	poid mélange kg	contenance d'eau %	contenance d'eau kg	poid mélange kg	poid mélange final g	
ciment	0,243	3143	0,765			0,765	C	**764,89**
Eau	0,307	1000	0,307			0,314	E1	**188,38**
							E2	**125,58**
superplast (MEDAFLOW145)		1065	0,008	70	0,005	0,008	Sp	**7,65**
Sable	0,450	2683	1,207	-1,05	-0,013	1,195	SG	**561,26**
							SF	**633,42**
Total	1,000					**2,281**		

Tableau A.1 : Feuille Excel donnant composition du mortier MAP1 (Sable Corrigé).

A.2.2/ MAP2 à base du sable Boughezoul

A.2.2.1/ Les Données

Pour un volume du mortier de **V=1.00 l**

- Les masses volumiques absolues des constituants :
  - Ciment : ρ_C=3143 kg/m^3
  - Sable : ρ_S=2587 kg/m^3
  - Superplastifiant : ρ_{Sp}=1065 kg/m^3
  - Eau : ρ_E=1000 kg/m^3
- Coefficient d'absorption du sable A_b= 1.44
- Rapport Sable/Mortier ***S/M*** = 0.45
- Rapport (par poids) ***E/C*** = 0.40 ou (par volume) ***E/C*** =1.26
- Le superplastifiant -MEDAFOW 145- est de 30% extrait (contient 70% d'eau), le dosage en superplastifiant sera de : %**Sp** =1,40 % du poids de ciment.

A.2.2.2/ Les Résultats

Essais sur Mortier					valeurs données dans cellules en rouge			
					valeurs calculées dans cellules en noir			
					Date : 12/06/2014			
Référence du mélange : MAP2								
Données :								
volume de mortier (litres)	1,00							
sable/mortier vol	0,45							
E/C vol	1,260							
% ciment vol	24,34							
% Eau vol	30,66							
E/C	0,4009							
Ciment CEM II 42,5 sans ajout	100							
% Sp/C (MEDAFLOW145)	1,4							
	absorption (%)		correction (%)					
humidité sable	1,44		-1,44					
Résultats :								
Materiaux/Type	vol	densité	poid mélange	contenance d'eau		poid mélange	poid mélange	
	litres	kg/m^3	kg	%	kg	kg	final g	
ciment	0,243	3143	0,765			0,765	C	**764,89**
Eau	0,307	1000	0,307			0,316	E1	**189,54**
							E2	**126,36**
superplast (MEDAFLOW145)		1065	0,011	70	0,007	0,011	Sp	**10,71**
Sable	0,450	2587	1,164	-1,44	-0,017	1,147	S	**1147,39**
Total	1,000					**2,239**		

Tableau A.2 : Feuille Excel donnant composition du mortier MAP2 (Sable Boughezoul).

A.2.3/ MAP3 à base du sable Bayazid

A.2.3.1/ Les Données

Pour un volume du mortier de **V=1.00 l**

- Les masses volumiques absolues des constituants :
  - Ciment : ρ_C=3143 kg/m^3
  - Sable : ρ_S=2793 kg/m^3
  - Superplastifiant : ρ_{Sp}=1065 kg/m^3
  - Eau : ρ_E=1000 kg/m^3
- Coefficient d'absorption du sable A_b= 0.72
- Rapport Sable/Mortier ***S/M*** = 0.45
- Rapport (par poids) ***E/C*** = 0.40 ou (par volume) ***E/C*** =1.26
- Le superplastifiant -MEDAFOW 145- est de 30% extrait (contient 70% d'eau), le dosage en superplastifiant sera de : %**Sp** =1,00 % du poids de ciment.

A.2.3.2/ Les Résultats

Essais sur Mortier					valeurs données dans cellules en rouge			
					valeurs calculées dans cellules en noir			
					Date : 26/05/2014			
Référence du mélange : MAP3								
Données :								
volume de mortier (litres)	1,00							
sable/mortier vol	0,45							
E/C vol	1,260							
% ciment vol	24,34							
% Eau vol	30,66							
E/C	0,4009							
Ciment CEM II 42,5 sans ajout	100							
% Sp/C (MEDAFLOW145)	1							
	absorption (%)		correction (%)					
humidité sable	0,72		-0,72					
Résultats :								
Materiaux/Type	vol	densité	poid mélange	contenance d'eau		poid mélange	poid mélange	
	litres	kg/m^3	kg	%	kg	kg	final g	
ciment	0,243	3143	0,765			0,765	C	**764,89**
Eau	0,307	1000	0,307			0,310	E1	**186,20**
							E2	**124,13**
superplast (MEDAFLOW145)		1065	0,008	70	0,005	0,008	Sp	**7,65**
Sable	0,450	2793	1,257	-0,72	-0,009	1,248	S	**1247,80**
Total	1,000					**2,331**		

Tableau A.3 : Feuille Excel donnant composition du mortier MAP3 (Sable Bayazid).

ANNEXE B :

EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU BETON

ANNEXE B :

EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU BETON

Les mêmes démarches de la composition du mortier (**ANNEXE A**) sont suivies pour la composition du béton autoplaçant :

B.1/ Méthode et Formules de Calcul

B.1.1/ Calcul des différents composants

B.1.1.1/ Gravier

La quantité ***G*** en kg du gravier nécessaire pour un volume de béton V :

$$G(kg) = \frac{G(kg/m^3) \times V}{1000}\left(1 - \frac{Ab_G}{100}\right)$$

Le gravier utilisé est à l'état sec, donc son humidité est nulle.

B.1.1.2/ Sable

Pour calculer la quantité du sable dans le béton on calcule avant tout le pourcentage du gravier dans le béton (%G), le pourcentage du mortier par rapport au béton (%M) puis le pourcentage du sable dans le béton (%S) pour arriver à la quantité du sable dans un volume V de béton (S) :

Le pourcentage du gravier G dans le béton :

$$\%G = \frac{G(kg/m^3)}{\rho_{AG} \times 10}$$

Le pourcentage du volume de mortier M par rapport au volume de béton :

$$\%M = 100 - \%G - \%A$$

Le pourcentage du sable S dans le béton :

$$\%S = \frac{\%M \times S/M}{100}$$

Quantité du sable *S* en (kg) pour un volume V de béton :

$$S(kg) = \frac{\%S \times \rho_{AS} \times V}{1000}\left(1 - \frac{A_{bS}}{100}\right)$$

Le sable utilisé est à l'état sec, donc son humidité est nulle.

D'où on peut obtenir le rapport G/S de notre composition

B.1.1.3/ Ciment

Pourcentage de volume pâte dans le béton (%P) :

$$\%P = \%M - \%S$$

Pourcentage de ciment dans le béton (%C) :

$$\%C = \frac{1}{1 + E/C_{volume}} \times \%P$$

La quantité de ciment C en (kg) pour un volume V de béton :

$$C(kg) = \%C \times \rho_C \times 10 \times \frac{V}{1000}$$

B.1.1.4/ Superplastifiant

Le dosage en superplastifiant par mètre cube de béton *Sp* (kg/m3) :

$$Sp(kg/m^3) = \frac{\%Sp}{100} \times \%C \times \rho_C \times 10$$

La quantité de superplastifiant Sp en (kg) pour un volume V de béton :

$$Sp(kg) = Sp(kg/m^3) \times V$$

B.1.1.5/ Eau

L'eau ajoutée au béton (*E*) est divisée en deux partie : la première partie (E_1) est de 60% de (*E*) elle est ajoutée durant la première minute de malaxage et la deuxième partie (E_2), de 40% de (*E*) est ajoutée au superplastifiant est l'ensemble est ajouté au mélange du béton durant la deuxième minute de malaxage.

Le pourcentage d'eau dans le béton (%E) :

$$\%E = \frac{E / C_{volume}}{1 + E / C_{volume}} \times \%P$$

Calcul de l'eau contenue dans le sable (e_1) et dans le gravier (e_2), ces eaux doit être ajoutées (humidité nul) et l'eau contenue dans le superplastifiant (e_3) doit être extraite :

L'eau contenue dans le sable : e_1

$$e_1(kg) = \frac{\%S \times \rho_{AS} \times V}{1000}\left(\frac{A_{bS}}{100}\right)$$

L'eau contenue dans le gravier : e_2

$$e_2(kg) = \frac{G(kg/m^3) \times V}{1000}\left(\frac{A_{bG}}{100}\right)$$

L'eau contenue dans le superplastifiant : e_3

$$e_3(kg) = \frac{Sp(kg) \times 70}{100}$$

L'eau à ajoutée e : $e = (e_1 + e_2) - e_3$

D'où la quantité d'eau globale E en (kg) pour un volume V de béton :

$$E(kg) = \frac{\%E \times 10 \times V}{1000} + e$$

Avec :

Eau1 : $E_1(kg) = 0.60 \times E$

Eau2 : $E_2(kg) = 0.40 \times E$

B.2/ Résultats exemplaire (BAP CB1)

B.2.1/ Les Données

Pour un volume de béton de V=27 litres (par exemple)

- Les masses volumiques :
  - Masse volumique apparente du gravier (gravier Bouaichoune) : ρ_{AG}=1415 kg/m^3 ;
  - Masse volumique absolue du gravier (gravier Bouaichoune) : ρ_{SG} = 2625 kg/m^3 ;
  - Masse volumique absolue du sable (Corrigé) : ρ_S = 2683 kg/m^3 ;
  - Masse volumique absolue du ciment : ρ_C =3143 kg/m^3.

- Les coefficients d'absorption :
  - Coefficient d'absorption du sable : Ab_S = 1.05 ;
  - Coefficient d'absorption du Gravier : Ab_G = 1.18.

- Le rapport Sable/Mortier : *S/M* = 0.45 ;
- Le pourcentage du gravier est de 58% de sa densité apparente donc son dosage sera de :

$$G(\text{kg/m}^3) = \frac{\rho_G \times 58}{100} \text{ : telle que G/S=1}$$

- Le volume d'air dans le béton en pourcentage : A=1% du volume du béton ;
- Le rapport Eau/Ciment est de E/C_{volume}=1.26 par unité de volume de ciment et $E/C_{poids} = E/C_{volume} / \rho_C = 0.40$ par unité de poids de ciment ;
- Le pourcentage de superplastifiant (**MEDAFLOW145**) : *%Sp* = 1,00% du poids de ciment, le **MEDAFLOW145** est de 30% d'extrait (donc il contient 70% d'eau).

B.2.2/ Les Résultats

Composition du Mélange de BAP CB1				valeurs données dans cellules en rouge					
				valeurs calculées dans cellules en noir					
Données:				Date: 24/05/2014					
Densités Absolues			**Absorptions (%)**						
Gravier	2,625		Gravier	1,18					
Sable	2,683		Sable	1,05					
Ciment	3,143								
gravier									
Densité Apparente (kg/m3)	1415		% gravier	31,26					
Pourcentage	58		Gravier (kg/m3)	820,70					
8/15:3/8	1		8/15 (kg/m3)	410,35					
G/S	1,004		3/8 (kg/m3)	410,35					
air									
volume air % de béton	1								
Sable									
% mortier vol de béton	67,74		% Sable vol de béton	30,48					
% Sable vol du mortier	45		Sable (kg/m3)	817,80					
pate									
% pate vol de béton	37,25		% Eau vol de béton	20,77					
E/P volume	1,26		Eau (kg/m3)	207,70					
% Poudre vol de béton	16,48		% Ciment vol de béton	16,48					
% Ciment vol Poudre	100		Ciment (kg/m3)	518,10					
Densité Absolue ciment	3,143		E/P Poids	0,4009					
Superplastifiant: MEDAFLOW 145									
% Sp liquide vol Poudre	1		Sp (kg/m3)	5,18					
Mélange vol (l)	27								
Densité de béton (kg/m3)	2369,48								
Poids Mélange (kg)	63,98								
Résultats:									
Poids Mélange									
Materiaux/Type	prop.mél kg/m3	Poids mélanges kg	absorption %	humidité %	extra eau kg	Poids kg	Poids mél final kg		
Gravier 8/15	410	11,079	1,18	0,00	-0,13	10,949	G 8/15	10,949	
Gravier 3/8	410	11,079	1,18	0,00	-0,13	10,949	G 3/8	10,949	
Sable	818	22,081	1,05	0,00	-0,23	21,849	SG	10,265	
							SF	11,584	
Ciment CEM II 42,5	518	13,989				13,989	C	13,989	
Sp: MEDAFLOW 145	5,18	0,140		70	0,10	0,140	Sp	0,140	
Eau	208	5,608				6,003	E1	3,602	
							E2	2,401	
Total	**2369**	**63,976**			-0,40	**63,878**		**63,878**	

Tableau B.1 : Feuille Excel donnant composition et résultats des essais sur BAP (CB1).