

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : STRUCTURES

Présenté par : **MESSIAD BOUTHEYNA & BOURTAL HOUSSEM EDDINE**

Thème : **ETUDE COMPARATIVE DE DURABILITE ENTRE LES BETONS AUTOPLACANTS ET LES BETONS ORDINAIRES**

Sous la direction de : **Pr. BENMARCE ABDELAZIZ**

Juin 2018

RESUME

Les bétons autoplaçants présentent des particularités de compositions comparativement aux bétons ordinaires. Parmi ces particularités, un volume élevé de fines et un volume de pâte élevé qui est d'ailleurs responsable de leur comportement rhéologique. De plus, la texture très complexe des bétons autoplaçants à l'état durci qui a fait l'objet de nombreuses recherches.

L'objectif principal de ce travail est d'établir un programme expérimental afin de comparer entre les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires. Nous nous sommes intéressés dans ce travail à la durabilité des bétons.

Dans ce travail expérimental, nous avons préparé des échantillons de BAP avec différentes teneur de filler calcaire (10,17 et 20%) comme substitut au ciment avec un échantillon de béton ordinaire ce qui va nous permettre d'étudier la valorisation filler calcaire sur les propriétés mécaniques (résistance à la compression) et la durabilité du béton (porosité, perméabilité à l'air et l'absorption d'eau). Grâce aux résultats obtenus, on en conclut que filler calcaire a un effet positif sur les propriétés mécaniques et physique. L'effet est quelques peu acceptable pour la durabilité du béton en particulier à long terme, mais d'une manière générale, la durabilité de béton autoplaçant est supérieure à celle de béton ordinaire.

Mots-clés : Béton Autoplaçant, Durabilité, béton ordinaire, Propriétés mécaniques, Propriétés physiques.

Abstract

Self-compacting concretes (SCC) present particularities in term of compositions compared with ordinal concretes (OC). Among these particularities, a high volume of fines and a high volume of binders which is moreover responsible for their rheological behavior. Furthermore, the very complex texture of self-compacting concretes in the hardened state, which was the object of numerous researches. The main objective of this work is to establish an experimental program to compare between SCC and OC. We were particularly interested in this work in the durability of concretes.

In this experimental work, we prepared SCC samples with different content to limestone filler (10,17 and 20 %) as substitute to the cement along with OC samples which allows us to study the valuation of the calcareous filler on the mechanical properties (compressive resistance) and the durability of the concrete (porosity, air permeability and water absorption). Upon the obtained results, we can conclude that the SCC based on limestone filler has a positive effect on the mechanical properties and the physical properties. The effect is acceptable in terms of durability of the concrete in particular long-term, but generally we can conclude that the SCC durability is higher than that of OC.

Key words: Self-compacting concretes, durability, normal concrete, mechanical properties, physical properties.

ملخص

تتميز خرسانة ذاتية القولبة بخصائص التراكيب مقارنة بالخرسانة العادية، من بين هذه الخصوصيات تتميز الخرسان ذاتية الحركة بخاصية التراكيب مقارنة بالخرسانة العادية. من بين هذه الميزات، كمية كبيرة من الغرامات وحجم كبير من العجين وهو مسؤول أيضا عن سلوك الريولوجي لها. بالإضافة إلى ذلك، فإن تركيبة الخرسانة ذاتية الانضغاط المعقدة للغاية في الحالة الصلبة التي كانت موضوعًا لكثير من الأبحاث.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو وضع برنامج تجريبي لمقارنة الخرسانة ذاتية الانضغاط والخرسانة العادية. نحن مهتمون، في هذا العمل التجريبي بديمومة الخرسانة ، قمنا بإعداد عينات من الخرسانة ذاتية الانضغاط بمحتوى حشو من مختلف (10،17 و20%) كبديل من الأسمنت مع عينة من الخرسانة العادية والتي ستسمح لنا بدراسة تقييم الحشوة الجيرية على الخواص الميكانيكية (قوة الانضغاط) ومتانة الخرسانة (المسامية ونفاذية الهواء وامتصاص الماء). بفضل النتائج التي تم الحصول عليها، استنتج أن حشو الحجر الجيري له تأثير إيجابي على الخواص الميكانيكية والفيزيائية، التأثير مقبول من حيث ديمومة الخرسانة على المدى الطويل على وجه الخصوص، ولكن بصفة عامة الخرسانة ذاتية الانضغاط أكثر دواما من ذلك من OC.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة ذاتية الانضغاط، المتانة، الخرسانة العادية، الخواص الميكانيكية، الخواص الفيزيائية.

REMERCIEMENTS

*Je témoigne que c'est par la grâce de **Dieu** le tout puissant et miséricordieux, d'aide incessante, qu'il m'a porté et d'orientation imminente qu'il m'a accordé pour achever ce travail.*

*Je tiens à exprimer toute mon estime et ma reconnaissance envers mon encadreur professeur **BENMARCE Abdelaziz** (professeur à L'université de Guelma) pour nous avoir donné la chance de réaliser ce travail, pour la confiance qu'il a manifesté à notre égard, pour son aide précieuse, pour ses conseils très constructives et pour nous avoir soutenus et toujours encouragés.*

Nos vifs remerciements aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous font en de juger et d'examiner ce travail.

*Je me dois de remercier le **Dr. Mahdi BENZAID** pour son aide dans mes différentes démarches expérimentales et son aide lors de mes expérimentations.*

*Je remercie aussi **Dr. Messiad Hanane** et **Dr. Yousfi Tarek** pour leurs disponibilités, Sans prêt oublier les idées et les nombreux conseils qu'ils ma donnés.*

Je tiens à exprimer mon profonde gratitude qui m'a toujours soutenues et à tout ce qui participe de réaliser ce mémoire. Ainsi que l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation.

Je tiens aussi à exprimer mes sincères remerciements à l'ensemble des doctorants que j'ai rencontré Boukour Salima et Boudjadera Fatiha au sein du laboratoire de LGCH de l'Université de GUELMA et aussi l'équipe technique de laboratoire Samira et sihem .

Enfin, je remercie du fond du cœur mes parents sans qui rien de tout cela ne serait arrivé.

Vous m'avez toujours supporté et accompagné dans mes projets. Voyez ici une reconnaissance Profonde de ce que vous m'avez apporté dans la vie. Je vous dois beaucoup. Je dédie ce travail à mon père qui j'espère sera fier de moi.

J'en oublie certainement encore et je m'en excuse. Encore un grand merci à tous pour m'avoir conduit à ce jour mémorable.

Dédicace

*A la mémoire de mes grands-parents **Khoutir** et **Fatima Zahraa**.*

Ce qui sont le plus chers au monde, mes parents :

☞ *A mon père **Chérif**, pour m'avoir soutenu moralement, matériellement et financièrement jusqu'à ce jour. Père ce travail est le Tien.*

☞ *A mère **Saliha**, voici l'aboutissement de tes nombreuses nuits de prières de ta sagesse et ta générosité pour votre seule Fille .chère mère ce travail et le fruit de tes efforts.*

☞ *A ma Sœur **Hanane** et tonton **Tarek** qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.*

☞ *A mes deux frères **Islem** et **Dayou** le chemin est dur et encore long, il faudrait du courage et beaucoup de chance, que dieu vous garde.*

☞ *Je n'oublie jamais la générosité illimitée de ma sœur : **Manel** qui m'apporter beaucoup, je te souhaite une vie pleine de bonheur et de succès.*

☞ *À mes cousins et mes cousines, **Amira**, **Imen**, **youness**, **ayoub** et **zahra**.*

☞ *À mes amis surtout : **Amina**, **Samira**, **Abla**, **sara**, **Nadia** et **Wided***

BOutheyna

Dédicace

À la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore. Que dieu te garde toi et mon père dans son vaste paradis.

*A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours derrière moi malgré ses grandes responsabilités, que dieu t'aide et te garde pour ta belle petite famille « Vanessa, Sarah et **Adoumi** », à toi mon frère **Badori**.*

*Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à tous mes frères Said, Mouriro, **Walid**, **Souma** et **Hamada**. Et mes sœurs **Smina**, **Fatoma**, Nabila, Houda et Mimi et ces petites familles. Mes chers neveux Oussema et Malik. Je dédie ce travail dont le grand plaisir leurs revient en premier lieu pour leurs conseils, aides, et encouragements.*

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études, mes aimables amis, collègues d'étude, et frères de cœur, toi Alaa, Khaled, Youcef et Hichem.

Sissou

Liste des figures

Figure I.1	Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.	5
Figure I.2	Presse de flexion utilisée (3 points).	8
Figure II.1	Comparaison de la structure d'un BAP et d'un BO	16
Figure II.2	(a) Pâte de ciment non adjuvantée, (b) Pâte de ciment additionnée d'un superplastifiant.	20
Figure II.3	Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow).	23
Figure II.4	Essai de la boîte en L (L-box test)	24
Figure II.5	Essai de stabilité au tamis.	25
Figure II.6	L'essai V-funnel	26
Figure II.7	Essai de ressuage.	26
Figure II.8	Essai J. Ring	27
Figure II.9	Essai de la boîte en U.	27
Figure II.10	Essai de stabilité à la colonne	28
Figure II.11	Essai à la bille développé par Trudel	29
Figure II.12	Mesure de la résistance à la compression.	30
Figure II.13	Mesure de la résistance à la traction par flexion.	30
Figure II.14	Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales.	31
Figure II.15	Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation.	31
Figure II.16	Appareil de mesure.	33
Figure II.17	Mesures en transparence.	34
Figure II.18	Mesures en surface	34
Figure III.1	Répartition porométrique dans le béton.	43
Figure III.2	Essai de porosité accessible à l'eau.	44
Figure III.3	Concept de la perméabilité d'un milieu poreux selon	45
Figure III.4	illustration des profondeurs de pénétration des ions chlorures.	47
Figure III.5	Exemple d'éprouvettes après l'immigration des chlorures	47
Figure III.6	Différents types de dégradations.	49
Figure IV.1	Mesure de la masse volumique apparente du sable.	50
Figure IV.2	Mesure de la masse volumique absolue du sable.	51
Figure IV.3	Mesure de la compacité du sable.	52
Figure IV.4	Détermination de la teneur en eau.	53
Figure IV.5	Courbes granulométrique du sable.	54
Figure IV.6	Mesure de la propreté du sable.	56
Figure IV.7	Mesure de la propreté du sable.	56
Figure IV.8	Procédé utilisé pour la mesure de la masse apparente du gravier.	58
Figure IV.9	Mesure de la masse volumique absolue du gravier.	59
Figure IV.10	Détermination de la teneur en eau.	59
Figure IV.11	Mesure de la propreté des graviers.	60
Figure IV.12	Analyse granulométrique.	61
Figure IV.13	Allure de la courbe granulométrique du gravier	62

Figure IV.14	Répartition granulométrique	64
Figure V.1	Gravier et Sable utilisés.	67
Figure V.2	ciment utilisé de H'djar Soud (Skikda).	68
Figure V.3	filler utilisés.	69
Figure V.4	L'adjuvant utilise MEDAPLAST SP40.	70
Figure V.5	Les éprouvettes utilisées.	71
Figure V.6	Essai D'étalement.	73
Figure V.7	Essai De boîte en L.	73
Figure V.8	Essai de stabilité au tamis.	74
Figure V.9	Essai De V de Funnel.	74
Figure V.10	Presse de compression utilisée.	75
Figure V.11	Presse de flexion utilisée (3 points).	76
Figure V.12	Essai de flexion réalisé avec ses étapes.	76
Figure V.13	Les étapes d'essai d'obtention De module d'élasticité dynamique avec l'ultrason.	77
Figure V.14	Essai de porosité.	78
Figure V.15	Dispositif utilisée pour le calcul de la perméabilité à l'air (compte-bulles)	80
Figure V.16	Intérieur d'une cellule de perméabilité à l'air. A : Echantillon de béton, B : Manchon en polyuréthane étanche, C : Chambre à air gonflable, D : Couvercle avec fixations.	80
Figure V.17	Dispositif utilisée pour le calcul de la pénétration de l'eau.	82
Figure VI.1	Résistance de compression résiduelle relative	86
Figure VI.2	courbe de la résistance la compression par rapport au taux E/C	87
Figure VI.3	Résistance de Flexion résiduelle relative	88
Figure VI.4	courbe de la résistance la flexion par rapport au taux E/C	89
Figure VI.5	Le module d'élasticité dynamique de béton ordinaire et des BAP avec différents pourcentages	90
Figure VI.6	La porosité totale de chaque mélange par rapport au pourcentage de filler calcaire et de béton ordinaire..	92
Figure VI.7	L'évolution de la densité apparente en fonction de pourcentage de filler calcaire et de béton ordinaire.	93
Figure VI.8	L'évolution de la perméabilité apparente K App.	94
Figure VI.9	La pénétration de l'eau.	95

Liste des tableaux

Tableau I.1	Classement des bétons selon la valeur Affaissement au cône d'Abram's.	6
Tableau I.2	Principaux Les Avantages et les Inconvénients de l'Emploi du béton	10
Tableau II.1	Propriétés d'ouvrabilité des BAP	22
Tableau IV.1	Résultats de la masse volumique apparente du sable.	51
Tableau IV.2	Résultats de la masse volumique absolue du sable.	51
Tableau IV.3	Résultats de la compacité du sable.	52
Tableau IV.4	Valeurs de la porosité du sable.	52
Tableau IV.5	Teneur en eau des graviers lors des essais.	53
Tableau IV.6	Analyse granulométrique du sable.	54
Tableau IV.7	Résultat de l'équivalent de sable	56
Tableau IV.8	Résultats des essais sur le sable.	57
Tableau IV.9	Résultats des mesures de la masse volumique apparente du gravier.	58
Tableau IV.10	Résultats des essais de mesure de la masse volumique absolue du gravier.	59
Tableau IV.11	Teneur en eau des graviers lors des essais.	60
Tableau IV.12	Résultats des mesures de la propreté des graviers.	61
Tableau IV.13	Analyse granulométrique du gravier 5/15.	62
Tableau IV.14	Valeurs du coefficient d'absorption du gravier.	63
Tableau IV.15	Résultats des essais sur le gravier.	63
Tableau IV.16	Caractéristiques chimiques.	63
Tableau IV.17	Caractéristiques physiques.	64
Tableau IV.18	Composition chimique moyenne du laitier granulé utilisé Caractéristiques physiques et chimiques du ciment utilisé.	64
Tableau IV.19	Compositions et paramètres de formulation des bétons étudiés.	66
Tableau V.1	Résultats des essais sur le gravier et le sable.	67
Tableau V.2	Propriétés physique du ciment utilisé.	68
Tableau V.3	Propriétés chimique du ciment, filler utilisés	69
Tableau V.4	programme des essais réalisé à l'état frais.	75
Tableau VI.1	Différents formulations de BAP.	84
Tableau VI.2	propriétés des BAP l'état frais.	85

Tableaux VI.3	Résistance à la compression des BO et des BAP en fonction des différents pourcentages de fillers 10% 17% et 20%.	86
Tableaux VI.4	Résistance à la flexion de BO et des BAP avec trois pourcentages.	88
Tableau VI.5	Module d'élasticité dynamique	90
Tableau VI.6	La porosité des BAP en fonction de différents pourcentages de filler	91
Tableau VI.7	La densité des BAP et de BO.	92
Tableau VI.8	Résultat de coefficient de perméabilité apparente.	93
Tableau VI.9	La pénétration de l'eau en fonction	94

Sommaire

<i>RESUME</i>	<i>i</i>
<i>Abstract</i>	<i>ii</i>
<i>ملخص</i>	<i>iii</i>
<i>REMERCIEMENTS</i>	<i>iv</i>
<i>Dédicace</i>	<i>v</i>
<i>Dédicace</i>	<i>vi</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>vii</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>ix</i>
<i>Tableau I.1</i>	<i>ix</i>
<i>Tableau I.2</i>	<i>ix</i>
<i>Tableau II.1</i>	<i>ix</i>
<i>Tableau IV.1</i>	<i>ix</i>
<i>Tableau IV.2</i>	<i>ix</i>
<i>Tableau IV.3</i>	<i>ix</i>
<i>Tableau IV.4</i>	<i>ix</i>
<i>Tableau IV.5</i>	<i>ix</i>
<i>Tableau IV.6</i>	<i>ix</i>
<i>Tableau IV.7</i>	<i>ix</i>
<i>Tableau IV.8</i>	<i>ix</i>
<i>Tableau IV.9</i>	<i>ix</i>
<i>Tableau IV.10</i>	<i>ix</i>
<i>Tableau IV.11</i>	<i>ix</i>
<i>Tableau IV.12</i>	<i>ix</i>
<i>Tableau IV.13</i>	<i>ix</i>
<i>Tableau IV.14</i>	<i>ix</i>
<i>Tableau IV.15</i>	<i>ix</i>
<i>Tableau IV.16</i>	<i>ix</i>
<i>Tableau IV.17</i>	<i>ix</i>

<i>Tableau IV.18</i>	<i>ix</i>
<i>Tableau IV.19</i>	<i>ix</i>
<i>Tableau V.2</i>	<i>ix</i>
<i>Tableau V.3</i>	<i>ix</i>
<i>Tableau V.4</i>	<i>ix</i>
<i>Tableau VI.1</i>	<i>ix</i>
<i>Tableau VI.2</i>	<i>ix</i>
<i>Tableaux VI.3</i>	<i>x</i>
<i>Tableaux VI.4</i>	<i>x</i>
<i>Tableau VI.5</i>	<i>x</i>
<i>Tableau VI.6</i>	<i>x</i>
<i>Tableau VI.7</i>	<i>x</i>
<i>Tableau VI.8</i>	<i>x</i>
<i>Tableau VI.9</i>	<i>x</i>
<i>Sommaire</i>	<i>xi</i>
<i>Introduction générale</i>	<i>1</i>

Partie I Etude bibliographique

Chapitre I Bétons Ordinaires

<i>I.1 Introduction</i> :	<i>3</i>
<i>I.2 Définition</i>	<i>4</i>
I.3.1 Propriétés de béton frais :	<i>5</i>
I.3.1.1 Essai d'affaissement ou cône d'Abram's ou Slump-test : (NF P 18-439).....	<i>5</i>
I.3.1.2 La masse volumique du béton frais :	<i>6</i>
I.3.2 Propriétés de béton durci :	<i>7</i>
I.3.2.1 Résistance à la compression ^[8] :	<i>7</i>
I.3.2.2. Résistance à la traction par flexion ^[9] :	<i>8</i>
<i>I.4 Constituants des Bétons</i> :	<i>8</i>
I.4.1 Ciments :	<i>8</i>
I.4.2 Eau de gâchage :	<i>9</i>
I.4.3 Granulats :	<i>9</i>
<i>I.5 Formulation du béton</i> :	<i>9</i>

<i>I.6. Principaux avantages et inconvénients du béton :</i>	10
<i>I.7. Conclusion :</i>	11

Chapitre II Bétons Autoplaçants

<i>II.1 Introduction :</i>	12
<i>II.2 Historique :</i>	12
<i>II.3 Notion du béton Autoplaçant :</i>	13
<i>II.4 Domaine d'utilisation des BAP :</i>	14
<i>II.5 Les avantages et inconvénients des BAP :</i>	14
<i>II.6 La structure des BAP :</i>	15
<i>II.7 Les principaux constituants des BAP :</i>	16
<i>II.7.2 Les additions minérales :</i>	18
<i>II.7.3 Les Adjuvants chimiques :</i>	19
<i>II.8 Propriétés des BAP à l'état frais ^[23] :</i>	21
<i>II.9 Caractérisation des BAP à l'état frais :</i>	23
<i>II.9.2 Essai de la boîte en L (L-box test) :</i>	24
<i>II.9.3 Essai de stabilité au tamis :</i>	24
<i>II.9.4 Essai d'entonnoir (V-Funnel NF EN 12350-9) :</i>	25
<i>II.9.5 Essai de ressuage :</i>	26
<i>II.9.6 Essai J-Ring :</i>	26
<i>II.9.7 Essai à la boîte en U (U-Box) :</i>	27
<i>II.9.8 Essai à la colonne :</i>	27
<i>II.9.9 Essai à la bille:</i>	28
<i>II.10 Caractérisation d'un BAP à l'état durci (destructif et non destructif) :</i>	28
<i>II.10.1 Les essais de compression :</i>	29
<i>II.10.2 Les essais de traction par flexion :</i>	30
<i>II.10.3 Module d'élasticité :</i>	31
<i>II.10.4 Essai d'auscultation dynamique :</i>	32
<i>II.11 Formulation des BAP :</i>	34
<i>II.11.1 Méthode japonaise :</i>	35
<i>II.11.2 L'approche suédoise :</i>	35
<i>II.11.3 Formulation par volume de pâte minimal :</i>	36
<i>II.11.4 Formulation par optimisation du squelette granulaire :</i>	36
<i>II.11.5 Méthode basée sur un plan d'expérience :</i>	36
<i>II.12 Conclusion :</i>	37

Chapitre III Durabilité des bétons

<i>III.1 Généralités</i> :	38
<i>III. 2 Introduction</i> :	39
<i>III.3 Facteurs Influençant la durabilité</i> :	39
<i>III.4 Durabilité et économie</i> :	41
<i>III.5 Béton durable et béton résistant</i> :	41
<i>III.6 Les indicateurs de durabilité généraux</i> :	42
III.6.1 Porosité accessible à l'eau (AFPC-AFREM, 1998) (NF P 18 – 459) :	42
III.6.2 La perméabilité aux gaz (AFPC-AFREM, 1998) (NF P 18 – 463) :	44
III.6.3 Le coefficient de diffusion des ions chlorures :	45
III.6.4 Source de l'attaque des ions chlores :	45
III.6.5 Les essais de pénétration des ions de chlores :	46
<i>III.7 Les indicateurs de substitution</i> :	48
III.7.1 L'Indicateurs de substitution à l'absorption d'eau par capillarité (AFPC,1997) :	48
<i>III.8 Les indicateurs de durabilité spécifiques</i> :	48
<i>III.9 Conclusion</i> :	49

Partie II Etude expérimentale

Chapitre IV Caractéristiques des matériaux

<i>IV.1 Introduction</i> :	50
<i>IV.2 Caractérisation du sable</i> :	50
IV.2.1 Caractéristiques physiques des sables utilisés :	50
IV.2.1.1 Masse volumique apparente du sable:	50
IV.2.1.2 Masse volumique absolue : (NF P 18-555)	51
IV.2.1.3 Mesure de la compacité :	51
IV.2.1.4 Porosité :	52
IV.2.1.5 Teneur en eau :	53
IV.2.1.6 Analyse granulométrique :	54
IV.2.1.7 Equivalent de sable :	54
<i>IV.3 Caractérisation du gravier</i> :	57
IV.3.1 Masse volumique apparente du gravier :	57
IV.3.2 Masse volumique absolue :	58
IV.3.3 Mesure de la teneur en eau des graviers :	59
IV.3.4 Mesure de la propreté :	60
IV.3.5 Analyse granulométrique :	61

IV.3.6 Absorption d'eau :	62
IV.4 Les additions :	63
IV.4.1 Les fillers :	63
IV.4.2 Eau de gâchage :	64
IV.4.3 Ciment :	64
IV.4.4 Les adjuvants :	65
IV.5 formulation des bétons :	65
Chapitre V Méthodologie des essais	
V.1 Introduction :	67
V.2 Rappel sur les matériaux :	67
V.2.1 Les granulats :	67
V.2.2. Le ciment :	68
V.2.3. L'eau de gâchage :	68
V.2.4. Les addition :	68
V.2.5. Les adjuvants :	69
V.2.6 Formulation retenus :	70
V.2.7 Conditionnement et conservations des éprouvettes :	70
V.2.8 Taille des éprouvettes :	71
V.3 Méthodologie d'essais :	71
V.4.1 L'essai d'étalement au cône d'Abrams :	72
V.4.2 L'essai d'écoulement à la L-box ou boîte en L :	73
V.5 Essai résiduels :	75
V.5.1 Essais mécaniques :	75
V.5.1.1 Essai de compression :	75
V.5.1.2 Essai de flexion :	75
V.5.1.3 Module d'élasticité dynamique :	76
V.6 Essais physiques :	77
V.6.1 Porosimétrie à l'eau:	77
V.6.2 Perméabilité :	79
V.6.2.1 Perméabilité à l'air :	79
V.6.2.2 Pénétration à l'eau :	81
V.5 Conclusion :	82

Chapitre VI Résultats et discussions

<i>VI.1 Introduction</i>	83
<i>VI.2 La formulations</i> :.....	83
VI.2.1 Résumé de la méthode Japonaise :	83
VI.2.2 Les données de base :	83
<i>VI.3 Résultats et Analyses</i> :.....	85
VI.3.1 Résultat des essais à l'état frais :	85
VI.3.2 Résultat des essais à l'état durci :	85
VI.3.2.1 Résultat des essais mécaniques :	85
VI.3.2.2 Résultat des essais physique	91
<i>VI.4 Conclusion</i>	95
<i>Conclusion générale</i> :	97
<i>Références Bibliographiques</i>	100
<i>Références Nétographique</i>	104

Introduction générale

Introduction générale

Le béton est le matériau le plus utilisé de nos jours dans le domaine de la construction. Bien souvent, le béton est formulé avec pour données du cahier des charges son ouvrabilité et ses caractéristiques mécaniques. Sa durabilité (c'est-à-dire sa capacité à conserver au cours du temps ses caractéristiques au sein de la structure) commence néanmoins à être prise en compte dans le processus de formulation. Depuis des années, la communauté scientifique étudiant des travaux permettant de mieux comprendre les phénomènes nuisant à la durabilité du béton et des structures en béton armé et de proposer des solutions pour prolonger leur durée de vie.

De nos jours, la construction d'ouvrages d'art conventionnels ou plus exceptionnels est de plus en plus souvent associée à une démarche qualité dans laquelle la durabilité de l'ouvrage revêt un caractère très important. Il est donc nécessaire de pouvoir prédire le comportement des ouvrages à très long terme vis à vis des agressions extérieures dont ils font l'objet (pénétration de chlorures, gel-dégel, actions de sulfates, actions mécaniques répétées telles que celles subies par les structures situées en zone de marnage, ...).

La durabilité constitue l'un des paramètres essentiels dans l'élaboration des ouvrages en béton. Ainsi la formulation des bétons se fait en fonction des sollicitations environnementales auxquelles ils sont soumis.

L'objectif principal de ce travail est d'établir un programme expérimental afin de comparer entre les bétons Autoplaçant et les bétons ordinaires. Nous nous sommes intéressés dans ce travail à la durabilité des bétons

Pour répondre aux objectifs généraux fixés initialement dans le cadre de ce mémoire, l'organisation suivante a été adoptée :

- Un état de l'art regroupant la synthèse bibliographique qui a fait l'objet d'une première partie, elle est scindée dans les trois chapitres premiers, qui décrivent les bétons ordinaires, bétons autoplaçants et durabilité du béton respectivement, .d'autre part à définir le contexte normatif correspondant à l'analyse des techniques et méthodes d'évaluation de la durabilité.
- Le programme expérimental élaboré dans le cadre de ce mémoire est présenté dans la deuxième partie qui regroupe 3 chapitres :

La caractérisation des matériaux retenus pour les travaux expérimentaux sont exposés dans le chapitre IV. Les détails des dispositifs expérimentaux employés sont présentés dans le

chapitre V, Le dernier chapitre (Chapitre VI) synthétisera l'ensemble des résultats de durabilité et de résistance.

Enfin, pour achever notre mémoire une conclusion générale est présentée dans laquelle nous rappelons les principaux enseignements que nous avons pu tirer de ce travail expérimental, aussi quelques perspectives pour de futures travaux sont proposées.

Partie I

Etude bibliographique

Chapitre I

Bétons Ordinaires

I.1 Introduction :

Le béton est un terme générique qui désigne un matériau de construction composite fabriqué à partir de granulats (sable, gravillons) agglomérés par un liant.

Le liant peut être «hydraulique», car il fait prise par hydratation, il est appelé ciment, on obtient dans ce cas un béton de ciment, ou béton tout court. Le liant peut être aussi un hydrocarboné appelé aussi bitume, ce qui conduit à la fabrication du béton bitumineux.

La réaction chimique qui permet au béton (de ciment) de faire prise est assez lente : à peine 75 % de la résistance mécanique finale au bout de 7 jours. La vitesse de durcissement du béton peut cependant être affectée par la nature du ciment utilisé et par la température du matériau lors de son durcissement.

Il est possible de modifier la vitesse de prise d'un béton en lui incorporant à l'état frais des adjuvants (additifs). Il existe plusieurs types d'adjuvants qui permettent de modifier certaines propriétés physicochimiques des bétons. On peut, par exemple, augmenter la fluidité du béton pour faciliter sa mise en œuvre en utilisant des superplastifiants hautement réducteurs d'eau, le rendre hydrofuge par l'adjonction d'un liquide hydrofuge ou d'une résine polymère, ou augmenter la quantité d'air occlus avec un entraîneur d'air. Le béton classique est constitué d'éléments de granulométrie différente mais continue [1].

L'eau joue un double rôle : hydratation de la poudre de ciment et amélioration de l'ouvrabilité. En l'absence d'adjuvant superplastifiant, la quantité d'eau est déterminée par les conditions de mise en œuvre. Un béton contient donc une part importante d'eau libre, ce qui tend à favoriser une forte porosité et donc une faible résistance du béton durci. En ajoutant un superplastifiant, appelé aussi haut réducteur d'eau, la quantité d'eau utilisée décroît et les performances mécaniques du matériau sont améliorées, c'est le cas des bétons à hautes performances (BHP).



I.2 Définition

Pour les bétons ordinaires, les granulats sont des grains de pierres (sable, gravier, cailloux) et le liant est le ciment (généralement un ciment portland) qui fait prise par hydratation. La réaction chimique qui permet au béton de faire prise est lente (50% de la résistance finale au bout de 7 jours). La valeur prise comme référence dans les calculs est celle obtenue à 28 jours (80% de la résistance finale).

Ce type de béton est utilisé pour de très nombreux ouvrages du bâtiment et du génie civil: fondation, structures, murs, ponts...etc. le béton courant est un mélange de plusieurs composants (ciment, granulats, eau) ; qui constituent un ensemble hétérogène ; ils présentent une masse volumique de 2500 Kg/m³ environ [2].

I.3 Propriétés du béton :

Le béton doit être considéré sous deux aspects :

➤ **Le béton frais** : La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité, c'est à dire son aptitude à remplir n'importe quel volume (coffrage, moule...) et à enrober convenablement les armatures. A la clé, une grande liberté de formes.

- La consistance d'un béton est la grandeur qui caractérise son ouvrabilité
- La composition du béton et les moyens de sa mise en œuvre doivent être appropriés
- La teneur en eau doit être limitée au minimum compatible avec les exigences d'ouvrabilité [Net2].

➤ **Le béton 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.

- Une bonne résistance à la compression est la performance souvent recherchée pour le béton durci.
- La durabilité.
- 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 [Net3].

Le béton offre une grande pérennité face aux agressions physico-chimiques du milieu environnant (gel, pluie et pollution atmosphérique...). Il est particulièrement adapté pour la réalisation d'ouvrages devant résister à des conditions difficiles et extrêmes.

- La porosité et la compacité.

- Ces propriétés conditionnent les deux premières. Plus un béton est compact (ou moins, il est poreux), plus ses performances seront élevées et sa durabilité importante.
- On améliore la compacité du béton en optimisant la dimension et l'empilement des granulats et en réduisant la quantité d'eau.
- La tenue au feu.
- La capacité d'isolation thermique et acoustique
- La résistance au choc ^[Net4].

I.3.1 Propriétés de béton frais :

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité qui est la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage complet du ferrailage, L'ouvrabilité doit être telle que le béton soit maniable et qu'il conserve son homogénéité. Elle est caractérisée par une grandeur représentative de la consistance du béton frais. Dans le cas de béton ordinaire elle est principalement influencée par :

- La nature et le dosage du liant.
- La forme des granulats.
- La granularité et la granulométrie.
- Le dosage en eau.

L'ouvrabilité peut s'apprécier de diverses façons et en particulier par des mesures de plasticité, il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité. ^[3-4]

I.3.1.1 Essai d'affaissement ou cône d'Abram's ou Slump-test : (NF P 18-439)

Cet essai est incontestablement un des plus simples et des plus fréquemment utilisés, car il est très facile à mettre en œuvre. C'est un essai essentiellement statique et assez limité dans sa plage de mesure pour les bétons très secs et pour les bétons très fluides. L'appareillage est complètement montré dans la **Figure I.1** et décrit dans la norme NF P 18-439 ^[5].

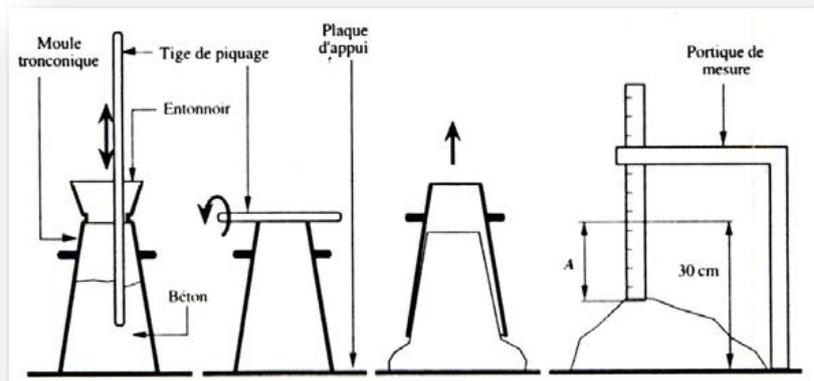


Figure I.1 Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams [6].

- **Classes de consistance du béton :**

Il existe 5 différentes classes de consistance des bétons référencés par la norme NF EN 206-1^[7]. Ces classes sont définies par les essais d'affaissement du béton au cône d'Abrams.

Tableau I.1 Classement des bétons selon la valeur Affaissement au cône d'Abram's.

Classe	Consistance de Béton	Affaissement En mm Au cône d'Abram's
S1	Ferme	10-40
S2	Plastique	50-90
S3	Très Plastique	100-150
S4	Fluide	160-210
S5	Très Fluide	≥220

I.3.1.2 La masse volumique du béton frais :

On mesure la masse volumique du béton frais à l'aide d'un récipient étanche à l'eau et suffisamment rigide. Le béton est mis en place dans le récipient et vibré à l'aide d'une aiguille vibrante, une table vibrante ou un serrage manuel en utilisant une barre ou tige de piquage, après un arasement approprié. Le récipient et son contenu doivent être pesés afin de déterminer la masse volumique qui sera calculée en utilisant la formule suivante ^[5] :

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad Eq (I.1)$$

ρ : est la masse volumique du béton frais (kg/ m³).

m_1 : est la masse du récipient (kg).

m_2 : est la masse du récipient plus la masse du béton contenu dans le récipient (kg).

V : est le volume du récipient en mètre cube (m³).

La masse volumique du béton est arrondie aux 10 kg/m³ les plus proches.

I.3.2 Propriétés de béton 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.

- 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 [5].

I.3.2.1 Résistance à la compression [8] :

Parmi toutes les sollicitations mécaniques, la résistance du béton en compression uniaxiale a été la plus étudiée, vraisemblablement parce qu'elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton, puisqu'elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydratée. De plus, la résistance du béton en compression est presque invariablement l'élément clé lors de la conception des structures en béton et lors de l'établissement des spécifications de conformité.

Un béton est défini par la valeur de sa résistance caractéristique à la compression à 28 jours, f_{c28} . La résistance à la compression du béton est mesurée par la charge conduisant à l'écrasement par compression axiale d'une éprouvette cylindrique de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur ou bien des éprouvettes 10 x 10 x 10 cm. Les éprouvettes sont chargées jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression, La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression calculée.

La résistance à la compression est donnée par l'équation suivante :

$$\sigma_c = \frac{F}{A_c} \quad Eq (I.2)$$

Où :

- σ_c : résistance en compression, exprimée en méga pascal (Newton par millimètres carrés) ;
- F : charge maximale, exprimée en Newtons ;
- A_c : l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée, calculée à partir de la dimension nominale de l'éprouvette.

La résistance à la compression doit être exprimée à 0,5 MPa (N/mm²) près.

I.3.2.2. Résistance à la traction par flexion ^[9] :

Des éprouvettes prismatiques de dimensions 7x 7x 28 cm sont soumises à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs. La charge maximale enregistrée au cours de l'essai est notée et la résistance à la flexion est calculée.

Les mesures sont faites sur une presse qui répond aux normes NF P 18-407 (NA 428) ^[10], munie d'un banc de flexion à 4 points. Pour une charge totale P, le moment de flexion constant entre les deux points d'application de la charge est :

$$M = \frac{P \times a}{2} \quad \text{Eq (I.3)}$$

P : Et la contrainte de traction correspondante sur la fibre inférieure est $f_{tj} = 6 M / a^3$, la relation suivante permet de calculer la résistance ^[5] :

$$f_{tj} = \frac{1.8P}{a^2} \quad \text{Eq (I.4)}$$

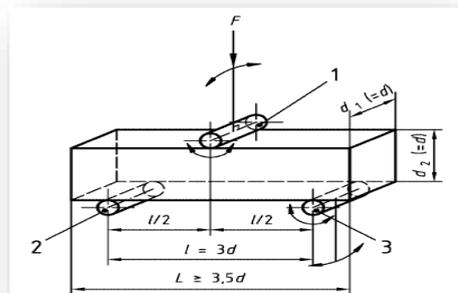


Figure I.2. Presse de flexion utilisée (3 points).

I.4 Constituants des Bétons :

I.4.1 Ciments :

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau et par ce que cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau.

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale.

• En fonction de leur composition :

La norme européenne NF197-1^[11] donne 27 ciments courants, qui sont regroupés en cinq principaux types à savoir :

- CEM I: Ciment Portland (CPA);
- CEM II: Ciment Portland (CPJ);
- CEM III : Ciment de haut fourneau (CHF) ;

- CEM IV : Ciment Pouzzolanique (CPZ) ;
- CEM V : Ciment au laitier et aux cendres (CLC) [12].

I.4.2 Eau de gâchage :

L'eau de gâchage est essentielle pour la fabrication du béton. Elle est ajoutée lors du mélange afin d'hydrater le ciment et permet de lier les constituants du béton entre eux. L'eau rend également le mélange bien plus maniable, ce qui facilite l'application du béton. Élément indispensable pour obtenir du béton, l'eau utilisée doit absolument être propre et ne doit pas être ajoutée avec excès. Si ces deux conditions ne sont pas respectées, notre béton risque d'être fragile et ses performances seront altérées [13].

I.4.3 Granulats :

Les granulats sont définis comme l'ensemble des grains inertes compris entre 0 mm et 40 mm (sable, graviers et cailloux) dont l'origine peut être naturel ou artificiel [NF P 15-010] [14]. Les dimensions de ces granulats varient d'un dixième à plusieurs dizaines de millimètres. La norme française XP P 18-540 donne une définition des principales divisions granulométriques des granulats :

- Sable avec $1 \text{ mm} < D \leq 6,3 \text{ mm}$
- Gravillon avec $d = 1 \text{ mm}$ et $D = 125 \text{ mm}$
- Gravier avec $D > 6,3 \text{ mm}$.

Ils proviennent dans la plupart des cas des roches naturelles. Leur utilisation pour la confection d'un béton est motivée par le faible coût volumique, par une meilleure durabilité et stabilité volumétrique par rapport au mélange ciment-eau. La forme, la texture de la surface et la concentration en granulats influent d'une manière considérable sur le comportement du béton à l'état frais et à l'état durci [13].

I.5 Formulation du béton :

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

La formulation de la majorité des bétons est généralement établie pour atteindre les objectifs suivants :

- la stabilité et la résistance mécanique.
- la résistance aux contraintes externes.
- l'hygiène, la santé et l'environnement.
- la sécurité en cas d'incendie.
- la protection contre le bruit (isolation acoustique).
- l'économie d'énergie et l'isolation thermique [13].

La formulation définit par une méthode de calcul les proportions optimum d'un mélange granulaire. Tous se joueront alors sur la meilleure granularité possible, effectivement, la plupart des méthodes sont fondées sur la recherche d'une courbe granulométrique de référence conduisant à ce minimum de vide inter granulaire. En vérité, il n'existe pas une composition type, mais des méthodes de composition (FAURY, BOLOMEY, VALLETTE, DREUX-GORISSE,...) sont toutes basées sur une adaptation de résultats expérimentaux. Parmi elles, nous utilisons souvent la méthode dite DREUX- GORISSE.

- **Méthode Dreux-Gorisse :**

C'est une méthode pratique qui simplifie et rend la formulation du béton. Plus pragmatique. Elle consiste à rechercher conjointement la résistance à la compression et l'ouvrabilité désirée à partir des données de base essentielles pour la formulation du béton telles que la dimension des granulats (**D**).

La méthode de formulation de Dreux-Gorisse permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau **E**, ciment **C**, sable **S** et gravier **G**) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton. Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton. Il faut déterminer au préalable le rapport **E/C** [15].

I.6. Principaux avantages et inconvénients du béton :

Tableau I.2 Principaux Les Avantages et les Inconvénients de l'Emploi du béton [13].

Les avantages de béton	Les inconvénients de béton
<ul style="list-style-type: none"> • résistance, durabilité, longévité et résilience sans égal • efficacité énergétique maximisée grâce à sa masse thermique • durabilité dans tout environnement 	<ul style="list-style-type: none"> • Faible résistance à la traction. • Le placement d'un revêtement de façade lourd (brique, pierre naturelle...) entraîne des coûts considérables, notamment pour les fondations plus épaisses et les linteaux de fenêtre.

- un matériau de construction qui ne brûle pas, ne rouille pas ou ne pourrait pas.
 - sûreté et sécurité
 - versatilité — il peut être moulé sous toutes formes, couleurs et motifs imaginables
 - n'émet pas de gaz
 - excellente isolation aux vibrations et aux sons
 - faibles coûts d'entretien
- Coffrages nécessaires pour sa mise en œuvre. Sa destruction entraîne un cout élevé (en cas de démolition) et n'est pas ou peu recyclable.
 - Les adeptes d'architecture écologique apprécient moins, même si le béton est entièrement recyclable

I.7.Conclusion :

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

Chapitre II

Bétons Autoplaçants

II.1 Introduction :

En raison de ses propriétés spécifiques, l'étude du béton Autoplaçant (BAP) représente un domaine de recherche qui possède un fort potentiel de développement. Le développement d'un BAP économique ayant des propriétés intéressantes à l'état frais et à l'état durci est important pour qu'un tel béton soit employé dans l'industrie de la construction.

Pour trouver de nouvelles solutions économiques s'ajoutant aux solutions techniques, des recherches sur les BAP économiques ont été conduites au cours de ces dernières années. Cependant, la quantité très importante de l'addition minérale dans la formulation des BAP, nous laisse penser que l'utilisation des ajouts minéraux naturels et économiques semble être l'une des solutions envisageables pour l'avenir des BAP.

La technologie des bétons autoplaçants est capable de consommer d'énormes quantités d'additions, parce que la formulation du BAP comporte une grande quantité de fines (environ 500 kg/m^3). Ces dernières pourraient améliorer les caractéristiques et performances de ce type de béton. Parmi ces additions on note l'utilisation des fines calcaires, des laitiers, de la pouzzolane naturelle et les pouzzolanes artificielles telles que le méta kaolin et la vase issue des dragages des barrages envasés

Dans ce chapitre sont exposés les différents critères qui caractérisent les BAP, à l'état frais, ainsi que l'influence des différentes additions sur les propriétés des BAP à l'état frais et durci [16].



II.2 Historique :

Les chercheurs K. OZAWA ET K. MAEKAWA de Université de Kochi (Tokyo) ont développé le premier prototype de BAP pendant l'été de 1988. Ces résultats ont été présentés par K. OZAWA pour la première fois au 2^{ème} Congrès de l'Asie de l'Est et Pacifique sur le Génie Civil et la Construction, tenu en Janvier 1989 à Chiangmai (Thaïlande). Trois années plus tard, en Mai 1992 au 4^{ème}, Congrès International CANMET & ACI à Istanbul, l'intervention de Ozawa a accéléré la diffusion mondiale du concept de cette nouvelle génération de béton [17].

II.3 Notion du béton Autoplaçant :

Les bétons Autoplaçants (BAP ou SCC en anglais, pour self-compacting concrète) ont été utilisés pour la première fois au Japon vers la fin des années 1980 afin d'améliorer la rentabilité de la construction, d'assurer constamment une mise en place correcte avec un béton de qualité et de diminuer les nuisances sonores. L'idée de la formulation du BAP est liée à l'observation du comportement de béton sous l'eau (ouvrages marins) en utilisant un viscosant afin d'améliorer la cohésion entre les particules du ciment et un superplastifiant pour assurer la fluidité de ce béton ^[18].

Le béton autoplaçant par définition, est un béton très fluide, homogène et stable, qui se caractérise par sa rapidité de mise en place sous l'effet de son poids propre sans apport de vibration externe ou interne. En effet, les bétons ordinaires subissent une réduction de leur ouvrabilité lors du transport et de la mise en œuvre et nécessitent, en général, un apport d'énergie (sous la forme d'une vibration interne ou externe) permettant d'évacuer l'air emprisonné dans le matériau. Les bétons ordinaires de consistance fluide peuvent, dans certains cas, être mis en œuvre sans vibration seulement à l'état durci ils présentent un comportement mécanique et une durabilité plus faibles par rapport aux bétons vibrés ^[19].

Ce qui distingue véritablement les BAP des bétons fluides ordinaires, c'est leur capacité à s'acheminer dans les coffrages tout en conservant leur homogénéité et leur compacité. L'utilisation des BAP offre de nombreux avantages à la pratique de la construction. Globalement, leur utilisation permet d'améliorer les conditions de travail et la qualité des produits finis, ainsi que la possibilité de coulage dans des zones fortement ferraillées, d'architecture complexe et difficilement accessibles. En effet, le risque de blocage peut être réduit en optimisant les mélanges avec une viscosité adéquate. Ceci permet d'assurer une bonne suspension aux particules solides durant l'écoulement. Cela peut se faire en réduisant le rapport eau/liant et/ou en incorporant un dosage adéquat en superplastifiant.

Selon Khayat ^[20], le BAP doit assurer le compromis entre deux propriétés tout à fait contradictoires : une grande fluidité et une grande stabilité.

Un BAP assure en effet, un remplissage complet des coffrages même quand l'accès est gêné par des vides étroits entre les barres d'armatures ou dans des coffrages ayant des formes complexes. Pour se faire, le béton frais doit présenter simultanément, une grande fluidité et une bonne stabilité.

En plus, ces bétons présentent d'autres avantages qui justifient l'intérêt nouveau que leur portent les industriels ^[21] :

- Élimination du besoin de vibration et les nuisances sonores ;
- Réduction du temps de travail ;
- Amélioration du fait de la stabilité de la matrice, de la qualité de l'interface entre la pâte de ciment et les granulats ou les armatures ;
- Amélioration de la qualité d'adhérence à l'interface entre un ancien béton et le BAP de réparation ;
- Après l'élimination des couches du béton endommagé de l'élément structural en le remplaçant par une couche de BAP de réparation, une diminution de la perméabilité et par conséquent, une amélioration de la durabilité peuvent être observées sur cet élément structural. Amélioration de la qualité des parements.

II.4 Domaine d'utilisation des BAP :

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton [22]. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.).

Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation de structures pour lesquelles la mises-en œuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire, présentant des :

- Densités de ferrailage importantes ;
- Formes et géométries complexes : voiles, courbes, ... ;
- Voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts, ... ;
- Voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures ;
- Exigences architecturales et qualité de parement particulière.

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 auto plaçant.

Malgré ça on pourra encourager les entreprises de construction algériennes à utiliser ce type de formulation, d'où l'intérêt pour le développement de l'industrie de la construction en Algérie [23].

II.5 Les avantages et inconvénients des BAP :

Les BAP présentent de nombreux avantages [Net5] :

a) Avantages techniques :

- Facilité et rapidité la mise en œuvre du béton.
- Réalisation d'éléments de forme complexe.
- Bétonnage en milieux fortement ferraillés.

b) Avantages économiques :

- Réduction du cout de main d'œuvre et du temps de bétonnage.
- Absence de systèmes de vibration réduisant ainsi les couts et les nuisances sonores dans et au voisinage du chantier.

c) Avantages écologiques :

- Valorisation des déchets de construction (récupération de ces déchets au niveau des chantiers, industries, carrières, stations de concassage).
- Diminution de la quantité de CO₂ émise par l'industrie cimentaire (due à la réduction de la quantité de ciment nécessaire au BAP).

➤ Comme inconvénients, on distingue :

La composition des BAP implique un dosage délicat des matières premières. Il est donc préférable de faire appel à une entreprise spécialisée pour réaliser ces bétons. La liquidité des BAP est très précise et réclame donc un étroit partenariat entre la société de fabrication et l'entrepreneur du chantier. En effet, suivant le type de coffrage, sa disposition ou sa taille, on préférera plutôt un type de liquidité ou un autre. Cela rajoute donc des contraintes dans les préparatifs du chantier puisque beaucoup de discussions s'imposent. De plus, la rigueur dans les délais est de mise, sans quoi la liquidité du béton peut varier. Cet aspect prend beaucoup plus d'importance que pour les bétons vibrés. Rajoutons à cela que les matières premières en elles-mêmes sont spécifiques et ne sont pas toujours disponibles de stock chez les fabricants [24].

II.6 La structure des BAP :

Pour parvenir au cahier de charges précédentes, les BAP sont formulés différemment des BO voir **la Figure.II.1**. Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau, de l'air et d'une addition minérale, est privilégiée au détriment des gravillons. En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition minérale qui sert de substitut aux gravillons. Cependant, cette formulation n'est pas suffisante pour atteindre la fluidité, il est donc nécessaire d'ajouter aux BAP un défloculant (superplastifiant), sans lequel la demande en

eau du mélange serait trop élevée, d'autres adjuvants chimiques tels que les agents colloïdaux (dits aussi agents de viscosité) peuvent être introduits afin d'empêcher la ségrégation et d'assurer une meilleure stabilité de béton, en revanche, leur utilisation est au contraire peu répandue, car ils engendrent un surcoût, qui s'ajoute à ceux dus au superplastifiant et aux additions minérales, les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie [25].

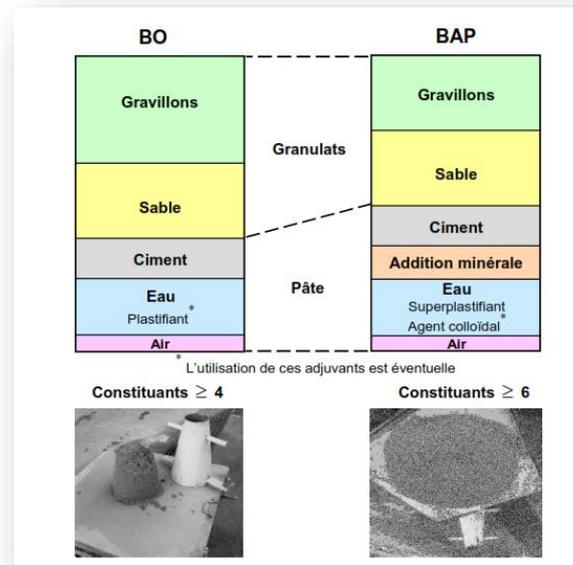


Figure II.1 Comparaison de la structure d'un BAP et d'un BO.

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

- Un volume de pâte élevé,
- Une quantité importante de fines,
- Un faible volume de gravillons,
- Un fort dosage de superplastifiant,
- L'utilisation éventuelle d'agent colloïdal [26].

II.7 Les principaux constituants des BAP :

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

Généralement, on peut diviser les constituants entrant dans la fabrication du BAP, selon leur utilisation, en trois catégories ; les matériaux de base (ciment, granulats et eau de gâchage), les additions minérales, ainsi que les adjuvants chimiques [25].

II.7.1 Matériaux de base :

Les granulats, le ciment et l'eau forment les éléments de base de tous types de béton.

Ils sont qualifiés ainsi puisqu'ils sont historiquement les seuls constituants des bétons de nos ancêtres et parce qu'ils ont toujours les plus grosses proportions relatives dans le mélange de BAP.

a) Les granulats :

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

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

Dans le cas des BAP, les gravillons sont essentiellement caractérisés par leur dimension maximale, cette dimension étant principalement limitée à 20 mm afin d'empêcher le risque de blocage lors de la mise en place. Les gravillons roulés ou concassés peuvent en principe être utilisés. En outre, le sable recommandé à la confection des BAP doit comporter des quantités assez fortes d'éléments fins ($\Phi \geq 0.125$ mm), dans la plage de 4 à 8 %. Ainsi, ses grains passants au tamis de 2 mm doivent être compris entre 38 et 42 % [27]. Cette optimisation de sable permet d'améliorer le comportement rhéologique des BAP, mais elle entraîne un surcoût supplémentaire.

b) Le ciment :

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

c) L'eau de gâchage :

Pour convenir à la confection de BAP, l'eau de gâchage ne doit contenir ni composés risquant d'attaquer chimiquement le ciment, les granulats ou les armatures, ni particules en suspension dont la quantité pourrait modifier ses qualités originelles. À cet effet, une analyse

chimique de l'eau non potable peut être nécessaire pour détecter toute teneur trop élevée en ces impuretés.

II.7.2 Les additions minérales :

L'emploi des pouzzolanes minérales pour faire des mortiers et des bétons est connu depuis l'Antiquité. Ces pouzzolanes désignent un grand nombre d'additions minérales aux origines diverses, mais qui présentent tous, le fait d'être fins et de réagir en présence d'eau et de chaux. De nos jours, des quantités considérables de plusieurs types de ces additions continuent d'être utilisées. Nous présentons ci-dessous les différentes additions minérales éventuelles qu'on peut incorporer dans les compositions des BAP [25] :

a) Les fillers calcaires :

Les fillers calcaires, matériaux fins dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 μm , sont obtenus par broyage ou par pulvérisation des roches calcaires naturelles ou non.

Ils sont généralement considérés comme une addition inerte, mais le fait qu'ils présentent certaines propriétés hydrauliques n'est pas en soi désavantageux, de même que s'ils présentent une réaction avec certains composés développés au cours de l'hydratation [28].

Pour pouvoir être considérés comme un constituant principal du liant, les fillers calcaires doivent présenter une proportion de carbonate de calcium CaCO_3 supérieur à 75 % en masse [29].

b) Les pouzzolanes naturelles :

Les pouzzolanes naturelles, substances finement broyées ont une finesse à peu près identique à celles du ciment, sont généralement d'origine volcanique ou des roches sédimentaires. Elles n'ont pas des propriétés hydrauliques intrinsèques mais, en présence d'eau avec de l'hydroxyde de chaux libéré par le clinker à la cour de son hydratation, elles forment, elles aussi des hydrates stables et peu solubles dans l'eau. Les constituants qui, par le même processus que les pouzzolanes, conduisent également à la formation d'hydrates stables sont réputés avoir des propriétés pouzzolaniques [30].

Les pouzzolanes naturelles sont essentiellement composées de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25 %), d'alumine et d'oxyde de fer [29].

c) Le laitier de haut fourneau :

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau. Après le broyage, il se présente sous forme de nodules dont les diamètres sont compris entre 10 et 45 μm . La composition chimique de laitier comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 et 35 %, de

de l'alumine entre 12 et 30 % ainsi que de la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker [29].

Le laitier granulé broyé est considéré comme un véritable ciment car il suffit d'ajouter un catalyseur activant pour amorcer la prise et le développement des résistances mécaniques [31].

d) La fumée de silice :

La fumée de silice est un sous-produit de l'industrie des alliages de silicium et notamment Ferro silicium récupérée dans les fumées émises par les fours électriques de fabrication de ces produits. Elle se présente sous forme de particules sphériques plus ou moins grisâtres et extrêmement fines dont le diamètre moyen est de l'ordre de 0.1 μm (100 fois plus petits que ceux du ciment) [29]. Sa composition chimique doit contenir au moins 85 % de dioxyde de silicium SiO_2 . La fumée de silice possède des propriétés pouzzolaniques s'avérant plus élevées que celles des pouzzolanes naturelles en raison de sa forte teneur en silice amorphe.

II.7.3 Les Adjuvants chimiques :

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

L'utilisation des adjuvants avait commencé déjà du temps des Romains et des Grecs qui les ajoutaient au mélange de la chaux et des pouzzolanes pour édifier leurs constructions [32]. À cette époque les adjuvants du béton étaient le sang et le blanc d'œuf.

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

Dans cette section, on s'intéressera seulement aux adjuvants modifiant la rhéologie des BAP puisque cette catégorie d'adjuvants a servi de base aux présents travaux de recherche. Dans cette catégorie d'adjuvants, il existe deux types bien distincts : le premier est celui des super-plastifiants et le second celui des agents colloïdaux [25].

a) Super-plastifiants :

La fluidité des bétons autoplaçants est obtenue en ajoutant des super-plastifiants. Ces fluidifiants sont identiques à ceux employés pour les autres types de béton, à savoir des polymères de type poly carboxylate, polyacrylate/polyacrylate ester acrylique. Les super-

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

Le niveau élevé de l'ouvrabilité requis par les bétons autoplaçants tout en maintenant la stabilité du mélange a mené à l'utilisation d'un certain nombre d'adjuvants dans le béton. La demande élevée en eau pour réaliser une fluidité requise par le béton autoplaçant, était impraticable compte tenu du dosage très élevé de ciment qui était souvent requis pour les résistances à la compression souhaitées. L'arrivée des super-plastifiants et la technologie de développements de ces adjuvants, ont joué un rôle essentiel dans le développement des bétons autoplaçants. Les super-plastifiants modernes (basés sur les éthers poly carboxyliques) favorisent la conservation de la fluidité souhaitée tout en maintenant la stabilité du mélange béton. Ces supers plastifiants réalisent ce qui est montré dans la **Figure.II.2**, avec un mécanisme de répulsion électrostatique en combinaison avec l'obstacle stérique. Le mode d'action des superplastifiants est extrêmement complexe. Il peut être expliqué comme suit ^[33] :

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

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

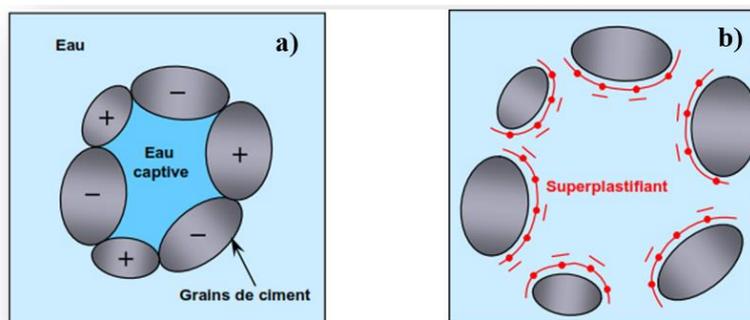


Figure II.2. (a) Pâte de ciment non adjuvante, (b) Pâte de ciment additionnée d'un superplastifiant.

b) Autres additions :

En plus des additions minérales indispensables caractérisant la composition de la pâte de ciment du BAP, les additions inertes suivantes sont aussi parfois utilisées :

- les pigments pour la coloration d'éléments architectoniques
- les fibres d'acier comme armature constructive
- les fibres de polyéthylène (fibres PE) pour améliorer la résistance au feu
- les fibres de polyéthylène ne (fibres PP) pour empêcher les fissures de retrait plastique.

II.8 Propriétés des BAP à l'état frais :

Les propriétés générales d'un béton autoplaçant frais sont la fluidité et l'homogénéité. Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques : le remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité à passer à travers les obstacles que nous appellerons capacité de passage ^[34].

a) Le remplissage :

Le remplissage du béton, ou la déformabilité, est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le béton autoplaçant est capable de remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné, en se déformant sous l'effet de son propre poids, et sans sollicitations.

Le remplissage est observé sous deux aspects, la capacité de remplissage et la vitesse de remplissage, le premier aspect est lié à la capacité de déformation du béton, il traduit le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace, le second est lié à la vitesse de déformation, il traduit ainsi la vitesse d'écoulement du béton, le test d'étalement au cône d'Abrams donne des indications sur les deux aspects ^[23].

b) La résistance à la ségrégation :

La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité dans la distribution des constituants ce qui provoque généralement une séparation de phases solide et liquide ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions ^[35].

La ségrégation peut donc se manifester dans un béton de façons différentes, comme la séparation entre la pâte et les granulats, la séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinées, et une répartition non homogène de l'air occlus. Pour éviter la ségrégation, il faut réduire la quantité d'eau libre dans le béton en réduisant le rapport E/C du béton. La résistance à la ségrégation du béton peut aussi être augmentée en élevant la viscosité de l'eau dans la suspension, avec certains agents de viscosité.

c) La capacité de passage :

Le béton autoplaçant doit réunir à la fois la fluidité (la capacité de remplissage) et la résistance à la ségrégation pour produire un bon écoulement. Cependant, dans les milieux confinés, il faut que le béton puisse s'écouler dans les espaces étroits et entre les armatures.

En effet, le blocage des granulats est provoqué par la quantité importante de granulats dans le béton, et par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armatures ou dans un confinement [23].

Donc, un béton est qualifié d'autoplaçant s'il satisfait les propriétés citées ci-dessus, en trouvant le bon compromis entre des caractéristiques presque contradictoires : fluidité et résistance à la ségrégation.

Pour résumer, on présente les propriétés des BAP, les moyens de les obtenir et les actions entreprises pour leur mise en œuvre dans le tableau II.1.

Tableau II.1 : Propriétés d'ouvrabilité des BAP.

Propriétés D'un BAP	Moyens D'obtention	Actions A Mener Dans La Formulation
REMPLISSAGE (FLUIDITE)	Réduction des frictions entre les particules	Augmentation des volumes de pate
	Optimisation de la pate	Utilisation des superplastifiants Optimisation du rapport e/c
RESISTANCE A LA SEGREGATION	Réduction de l'eau libre dans le béton	Réduction du rapport e/c
		Utilisation des matériaux de grande surface Utilisation d'agent de viscosité
RESISTANCE A LA SEGREGATION	Réduction de la séparation de phases	Réduction du rapport e/c
		Utilisation d'agent de viscosité Réduction de la taille maximale des granulats
CAPACITE DE PASSAGE	Réduction de blocage des granulats	Réduction de volume de gravier
		Réduction de la taille maximale des granulats

L'ouvrabilité des bétons autoplaçant se décompose en trois caractéristiques ;

- La mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement) ;

- La mobilité en milieu confiné (décrit par la boîte en L) ;
- La stabilité (résistance à la ségrégation et au ressuage) [36].

II.9 Caractérisation des BAP à l'état frais :

II.9.1 Essai d'étalement :

L'essai d'étalement s'est imposé comme l'essai le plus facile à réaliser, il permet de mesurer la consistance d'un béton. Cet essai s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams (**Figure II.3**).

Cependant l'affaissement étant toujours supérieur à 25 cm, on mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute, ainsi que le temps nécessaire à l'obtention du diamètre d'une galette de 50 cm de diamètre. Cette dernière valeur donne une indication sur la viscosité du matériau. Une observation permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. Cet essai réalisable sur chantier ne nécessite qu'un petit échantillon de béton. Une valeur de 60 à 75 cm est en général visée pour obtenir un BAP [37].

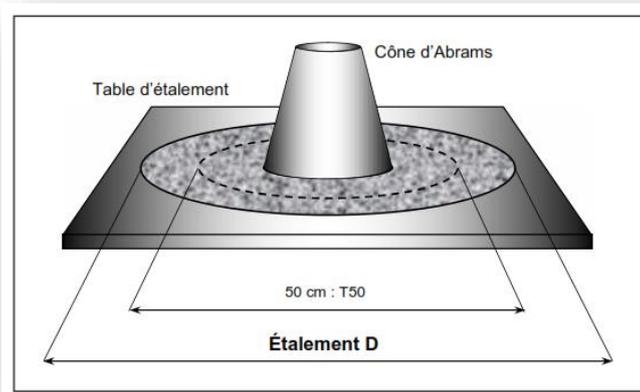


Figure II.3. Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow).

Des observations complémentaires peuvent aider à appréhender certaines propriétés à l'état frais des bétons autoplaçants :

- Un ressuage peut être détecté si de l'eau est présente en grande quantité sur les bords de la galette,
- En traçant à la truelle des lignes dans la « galette », on peut vérifier si le béton se referme bien, ce qui est synonyme de bon comportement,
- La fluidité du béton peut être évaluée en mesurant les temps de passage du béton aux diamètres 50 et 60 cm durant un écoulement au cône,

- Une forme bombée de la « galette » traduit un effet de voûte, ce qui peut nuire à l'homogénéité du béton.

Toutes ces indications sont plus ou moins subjectives mais aident la formulation, expérimenté à effectuer certaines corrections en vue d'obtenir un béton qui correspond plus à ses attentes.

II.9.2 Essai de la boîte en L (L-box test) :

Tout comme l'essai à l'anneau Japonais, cet essai permet de caractériser la mobilité en milieu confiné, c'est-à-dire la ségrégation dynamique.

La partie verticale du L (**Figure.II.4**) est remplie de béton en une seule fois. Après ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers un ferrailage standard (39 mm entre 3 barres $\varnothing 14$) qui correspond à des ouvrages très ferrillés mais qui peut être éventuellement allégé (58 mm d'espace libre entre deux barres).

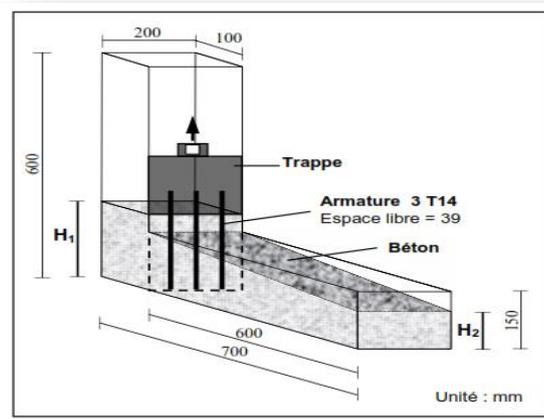


Figure II.4. Essai de la boîte en L (L-box test)

Pour que le béton autoplaçant soit accepté, le taux de remplissage de la boîte en L (rapport des hauteurs H/L_{\max}) doit être supérieur à 0,8. Des temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour apprécier la viscosité du béton [37].

II.9.3 Essai de stabilité au tamis :

Appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçants, il vise à qualifier les bétons Autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation (Figure II.5). 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 [34].

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. Il consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (P_{laitance}) d'un échantillon de béton ($4,8 \pm 0,2$ kg) passant à travers un tamis de 5 mm.

Les critères d'acceptabilité d'une formulation d'un béton autoplaçant sont divisés en trois classes ^[37] :

- $0\% \leq \% P_{\text{laitance}} \leq 15\%$: stabilité satisfaisante,
- $15\% < \% P_{\text{laitance}} \leq 30\%$: stabilité critique : essai de ségrégation à réaliser in situ,
- $\% P_{\text{laitance}} > 30\%$: stabilité très mauvaise : ségrégation systématique, béton inutilisable.

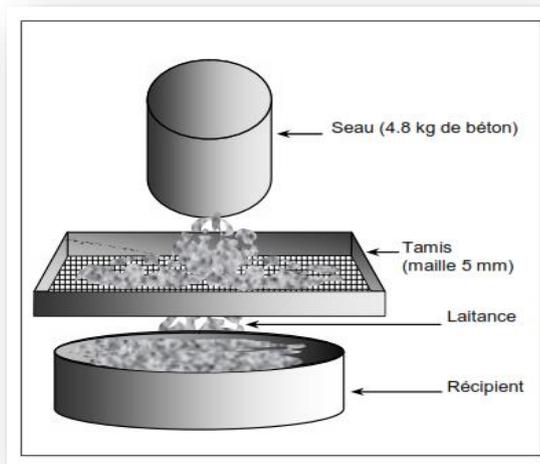


Figure II.5. Essai de stabilité au tamis.

II.9.4 Essai d'entonnoir (V-Funnel NF EN 12350-9) :

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante, l'entonnoir dont les dimensions sont définies sur la figure suivante est remplie de béton jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé. Ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton autoplaçant. Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement compris entre 8 et 14 secondes est recommandé pour le BAP ^[38].

Le temps d'écoulement au V-Funnel dépend également du type d'application, mais n'est groupé que selon 2 classes :

- Classe VF1 : temps d'écoulement inférieur à 10s.
- Classe VF2 : temps d'écoulement compris entre 7 et 27s.

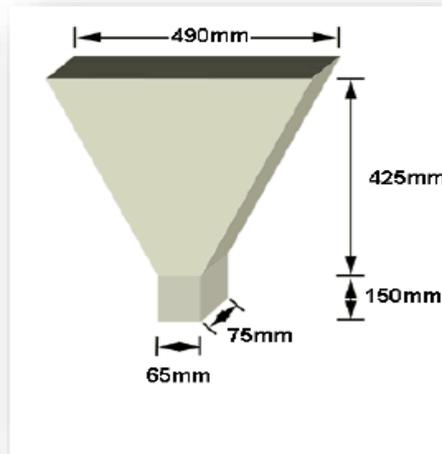


Figure II.6. L'essai V-funnel.

II.9.5 Essai de ressuage :

La capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié (développé par le LCPC, Figure I .15) : le volume d'eau libéré par l'échantillon de béton remonte au-dessus du perchloroéthylène (dont la densité est supérieure à celle de l'eau : 1,59) dans une colonne graduée où il est facile de l'estimer ^[39], ce test semble cependant peu pratique à être utilisé étant donné la nocivité du produit employé.

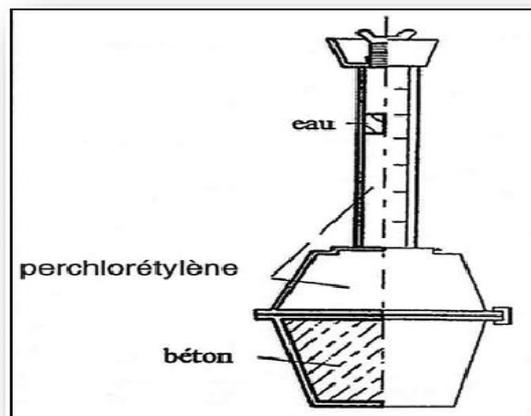


Figure II.7 L'essai V-funnel.

II.9.6 Essai J-Ring :

Cet essai consiste à faire écouler le béton au travers de barres d'armatures afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage, le béton s'écoule à partir du cône disposé au

centre d'un anneau métallique (**Figure II.8**), on caractérise donc la tendance à la ségrégation et l'enrobage d'armatures, de plus, la répartition des granulats doit être homogène [38].

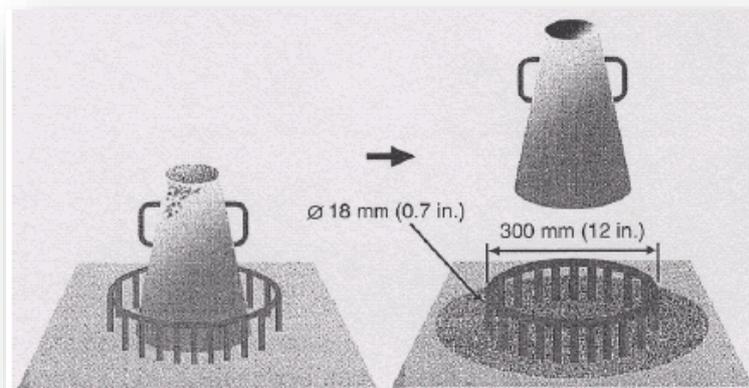


Figure II.8. Essai J. Ring.

II.9.7 Essai à la boîte en U (U-Box) :

Il est utilisé au Japon et en Angleterre, le principe est sensiblement le même que pour la boîte en L, le béton doit s'écouler à travers des armatures et remonter dans la deuxième partie du U de la boîte, une hauteur de remplissage supérieure à 300 mm est requise [40].

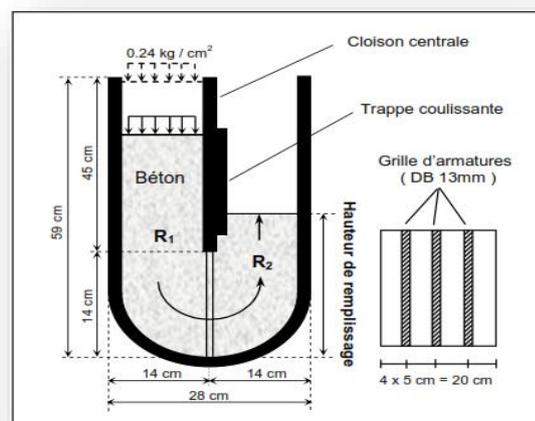


Figure II.9. Essai de la boîte en U.

II.9.8 Essai à la colonne :

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

Il s'agit de remplir une colonne et de laisser le matériau au repos pendant 1min, après cette phase de repos, la colonne est vibrée à l'aide d'une table à secousses, les échantillons des

différentes parties de la colonne (haut, milieu, fond) sont prélevés, chaque prélèvement est lessivé et tamisé afin de ne récupérer que les gros granulats qui sont ensuite pesés [40].

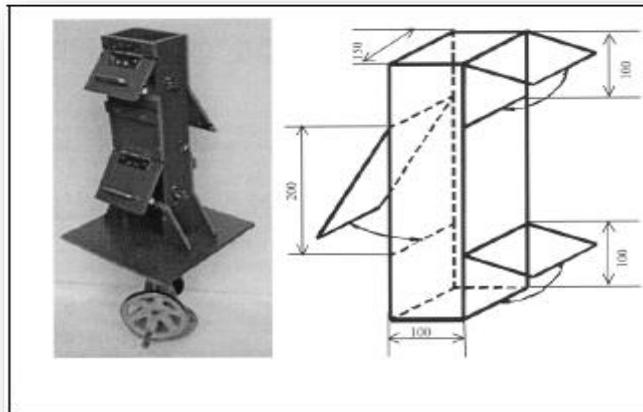


Figure II.10. Essai de stabilité à la colonne [41].

Le critère de stabilité de cet essai est le suivant :

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

Cet essai permet d'obtenir une certaine appréciation de la ségrégation (gradation de la ségrégation). Le principe est simple et les résultats sont obtenus directement. Cependant, la réalisation d'un essai nécessite un appareillage spécifique (colonne et balances pour les pesées) et prend du temps [40].

II.9.9 Essai à la bille:

L'essai a été développé au LCPC en collaboration avec l'Université de Sherbrooke par Trudel et repris par Sedran [42], il s'agit de mesurer l'enfoncement d'une bille de même dimension que les gros granulats, immergée dans un échantillon de béton (Figure. II 11), la densité apparente de la bille peut être ajustée grâce à un contrepois et le déplacement de la bille est mesuré par un capteur LVDT relié à un ordinateur. Les résultats sont donc obtenus directement [40]

II.10 Caractérisation d'un BAP à l'état durci (destructif et non destructif) :

Le béton doit être soumis à différents essais mécaniques de caractérisation :

- a) Les essais destructifs :
 - Les essais de compression ;

- Les essais de traction par flexion ;
 - Module d'élasticité
- b) Les essais non destructifs :
- Essai au scléromètre
 - Essai d'auscultation dynamique

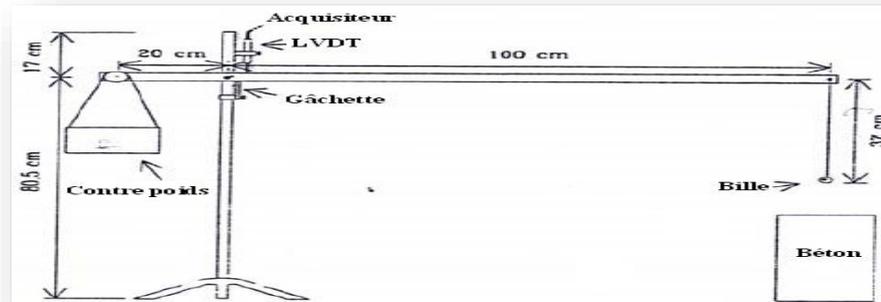


Figure II.11. Essai à la bille développé par Trudel^[42].

A) Les essais destructifs du béton :

II.10.1 Les essais de compression :

Les essais de mesure de la résistance à la compression sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques 16x32 cm conformément aux prescriptions de la norme ou bien des éprouvettes 10x10x10 cm. Ce test fournit la force de compression [N] qui génère la rupture de l'échantillon.

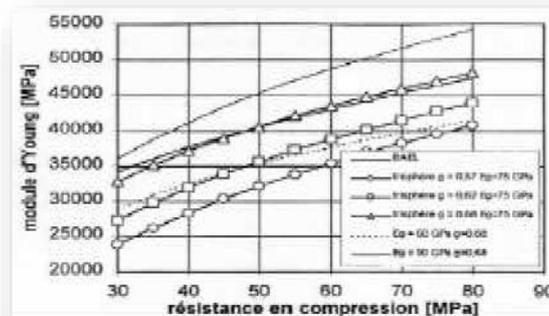


Figure II.15. Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire



Figure II.12. Mesure de la résistance à la compression.

II.10.2 Les essais de traction par flexion :

Cet essai très utilisé permet de simuler le type de sollicitation le plus courant dans les éléments des ouvrages (Figure II.13). Les éprouvettes utilisées pour ce type d'essai sont propres uniquement aux mortiers, elles sont prismatiques de dimensions 7x7x28 cm. La résistance à la traction par flexion est obtenue par l'application de la formule de résistance des matériaux suivante : $\sigma = \frac{M_f \cdot a}{2I}$, avec le moment de flexion :

$$M_f = \frac{F \cdot L}{4} \quad \text{Eq (II.1)}$$

Où F est la charge de rupture, L la portée, I l'inertie de flexion, et a le côté du prisme [23].



Figure II.13. Mesure de la résistance à la traction par flexion.

II.10.3 Module d'élasticité :

Les différents matériaux de BAP peuvent montrer un différent comportement de relation contrainte-déformation si les BAP contiennent une basse quantité de gros granulats on se réfère à la formule réglementaire du module ($E_{ij} = 11000f_{cj} / 1/3$), celui-ci ne dépend que de la résistance du béton, ainsi, à résistance égale, un béton autoplaçant aurait donc le même module qu'un béton vibre.

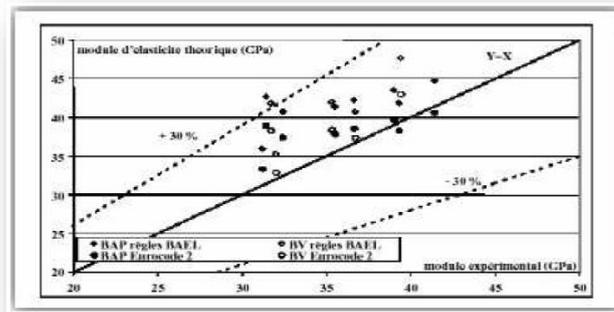


Figure II.14. Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales.

Certains auteurs ont trouvé que le module élastique de BAP coïncide bien avec celui de BV avec des propriétés similaires quand la résistance est constante [Person 03], les mêmes résultats trouvés par. [43].

Par contre, le module élastique de BAP est inférieur à celui de BV donc le BAP est plus rigide [36]. On a trouvé qu'avec une résistance donnée le module élastique de BAP est inférieur à celui de BV, ce comportement est dû à la petite dimension de grains de BAP et la quantité élevée de pâte de ciment. En effet, dans un béton formulé avec des granulats classiques, le module de la matrice (6000-25000 MPa) est environ de 3 à 15 fois plus faible que celui des granulats E_g (60000 à 100000 MPa) [43].

B) Essais non destructifs du béton :

➤ Définition :

Les problèmes de qualité rencontrés dans les structures en béton apparaissent à différentes phases de la réalisation des ouvrages, c'est pour cette raison que depuis longtemps il y a une demande accrue pour des méthodes plus précises et, en même temps, plus souples d'évaluation de la qualité du béton.

Le contrôle par essais destructifs nécessite la confection d'éprouvettes prélevées représentant un échantillon. Ce contrôle ne peut être effectué à 100 % ou tout au moins sur un

échantillonnage significatif. De plus, l'échantillon prélevé n'est pas toujours représentatif du béton de la structure réelle. Ainsi, pour répondre à ces problèmes, on a développé une gamme d'essais in situ appelés « Essais non destructifs » venant compléter les essais destructifs.

Les essais non destructifs consistent à prendre des mesures qui n'endommagent pas les constructions, Ils représentent des méthodes de reconnaissance couramment appliquées aux structures de bâtiments [23].

Les essais non destructifs peuvent jouer un rôle exceptionnel dans la garantie de la qualité du béton et dans le développement ultérieur de la technologie de construction. La signification de ces essais se développera considérablement à l'avenir, parce que sa technologie de mesure automatisée et la réduction de la taille de l'appareillage de mesure ouvriront des applications entièrement nouvelles.

➤ **But d'utilisation :**

Ces essais sont rapides et faciles à mettre en œuvre, et apportent de surcroît une réponse globale à l'échelle d'une structure ou d'un ouvrage, dans le cadre de contrôles d'ouvrages neufs ou en construction comme de diagnostics d'état d'ouvrages anciens.

➤ **Principaux domaines d'application :**

Les essais non destructifs permettent de contrôler la qualité de la construction et mesurer de façon indirecte les caractéristiques des matériaux à savoir :

- La résistance
- L'homogénéité
- La porosité
- La durabilité...

➤ **Avantages de ces méthodes réside dans :**

Les méthodes non destructives présentent les avantages suivants :

- La performance ou l'apparence de la structure n'est pas modifiée ;
- La possibilité de suivre le changement des propriétés du béton dans le temps ;
- Une plus grande sécurité, et une meilleure planification de la construction ;
- Une progression plus rapide et plus économique.

II.10.4 Essai d'auscultation dynamique :

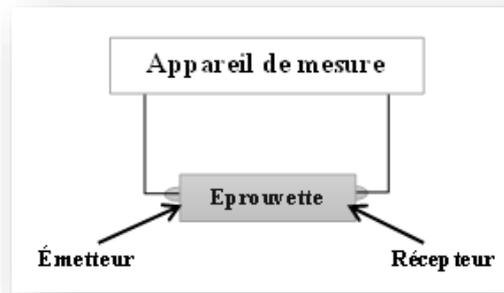


Figure II.16. Appareil de mesure

➤ **Mode Opérateur**

- Poncer et égaliser la partie de la surface de l'élément à ausculter ou le transducteur sera Fixé,
- Employer un matériau intermédiaire entre les deux et en prenant soin de vérifier que l'appareil est bien appliqué contre la surface à tester à l'aide d'un matériau d'interposition comme la vaseline, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de glycérol.

➤ **Points de mesures :**

Le nombre de points de mesures dépend des dimensions de l'ouvrage à tester. Pour un grand panneau (dalle, voile, radier, etc.) les points de mesures sont situés aux intersections d'un quadrillage d'une maille de 0.5m. Le cas des petits éléments (poteaux, poutres, etc.), les mesures se font en six points.

➤ **Manières de mesure :**

La détermination de la vitesse de propagation des ultrasons se fait de trois manières, suivant le type de l'élément à tester.

➤ **Mesure en transparence (directe) :**

Les mesures en transparence sont utilisées dans le cas des éprouvettes, des poteaux ou de certaines poutres. Les transducteurs sont appliqués sur les deux faces de l'élément à tester. Figure II.17.

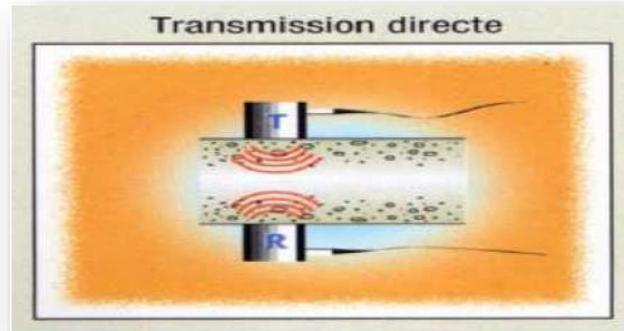


Figure II.17. Mesures en transparence.

➤ **Mesures en surface (indirecte) :**

Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les dalles et éléments en longueur figure II.18.

L'émetteur est maintenu en un point fixe, le récepteur est déplacé successivement à des distances marquées à l'avance.

Après avoir relevé le temps correspondant à un point considéré, on passe au point suivant :



Figure II.18. Mesures en surface

II.11 Formulation des BAP :

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

propriétés des BAP sont contradictoires ; un béton riche d'une pâte fluide est très sensible à la ségrégation [25].

Depuis l'invention du BAP, aucune méthodologie pratique de formulation n'a été établie. Les différentes propriétés recherchées rendent la formulation du BAP relativement compliquée. De multiples approches se sont développées à travers le monde pour la formulation d'un BAP. Nous rapportons un exposé général sur les approches principales [24].

II.11.1 Méthode japonaise :

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kochi (1990), se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Les principes de formulation et leur application sont les suivants :

a). **Dosage des gravillons** : Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m³ de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides. Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

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

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

d). **Dosage de l'eau et du super plastifiant** : Les dosages en eau et en super plastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir. [24].

II.11.2 L'approche suédoise :

Cette méthode est basée sur la méthode japonaise citée ci-dessus, le principe est d'intégrer l'approche de l'évaluation du risque de blocage dans le processus de formulation. Pour chaque rapport G/S on estime le volume de pâte critique pour le blocage, on retiendra ensuite le rapport G/S qui vérifie les propriétés rhéologiques recherchées. Les dosages des fines, de l'eau et du superplastifiant sont ajustés pour avoir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement, et une résistance souhaitée. Cette approche permet une meilleure optimisation du squelette

granulaire. Cependant, on ne peut pas appliquer le critère de blocage à n'importe quel type de granulats [24].

II.11.3 Formulation par volume de pâte minimal :

Dans cette méthode le béton est considéré comme un matériau biphasique, une phase solide constitué par les granulats et une phase liquide qui est la pâte (eau, liant, adjuvants). Les chercheurs supposent que la pâte joue deux rôles principaux dans un BAP : D'une part, elle assure la fluidité du mélange, ce qui limite les frottements entre les granulats, d'autre part elle écarte les gravillons pour éviter le phénomène de blocage. Pour assurer ces deux rôles les chercheurs jugent qu'il doit exister un volume minimum de pâte [44].

II.11.4 Formulation par optimisation du squelette granulaire :

Sachant que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte et que l'ouvrabilité est tributaire de l'arrangement du squelette granulaire. La formulation des bétons est basée sur l'optimisation de la porosité du système, en prenant en considération tous les grains solides, du ciment aux gravillons. Si la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains est importante, plus la suspension est fluide. A quantité d'eau constante, si on minimise la porosité de l'empilement de grains, on optimise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange. Cet exemple simple montre donc le lien entre compacité et rhéologie [44].

II.11.5 Méthode basée sur un plan d'expérience :

Le principe de cette méthode est l'utilisation d'un plan d'expérience pour connaître l'effet des paramètres de composition du béton. Khayat et al ont réalisé une telle étude avec les facteurs suivants :

Le volume de gravillons, la masse de fines (C+A), le rapport massique eau sur fines $E/(C+A)$, la masse de superplastifiant et la masse d'agent de viscosité. Chaque facteur est varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre de compositions effectuées à 25. Au final, les modèles obtenus sont fournis avec les résultats des essais, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs. Même si ces modèles ne sont exploitables que pour les constituants utilisés dans l'étude, cette approche fournit surtout un support pour corriger une formule ne répondant pas, par exemple, aux critères de l'AFGC.

II.12 Conclusion :

Cette synthèse bibliographique a été menée afin de se familiariser avec les bétons autoplaçants,

L'objectif étant de les définir, ainsi que leurs multiples propriétés, les caractériser, et résumer les principales méthodes de leur formulation.

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 à l'état frais sont :
- Fluidité et viscosité élevées, sans aucune tendance à la ségrégation
- Capacité de passage dans les milieux confinés

Excellente aptitude au remplissage des moindres recoins du coffrage par un béton homogène, même en présence de ferrailage dense. Le fastidieux travail de vibration est ainsi supprimé.

Un béton est qualifié d'autoplaçant lorsque ces trois critères sont vérifiés. Ainsi, un grand nombre de tests empiriques sont développés pour caractériser le béton vis-à-vis des propriétés d'ouvrabilité.

Chapitre III

Durabilité des bétons

III.1 Généralités :

Un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques...), c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant... tout en conservant son esthétique. Il doit satisfaire, sans perdre ses performances, aux besoins des utilisateurs au cours du temps. Il devient possible de définir des objectifs de durabilité et de choisir avec précision les caractéristiques du béton en fonction de l'agressivité du milieu dans lequel se trouve l'ouvrage et d'optimiser ses caractéristiques afin de les adapter à la durée d'utilisation souhaitée.

Les spécifications concernent la nature et le dosage minimal en ciment, la compacité minimale, la valeur maximale du rapport Eau/Ciment, l'enrobage minimal des armatures et la teneur maximale en chlorures dans le béton.

Les connaissances actuelles sur les ciments et les bétons permettent d'optimiser et d'adapter la composition et la formulation des bétons aux contraintes environnementales auxquelles ils seront soumis, tout en respectant les critères de performances mécaniques.

Les ouvrages en béton disposent aujourd'hui d'un support normatif complet, constitué de normes européennes et de référentiels français. Cet ensemble de textes couvre :

- Le dimensionnement des ouvrages en béton.
- Les constituants du béton : la norme NF EN 197-1 pour les ciments, les normes NF EN 12620 et XP P18-545 pour les granulats et la norme NF EN 934-2 pour les adjuvants),
- La durabilité des bétons : norme NF EN 206-1, fascicule de documentation FD P18-011, recommandations sur l'alcali-réaction, le gel-dégel, la réaction sulfatique interne.
- Les produits en béton : norme NF EN 13369.
- L'utilisation du béton dans les ouvrages : Fascicule 65A, DTU....

Ces normes et référentiels se complètent de manière cohérente et permettent in fine de mieux appréhender et de mieux maîtriser la durabilité des structures en béton ^[45].

Malgré les aspects intéressants que proposent les bétons autoplaçants, en particulier à l'état frais, et leur utilisation en constante augmentation, ils ne disposent pas encore du recul nécessaire et suffisant pour être acceptés par tous les maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre, ce qui limite encore leur diffusion ^[46].

Pour encourager l'utilisation des bétons autoplaçants, plusieurs études sur les différents aspects de la durabilité des bétons autoplaçants comme la perméabilité à l'oxygène ^[47], la

diffusion des ions chlore [48,49], la carbonatation accélérée [49,50], la lixiviation [51],..., ont été menées depuis quelques années.

L'objectif de notre étude est de contribuer à la connaissance du comportement des bétons autoplaçants face à l'attaque sulfatique externe. Les résultats pourront contribuer, à l'établissement des normes européennes dans ce domaine et au développement de ce nouveau matériau auprès des acteurs de la profession du BTP.

III. 2 Introduction :

Avec les caractéristiques mécaniques présentées dans le chapitre précédent, les propriétés de durabilité des bétons sont aussi d'une importance capitale. En effet, bien que la résistance mécanique ait été choisie comme critère d'équivalence entre les divers bétons, l'objectif de cette étude concerne l'estimation de la durabilité des bétons autoplaçants.

La durabilité peut être, donc, définie comme la résistance du béton aux agressions chimiques ou physiques, en maintenant son comportement et ses performances dans de bonnes conditions de service prévues pour l'ouvrage. Généralement, les agressions chimiques sur le béton affectent d'abord la pâte de ciment. Le béton, le mortier ainsi que la pâte de ciment hydraté, peuvent être considérés comme des matériaux multiphasiques composés d'une phase solide (squelette poreux comme les granulats et hydrates) et d'une phase liquide (solution interstitielle) et d'une phase gazeuse (air sec, vapeur d'eau, CO₂ ...) se trouvant à l'intérieur du matériau solide [52].

III.3 Facteurs Influençant la durabilité :

La durabilité peut être altérée par diverses actions physiques ou chimiques néfastes qui font intervenir l'écoulement de fluides (liquides ou gaz) à travers le béton. Par conséquent, la caractérisation dimensionnelle et la comparaison des BAP avec les bétons vibrés nécessitent la détermination de certaines propriétés physico-chimiques.

Le mécanisme de dégradation chimique du béton consiste à une décalcification progressive du béton au cours du temps en contact avec un environnement agressif. Cette dégradation provoque une augmentation de la porosité du béton qui modifie ces propriétés physicochimiques et mécaniques.

D'une part cette augmentation de porosité accélère le processus de transport (perméabilité ou diffusion) de matières et entraîne une accélération de la dissolution des hydrates (notamment la portlandite). D'autre part, ceci induit une modification des propriétés mécaniques comme la perte de résistance et la perte de rigidité. En plus, les sollicitations mécaniques créent des microfissures qui peuvent être des facteurs accélérant le processus de dégradation chimique.

La perméabilité, la diffusion et l'absorption sont les trois principaux processus qui peuvent amener des substances agressives à pénétrer dans le béton et affecter ses qualités mécaniques et protectrices (à l'égard de la corrosion des armatures principalement). La perméabilité concerne le transfert de matière dû à un gradient de pression, la diffusion est le mécanisme par lequel un fluide se déplace sous l'action d'un gradient de concentration et l'absorption est le résultat de différence de tension de surface dans les capillaires. D'autre part, les trois fluides naturels qui peuvent se déplacer selon les processus mentionnés ci-dessus et remettre en cause la durabilité du béton sont : l'oxygène, l'eau (contenant ou non des ions agressifs) et le dioxyde de carbone.

La durabilité du béton dépend donc de sa capacité à résister à la pénétration de ces fluides à l'intérieur du matériau suivant les trois mécanismes d'écoulement possibles.

Bien que dans la réalité les différents mécanismes de transfert agissent simultanément, ceux-ci sont examinés (en laboratoire) séparément afin d'apprécier les propriétés fondamentales en jeu. Différents essais ont donc été réalisés pour quantifier les propriétés révélatrices de ces processus de dégradation physico-chimique du matériau BAP. La durabilité en général est relative aux paramètres de composition en terme de compacité et de nature chimique du liant (et de la minéralogie des granulats pour l'alcali-réaction). Les règles applicables pour les bétons courants restent donc normalement applicables aux BAP (norme XP 18-305 maintenant NF EN 206-1).

Les données de la littérature dans ce domaine concernent la microstructure des bétons autoplaçants, la perméabilité (aux gaz), la migration des ions chlore, l'absorption d'eau, la carbonatation et leur résistance au gel – dégel, la pénétration d'agents agressifs qui peut conduire à l'amorçage (et au développement) du processus de corrosion des armatures, Les réactions chimiques internes, mettant en jeu des espèces issues du milieu environnant ou déjà présentes dans le matériau, telles que l'alcali-réaction ou les attaques sulfatiques, sources de gonflement et de fissuration du béton. Les caractéristiques microstructurales des BAP sont principalement influencées par :

- Un volume de pâte élevé,
- La présence d'additions en quantité importante,
- Un réseau de bulles d'air plus ou moins dense.

L'influence des additions sur la matrice cimentaire dépend de la taille des particules, de leurs compositions chimiques et minéralogiques. Les plus fines d'entre elles permettent d'accroître la compacité du squelette granulaire et aussi de diminuer l'épaisseur et la porosité

des auréoles de transition (interfaces pâte – granulats, zone plus poreuse avec des pores plus gros). En ce qui concerne la densité du réseau de bulles d'air, celle-ci dépend de l'utilisation ou non d'un entraîneur d'air spécifique mais également de l'effet entraîneur d'air du superplastifiant et/ou de l'agent de viscosité utilisés. La durée de malaxage est également un facteur important : un malaxage prolongé peut multiplier par deux le volume d'air occlus [45].

III.4 Durabilité et économie :

La durabilité est un objectif de qualité pour l'ingénieur, et le métier de ce dernier consiste à atteindre les objectifs fixés au moindre coût. Il en résulte deux règles qui permettent de concilier au mieux économie et durabilité.

Règle 1 : l'expérience du temps : Toute innovation doit être évaluée par comparaison avec ce qui est connu pour avoir subi avec succès l'épreuve du temps.

Règle 2 : la communication des règles de comparaison : Les règles de comparaison entre l'innovant et le traditionnel doivent donner lieu à une délibération intra et interprofessionnelle en vue de déterminer celle qui, à chaque époque, paraissent les mieux adaptées.

De nos jours, l'application de la **règle 1** se fait principalement dans les laboratoires et la règle 2 se traduit par l'élaboration de normes, de codes et de règlements. Le fondement d'une approche économique de la durabilité réside donc dans le lien nécessaire entre les résultats expérimentaux et le cadre normatif [45].

III.5 Béton durable et béton résistant :

La porosité est le paramètre de premier ordre qui caractérise la texture du béton ; ce n'est pas évidemment pas le seul paramètre, mais c'est celui qu'il faut fixer avant d'étudier tous les autres. Il conditionne presque toutes les propriétés du béton et, en premier lieu, sa résistance mécanique.

La résistance aux efforts de compression est la propriété principale du béton, celle qui permet son utilisation comme matériau de construction. Plus faible est la porosité, plus grande est la résistance. Mais presque toutes les autres propriétés du béton dépendent de ce même paramètre de premier ordre. Toutes choses égales par ailleurs, le béton le plus résistant sera aussi le plus rigide, le plus dur, etc.

Serait-ce aussi le plus durable ?

Pour évaluer expérimentalement la durabilité du béton, il faut étudier son comportement vis-à-vis d'un certain nombre de mécanismes susceptibles de le dégrader. On peut traiter la question

comme la durabilité du béton face au gel-dégel, à l'alcali-réaction, aux environnements agressifs.

Une façon pratique d'y parvenir est de toujours partir de la résistance aux efforts de compression pris comme critère global et de discuter de la durabilité en deux temps :

- toutes choses égales par ailleurs, en comparant des bétons qui ne diffèrent que par leur résistance ;
- puis à résistance constante, en examinant les paramètres spécifiques de la durabilité.

Il y a donc avantage, en vue de l'objectif de durabilité, à choisir la classe de résistance du béton en fonction de l'agressivité du milieu, d'autant plus élevée que le milieu est plus agressif. D'un point de vue pratique, cela signifie que c'est l'exigence de durabilité qui peut, parfois, déterminer la résistance à prendre en compte dans le calcul de l'ouvrage.

On peut considérer qu'un niveau de résistance adapté au milieu environnant est un premier critère de qualité qui doit être complété par d'autres conditions. En effet, tous les bétons de même résistance à la compression ne sont pas également durables. A résistance égale, il existe des différences parfois importantes, entre les bétons. Au simple critère de résistance, il faut ajouter d'autres considérations.

D'abord, la résistance (et ainsi la porosité) n'est qu'un critère de premier ordre qui doit être complété par d'autres mesures comme, par exemple, la perméabilité ou la diffusion, la distribution des tailles de pores. En effet, un autre facteur majeur est la dimension des pores. A porosité égale, les agents agressifs pénètrent d'autant plus difficilement que les pores sont fins. Or, la finesse des pores dépend du rapport E/C, du ciment (CHF-CEM III/A, CLC-CEM V/A et B, CLK-CEM III/C comparés au CPA-CEM I et CPJ-CEM II/A ^[53]), des additions minérales (cendres volantes, laitiers), de l'exposition du béton (dessiccation, carbonatation) et même de la dimension et de la nature des granulats ^[45].

III.6 Les indicateurs de durabilité généraux :

Les indicateurs de durabilité généraux permettent d'évaluer la durabilité de tout type de bétons. Cinq indicateurs de durabilité généraux sont identifiés dans le guide AFGC ^[54].

III.6.1 Porosité accessible à l'eau (AFPC-AFREM, 1998) (NF P 18 – 459) :

La porosité est le premier facteur qui apparaît comme fondamental dans la caractérisation des bétons. Il est important de limiter la porosité car elle affecte la durabilité des ouvrages et peut conduire à une perte de capacité structurale en influençant la résistance en compression et d'autres propriétés du béton. La porosité volumique totale ϕ d'un matériau est définie par (cf. Eq III.1) :

$$\phi = \frac{V_P}{V_T} \times 100 \quad \text{Avec} \quad V_T = V_P + V_S \quad \text{Eq III.1}$$

Où V_T : volume total d'un échantillon de matériau,

V_P : volume poreux de l'échantillon,

V_S : volume solide de l'échantillon.

La porosité diminue au cours du temps avec la progression de l'hydratation du ciment. Les paramètres de transfert comme la diffusivité ou la perméabilité dépendent largement de la porosité.

Cependant, deux bétons peuvent avoir, pour une même porosité, des diffusivités ou des perméabilités différentes. En effet, la proportion volumique des vides dans un matériau n'est pas un critère suffisant pour caractériser les propriétés de transfert des bétons. Deux autres paramètres sont à considérer :

- la distribution de la taille des pores,
- la connectivité et la tortuosité des réseaux poreux.

D'une manière générale, tous les phénomènes de transfert dépendent de la taille des pores.

L'ensemble des pores (cf. Figure III. 1) est constitué :

- des pores capillaires : ($0,01 \mu\text{m} < \phi \text{ pore} < 5,00 \mu\text{m}$) vestiges des espaces intergranulaires de la pâte fraîche. Ils sont directement liés au rapport E/C et à l'hydratation.
- Les pores des hydrates désignent les espaces inter-feuillets ou les pores de gel :

($\phi \text{ pore} < 40 \text{ \AA}$) qui sont associés à la formation des hydrates et qui, au contraire de la famille précédente, dépendent faiblement du rapport E/C.

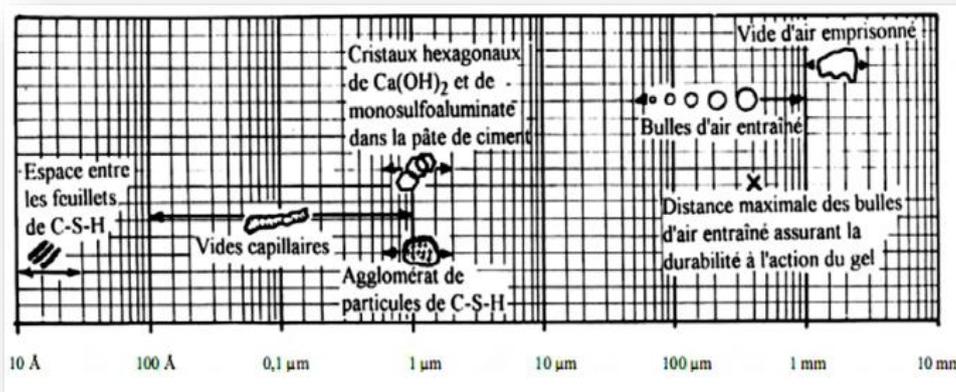


Figure III.1. Répartition porométrique dans le béton.

Les propriétés de transfert des matériaux ne dépendent pas que de la valeur de la porosité globale et de la taille de pores, mais, ils dépendent aussi de la connectivité et de la tortuosité

des pores. Mehta [55] distingue trois catégories de familles de pores en caractérisant l'interconnexion du réseau :

- les pores interconnectés qui forment un espace continu dans le milieu poreux et qui ont un impact majeur sur les propriétés de transport du matériau,
- les pores isolés (ou occlus) qui constituent la porosité fermée et ne communiquent pas avec le milieu extérieur,
- les pores aveugles (ou bras morts) et qui sont connectés uniquement par une voie accessible à un fluide extérieur et qui ne participent pas au transport.

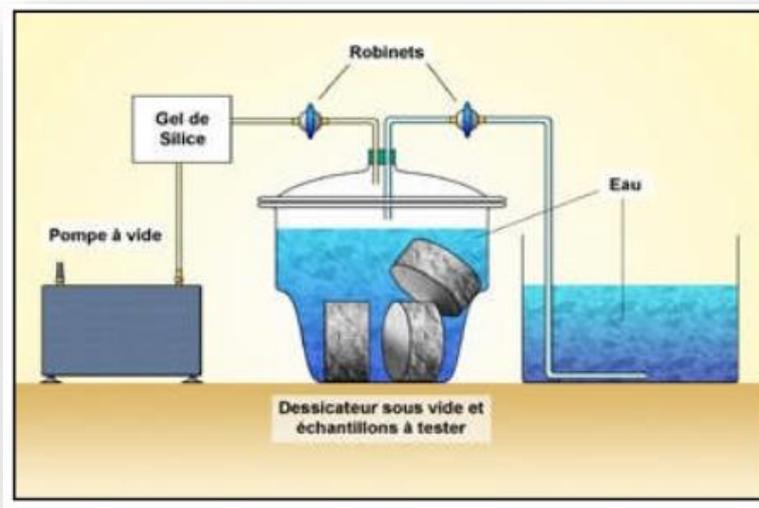


Figure III.2 Essai de porosité accessible à l'eau.

III.6.2 La perméabilité aux gaz (AFPC-AFREM, 1998) (NF P 18 – 463) :

La perméabilité aux gaz est un indicateur de durabilité général majeur qui évalue la capacité du matériau vis-à-vis de la pénétration d'agents agressifs [56].

La perméabilité traduit l'aptitude d'un matériau à se laisser traverser par un fluide liquide ou gazeux sous l'effet d'un gradient de pression. Selon l'équation Eq III.2, la perméabilité k d'un milieu poreux est définie par la relation de Darcy [57] qui exprime le débit volumique Q d'un fluide de viscosité μ qui traverse une épaisseur dx de matériau de section apparente A sous la différence de pression dp (Figure III.3).

$$Q = \frac{k}{\mu} A \frac{dp}{dx} \quad \text{Eq III.2}$$

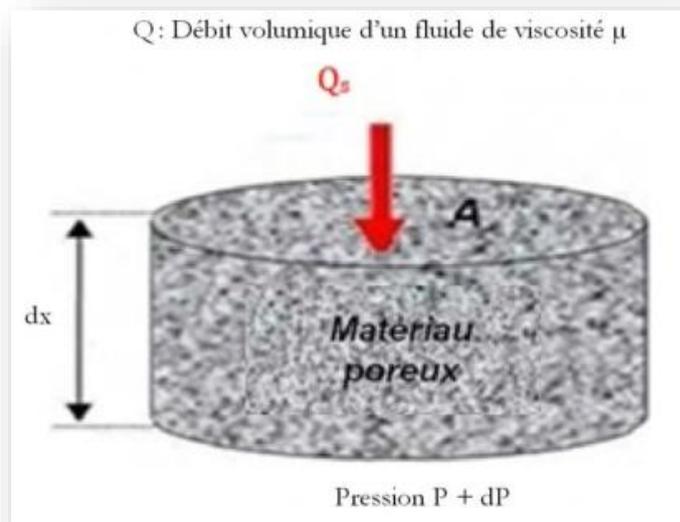


Figure III.3 Concept de la perméabilité d'un milieu poreux selon [57].

III.6.3 Le coefficient de diffusion des ions chlorures :

➤ Définition

La corrosion des armatures générée par les ions chlorures est la principale cause de dégradation des structures en béton armé. Les chlorures agissent dans les mécanismes de corrosion en diminuant la résistivité de l'électrolyte et en permettant un amorçage plus rapide de la corrosion en dépassivant la couche superficielle. La corrosion qui en résulte sous forme de piqûres à la surface de l'acier est une corrosion localisée. Les chlorures agissent aux zones anodiques, de surface bien plus petite que celles des zones cathodiques, et la vitesse de corrosion sur les zones anodiques s'en trouve fortement augmentée. Une fois la corrosion amorcée, il est bien plus difficile d'y remédier que dans le cas de la carbonatation car le processus est autocatalytique^[58].

III.6.4 Source de l'attaque des ions chlorures :

Les chlorures présents dans le béton peuvent provenir de deux sources différentes. Soit ils sont présents au moment du gâchage : utilisation d'eau contenant des chlorures ou agrégats contaminés. Soit ils proviennent de l'environnement (atmosphère marine, sels de déverglaçage, produits chimiques) et ont diffusés dans le béton.

Les chlorures existent sous deux formes dans le béton :

- Les chlorures libres qui sont dissous dans la solution interstitielle
- Les chlorures piégés ou liés qui sont combinés à des hydrates du ciment et à des agrégats, ou absorbés physiquement sur les parois des pores^[58]. On considère que seuls

les chlorures libres peuvent diffuser et jouer un rôle actif dans le processus de dépassement et de corrosion des armatures.

III.6.5 Les essais de pénétration des ions de chlores :

➤ Protocole d'essai :

Par rapport à la carbonatation, la diffusion des ions chlorures entraîne des dissolutions locales dans la couche passive des aciers. De faibles concentrations en chlorures peuvent modifier la structure de cette couche.

Le protocole d'essai consiste à déterminer le coefficient de migration des ions chlorures en régime non stationnaire sur échantillons durcis, à l'âge de 28 jours, sous forme de disques de 100 mm de diamètre et 50 mm d'épaisseur, obtenus par sciage à partir d'une éprouvette cylindrique de 100 mm de diamètre et de 220 mm de longueur.

Les éprouvettes ont été conservées dans l'eau pendant 28 jours à une température de (20 ± 2) °C.

Ces spécimens subissent une mise sous vide sous une pression de 1 à 5 kPa pendant quelques minutes. Les échantillons sont par la suite conservés dans une solution saturée en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pendant 24 heures, période à l'issue de laquelle, les mesures sont entamées.

Le coefficient de migration des ions chlorures en régime non stationnaire (non- steady-state migration coefficient) D_{nssm} est donné par la relation :

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} \left[x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+T)Lx_d}{U-2}} \right] \quad [10^{-12} \text{m}^2/\text{s}] \quad \text{Eq III.3}$$

Où :

U : est la différence de potentiel appliquée, en Volt ;

T : est la température moyenne de la solution, en °C ;

L : épaisseur du spécimen, en mm ; X_d : valeur moyenne de la profondeur de pénétration des ions, en mm ; t : durée du test, en heure.

Cette méthode dite NT BUILD 492 appelée méthode CTH (Chalmers University of Technology, ou essai Tang Luping) (Tang, 2001) ^[59], est un compromis entre la représentativité de l'essai et la vitesse réelle de la diffusion.

Le mouvement de migration des ions est opéré sous champ électrique extérieur (25 V) pendant 24 heures. La diffusion des ions est effectuée sous gradient de concentration, ou plus précisément avec un potentiel chimique, d'une zone à haute concentration en ions chlorures vers une zone de faible concentration (béton).

Le potentiel électrique est exécuté axialement à travers la surface circulaire du spécimen.

Lequel potentiel, force les ions chlorures à migrer à l'intérieur de l'échantillon. Le schéma de principe est illustré par la figure III.4.

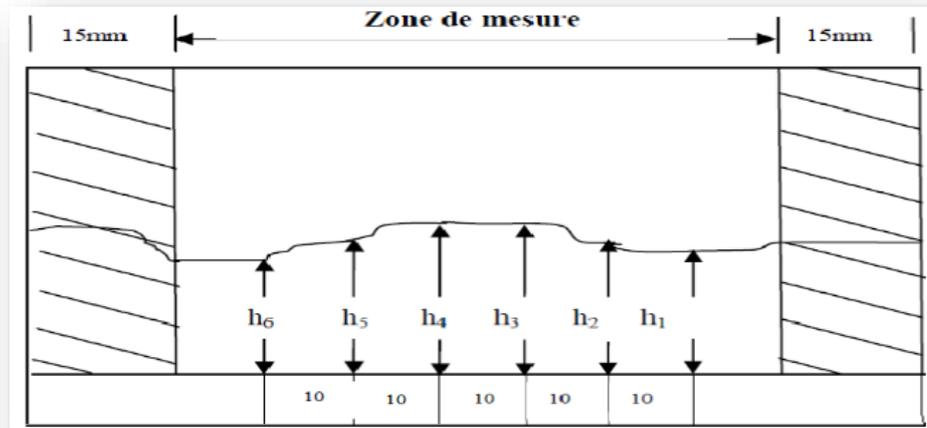


Figure III.4 illustration des profondeurs de pénétration des ions chlorures.

A l'issue de l'essai, le spécimen est fendu et on détermine la profondeur de pénétration des ions chlorures au moyen d'un indicateur calorimétrique à base de nitrate d'argent. A partir de cette profondeur, on détermine le coefficient de diffusion apparent.

Le profil des profondeurs de pénétration des ions chlorures est illustré par la figure 1 et l'aspect visuel peut être apprécié par la figure III.5. La couche dégradée est caractérisée par une couleur grisâtre, quant aux zones affectées, elle varie selon la profondeur.



Figure III.5 Exemple d'éprouvettes après l'immigration des chlorures.

III.7 Les indicateurs de substitution :

Les indicateurs de durabilité généraux peuvent être remplacés par des paramètres qui sont souvent plus faciles à déterminer, plus spécifiques aux problèmes posés ou plus adaptés aux modèles mis en œuvre. On trouvera donc parmi les indicateurs de substitution ^[60] :

- La porosité par injection de mercure,
- La résistivité électrique,
- La quantité d'électricité selon l'essai AASHTO,
- Le coefficient de diffusion du dioxyde de carbone CO₂ ou d'O₂,
- Le coefficient de diffusion de l'eau tritiée.

III.7.1 L'Indicateurs de substitution à l'absorption d'eau par capillarité

(AFPC,1997) :

L'absorption capillaire caractérise l'aptitude d'un matériau poreux à absorber et à véhiculer un fluide par capillarité. Le plus souvent, le fluide concerné est l'eau.

Ce mécanisme de transfert d'eau dépend, d'une part de la structure poreuse et d'autre part de l'humidité relative du béton. L'absorption capillaire dépend essentiellement de la porosité du béton et de la taille des pores selon la loi de Jurin ^[61]. Dans notre travail, nous avons utilisé l'absorption d'eau par remontée capillaire car la porosité interconnectée joue un rôle primordial dans la durabilité des ouvrages en béton.

On définit alors la sorptivité *S* (la vitesse d'absorption par remontée capillaire) par l'équation suivante ^[60] (cf. Eq III.4) :

$$M(t) = St^{\frac{1}{2}} \quad \text{Eq III.4}$$

Où : *M*(*t*) [kg/m²] : masse d'eau absorbée par unité de surface.

S [kg/m².s^{-1/2}] : la sorptivité.

t [s] : temps.

III.8 Les indicateurs de durabilité spécifiques :

Pour avoir une bonne estimation de la durabilité des ouvrages, il peut s'avérer nécessaire de compléter le panel d'indicateurs généraux par des indicateurs spécifiques AFGC ^[54]. Selon la classe d'exposition des ouvrages (la pénétration de chlorures XS, la carbonatation des bétons XC, les attaques sulfatiques XA), un indicateur de durabilité spécifique est défini. Dans la plupart des cas, il s'agit d'un essai de dégradation accélérée. Par exemple, pour le cas de la

prévention des dégradations dues à la carbonatation, un essai de carbonatation accélérée permet de mesurer une profondeur de carbonatation [54].



Figure III.6 Différents types de dégradations.

III.9 Conclusion :

La durabilité d'un béton n'est pas une de ses caractéristiques, mais plutôt sa réponse aux charges en service et aux conditions environnementales. Ainsi, la durabilité d'un béton dépend d'une multitude de caractéristiques du matériau, mais aussi de l'agressivité de son environnement.

Partie II

Etude expérimentale

Chapitre IV

Caractéristiques des matériaux

IV.1 Introduction :

Cette partie expérimentale a été consacrée à la caractérisation physique et mécanique des constituants des bétons testés. Les essais ont été effectués au Laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH) de l'Université 8 Mai 45 Guelma. Les protocoles pour la conduite des essais sont conformes aux normes en vigueur en Algérie (Normes NA).

Nous présenterons dans ce chapitre, les caractéristiques des matériaux utilisés pour la confection du béton.

Les matériaux utilisés sont :

- Le sable utilisé est un sable naturel issu de la région de la Wilaya de Tébessa.
- Le gravier de la carrière de Maouna implanté dans la région de Guelma, a été utilisé. Il s'agit d'un gravier concassé d'étendue granulaire 5/15.
- Le ciment portland composé CPJ de classe 42.5, qui provient de la cimenterie de H'djar Essoud –Skikda-Les fillers : les fines calcaires d'ENG d'El Khroub.
- Les adjuvants : MEDAPLAST SP 40 de SIKA. (super-plastifiant).
- L'eau potable du laboratoire de l'université 8 mai 1945 de Guelma.

IV.2 Caractérisation du sable :

Le sable utilisé est un sable naturel issu de la région de la Wilaya de Tébessa.

IV.2.1 Caractéristiques physiques des sables utilisés :

Le sable a été soumis à plusieurs essais au laboratoire de Génie civil de l'université de Guelma, suivant les normes françaises AFNOR

IV.2.1.1 Masse volumique apparente du sable:

La procédure utilisée pour la détermination de cette grandeur est présentée à travers la figure suivante :

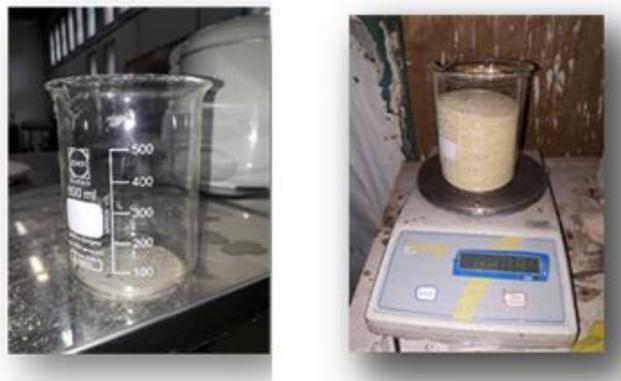


Figure IV.1. Mesure de la masse volumique apparente du sable.

Tableau IV.1. Résultats de la masse volumique apparente du sable.

Volume d'un récipient connu (ml)	Volume	500 ml
Masse de sable contenu dans le récipient (gr)	Masse	828.95 gr
Masse volumique apparente $\frac{M}{V}$ (gr/ml)	ρ_{app}	1.657 gr/ml
$\rho_{app}=1657 \text{ kg/m}^3$		

IV.2.1.2 Masse volumique absolue : (NF P 18-555)

C'est la masse de l'unité de volume de la substance, c'est-à-dire le rapport entre sa masse et son volume absolu.

**Figure IV.2** Mesure de la masse volumique absolue du sable.**Tableau IV.2** Résultats de la masse volumique absolue du sable.

Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	V_1	80 ml
Masse de l'échantillon (gr)	Masse (M)	80 gr
Lire le nouveau volume (ml)	V_2	110 ml
Masse volumique absolue $\frac{M}{(V_2-V_1)}$	ρ_{Abs}	2.666
$\rho_{Abs}= 2666 \text{ kg/m}^3$		

IV.2.1.3 Mesure de la compacité :

Pour effectuer cette mesure il suffit de déterminer le volume des vides présentés par une quantité donnée de granulats, remplissant un bocal de volume V.

- Peser une quantité de matériau sec et la verser (sans tasser) dans une éprouvette graduée.
- Noter le niveau atteint représentant le volume apparent du matériau, soit V.
- Dans une deuxième éprouvette contenant un volume V' d'eau, verser le sable de la première éprouvette.

- Noter le volume atteint par l'eau V_1

Le volume des vides est égal à : $(V + V') - V_1$

La compacité sera déduite à partir de l'expression suivante :

$$C = \frac{(V_1 - V')}{V} \quad \text{Eq. (IV.1)}$$



Figure IV.3 Mesure de la compacité du sable.

Tableau IV.3 Résultats de la compacité du sable.

Lire dans l'éprouvette graduée le volume du poids de l'échantillon (gr)	V	53 gr
Lire dans la deuxième éprouvette le volume d'eau (ml)	v'	80 ml
Lire le nouveau volume atteint par l'eau (ml)	V_1	112 ml
La compacité C : $\frac{(V_1 - V')}{V}$	c	0.603
$C = 0.608$		

IV.2.1.4 Porosité :

La porosité est par définition le complément à l'unité de la compacité. Soit en désignant celle-ci par E :

$$E = 1 - C \quad \text{Eq. (IV.2)}$$

Tableau IV.4 Valeurs de la porosité du sable.

La compacité	c	0.603
La porosité $E = 1 - C$	E	0.397
$E = 0.392$		

IV.2.1.5 Teneur en eau :

La méthode de mesure consiste à prélever une quantité donnée de granulats mouillés, de faire évaporer cette eau et de peser la quantité de granulat sec. La différence de ces deux pesées définit la quantité d'eau évaporée, d'où la teneur en eau.

La teneur en eau, notée ω est donnée par :

$$\omega = \left(\frac{M_h - M_s}{M_s} \right) 100 \text{ Eq. (IV.3)}$$

Avec : M_h : poids de granulat humide (mouillé).

M_s : poids de granulat sec.



Figure IV.4 Détermination de la teneur en eau.

Tableau IV.5. Teneur en eau des graviers lors des essais.

Poids de l'échantillon (gr)	Ph	5000
Poids de l'échantillon après séchage (gr)	Ps	4540
Teneur en eau (%) $\frac{(P_H - P_S)}{100}$	w	10.13
$\omega = 10.13\%$		

IV.2.1.6 Analyse granulométrique :

Tableau IV.6. Analyse granulométrique du sable.

Tamis en mm	Refus partiels en g	Refus cumulés en g	Refus cumulés en %	Tamisât cumulés en %
5	47.94	47.49	2.37	97.63
4	16.97	64.91	3.24	96.76
2	93.55	158.46	7.92	92.08
1	199.45	357.91	17.89	82.11
0.5	670.75	1028.66	51.43	48.57
0.250	711.02	1739.68	86.98	13.02
0.125	154.09	1893.77	94.69	5.31
0.063	57.32	1951.09	97.55	2.45
fines	44.63	1995.72	99.87	0.13

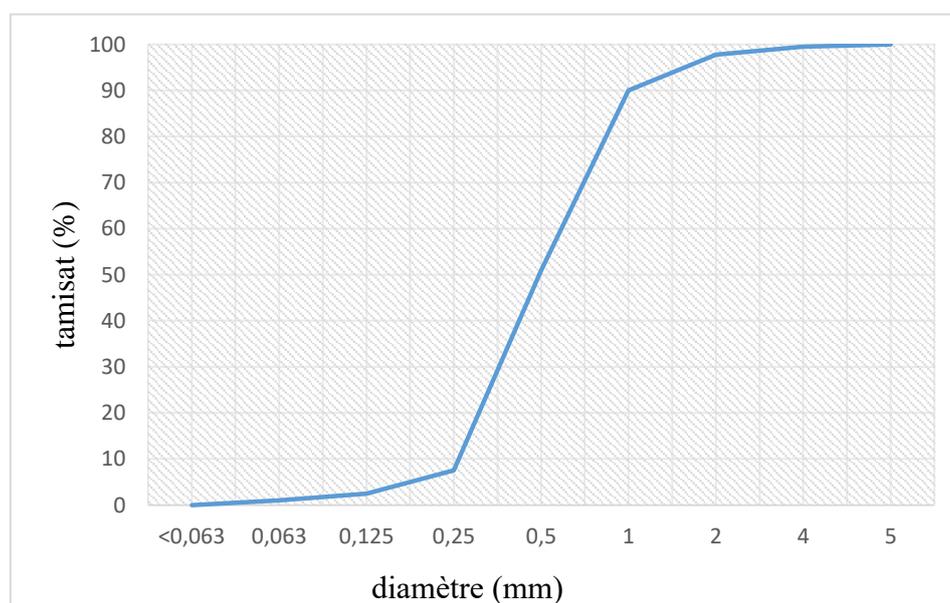


Figure IV.5 Courbes granulométrique du sable.

La lecture de la courbe granulométrique montre que le sable utilisé est de type de sable fin.

IV.2.1.7 Equivalent de sable :

Cet essai a pour but de mesurer la propreté d'un sable. L'essai est effectué sur la fraction 0/5mm du matériau à étudier. Le tamisage se fait par voie humide afin de ne pas perdre d'éléments fins. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé. Pour cela on utilise une solution lavante, elle permet de séparer les éléments fins argileux et provoque la floculation. Après décantation, on mesure la hauteur des fines floculées, (sable propre + éléments fins = h_i) et la hauteur de sable propre (h_2 si c'est au piston ou h'_2 si c'est au réglet).

➤ **Mode opératoire :**

- Tamiser une quantité de sable (masse supérieure à 500 g).
- Prendre une pesée de 120 g.
- Remplir l'éprouvette de solution lavante jusqu'au premier repère (10cm).
- A l'aide de l'entonnoir verser la prise d'essai (120g) dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main afin de chasser toutes les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.
- Laisser reposer pendant 10 minutes.
- Fermer l'éprouvette à l'aide du bouchon en caoutchouc et lui imprimer 90 cycles de 20cm de cours horizontale en 30 secondes à la main à l'aide d'un agitateur mécanique.
- Retirer ensuite le bouchon, le rincer avec la solution lavante au-dessus de l'éprouvette, Rincer ensuite les parois de celle-ci.
- Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette, le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette et en imprimant en même temps au tube un léger piquage. Cette opération a pour but de laver le sable et de faire monter les éléments fins et argileux. Effectuer cette opération jusqu'à ce que la solution lavante atteigne le 2^{ème} repère. Laisser ensuite reposer pendant 20 minutes.
- Après 20 minutes de dépôt de sable, lire la hauteur h1 du niveau supérieure du floculant jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une règlette.
- Mesurer également avec la règle la hauteur h2 comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire et le fond de l'éprouvette.

$$ESV = \frac{h_2}{h_1} \times 100[\%] \quad Eq.(IV. 4)$$

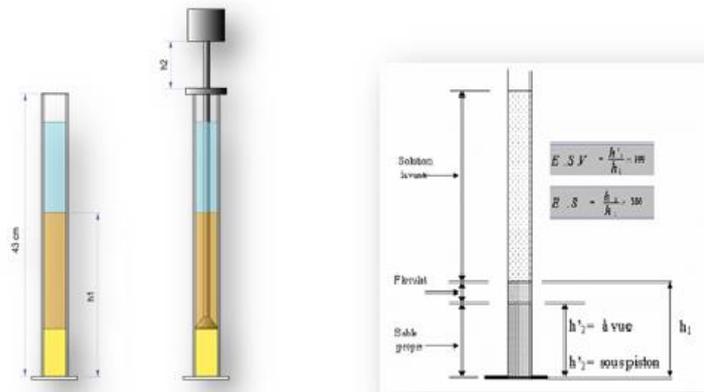


Figure IV.6 Mesure de la propreté du sable.

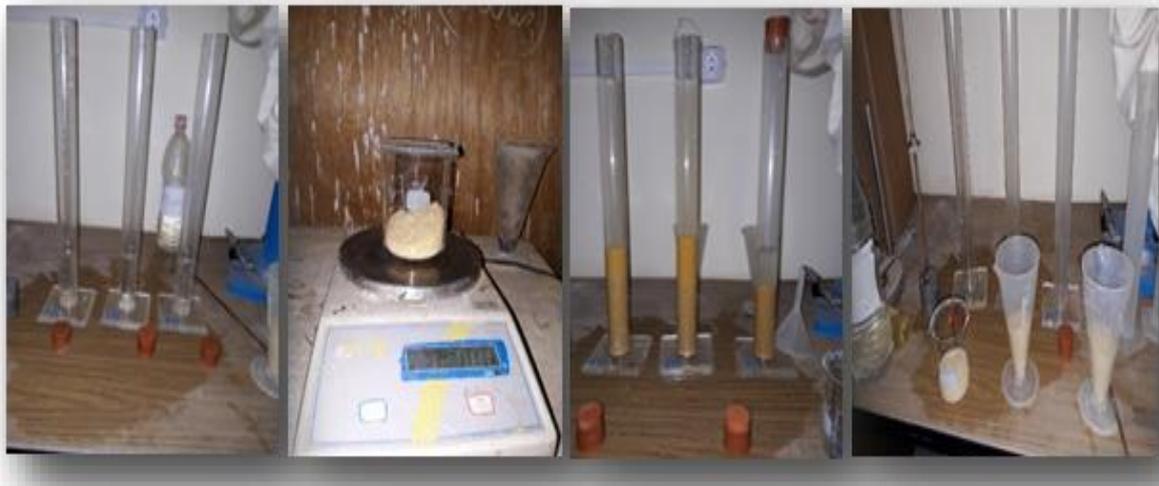


Figure IV.7 Mesure de la propreté du sable.

Tableau IV.7 Résultat de l'équivalent de sable.

Lectures	Prise n° 1	Prise n° 2	Prise n° 3
h₁	4.5	5.1	5.8
h₂	3.8	3.9	4.7
Sur chaque prise : E.S.V	84.44	76.4	81.03
Sur l'échantillon : E.S.V	80.62%		

L'ESV de notre sable est de 80%, ce qui montre qu'il est propre.

➤ **Récapitulatif des résultats**

L'ensemble des résultats des essais entrepris sur le sable est résumé dans le tableau suivant :

Tableau IV.8 Résultats des essais sur le sable.

<i>Essais</i>	Résultats des mesures
<i>Masse volumique apparente</i>	$\rho_{App} = 1650 \text{ kg/m}^3$
<i>Masse volumique absolue</i>	$\rho_{Abs} = 2666 \text{ kg /m}^3$
<i>Compacité</i>	$C = 0.608$
<i>Porosité</i>	$E = 0.392$
<i>Teneur en eau</i>	$\omega = 10.13\%$
<i>Equivalent de sable</i>	80.62%

L'ensemble des résultats, à l'exception de l'étendue granulaire, montre que le sable utilisé répond aux différentes normes utilisées.

IV.3 Caractérisation du gravier :

Pour l'élaboration des bétons, un gravier provenant de la carrière de Maouna implanté dans la région de Guelma, a été utilisé. Il s'agit d'un gravier concassé d'étendue granulaire 5/15.

IV.3.1 Masse volumique apparente du gravier :

La masse volumique apparente est la masse du matériau par unité de volume en vrac, c'est-à-dire «vides» compris.

➤ *Principe de mesure :*

La mesure consiste à verser le granulat sec dans un récipient de volume connu en le disposant, sans tasser, par couches horizontales successives, d'araser la dernière couche par un mouvement de va et vient à l'aide d'une règle. La masse volumique apparente, notée M_v est donnée par l'expression :

$$M_v = \frac{M}{V} \quad \text{Eq. (IV.5)}$$

Avec :

M : masse des granulats contenus dans le récipient ; V : volume du récipient.



Figure IV.8 Procédé utilisé pour la mesure de la masse apparente du gravier.

Tableau IV.9 Résultats des mesures de la masse volumique apparente du gravier.

Volume d'un récipient connu (ml)	Volume	500 ml
Masse de sable contenu dans le récipient (gr)	Masse	712.34 gr
Masse volumique apparente $\frac{M}{V}$ (gr/ml)	ρ_{App}	1.424 gr/ml
$\rho_{App} = 1424 \text{ kg/m}^3$		

La masse volumique apparente moyenne obtenue est de 1420 Kg/m^3 , ce qui correspond à une valeur acceptable, en effet les granulats pour bétons doivent présenter une masse volumique absolue variant dans les limites de 1400 à 1600 Kg/m^3 .

IV.3.2 Masse volumique absolue :

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

➤ Principe de mesure (Méthode de l'éprouvette graduée) :

Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau. Peser un échantillon sec M de granulats et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air. Le liquide monte dans l'éprouvette, lire le nouveau volume V_2 .

La masse volumique absolue est alors :

$$\rho = \frac{M}{V_1 - V_2} \quad \text{Eq. (IV.6)}$$

Les résultats des mesures, effectuées sur trois échantillons, sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau IV.10 Résultats des essais de mesure de la masse volumique absolue du gravie

Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	V_1	80 ml
Masse de l'échantillon (gr)	M	80 gr
Lire le nouveau volume (ml)	V_2	109 ml
Masse volumique absolue $\frac{M}{(V_2-V_1)}$	ρ_{Abs}	2.758 gr/ml
$\rho_{Abs} = 2758 \text{ kg/m}^3$		

**Figure IV.9.** Mesure de la masse volumique absolue du gravier.

IV.3.3 Mesure de la teneur en eau des graviers :

Il est important de déterminer la teneur en eau des granulats afin de faire une correction de la quantité d'eau à incorporer dans le béton. La méthode de mesure consiste à prélever une quantité donnée de granulats mouillés, de faire évaporer cette eau et de peser la quantité de granulat sec. La différence de ces deux pesées définit la quantité d'eau évaporée, d'où la teneur en eau. La teneur en eau, notée ω est donnée par l'équation (IV.3).

0

**Figure IV.10** Détermination de la teneur en eau.

Tableau IV.11 Teneur en eau des graviers lors des essais.

Poids de l'échantillon (gr)	P _h	5000 gr
Poids de l'échantillon après séchage (gr)	P _s	4890 gr
Teneur en eau (%) $\frac{(P_H - P_S)}{100}$	ω	2.2
$\omega = 2.2\%$		

IV.3.4 Mesure de la propreté :

La propreté désigne, d'une part, la teneur en fines argileuses ou autres particules adhérentes à la surface des grains (ce qui se vérifie sur le chantier par les traces qu'elles laissent lorsqu'on frotte les granulats entre les mains), et d'autre part, les impuretés susceptibles de nuire à la qualité du béton, parmi lesquelles on peut citer les scories, le charbon, les particules de bois, les feuilles mortes, les fragments de racine.

➤ Principe :

Les graviers présentant des classes granulaires relativement grossières. La séparation des agrégats des éléments fins se fera par un simple lavage à l'eau.

➤ Mode opératoire :

- Peser une masse M (environ 1000gr) de gravier et la placer dans un tamis (maille de 0,5mm),
- Laver l'échantillon jusqu'à ce que l'eau qui traverse le tamis devienne claire,
- Essuyer l'excès en eau à l'aide d'un chiffon et peser la nouvelle masse, soit M'.

La propreté se déduit alors à partir de l'expression suivante :

$$P(\%) = \left(\frac{M - M'}{M} \right) 100 \quad \text{Eq (IV.7)}$$

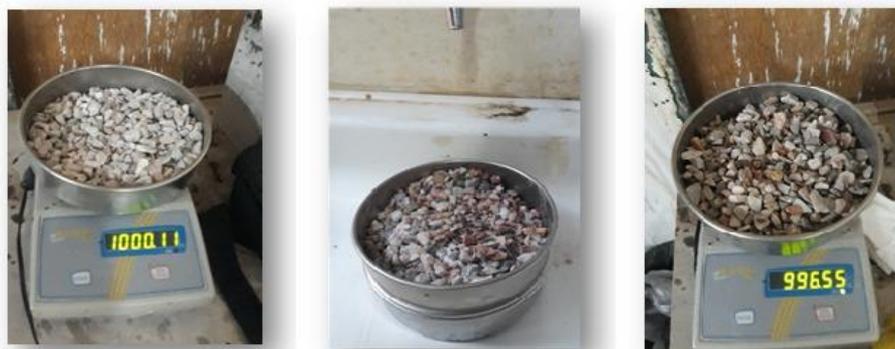


Figure IV.11 Mesure de la propreté des graviers.

Tableau IV.12 Résultats des mesures de la propreté des graviers.

Poids de l'échantillon (gr)	M	1000
Poids de l'échantillon après lavage (gr)	M'	996.55
Essai de propreté (%) $\left[\frac{(M-M')}{M} \right] \times 100$	P ₁	0.354
Pourcentage des fines	P = 0.35%	

Le pourcentage obtenu (0.35%) d'éléments fins ne dépasse pas la limite autorisée qui est souvent fixée à 2%.

IV.3.5 Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons, en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.

**Figure IV.12** Analyse granulométrique.

Tableau IV.13 Analyse granulométrique du gravier 5/15.

Tamis en mm	Refus partiels en g	Refus cumulés en g	Refus cumulés en %	Tamisât cumulés en %
16	0	0	0	100
14	335.07	335.07	16.75	83.25
10	897.36	1232.43	61.62	38.38
8	411.78	1644.21	82.21	17.79
6.3	156.6	1800.81	90.04	9.96
5	116.6	1917.66	95.88	4.12
4	34.92	1952.58	97.63	2.37
2	16.6	1969.18	98.46	1.54
1	2.3	1971.48	98.57	1.43

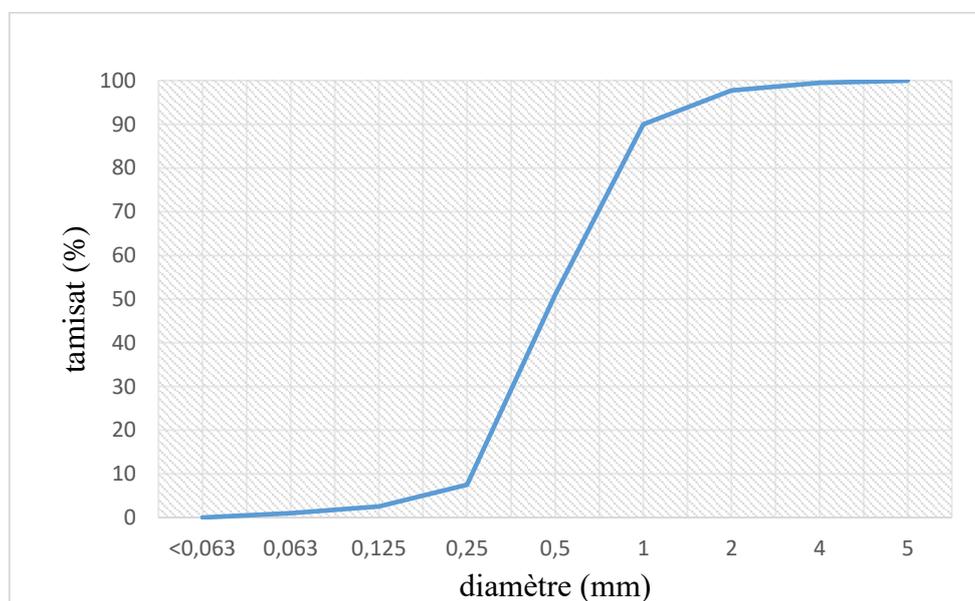


Figure IV.13 Allure de la courbe granulométrique du gravier

IV.3.6 Absorption d'eau :

Certains matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne qui est préjudiciable, en particulier, à la résistance au gel des bétons. En effet, l'eau incluse dans le granulat provoque l'écartement du béton lorsque celui-ci est soumis de manière prolongée à des basses températures.

➤ Principe de la mesure :

On détermine un coefficient d'absorption, qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20°C.

Le coefficient d'absorption (A_b) est défini par la relation :

$$A_b = \frac{M-M'}{M'} \quad \text{Eq.(IV.8)}$$

Avec : M : masse de l'échantillon sec.

M' : masse de l'échantillon imbibé.

Tableau IV.14 Valeurs du coefficient d'absorption du gravier.

<i>masse de l'échantillon sec (gr)</i>	M	5000
<i>masse de l'échantillon imbibé (gr)</i>	M'	4870
<i>Absorption d'eau $A_b = \frac{M-M'}{M'}$</i>	A_b	2.66
$A_b = 2.66\%$		

➤ **Récapitulatif des résultats :**

L'ensemble des résultats des essais entrepris sur le gravier est résumé dans le tableau suivant :

Tableau IV.15 Résultats des essais sur le gravier.

<i>Essais</i>	<i>Résultats des mesures</i>
<i>Masse volumique apparente</i>	$\rho_{\text{App}} = 1424 \text{ kg/m}^3$
<i>Masse volumique absolue</i>	$\rho_{\text{Abs}} = 2758 \text{ kg/m}^3$
<i>Propreté</i>	$\omega = 2.2\%$
<i>Teneur en eau</i>	$P = 0.35\%$
<i>Absorption d'eau</i>	$A_b = 2.66\%$

IV.4 Les additions :

IV.4.1 Les fillers :

Des fillers calcaire, de provenance ENG d'El Khroub, dont les principales caractéristiques

- **Caractéristiques chimique :**

Tableau IV.16 Caractéristiques chimiques.

$CaCO_3$	98%	$SO_3(\text{soluble dans l'eau})$	0.0021%
CaO	56.03%	$SO_3(\text{soluble dans l'acide})$	0.19%
SiO_2	0.04%	<i>soufre totale</i>	0.0137%
Na_2O	0.05%	<i>Résidu insoluble</i>	1.15%
MgO	0.17%	<i>solubilité dans l'eau (Ws)</i>	0.24%
Al_2O_3	0.03%	<i>perte au feu</i>	43%
Fe_2O_3	0.02%	<i>Ph</i>	9
K_2O	0.02%	TiO_2	0.009%
P_2O_5	0.008%	<i>chlorure</i>	0.0033%

- **Caractéristiques physique :**

Tableau IV.17 Caractéristiques physiques.

<i>Masse volumique réelle</i>	2700 Kg/M³
<i>Masse volumique en vrac</i>	1100 Kg/M ³
<i>Valeur de bleu de méthylène MB_f</i>	1.67 gr/Kg

- **Répartition granulométrique :**

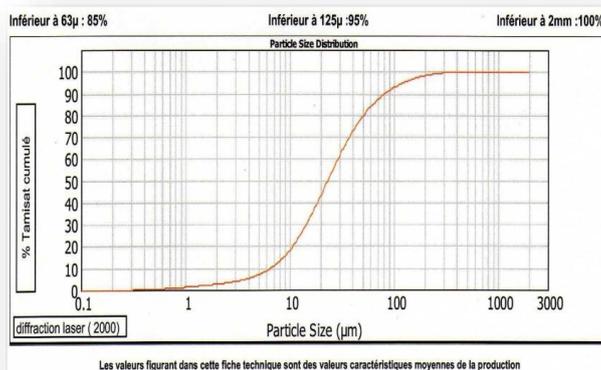


Figure IV.14. Répartition granulométrique

IV.4.2 Eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisé est celle du LGCH de l'université de Guelma.

IV.4.3 Ciment :

Le ciment de base utilisé dans notre travail, est un ciment portland composé CPJ de classe 42.5, qui provient de la cimenterie de H'djar Essoud –Skikda.

- **Caractéristiques physique et chimiques**

Les différentes caractéristiques sont regroupées dans le tableau suivant.

Tableau IV.18 Composition chimique moyenne du laitier granulé utilisé Caractéristiques physiques et chimiques du ciment utilisé.

Caractéristiques physiques	Valeur	Caractéristiques chimiques	Valeur
Masse volumique absolue (g/cm ³)	3.1	CaO	55-65%
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.12	SiO ₂	22-28%
Surface spécifique (m ² /kg)	370	Al ₂ O ₃	5-6%
		Fe ₂ O ₃	3-3.6%

IV.4.4 Les adjuvants :

Les adjuvants sont des produits solubles dans l'eau qui incorporés aux bétons à des doses qui doivent être inférieures ou égales à 5% du poids du ciment permet d'améliorer certaines de ces propriétés.

Dans notre étude on a utilisé le Superplastifiant MEDAPLASTS P40 : (Haut réducteur d'eau /Conforme à la norme EN934-2), permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

Le MEDAPLAST SP40 est introduit dans l'eau de gâchage, Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait été introduite.

Il se caractérise par :

- Forme.....Liquide
- Couleur.....Marron
- PH.....8,2
- Densité..... 1,20 ±0,01
- Teneur en chlore.....<1g/L

Grâce à ses propriétés le MEDAPLAST SP40 permet :

Sur béton frais :

- D'améliorer la fluidité.
- D'augmenter la maniabilité.
- De réduire l'eau de gâchage.
- D'éviter la ségrégation.
- De faciliter la mise en œuvre du béton.

Sur béton durci :

- D'augmenter les résistances mécaniques même à jeune âge.
- De diminuer la porosité et le retrait.
- D'augmenter la durabilité.
-

IV.5 formulation des bétons :

Comme nous l'avons déjà signalé précédemment, la composition des BAP est différente complètement de celle des bétons ordinaires et ce fait d'une manière empirique ^[3] et se caractérise par : un volume élevé de pâte, une grande quantité de fines ($\phi \leq 80\mu m$), l'emploi d'un superfluidifiant, un faible volume de gravillon et enfin l'utilisation éventuelle d'un agent

de viscosité rétenteur d'eau.

Bénéficiant des résultats de travaux cités précédemment dans la littérature ainsi que des recommandations de l'AFGC, nous avons adapté une formulation d'un BAP aux conditions locales au niveau du laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique. Par ailleurs, et vue le nombre important de paramètres, il était impératif de fixer quelques-uns notamment :

- le dosage en liant, constitué de ciment CPJ42, 5 est maintenu fixe à 400 Kg/m³,
- Le rapport E/C = 0,5 et le rapport G/S \approx 1
- l'ajout d'ultrafines d'origine calcaire dont le dosage est fixé de manière telle que la masse de la phase fine (mélange de ciment + ultrafines) soit de l'ordre de 500 Kg/m³

Plusieurs formulations et plusieurs superplastifiants ont été testés avant de pouvoir arriver à notre formulation finale pour les bétons autoplaçants. Nous avons d'abord formulé un BAP sans aucune addition s'appuyant uniquement sur les critères recommandés par [4].

A partir de la composition du **BAP_{SA}**, nous avons introduit les différentes additions avec des dosages de 10, 20 et 30% par rapport à la masse du ciment : **BAP_F** (BAP avec filler calcaire), **BAP_L** (BAP avec laitier granulé). Les différentes compositions des BAP sont données dans le tableau 21 ainsi que la formulation du béton vibré adaptée à partir la méthode de Dreux-Gorisse qui consiste à étudier le meilleur arrangement des granulats de manière à obtenir la meilleure compacité.

Le rapport Eau/Ciment a été pris égal à 0,5 et la résistance en compression visée était de 35 MPa. Après des gâchées d'essais, les dosages des constituants ont été corrigés et sont portés sur les tableaux IV.19 :

Tableau IV.19. Compositions et paramètres de formulation des bétons étudiés.

Composition (kg/m ³) et paramètres de formulation	BAP _{F10%}	BAP _{17%}	BAP _{20%}	BV
Ciment	430	430	430	400
Fillers calcaires	43	73.1	86	-
Medaplast SP 40	7.675	7.620	7.675	-
Sable	335.939	335.939	335.939	650
Gravier 5/15	415.798	415.798	415.798	1100
Eau	174.412	185.8435	190.7	200
Rapport G/S	1.23	1.23	1.23	1,70
Rapport E/C	0.40	0.432	0.443	0,50
Rapport ADD/ L	0.10	0.17	0.20	-
Essais au cône d'Abrams (cm)	73	72	70	-
Essai boîte en L	0,88	0.90	0.91	-
Essai au tamis %	12.69	10.27	9.55	-
Résistance réelle à 28jours(MPA)	7.5	6.6	4.8	-

Chapitre V

Méthodologie des essais

V.1 Introduction :

Ce chapitre regroupe un rappel sur les caractéristiques des matériaux utilisés, les types D'éprouvettes utilisées et des vérifications sur les caractéristiques des BAP à l'état frais. En plus, nous effectuons des essais à l'état durci. Finalement, nous traitons les essais de la durabilité sur les BAP en présence d'une préparation ordinaire de béton témoin par divers pourcentages.

Dans cette étude, les paramètres **mécaniques** ont été mesurés sur une série de six éprouvettes pour analyser de manière statistique les évolutions et pour les paramètres **physiques** ont été mesurés sur une série de trois éprouvettes pour chaque cycle, Nous présenterons dans la suite principalement des tendances moyennes.

V.2 Rappel sur les matériaux :

V.2.1 Les granulats :

Les résultats des essais entrepris sur le gravier 5/15, provenant de la carrière de Maouna (Guelma) et sur le sable fin 0/5 de la région de Tébessa est résumé dans le tableau suivant :



Figure V.1 Graviers et Sables utilisés.

Tableau V.1 Résultats des essais sur le gravier et le sable.

<i>Essais</i>	<i>Gravier</i>	<i>Sable</i>
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1420	1650
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2758	2666
Porosité	-	0.392
Propreté (%)	0.35	-
Teneur en eau (%)	2.2	10.13
Absorption d'eau (%)	2.59	-
Compacité	-	0.608
Équivalent de sable (%)	-	80.62

V.2.2. Le ciment :

Le ciment de base utilisé dans notre travail, est un ciment portland composé CPJ de classe 42.5, qui provient de la cimenterie de Hadjar Soud (Skikda) Les principales caractéristique sont représentées dans le tableau V.2.



Figure V.2 ciment utilisé de Hadjar Soud (Skikda).

Tableau V.2 Propriétés physique du ciment utilisé.

Propriétés Physiques	Surface spécifique de Blaine (m ² /kg)	Densité absolue ρ_{abs} (g/cm ³)	Densité apparente ρ_{App} (g/cm ³)	Résistance à la compression à 28 jours (Mortier Standard) (MPA)
CPJ CEM II/A 42.5 R	370	3.1	1.12	42.5

V.2.3. L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisé est celle du Laboratoire de Génie civil de L'université de 8 Mai 45 Guelma.

V.2.4. Les addition :

a) Filler Calcaire :

Les fillers calcaires utilisés étaient de la carrière ENG d'El Khroub (Constantine).

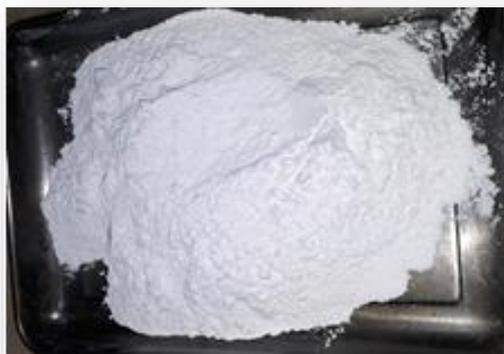


Figure V.3 filler utilisés.

Tableau V.3 Propriétés chimique du ciment, filler utilisés.

	CaCO ₃	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
CPJ CEM II/A 42.5 R	-	58.6%	24.92%	6.58%	3.65%	1.21%	0.85%	0.08%
Filler Calcaire	98%	56.03%	0.04%	0.03%	0.02%	0.17%	0.02%	0.05%

V.2.5. Les adjuvants :

Dans notre étude nous avons utilisé l'adjuvant MEDAPLAST SP provenant de GRANITEX-Oued Smar, conformément à FN EN 934-2^[62]. Il est un réducteur d'eau de haute gamme, contenant un polycarboxylate modifié. Sa densité est de 1,2 g/cm³ et l'extrait sec est de 40%. C'est un fluidifiant. Grâce à ses propriétés le MEDAPLAST SP permet :

a) Sur béton frais

- D'améliorer l'ouvrabilité à rapport E/C constant (pour un béton témoin ayant un étalement de 3 à 8 cm, MEDAPLAST SP permet d'obtenir un étalement de 12 à 20cm).
- Réduire la ségrégation.
- Diminuer le rapport E/C de 10 à 15%.
- Diminuer le dosage en ciment de 5 à 10%.

b) Sur béton durci

- Augmenter les résistances mécaniques.
- Accroître l'imperméabilité.
- Augmenter la cohésion granulats ciment.
- Augmenter la durabilité du béton.
- Obtenir de beaux bétons bruts au décoffrage.

Il est également caractérisé par :

- Forme.....Liquide
- Couleur.....Marron
- PH.....8,2
- Densité..... 1,20 ±0,0
- Teneur en chlore.....<1g/L

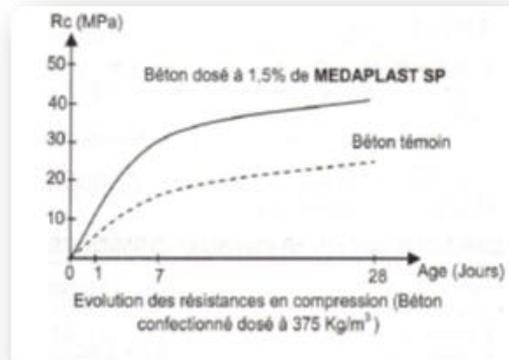


Figure V.4 L'adjuvant utilise MEDAPLAST SP40.

V.2.6 Formulation retenus :

Pour la formulation du béton autoplaçant nous n'avons pas suivi une formulation classique.

Nous avons respecté les conditions nécessaires permettant de garantir l'auto-applicabilité tout en se basant sur des compositions proposées dans la littérature spécialisée.

Il s'agit de choisir les proportions des constituants dans 1m³ de béton en ayant comme données

Les paramètres suivants :

- Un rapport G/S = 1.
- Un rapport E/C = 0.5
- Un dosage en ciment plutôt élevé C = 400 kg /m³
- Un pourcentage déterminé en ajouts (superplastifiant, les fillers) [25]. Les formulations retenues dans notre étude sont exprimés selon le chapitre IV (voir tableau IV.19).

V.2.7 Conditionnement et conservations des éprouvettes :

Les échantillons ont été coulés et laissés dans le moule 24h. Passés les 24h les éprouvettes ont été mises dans l'eau pour une cure jusqu'au 28^{ème} jour à température ambiante puis laissés à l'air libre, recommandée par RILEM [41] les échantillons étaient prêts à être utilisés pour les essais.

V.2.8 Taille des éprouvettes :

Pour notre étude 4 types d'éprouvettes ont été utilisés à savoir :

- **Des éprouvettes cubiques 10x10x10 cm** : pour les essais de compression.
- **Des éprouvettes cubiques 15x15x15 cm** : pour les essais porosité et la densité. mais aussi la perte de masse et les essais ultrasonores.
- **Des éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm** : pour les essais de flexion.
- **Des éprouvettes cylindriques Ø15x5 cm** : pour les essais de perméabilité à l'air et le taux de pénétration de l'eau.



Figure V.5 Les éprouvettes utilisées.

V.3 Méthodologie d'essais :

Notre étude est divisée en deux parties :

La première partie représente une étude comparative entre les propriétés du béton autoplaçant en changeant le pourcentage d'addition, en l'occurrence les BAP_{F10}, BAP_{F17} BAP_{F20} et le béton Ordinaire BO. On va aussi représenter une étude comparative entre les propriétés de la durabilité de béton autoplaçant selon le taux d'addition, en l'occurrence les BAP_{F10}, BAP_{F17} BAP_{F20} et le béton Ordinaire BO Pour cela plusieurs groupes d'essais étaient effectués.

- **Le 1^{ère} groupe** d'essais correspond aux essais de caractérisation à l'état frais.
La première série de mesures a été réalisée pour caractériser le béton auto plaçant à l'état frais avec différents essais.
- **Le 2^{ème} groupe** d'essais correspond aux essais mécaniques.

La deuxième série de mesures a été réalisée pour l'étude de l'influence des différents pourcentages d'additions sur les propriétés mécaniques des bétons.

- **Le 3^{ème} groupe** d'essais correspond aux essais non destructifs.

La troisième série de mesures a été réalisée pour mesurer les valeurs de la vitesse de propagation des impulsions ultrasonores dans les bétons et déduire ensuite le module d'élasticité dynamique.

- **Le 4^{ème} groupe** d'essais correspond aux mesures des propriétés physiques, de durabilité.

La quatrième série de mesures a été réalisée pour évaluer la porosité totale et en déduire la densité.

La cinquième série de mesures a été réalisée pour mesurer la perméabilité à l'air.

La sixième série de mesures a été réalisée pour mesurer le taux de pénétration de l'eau.

V.4 Essais réalisés à l'état frais :

Il existe dans la littérature plusieurs tests caractérisant les propriétés rhéologiques des BAP. Cependant, dans notre étude, nous nous basons sur les essais recommandés par le laboratoire pédagogique de génie civil de l'Université de Guelma LGCH. Dans notre étude, nous en validons les quatre essais suivants :

V.4.1 L'essai d'étalement au cône d'Abrams :

On utilise le même cône que celui normalement utilisé pour l'essai d'affaissement. Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante, puis il est rempli de BAP. Le cône est ensuite soulevé et le béton s'étale sous sa propre énergie (sans faire bouger la plaque). La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen du disque que forme le béton étalé. Cette valeur doit être comprise entre 600 et 800mm. Les granulats doivent être répartis uniformément ^[23].

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad \text{Eq.(V.1)}$$



Figure V.6. Essai D'étalement.

V.4.2 L'essai d'écoulement à la L-box ou boîte en L :

Pour cet essai, la partie verticale de la boîte est remplie de béton. On ouvre ensuite le volet et le béton s'écoule à travers un grillage, formé de 3 barres d'armature de 16mm de diamètre distantes de 50mm, avant de pouvoir atteindre la partie horizontale de la boîte. On mesure le temps nécessaire dès l'ouverture du volet jusqu'à la fin de l'écoulement du béton dans la partie horizontale. Ce temps d'écoulement doit être compris entre 3 et 7 secondes.

On peut aussi qualifier la capacité d'autonivellement du béton en mesurant la hauteur atteinte aux deux extrémités de la partie horizontale. L'essai permet en outre de vérifier la capacité du béton à s'écouler au travers d'un réseau d'armatures d'écartement défini.

On vérifie que le béton a la Capacité de traverser les armatures d'un coffrage sans avoir besoin de vibration. Il faut Obtenir un rapport ^[37] : $\frac{H_2}{H_1} \geq 0,80$.



Figure V.7. Essai De boîte en L.

V.4.3 L'essai de stabilité au tamis :

Pour ce test, on verse le béton au centre du tamis 15min après l'avoir prélevé. Deux minutes après, on retire le tamis et on pèse le fond avec la laitance. On calcule le pourcentage en masse de laitance par rapport à la masse de l'échantillon. L'essai de stabilité du tamis vise à qualifier les bétons vis-à-vis du risque de ségrégation. On vérifie la bonne homogénéité du béton réalisé. En effet, cet essai met en évidence la ségrégation et le ressuage du béton [34].



Figure V.8 Essai de stabilité au tamis.

- L'essai de V de funnel Un entonnoir de dimensions définies est rempli de béton jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert. On mesure le temps que met le béton à sortir de l'entonnoir jusqu'à ce que cet entonnoir soit entièrement vide. Ce temps d'écoulement, qui doit être compris entre 8 et 14 secondes, caractérise la viscosité du béton. Si le béton s'écoule plus rapidement, c'est que sa viscosité est trop faible [38].

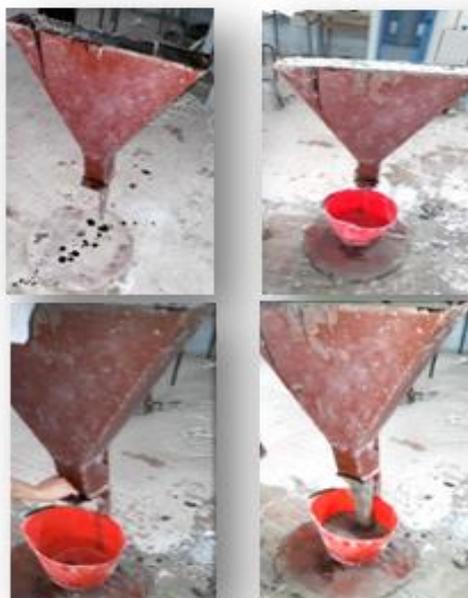


Figure V.9 Essai De V de Funnel.

Tableau V.4 programme des essais réalisé à l'état frais.

TYPE D'essais	Paramètre étudié	Valeur Mesure	Cibles	Unité
Etalement	Fluidité	Etalement : D	≥ 60	[cm]
Boite en L	Déformabilité	Taux de remplissage : H2/H1	$\geq 0,80$	--
Stabilité au tamis V de funnel	stabilité	Indice de ségrégation : π	≤ 15	[]

V.5 Essai résiduels :

Les essais sont effectués sur les éprouvettes après un refroidissement de 24h à l'air libre sur un minimum de trois éprouvettes pour chaque cycle.

V.5.1 Essais mécaniques :

V.5.1.1 Essai de compression :

Cet essai a été réalisé au Laboratoire National de l'Habitat et de Construction (LNHC-Guelma) grâce à une presse mécanique CONTROLS de 1500 KN sur trois échantillons cubiques (100x100x100) mm conformément à NF EN 206-1^[7] pour chaque cycle de chauffage. La vitesse de montée de charge était de 0,5 MPA/s, l'éprouvette est soumise au chargement jusqu'à la ruine.



Figure V.10 Presse de compression utilisée.

V.5.1.2 Essai de flexion :

Cet essai a été réalisé Au laboratoire de Génie Civil (Univ.GUELMA) grâce à une presse mécanique Control : Machine de flexion, motorisée, avec affichage DIGIMAX, 150 KN montre

dans la Figure V.11, sur trois échantillons prismatiques (7x7x28) cm pour chaque Pourcentage, conformément à la norme NF EN 12390-5^[9]. Le chargement a été effectué jusqu'à la rupture. Cet essai permet de déterminer la résistance en traction par flexion 3 points.

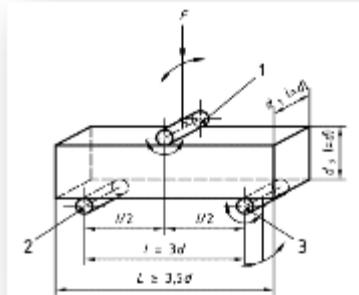


Figure V.11 Presse de flexion utilisée (3 points).



Figure V.12 Essai de flexion réalisé avec ses étapes.

V.5.1.3 Module d'élasticité dynamique :

Il faut d'abord calculer la vitesse de propagation des ondes sonores à travers les éprouvettes de béton pour pouvoir déduire le module d'élasticité dynamique. Nous avons pour cela utilisé un appareillage d'ultrason CONTROLS (Figure V.13).

Après le calcul de la vitesse de propagation le module d'élasticité dynamique a été déduit suivant la norme NF P 18-418^[63] avec l'équation (V.2).

$$E = \frac{\rho_{app} \times V^2 \times (1+\nu)(1-\nu)}{(1-\nu)} \quad Eq. (V.2)$$

Avec :

E : Module d'élasticité dynamique (MPa) ;

P_{app} : Masse volumique du béton (Kg/m^3) ;

V : Vitesse de propagation de l'onde (m/s) ;

ν : Coefficient de Poisson and $\nu = 0.2$.

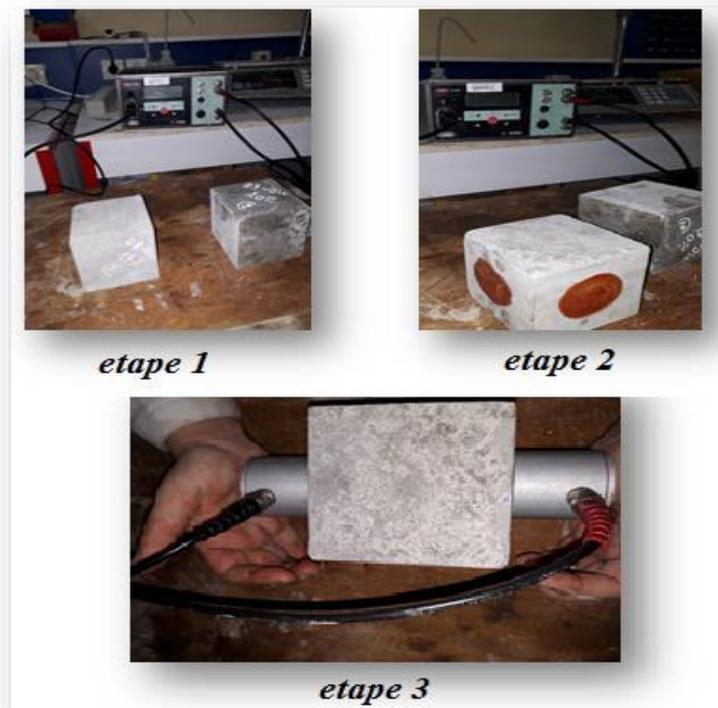


Figure V.13. Les étapes d'essai d'obtention de module d'élasticité dynamique avec l'ultrason.

V.6 Essais physiques :

V.6.1 Porosimétrie à l'eau:

Nous avons pris les éprouvettes utilisées pour l'essai de compression.

La densité et la porosité totale des différents bétons ont été étudiées sur des éprouvettes ($10 \times 10 \times 10$) cm de différents pourcentages de filler. La technique utilisée est une variante de la porosité à l'eau par pesée hydrostatique recommandée par l'AFREM [65], Elle donne la valeur globale de la porosité totale mais ne permet pas de déterminer la distribution des pores. Ils sont mis dans une étuve à une température de $60^\circ C$ jusqu'à masse constante.

Lorsque les échantillons sont entièrement secs, ils sont immergés dans l'eau. Des mesures de masse sont effectuées au fil du temps jusqu'à saturation complète. Une fois que l'échantillon est saturé, une pesée en état saturé immergé est réalisée sur une balance hydrostatique puis elle est suivie du pesage en état saturé après avoir essuyé l'échantillon avec un linge pour enlever

les surplus d'eau de la surface. Les échantillons testés sont BAP_{F10} BAP_{F17}et BAP_{F20}. Concernant la pesée, il est nécessaire d'avoir une balance très précise pour réduire les erreurs de mesures, ainsi, nous avons utilisé une balance de 3 kg avec une précision de 0.01 g disposant d'un crochet pour réaliser les pesées hydrostatiques.

La porosité est déterminée selon l'équation (V.3) :

$$\epsilon = \frac{M_{\text{Sat}} - M_{\text{Sec}}}{V} = \frac{M_{\text{Sat}} - M_{\text{Sat}}^{\text{imm}}}{M_{\text{Sat}} - M_{\text{Sat}}^{\text{imm}}} \quad \text{Eq. (V.3)}$$

Où, M_{Sat} et $M_{\text{Sat}}^{\text{imm}}$ sont la masse saturée d'un échantillon mesurée dans l'air et dans l'eau respectivement. M_{Sec} est la masse sèche obtenue après séchage à l'étuve.

A partir des mêmes éléments, il est possible de calculer la densité apparente ρ_d des Échantillons avec l'équation (V.4) :

$$\rho_d = \frac{M_{\text{Sec}}}{V} = \frac{M_{\text{Sec}}}{M_{\text{Sat}} - M_{\text{Sat}}^{\text{imm}}} \quad \text{Eq. (V.4)}$$



Figure V.14 Essai de porosité.

V.6.2 Perméabilité :

La perméabilité du béton est un autre paramètre pour contrôler la durabilité des structures. C'est l'aptitude d'un corps à se laisser pénétrer et traverser par l'air, par la vapeur d'eau ou par l'eau à l'état liquide. Elle est liée avec les caractéristiques du réseau poreux (forme, dimension, distribution, sinuosité, etc.).

V.6.2.1 Perméabilité à l'air :

La perméabilité aux gaz permet de caractériser la capacité du béton à permettre le transfert d'un gaz au travers de sa porosité. Il constitue à ce titre un indicateur de durabilité du matériau, notamment vis-à-vis des gaz pouvant réagir chimiquement avec les hydrates (carbonatation due au dioxyde de carbone). L'objectif de cet essai est de mesurer le débit volumique de gaz, en l'occurrence l'air comprimé, traversant en régime permanent un échantillon de matériau à base de liant hydraulique soumis à un gradient de pression constant, puis par application de la loi de Darcy d'en déduire la perméabilité aux gaz.

La perméabilité mesurée est la perméabilité apparente. Elle résulte de la loi de «Hagen-Poiseuille» :

$$K = \eta \frac{2.Q.P_0.l}{A.(P^2 - P_a^2)} \quad \text{Eq. (V. 5)}$$

Avec : K : Perméabilité apparente [m²],

A : section de l'éprouvette [m²],

Q : Débit de gaz [m³.s⁻¹],

l: Epaisseur de l'éprouvettes dans la direction de l'écoulement,

η : Viscosité dynamique du gaz d'essai [Pa.s] (Air à 20°C, η : 1.82 × 10⁻⁵Pa.s),

P : Pression absolue à l'entrée [Pa],

P_a : Pression absolue à la sortie [Pa],

P₀ : Pression à laquelle le débit est mesuré [Pa.s] (habituellement, p = p₀).

Pour déterminer la perméabilité apparente des bétons, nous utilisons un perméamètre Controlab compte-bulles. Il s'agit d'un perméamètre à charge constante. Dans des cellules d'essai qui permettent une étanchéité complète des surfaces de l'enveloppe. Le volume d'air s'écoulant est mesuré sur le côté opposé ^[56].



Figure V.15 Dispositif utilisée pour le calcul de la perméabilité à l'air (compte-bulles)

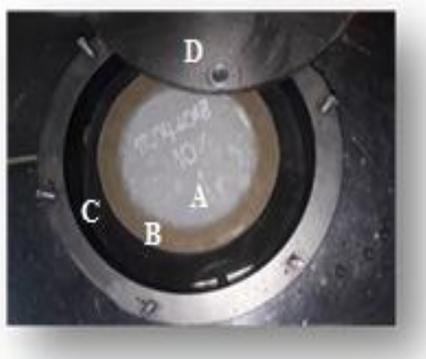


Figure V.16 Intérieur d'une cellule de perméabilité à l'air.
 A : Echantillon de béton, B : Manchon en polyuréthane étanche,
 C : Chambre à air gonflable, D : Couvercle avec fixations.

Pour mesurer la perméabilité des bétons, on confectionne des éprouvettes cylindriques $\phi 15 \times 5\text{cm}$ en utilisant des moules en PVC confectionnés spécialement pour cette essai. Les éprouvettes sont pesées, référencées et mises dans le four en même temps que les autres éprouvettes servant à réaliser les essais mécaniques.

Les essais doivent être réalisés $24\text{h} \pm 4\text{h}$ après leur sortie du four. Cela permet de conserver les mêmes conditions hydriques pour toutes les éprouvettes.

Le perméamètre CEMBUREAU fournit la perméabilité apparente K_a du matériau calculée en utilisant l'équation (EqIII.6) Pour déterminer la perméabilité intrinsèque K_v , on utilise la correction proposée par Klinkenberg ^[66], définie par l'équation (V.6).

$$K_a = K_v \left[1 + \frac{b^*}{p} \right] \quad \text{Eq. (V.6)}$$

Avec

K_a : Perméabilité apparente (m^2),

K_v : Perméabilité intrinsèque (m^2),

b^* : Coefficient de Klinkenberg (bars).

$$b^* = -0.032(Sr) + 3.119[91] \quad Eq. (V.7)$$

Sr : degré de saturation = 0 vu que toutes les éprouvettes sont sèches

P : Pression moyenne (bars)

$$P = \frac{P_0 + P_{Adm}}{2} \quad Eq.(V.8)$$

Ou P_0 : Etant la pression atmosphérique.

Pour mesurer la perméabilité, nous avons suivi les recommandations fournies par l'AFREM [56]. On dispose l'éprouvettes dans la cellule d'essai, puis procéder à sa fermeture en pensant à mettre tous les éléments indispensables comme la chambre à air latérale et les deux disques striés de part et d'autre de l'éprouvettes. Une fois fermée, il faut gonfler la chambre à air à une pression d'au moins 8 bars (soit 0.8 MPa) à l'aide du manomètre à main. Cette pression doit être au moins égale à trois fois la pression d'injection maximale exercée.

Cette étape termine la mise en place de la cellule d'essai. Ensuite, le gaz est injecté dans la cellule et la perméabilité peut être mesurée une fois que le régime est devenu stationnaire.

D'après l'AFREM, il faut utiliser trois pressions différentes au minimum pour déterminer la perméabilité apparente des matériaux. Cette pression d'injection est ajustée afin de pouvoir mesurer une pression en sortie et ainsi relever le débit correspondant. Le temps d'écoulement du gaz dans le débitmètre doit être compris entre 20 et 60 secondes. A partir de la valeur relevée, plusieurs autres mesures sont effectuées à intervalles réguliers de 10 minutes.

La perméabilité apparente se fait en fonction de trois pressions d'injection de 1.5, 2.5, 3 et 3.5 bars et cela quelle que soit la formulation testée.

V.6.2.2 Pénétration à l'eau :

Nous avons fait cet essai conformément à la norme (NF EN 13390-8) [64]. Il permet de déterminer l'absorption d'eau de prismes 200 x 200 x 120 mm ou cubes de 15 cm.

L'éprouvette est maintenue entre 2 flasques équipées de joints. L'eau sous pression est appliquée sur la surface de l'éprouvette à l'aide d'un compresseur.

La pénétration de l'eau est évaluée à la fin de l'essai de 2 façons :

- Rupture de l'éprouvette.
- Lecture sur burettes graduées.

Dans notre, nous avons utilisée des éprouvettes cubique 15^3 cm^3 après refroidissement de $24\text{h} \pm 4\text{h}$. Les éprouvettes ont été placées dans la machine (Figure V.16) et laissé sous pression d'eau de 5 ± 0.5 bars durant 72h, après nous avons coupé les éprouvettes en deux et calculé la monté d'eau.

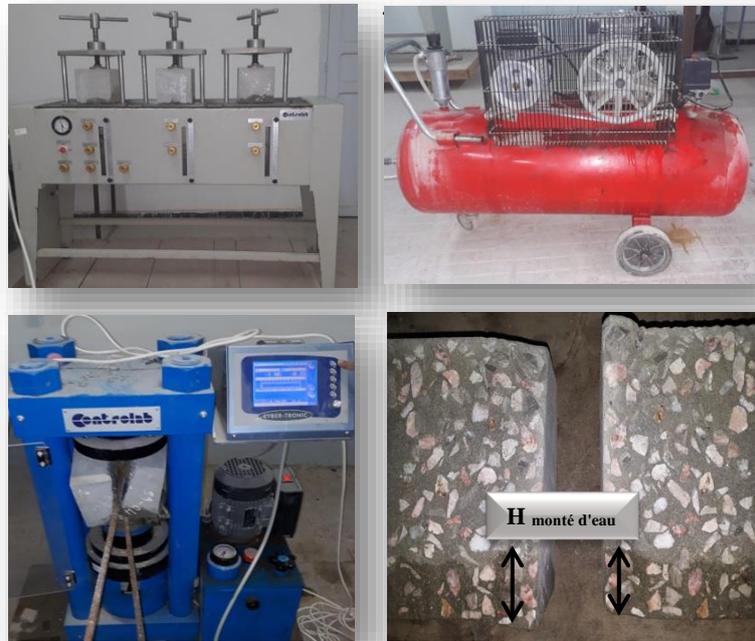


Figure V.17 Dispositif utilisée pour le calcul de la pénétration de l'eau.

V.7 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons essentiellement expliqué les méthodes utilisées dans notre recherche pour l'élaboration de notre projet de fin d'études. Nous avons cité aussi les différentes machines utilisées et les formulations retenus.

Chapitre VI

Résultats et discussions

VI.1 Introduction

Dans de ce chapitre nous présenterons les résultats des essais effectués sur les **BAP_{F10%}**, **BAP_{F17%}** et **BAP_{F20%}** et le béton ordinaire témoin, ainsi que l'analyse de ces résultats.

On a mesurés sur des séries de six éprouvettes pour les essais mécaniques et trois éprouvettes pour les essais physiques, pour analyser de manière statistique les évolutions. Nous présenterons dans la suite principalement des tendances moyennes.

VI.2 La formulations :

VI.2.1 Résumé de la méthode Japonaise :

- Volume des gravillons est limité en prenant le rapport G/S proche de 1.
- Volume de la pâte varie entre : 330 à 400 l/m³ (C+F).
- La masse du ciment : M_c=300 à 450 kg/m³.
- M_F=10% de la masse du ciment.
- Dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

VI.2.2 Les données de base :

On a choisi :

- G/S=0,9.
- On fixe le rapport E/(C+F) =0,38.
- Le dosage en superplastifiant est donné selon la fluidité (donné par l'essai d'étalement), on vise un étalement de 660 à 750mm.

a. Optimisation de la composition du BAP :

Le volume de la pâte pour 1m³ du BAP égale à 340 l/m³. 430 kg/m³ du ciment. 43 kg/m³ du filler calcaire (10% du poids du ciment). E/(C+F) =0,38. G/S=0,9.

b. Détermination de la masse de chaque constituant : On a :

- C=430 kg/m³.
- F=43 kg/m³.
- $\frac{E}{(C+F)} = 0,38$ donc $E = 0,38 \times (430 + 43) \longrightarrow E= 179,74 \text{ l/m}^3$.
- Volume de la pâte égale 340 l/m³.
- Volume de granulats égale 660 l/m³.
- $\frac{G}{S} = 0,9$

- $G + S = 660 \longrightarrow G=660-S$
- $S = \frac{660}{1,9} \longrightarrow S= 347,37 \text{ l/m}^3.$
- $G = 660 - 347,37 \longrightarrow G= 312,63 \text{ l/m}^3.$
- Le dosage en superplastifiant est 1,7% de la masse ciment et filler.
 $SP = 0,017 \times (430 + (43 \times 025)).$
 0.25 : le coefficient de réactivité
 $SP=7,493 \text{ kg/m}^3.$

c. Les masses des constituants pour 1m³ du BAP sont :

- Eau = 174,12 L.
 - Ciment =430 kg.
 - Filler =43kg.
 - Sable =335,939 kg.
 - Gravier : classe 5/15 = 415,798 kg.
 - SP=1,7%=7.4928 kg.
- ❖ On a fait cette méthode pour tous les pourcentages de fillers

On peut résumer le formulaire dans le tableau suivant, utilisant 3 différents pourcentages du fillers calcaires a base 10% ; 17% et 20% avec la formulation de béton ordinaire :

Tableau VI.1 : Différents formulations de BAP avec la formulation de béton ordinaire.

Composition (kg/m ³) et paramètres de formulation	<i>BAP_{F10%}</i>	<i>BAP_{17%}</i>	<i>BAP_{20%}</i>	<i>BO</i>
Ciment	430	430	430	400
Fillers calcaires	43	73.1	86	-
Medaplast SP 40	7.493	7.620	7.675	-
Sable	335.939	335.939	335.939	650
Gravier 5/15	415.798	415.798	415.798	1100
Eau	174.412	185.8435	190.7	200
Rapport G/S	1.23	1.23	1.23	1,70
Rapport E/C	0.40	0.432	0.443	0,50
Rapport ADD/ L	0.10	0.17	0.20	-

VI.3 Résultats et Analyses :

Les résultats trouvés sur les différents types des bétons, nous permettent d'avoir un aperçu sur l'effet de fillers calcaire sur la qualité du béton.

Pour mettre en évidence cette influence nous présentons dans les tableaux des essais effectués dans le but d'une comparaison entre le béton ordinaire, et le béton autoplaçant.

VI.3.1 Résultat des essais à l'état frais :

Le **tableau VI.2** montre les propriétés des bétons autoplaçants à l'état frais. Pour toutes les groupes des bétons.

Tableau VI.2 propriétés des BAP l'état frais.

Essais au cône d'Abrams (cm)	73	72	70	-
Essai boîte en L	0,88	0.90	0.91	-
Essai stabilité au tamis %	12.69	10.27	9.55	-
Essai de V de Funnel	7.5	6.6	4.8	

VI.3.2 Résultat des essais à l'état durci :

VI.3.2.1 Résultat des essais mécaniques :

La résistance à la compression, la résistance à la flexion, le module d'élasticité dynamique. On a mesurées après les 28_{jr} de la cure dans l'eau.

VI.3.2.1.1 Essai de compression

La résistance mécanique en compression est une caractéristique essentielle du béton et l'un des paramètres fondamentaux de notre étude .par conséquent, sa détermination et son évolution ont été suivies pour toutes les compositions des BAP étudiés dans cette étude et aussi pour le béton ordinaire.

Le rapport eau /ciment qui gouverne la résistance du béton ordinaire en compression simple n'est Plus le seul paramètre qui influence sur la résistance de BAP.

Les essais de compression ont été effectués dans le but de mettre en évidence l'effet de paramètre à savoir : le pourcentage d'addition sur la résistance mécanique en compression. Afin d'étudier l'effet de ce paramètre sur la durabilité du béton.

Tableaux VI.3 : Résistance à la compression des BO et des BAP en fonction des Différents pourcentages de fillers 10% 17% et 20%.

BO				
	M _c	M' ₂₈	C(KN)	σ(MPa)
1	2.195	2.242	326.1	26.1
2	2.220	2.276	272.8	27.2
3	2.210	2.259	258.0	25.8
4	2.236	2.268	221.6	30.1
5	2.201	2.255	209.9	29.2
6	2.211	2.255	351.7	28.4
	Moyenne			27.8

BAP _{F10%}				
	M _c	M' ₂₈	C(KN)	σ(MPa)
1	2.195	2.242	372.4	37.2
2	2.220	2.276	356.8	35.36
3	2.210	2.259	338.0	33.80
4	2.236	2.268	380.8	38.08
5	2.201	2.255	356.8	35.68
6	2.211	2.255	351.7	35.17
	Moyenne			35.88

BAP _{F17%}				
	M _c	M' ₂₈	C(KN)	σ(MPa)
1	2.295	2.317	394.0	39.40
2	2.250	2.293	375.6	37.56
3	2.305	2.360	369.5	36.95
4	2.215	2.243	376.1	37.61
5	2.205	2.243	384.1	35.25
6	2.210	2.249	401.0	40.10
	Moyenne			37.81

BAP _{F20%}				
	M _c	M' ₂₈	C(KN)	σ(MPa)
1	2.271	2.301	402.2	40.22
2	2.262	2.303	435.5	43.55
3	2.275	2.290	396.5	39.65
4	2.258	2.294	384.4	38.44
5	2.281	2.426	352.5	38.41
6	2.257	2.261	405.5	40.55
	Moyenne			40.13

La résistance à la compression est différente entre les quatre bétons et elle dépend du type de béton ainsi que le pourcentage de filler utilisées ou on remarque que pour le béton ordinaire la résistance est considéré faible par rapport au trois type de béton autoplaçant elle est de **27.8 MPa** qu’après Une augmentation de résistance modérée de **40.13 MPa** a été observée pour le BAPF17% après on observe qu’il y’a une légère diminution pour Le BAP_{F20%} de **40.13 MPa**.

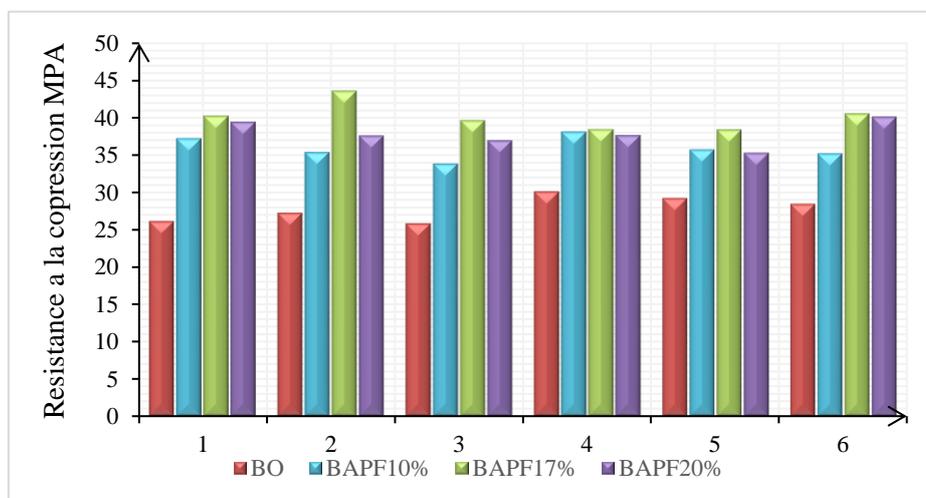


Figure VI.1 Résistance de compression résiduelle relative

D'après les résultats menés en **Figure VI.1** On peut observer les constatations suivantes : Le béton témoin (béton ordinaire) toujours présente une faible résistance à la compression dans l'âge de 28 jr.

L'augmentation de dosage de filler calcaire dans la composition du béton autoplaçant, crée une augmentation en résistance à la compression du béton jusqu'à le 17 %, à 20 % en remarquent une léger diminution de résistance.

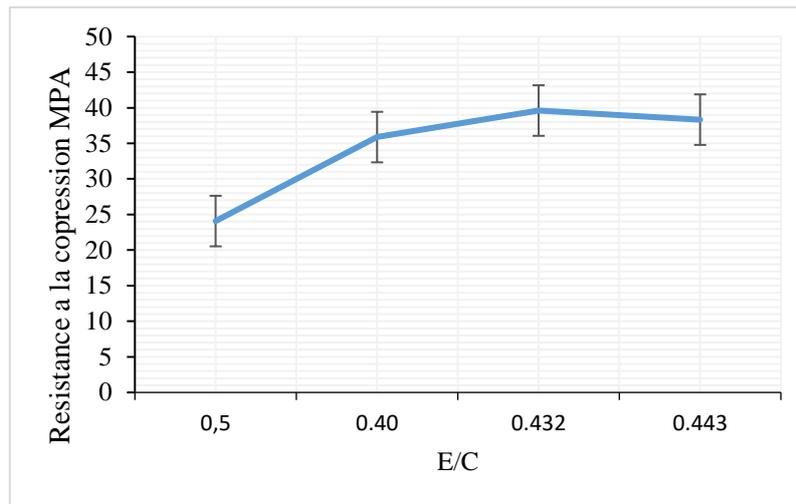


Figure VI.2 courbe de la résistance la compression par rapport au taux E/C

On remarque dans la figure précédente que le rapport E/C influe sur la résistance à la compression proportionnellement la résistance augmente avec l'augmentation de rapport j'jusqu'à $\frac{E}{C} = 0.432$ et c'est le taux de BAP a base 17% après il y'a une légère diminution jusqu'à le taux $\frac{E}{C} = 0.443$ celle de BAP a base 20

Les additions minérales telles que le filler calcaire, donnent aux BAP_s une microstructure plus dense que les bétons ordinaires de même rapport E/C. La porosité de ces BAP_s, en particulier celle de l'auréole de transition, est significativement plus faible que celle des bétons ordinaires, d'après ces données, il en résulte de ces observations une amélioration de la durabilité de ces bétons. [66]

VI.3.2.1.2 Essai de Flexion :

Tableaux VI.4 Résistance à la flexion de BO et des BAP avec trois pourcentages

BO			
	M _c	M' ₂₈	σ(MPa)
1	3044.31	3140.12	4,55
2	3110.19	3136.32	5,04
3	3022.57	3112.22	4,81
4	3011.04	3154.15	4,77
5	3075.16	3105.14	4,55
6	3023.54	3150.04	4,99
Moyenne			4.79

BAP _{F10%}			
	M _c	M' ₂₈	σ(MPa)
1	3081.2	3162.25	4,91
2	3132.4	3213.20	5,18
3	3134.5	3215.26	5,34
4	3021.7	3101.93	5,22
5	3051.5	3128.12	5,71
6	3054.8	3119.87	5,41
Moyenne			5.26

BAP _{F20%}			
	M _c	M' ₂₈	σ(MPa)
1	3145.11	3201.27	5,28
2	3105.20	3162.10	6,48
3	3200.10	3258.18	5,69
4	3105.10	3198.25	5,22
5	3152.32	3209.45	6,08
6	3208.44	3281.20	5,62
Moyenne			5.72

BAP _{F17%}			
	M _c	M' ₂₈	σ(MPa)
1	3091.22	3140.22	5,88
2	3085.17	3136.52	7,74
3	3062.51	3112.72	6,32
4	3088.18	3154.25	6,62
5	3105.26	3205.44	6,46
6	3098.54	3150.54	6,39
Moyenne			6.56

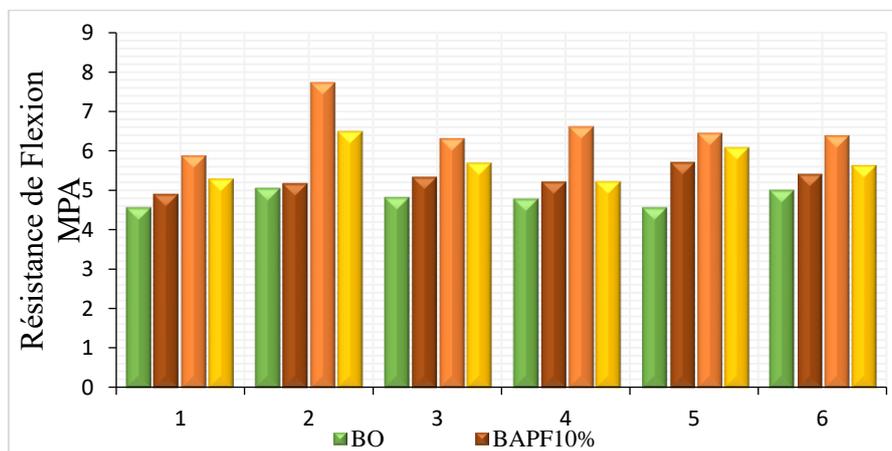


Figure VI.3 Résistance de Flexion résiduelle relative

L'analyse globale des valeurs de la résistance en traction par flexion montre que les BAP à base 10% de filler calcaire ont des valeurs légèrement supérieures à celle de BO et Celle de 17% ont des valeurs augmenté à celle de 20%, ou on remarque que pour le béton ordinaire la résistance est de **4.79 MPa** presque similaire de béton autoplaçant a base 10% elle est de

5.26MPa avec Une montée de résistance remarquable de **6.56 MPa** a été observée pour le BAP_{F17%} après on observe qu'il y'a une légère diminution pour Le BAP_{F20%} de **5.72MPa**.

La résistance à la flexion diminue progressivement avec la diminution de pourcentages de filler calcaire jusqu'à l'absence d'addition c'est le cas de béton ordinaire. et elle augmente avec l'augmentation d'addition jusqu'à 20%. La tendance générale de la résistance résiduelle à la flexion est une diminution de la force résiduelle de flexion pour tous les bétons les résultats ont montrés **Tableaux VI.4** et la **Figure VI.3**.

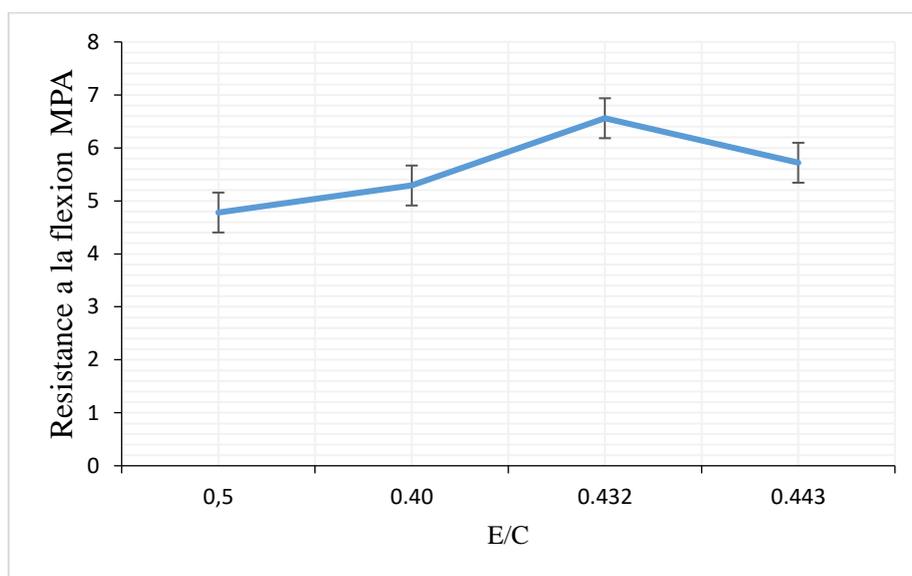


Figure VI.4 courbe de la résistance la flexion par rapport au taux E/C

On remarque dans la figure précédente que le rapport E/C influe sur la résistance à la flexion proportionnellement la résistance augmente avec l'augmentation de rapport j'jusqu'à $\frac{E}{C} = 0.432$ et c'est le taux de BAP a base 17% après il y'a une légère diminution jusqu'à le taux $\frac{E}{C} = 0.443$ celle de BAP a base 20%

VI.3.2.1.3 Module d'élasticité dynamique

Le **tableau VI.5** et La **figure VI.5** Montre la variation du module d'élasticité dynamique de chaque mélange par rapport aux nombre d'éprouvettes confectionné de pourcentages des fillers difféérés.

Tableau VI.5 Module d'élasticité dynamique.

		Les éprouvettes			
Composition		N° 1 (MPa)	N° 2 (MPa)	N° 3 (MPa)	Moyenne(MPa)
BAP _F	10%	45761,486	44361,348	44761,451	44961,428
	17%	46940,357	47579,92	47763,456	47427,911
	20%	46395,600	46305,116	45047,616	45916,110
BO	BO	42 082	42 736	40 574	42 804

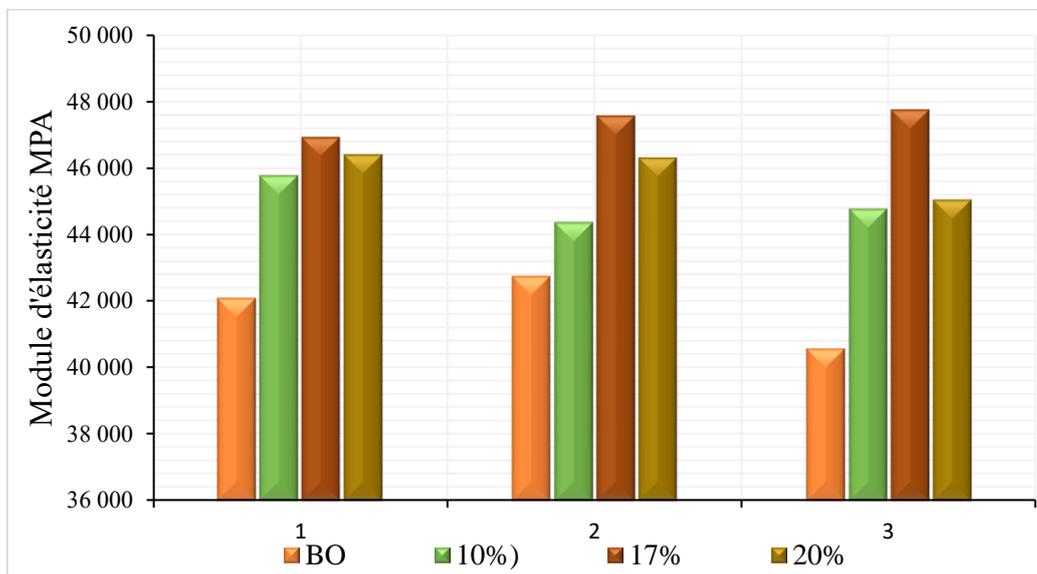


Figure VI.5 Le module d'élasticité dynamique de béton ordinaire et des BAP avec différents pourcentages

La Figure VI.5 montre une variation du module de l'élasticité dynamique en fonction du type de béton, et se vérifie par les essais ultrasoniques.

On peut conclure que le béton ordinaire donne une résistance faible par rapport au béton autoplaçant avec ces trois pourcentages de filler calcaire ; on a aussi remarqué que les bétons autoplaçant à base de 17% de fillers et augmenté que celle de 10% en revanche à celle de 20% on remarque une léger diminution, ce que veut dire que l'addition minérale utilisée n'influe sur le module d'élasticité dynamique à certain pourcentage.

VI.3.2.2 Résultat des essais physique

VI.3.2.2.1 Essai de porosité

La porosité totale de chaque mélange par rapport au pourcentage de filler est représentée sur la **figure VI.6**. Comme prévu, à béton autoplaçant à base 10% de filler ,17% et 20% en revanche le béton ordinaire.

Ce dernier a une porosité plus faible que celle de 10 % ,17 % et 20%, Cela est dû à la teneur en cendres volantes élevée dans CEM 42,5 R, combiné avec la chaux résultant de l'hydratation des composants actifs du ciment Portland, les pores sont remplis et les espaces capillaires fermés par les composés formée , pour tous les mélanges, on observe une légère augmentation de la porosité à mesure que l'addition augmente. Cette augmentation était uniforme et plutôt monotone.

Tableau VI.6 : La porosité des BAP en fonction de différents pourcentages de filler

		<i>Les éprouvettes</i>			
Composition		<i>N° 1 (%)</i>	<i>N° 2 (%)</i>	<i>N° 3 (%)</i>	<i>Moyenne(%)</i>
BAP_F	<i>10%</i>	9.91	10.42	10.21	10.18
	<i>17%</i>	7.01	5.78	6.09	6.29
	<i>20%</i>	6.74	5.91	5.21	5.95
BO	<i>BO</i>	12.84	10.24	11.58	11.55

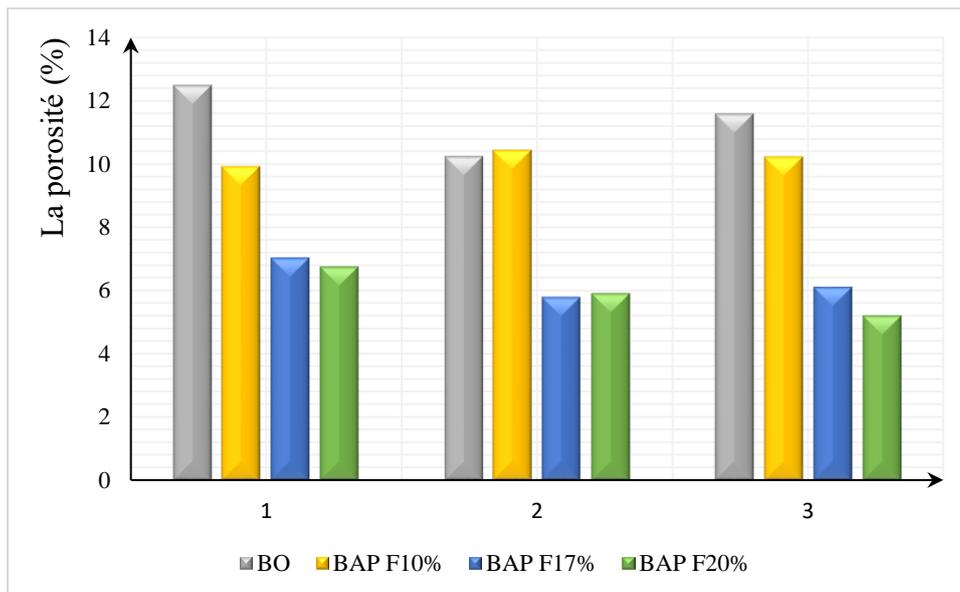


Figure VI.6 La porosité totale de chaque mélange par rapport au pourcentage de filler calcaire et de béton ordinaire.

VI.3.2.2.2 Essai de densité

L'évolution de la densité apparente de béton autoplaçant en fonction de Pourcentage d'addition ainsi que le béton ordinaire est illustrée à la **figure VI.7**. Pour tous les mélanges, on a observé une légère diminution de la densité apparente entre BAP_{F 10%} et BO. Comme il a été rapporté par de nombreux auteurs, la réduction de la densité est due au départ de l'eau pendant le chauffage du béton, la diminution est associée à l'expansion thermique du béton, et plus particulièrement des granulats. L'évolution de la densité est corrélée à celle de la porosité car les deux phénomènes sont liés [68].

Tableau VI.7 La densité des BAP et de BO.

		Les éprouvettes			
Composition		N° 1 (MPa)	N° 2 (MPa)	N° 3 (MPa)	Moyenne(MPa)
BAP_F	10%	2.21	2.23	2.20	2.21
	17%	2.23	2.22	2.23	2.22
	20%	2.26	2.26	2.25	2.77
BO	BO	2.2	2.19	2.2	2.19

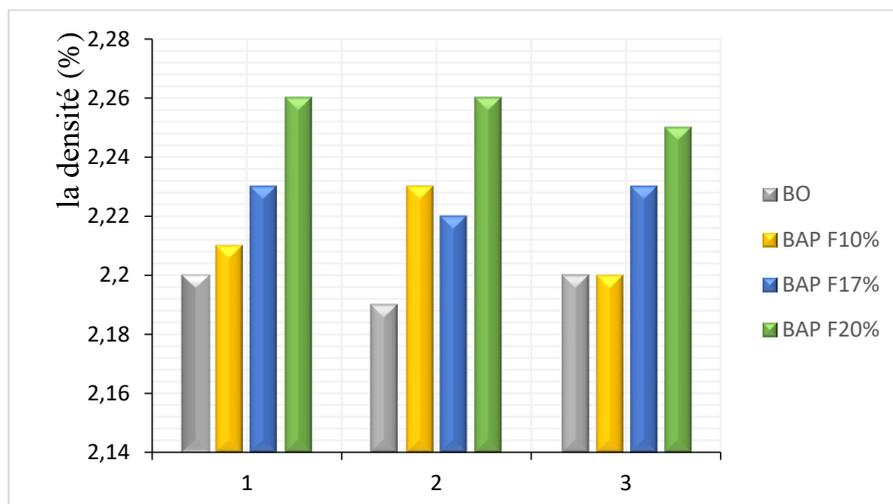


Figure VI.7 L'évolution de la densité apparente en fonction de pourcentage de filler calcaire et de béton ordinaire.

VI.3.2.2.3 Perméabilité au gaz

La perméabilité d'un matériau cimentaire se traduit par son aptitude à se laisser traverser par un fluide percolant cette caractéristique va être contrôlée par différents facteurs comme :

- La nature du fluide percolant, dans cette étude c'est de l'air qui est interne vis-à-vis de la matrice cimentaire.
- La porosité totale du matériau.
- Les chemins de percolation qui traduisent la connectivité et la tortuosité de réseau poreux.

Les résultats de la perméabilité apparente K_{App} en fonction de pourcentage d'addition ainsi que le béton ordinaire.

Tableau VI.8 Résultat de coefficient de perméabilité apparente.

		Les éprouvettes			
Composition		N° 1 (MPa)	N° 2 (MPa)	N° 3 (MPa)	Moyenne(MPa)
BAP F	10%	8.7984 E ⁻¹⁵	9.0890 E ⁻¹⁵	9.4806 E ⁻¹⁵	9.1226
	17%	7.9472 E ⁻¹⁵	7.9904 E ⁻¹⁵	8.1842 E ⁻¹⁵	8.0406
	20%	11.0264 E ⁻¹⁶	5.7419 E ⁻¹⁵	5.6307 E ⁻¹⁵	4.1584
BO	BO	-	-	-	

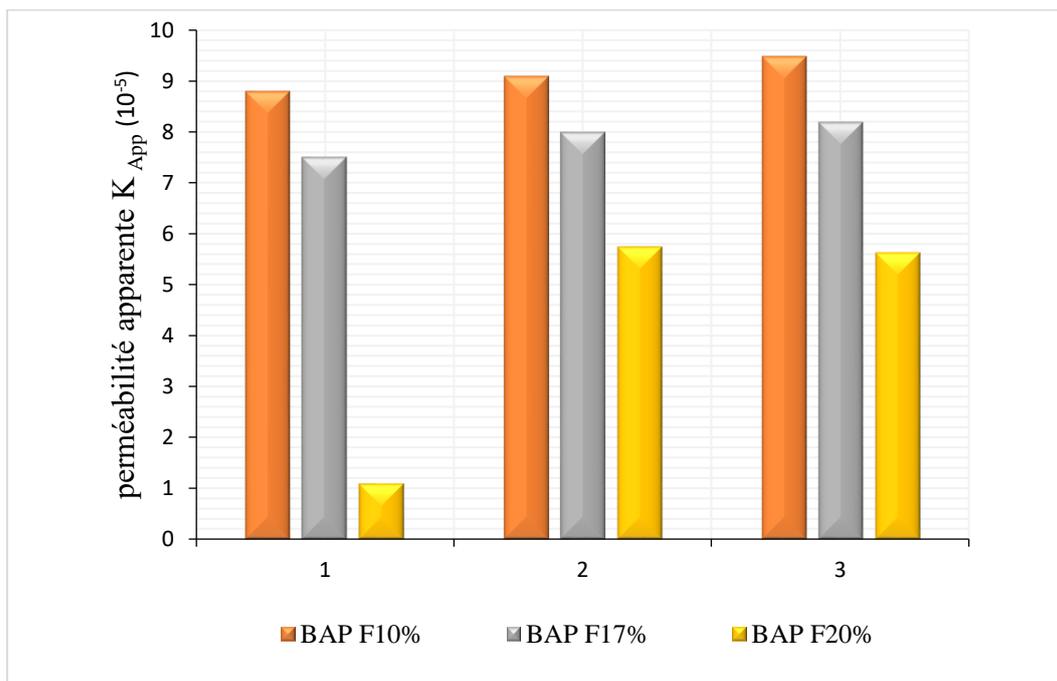


Figure VI.8 L'évolution de la perméabilité apparente K_{App} .

On remarque que la relation entre la perméabilité et le pourcentage du fillers calcaires ajoutés est inversement proportionnelle tel que son maximum est atteint à 10% avec un coefficient spécifique de perméabilité de $9 \text{ E}^{-15} \text{ m}^2$ puis elle diminue en augmentant le pourcentage jusqu'au $1 \text{ E}^{-15} \text{ m}^2$.

VI.3.2.2.4 Essais de pénétration de l'eau

Tableau VI.9 La pénétration de l'eau en fonction

		Les éprouvettes			
Composition		N° 1 (Cm)	N° 2 (Cm)	N° 3 (Cm)	Moyenne(Cm)
BAP_F	10%	2.43	2.75	2.4	2.52
	17%	2.045	2.85	2.04	2.31
	20%	3.01	3.45	4.51	3.65
BO	BO	6.2	5.4	4.22	5.27

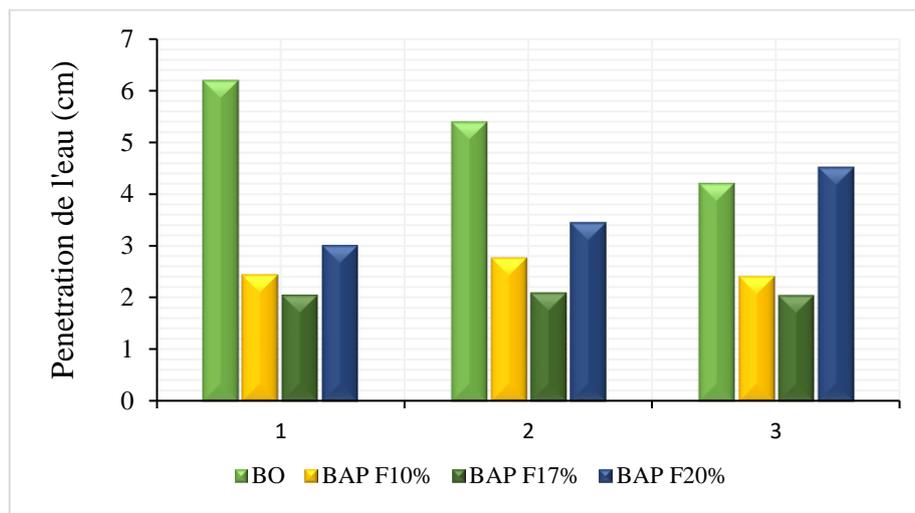


Figure VI.9 La pénétration de l'eau.

La **figure VI.9** montre la pénétration de l'eau en fonction de difer pourcentage ainsi que le béton ordinaire. Après 72 heures de test, tous les spécimens ont été coupés en deux, par scission. Comme on peut le voir sur cette figure que la pénétration de l'eau dans le béton entre le BAP_{F10%} et BAP_{F17%} est assez stable. Au-delà de cette pourcentage, une augmentation monotone de la pénétration de l'eau au niveau de BAP_{F20%} quel que soit le mélange.

VI.4 Conclusion

Les effets du type d'additions sur les matériaux physiques et mécaniques du béton autoplaçant ont été analysés et étudié sur quatre groupes de bétons. Les propriétés mécaniques et physiques résiduelles ont été déterminées avec différents pourcentages de filler, BAP_{F10%}, BAP_{F17%}, BAP_{F20%} en revanche le béton ordinaire. Les conclusions suivantes peuvent être tirées des résultats expérimentaux :

- Les propriétés mécaniques (résistance à la compression, résistance à la traction, flexion et module d'élasticité dynamique) des bétons testés ont généralement augmenté avec l'augmentation de quantité de filler ajouté a certain quantité.
- Le filler calcaire a eu peu d'effet sur la résistance à la flexion résiduelle relative, par rapport au béton ordinaire BO. En fait, l'ajout du Filler calcaire a accéléré l'augmentation de la résistance à la flexion BO, BAP_{F10%}, BAP_{F17%} jusqu'au BAP_{F20%} On a remarqué une légère diminution.

- la porosité se diminue avec la progression de pourcentage d'addition. Cette diminution peut être expliquée par un rétrécissement des diamètres des pores, d'où une diminution de la valeur de la perméabilité.

La perméabilité d'un ouvrage en béton et sa durabilité dans le temps, dépend de plusieurs paramètres liés d'une part à l'environnement (milieu agressif, types et concentration des agents agressifs) et d'autre part au matériau lui-même (nature et dosage des constituants, conditions de confection et de cure). Il est généralement admis qu'un béton durable est un béton résistant aux agressions. La pénétration d'eau des éléments agressifs dans le béton s'effectue par l'intermédiaire du réseau poreux de la matrice cimentaire, qui représente une barrière ouverte au milieu extérieur. Ce réseau poreux de la matrice cimentaire, qui représente une barrière ouverte au milieu extérieur. Ce réseau poreux est caractérisé par une quantité de pores de dimensions variables pouvant être connectés ou non, l'interconnectivité de ce réseau est une caractéristique qui définit la susceptibilité du matériau d'absorption est le degré de pénétration de tel ou tel agents.

Pour un rapport eau liant similaire, les baps développent une résistance mécanique en compression, égale et parfois même légèrement supérieure à celle des BO la Raison à cette différence est liée à l'utilisation des additions minérale. La prise en compte ou non du concept du liant équivalent ainsi qu'un dosage en superplastifiant plus élevé.

Pera et al et gibbs et zhu ont comparé l'évolution de la résistance mécanique en compression égale et parfois même légère à l'utilisation nt supérieure à celle des BO. La raison à cette différence est liée à l'utilisation des additions minérale, la prise en compte ou non du concept du liant équivalent ainsi qu'un dosage en superplastifiant plus élevé que dans les BO. [66]

Conclusion générale

Conclusion générale :

Les bétons autoplaçants sont des bétons spéciaux dont les qualités méritent d'être valorisées. En raison de leurs propriétés rhéologiques très spécifiques, leur compréhension nécessite des investigations plus approfondies.

Les BAP se développent maintenant en ALGERIE et semblent être amenés à remplacer, à terme, les bétons ordinaires dans de nombreuses applications. Ils présentent en effet des intérêts à la fois techniques et économiques : absence de nuisances sonores en milieu urbain, possibilité de bétonner des zones fortement ferraiillées ou à géométrie complexe et l'obtention d'une meilleure qualité du béton (pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers) d'une part, diminution du temps de personnel lors de la mise en place et réduction des coûts des processus industriels, d'autre part.

Malgré les aspects intéressants que les BAP proposent, en particulier à l'état frais et leur utilisation en constante augmentation, les BAP ne disposent pas encore une bonne connaissance sur leurs propriétés à l'état durci, son développement est freinée par une formulation complexe et un comportement sous sollicitations extrêmes (comportement différé, durabilité, comportement au feu) mal connu.

Alors que de nombreuses études visant à développer l'utilisation du BAP étaient (et sont encore) menées par différentes entreprises ou laboratoires universitaires, plusieurs questions posées par les maîtres d'ouvrage et les maîtres d'œuvre restaient sans réponse.

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais, qui sont le résultat d'une formulation spécifique. Cette dernière doit pouvoir concilier deux propriétés a priori contradictoires : une très grande fluidité et une bonne résistance à la ségrégation les BAP comme des bétons « très fluides, homogènes et stables»

La réalisation de cette étude a été effectuée en deux parties, une partie bibliographique, qui regroupe les trois premiers chapitres, dans le premier on a ressorti les propriétés essentielles du béton ordinaire, afin d'avoir les arguments de comparaison.

A cet effet, et selon les documents élaborés dans ce sens, nous avons trouvé que ces propriétés doivent être présentes dans tout béton ayant le même rôle que le béton ordinaire, à savoir la résistance, l'ouvrabilité, l'élasticité,

Dans le deuxième chapitre, on a mentionnée des généralités a propos les bétons autoplaçants

Conclusion générale

Avec ses caractérisations à l'état frais et durci et aussi les différentes approches de formulation Dans le troisième chapitre on a cité les points plus importants concernant la durabilité avec ses principaux indicateurs

Dans *la deuxième partie* on a réalisé une étude expérimentale qui regroupe les trois derniers chapitres

Le quatrième chapitre contient les essais de convenance des matériaux utilisés pour l'identification de ces derniers afin de connaître les caractéristiques des différents composants des bétons étudiés Les essais réalisés sont ceux recommandés par les normes AFNOR, à savoir, la granulométrie, mesure des masses volumiques, mesure de module de finesse, mesure de propreté.

Le cinquième chapitre décrit les critères des différents essais réalisés avec une description à propos les diverses méthodologies d'essais

Le sixième chapitre envisage la discussion et l'analyse des résultats obtenus, Cette étude a été élaborée en deux étapes.

En première étape, on a confectionné les différents bétons d'après la méthode de «Dreux - Gorisse» concernant le béton ordinaire et pour les bétons autoplaçant on a suivi l'approche japonaise les différents pourcentages de dosage en fillers calcaires qui seraient : 10 %, 17 %, et 20 %.

- La deuxième étape, c'est la réalisation des essais physico-mécanique pour la détermination des propriétés à l'état durci des différents bétons étudiés.

D'après les résultats trouvés nous ressortons les remarques suivantes :

1. Le béton ordinaire est toujours secondaire par rapport aux bétons autoplaçants étudié.
2. Les bétons autoplaçants à divers base de filler calcaire ($BAP_{F10\%}$, $BAP_{F17\%}$, et $BAP_{F20\%}$), présente une résistance à la compression assez acceptable , où on a constaté une augmentation de résistance par rapport à béton ordinaire ,
3. La divergence des valeurs de module d'élasticité entre le béton ordinaire et le béton autoplaçant, d'après l'analyse des résultats on a remarqué que la valeur de Module d'élasticité S'accroît proportionnellement avec l'ajout de l'addition.
4. la réalisation des essais de perméabilité tout en comparant les compositions du béton (BO, BAP et les pourcentages BAP : 10,17 et 20%) nous permet de distinguer que le BAP montre

une durabilité plus importante que celle du béton ordinaire à cause à la présence de filler calcaire qui participe en la diminution de la porosité de béton.

Recommandations :

En perspective, nous proposons les axes de recherches suivants :

1. L'étude de la durabilité du béton à base de filler calcaire à différentes cures.
2. L'étude de l'évolution des caractéristiques physico - mécaniques de ce béton à long terme «plus de 4 mois.

Références

Références Bibliographiques

- [1] **NF EN 12-620**, Granulats pour béton hydraulique.
- [2] ABDI.B, «La durabilité des bétons Autoplaçant destinés à la réparation des infrastructures». Mémoire de maitrisées science appliquées. Université de Sherbrooke, Québec, Canada, 2005.
- [3] ADAMM.N, « Propriétés des bétons », Edition Eyrolles.2000.
- [4] DREUX. G, « Nouveau guide du béton».1979.
- [5] BOUFEDAH BADISSI. A, «Influence de la granularité (classe granulaire 4/22.4) sur les caractéristiques des granulats et sur les propriétés des bétons ordinaires». Thèse de Doctorat. Université de MENTOURI Constantine, 2011.
- [6] Groupe Eyrolles : « Cône d’Abrams. » Edition Eyrolles.2010.
- [7] **NF EN 206-1**, AFNOR. Essai pour béton durci – Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes, Indice de classement, p18-455,2003.
- [8] **NF EN 12390-3**, résistance à la compression des éprouvettes.
- [9] **NF EN 12390-5**, AFNOR. Essai pour béton durci – Partie 3 : Résistance à la flexion des éprouvettes, Indice de classement, p18-433,2001.
- [10] **NF P 18-407** (NA 428), Essai de traction par flexion, 1981.
- [11] **NF 197-1**, Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants ,2012.
- [12] HANI.A, « Etude de comportement d’un béton hydraulique modifié (déchets des pneus) ». Mémoire de master. Université KASDI MERBAH-Ouargla, 2016.
- [13] RACHIL.L, DENDANI.M, «Influence des différentes granulométries des agrégats sur le comportement mécanique du béton ordinaire». Mémoire de master. Université De M’hamed Bougara -Boumerdes, 2016.
- [14] **NF P 15-010**, Liants hydrauliques - Guide d'utilisation des ciments ,1997.
- [15] BENTATA.A, « Etude expérimentale de béton avec le sable dune». Mémoire de magister. Université de Ouargla, 2004.
- [16] BELARIBI.O, «Durabilité des bétons autobloquants à base de vase et de pouzzolane ». Thèse de Doctorat. Université de Mostaganem, 2015
- [17] M’HAMEDI.M, BEN BRAHIM.O, «Durabilité du Béton Autoplaçant à base de sable de dune finement broyé vis-à-vis des attaques chimiques ». Mémoire de Master ACADEMIQUE. Université De Ziane Achour de Djelfa , 2016.
- [18] OUCHI.M,HIBINO.M,OKAMURA.H,«Effect of superplasticizer on self- compactibility of fresh concrete », Transportation research board, 76 th annual meeting, washington DC, 12-16, 1997.

- [19] Association Française de Génie Civil «AFGC», Bétons autoplaçants– Recommandations pour l’emploi, janvier 2008.
- [20] KHAYAT.K.H, «Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidating Concrete», ACI Materials Journal, May, vol. 96, n° 3, p. 346-353, 1999.
- [21] OKAMURA.H, OUCHI.M, «Self-compacting concrete. Development, present and future», Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO7), Stockholm, Suède, pp. 3-14, 13-15, septembre 1999.
- [22] Collection Technique CIM béton, Fiches techniques, Tome 2 ", Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre ", Édition octobre, 2006.
- [23] NASRIS, «Caractérisation aux moyens des essais non destructifs (NDT) et Essai direct d’un béton autoplaçant(BAP) à base de matériaux locaux (effet de la nature du sable) ». Mémoire de magister. Université de Mohamed Boudiaf-M’sila , 2016.
- [24] Benaddad .S, Benatsou. N, «Etude à la compression d’un Béton autoplaçant avec additions minérales (Argile cuite et broyée et Fillers calcaires) ». Mémoire de master. Université d’Abderrahmane Mira-Bejaia, 2012.
- [25] BRAHIM.N, «Etude des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons autoplaçants». Mémoire de magister. Université de Mohamed Khider –Biskra, 2006.
- [26] TAGNIT-HAMOU.A, «Microstructure et physico-chimie des ciments et des bétons». Notes de cours. Université de Sherbrooke. GCI-712. 1995.
- [27] Holcim «Le béton autocompactant». Recommandation étudiée par la société Holcim.Suisse. 26 Novembre 2004.
- [28] NEVILLE. A.M, «Propriétés des bétons». Version française traduit par CRIB. Eyrolles. 2000.
- [29] Abderrahmane. S, «Etude de la durabilité des systèmes béton armé mortiers de réparation en milieu marin». Thèse de doctorat. Université de l’Université de La Rochelle, 2013.
- [30] DREUX .G & FESTA. J : «Nouveau guide du béton et de ses constituants». 8ème Édition.Eyrolles. Mai 1998.
- [31] TURCRY.P,«Retrait et fissuration des bétons autoplaçants : Influence de la formulation».Thèse de Doctorat. Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes.Février 2004.
- [32] VENUAT. M : «Adjuvants et traitements des mortiers et bétons». 1ère Édition. Publiée par l’auteur. Paris, p 429. 1971.
- [33] BAALBAKI.M, « Influence des interactions du couple ciment/adjuvant dispersant sur les propriétés des bétons : Importance du mode d’interaction des adjuvants». Thèse de Doctorat. Université de Sherbrooke, Québec. Septembre 1998.

- [34] SAMOUH. H, ROZIERE.E, LOUKILI.A, «Interprétation des mesures du retrait de dessiccation des bétons autoplaçants (BAP) ». XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie, 6 au 8 juin 2012.
- [35] LEGRAND.C, « La structure des suspensions de ciment». Le Béton Hydraulique, Presses de l'ENPC, 1982.
- [36] KASMI .Z, « Propriétés mécaniques et rhéologiques des bétons autoplaçant fibrés exposés à haute température ».Mémoire de master. Université de Mohamed boudiaf-M'sila.2015.
- [37] Association Française de Génie Civil «AFGC», Bétons autoplaçants –Recommandations provisoires, p63, Juillet 2002.
- [38] NF EN 12350–9, Essai pour béton frais - Partie 9 : béton auto-plaçant - Essai d'écoulement à l'entonnoir en V, 2010.
- [39] Association Française de Génie Civil «AFGC», Bétons autoplaçants –Recommandations provisoires, Annales du bâtiment et des travaux publics, juin 2000.
- [40] BETHMONT.S, « Mécaniques de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP) » . Thèse de doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Décembre 2005.
- [41] RILEM, « Workability and Rheology of Fresh Concrete : Compendium of Tests, Report of Technical Committee TC145 WSM». Edité par Bartos, Sonebi et Tamimi.
- [42] SEDRAN.T, «Rhéologie et Rhéométrie des bétons : application aux bétons autonivelants».Thèse de Doctorat. L'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, p 220,1999.
- [43] HADDAD.O, 1er congrès international sur la technologie et la durabilité du béton à Alger, les 24,25 et 26 Mai 2004.
- [44] TURCRY .PH et LOUKILI. A, Différentes approches pour la formulation des BAP, revue française de génie civil volume 7 n°4, 2003.
- [45] RISSEL KHELIFA.M, «Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants ».Thèse de Doctorat. Université de Constantine et Université D'Orléans, 2009.
- [46] CAPMAS. A, «Béton et développement durable», LA DURABILITE DES BETONS, Presse de l'Ecole des Ponts et Chaussées, mai 2008.
- [47] ZHU.W, QUINN.J, BARTOS.P.J.M, «Transport properties and durability of self-compacting concrete», Proceedings of 2ndInternational Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japan, pp. 451-458, 23-25 October 2001.
- [48] ASSIE. S, « Durabilité des bétons autoplaçants ».Thèse de doctorat. Institut national des Sciences Appliqués de Toulouse, le 29 Octobre 2004.
- [49] AITCIN .P. C, NEUVILLE. A, ACKER.P, « Les différents types de retrait du béton», Bulletin du LCPC 215, réf. 4184, pp. 41-51, mai - juin 1998.

- [50] AUDENAERT.K, SHUTTER.G, « Influence of moisture on the carbonation of self-compacting concrete», Proceeding (SP 212) of the Dixth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Greece, pp. 451-465, juin 2003.
- [51] CARDE.C, «Caractérisation et modélisation de l'altération des propriétés due à la lixiviation des matériaux cimentaires», Thèse de Doctorat, I.N.S.A Toulouse, 1997.
- [52] GUILLON.E,« Durabilité des matériaux cimentaires –modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles ». Thèse de doctorat. Ecole Normale Supérieure de Cachan, France 2004.
- [53] Norme Française NF, « Liants hydrauliques. Guide d'utilisation des ciments». p.15-010, Octobre 19897.
- [54] BAROGHEL-BOUNY.V. et al.Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages, Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction, Etat de l'art et Guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité, Association Française de Génie Civil. 2004.
- [55] MEHTA.P, MONTEIRO.K, « Concrete: Structure, properties, and materials », Prentice Hall, Engle wood cliff, 1993.
- [56] CARE.S, DERKX.F, « Determination of relevant parameters influencing gas permeability of mortars». Construction and Building Materials, 25 (3)- 1248-1256,2011.
- [57] DARCY, « Les fontaines publiques de la ville de Dijon », Edition Dalmont, 1856.
- [58] BERRAIH. M, « Etude des mortiers contenant de la pouzzolane naturelle et des déchets de verre » .Mémoire de Magister. Université de l'ENSET d'Oran.2010.
- [59] TANG. L, SORENSEN.H.E, « Precision of the Nordic test methods for measuring the chloride diffusion/ migration coefficients of concrete», Materials and Structures/ Matériaux et constructions, Vol. 34, p.479-485, octobre 2001.
- [60] ALLAHYARI.I, « Approche performantielle des bétons : Vers une meilleure caractérisation des indicateurs de durabilité ».Thèse de doctorat. Université Toulouse III Paul Sabatier, 2006.
- [61] JURIN.J, « An account of some experiments shown before the Royal Society ; with an enquiry into the cause of the ascent and suspension of water in capillary tubes», Philosophical Transactions of the Royal Society, 30 : 739 - 747. 1718.
- [62] **NF EN 934-2**, Adjuvants pour bétons, mortier et coulis, Partie 2 : adjuvants pour béton - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage ,2012.
- [63] **NF P18-418**, Béton - Auscultation sonique - Mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton, Décembre 1989.
- [64] **NF EN 13390-8**, Mélanges bitumimeux - Spécifications des matériaux - Partie 8 : agrégats d'enrobés,Mars 2006 .
- [65] QUENARD D., CARCASSES M., «Les résultats des essais croisés AFREM : Perméabilité », Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM « Durabilité des bétons », Toulouse, 11-12 décembre 1997, p. 41-58.

[66] KOLLEK .J.J, « The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau method - a recommendation », Materials and Structures, vol 22, p.225-230, 1989.

[67] DERABLA .R, «Influence Des Additions Minérales Sur Le Comportement Au Jeune Age Et A Long Terme Des Bétons Autoplaçants Traités Thermiquement ». Thèse de doctorat. Université 8 Mai 1945 de Guelma, novembre 2015.

[68] Benzaid .M, «Contribution à l'étude du comportement à haute température des bétons autoplaçants ». Thèse de doctorat. Université 8 Mai 1945 de Guelma, novembre 2017.

Références Néto-graphique

[net1] Béton-Définition-Encyclopédie scientifique en ligne

www.techno-science.net, 2008.

[Net2] Propriétés de béton frais

www.infociments.fr/betons/proprietes/proprietes-beton-frais

Consulté le : 09/04/2018 21 :55.

[Net3] Propriétés de béton frais

www.infociments.fr/betons/proprietes/proprietes-beton-durci

Consulté le : 09/04/2018 20 :15.

[Net4] Propriétés des bétons durcis

www.planete-tp.com/proprietes-des-betons-durcis-a671.html

Consulté le : 09/04/2018 16 :55

[Net5] Direction technique et commerciale béton

www.béton-vicats.fr