

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 de 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par :

BENHAMIDA Selma

DOKHANE Rayane

**Thème : Effet de l'incorporation des fibres sur le comportement
des bétons autoplacants (BAP)**

Sous la direction de : **Dr. KHALDI. Nacera**

Juin 2022

Remerciements

En tout premier lieu, nous remercions Allah, le tout puissant qui nous a donné le courage, la volonté, la patience, la santé et la force pour accomplir ce travail.

*Nous vifs remerciements sont adressés à notre encadreur : Docteur **Khaldi Nacera** qui nous a guidées dans notre travail et nous a aidées à trouver des solutions pour avancer.*

Nous avons eu l'honneur d'être parmi vos étudiants et de bénéficier de votre riche enseignement.

Vos qualités pédagogiques et humaines sont pour nous un modèle. Votre gentillesse, et votre disponibilité permanente ont toujours suscité notre admiration.

Veillez bien madame recevoir nos remerciements pour le grand honneur que vous nous avez fait d'accepter l'encadrement de ce mémoire.

*Nous voulons exprimer nos remerciements les plus sincères aux : Pofesseur **Cheraït Yacine**, Professeur **Benmalek M. Larbi**, Docteur **Lafifi Ibrahim** et Docteur **Nigri Ghania** sans oublier le chef de département le Docteur **Himeur Mohamed** pour leur aide.*

*Nos remerciements vont aussi à monsieur **Younes A. Elkarim** pour son aide dans notre travail ainsi tous les autres ingénieurs de **LNHC** de Skikda.*

Enfin, nous adressons nos remerciements à tous nos professeurs et les enseignants de département de génie civil et d'hydraulique qui ont contribué à nos études du premier cycle jusqu'à la fin de notre cursus.

Merci à toutes et à tous

Dédicace

À l'aide du Dieu le tout puissant, qui a tracé le chemin de ma vie, j'ai pu réaliser ce modeste et sérieux travail que je dédie à mes plus chers êtres au monde :

À la lumière de ma vie mes chers parents, pour leur amour, tendresses et encouragements

Que Dieu vous protège et vous accorde une longue vie.

À mes jolies sœurs: Sara, Sabrina et mon beau frère Noureddine.

À mon frère: Saïd et son épouse Hayette.

À toute la famille Benhamida.

À la personne la plus chère à mes yeux, merci pour ton soutien, amour et encouragement.

À ma binôme Rayane et toutes mes chères amies que j'aime le plus au monde :

Surtout : Ithem et ses enfants, Khaoula, Chaima, soyez rassurées de toute ma reconnaissance et de mon profond respect.

À mes camarades du groupe structures en Génie Civil, promotion : 2021/2022.

À tous ceux que je n'ai pas cité nommément.

Merci du fond du cœur je vous aime.

Selma

Dédicace

À l'aide du Dieu le tout puissant, qui a tracé le chemin de ma vie, j'ai pu réaliser ce modeste et sérieux travail que je dédie à mes plus chers êtres au monde :

À la lumière de ma vie mes chers parents, pour leur amour, tendresses et encouragements

Que Dieu vous protège et vous accorde une longue vie.

*À mes deux jolies sœurs: **Maya** et **Nour**.*

*À mon frère jumeau : **Mohamed**.*

À toute ma famille surtout ma tante chérie pour son effort, patience, amour et soutien :

À la personne la plus chère à mes yeux, merci pour ton soutien, amour et encouragements.

*À ma binôme **Selma** et toutes mes chères amies que j'aime le plus au monde :*

*Surtout : **Amel**, **Khaoula** et **Maya** qui m'ont poussé à faire plus de forces pour continuer, soyez rassurées de toute ma reconnaissance et de mon profond respect.*

À mes camarades du groupe structures en Génie Civil, promotion : 2021/2022.

À toutes les personnes qui m'ont soutenu. . .

Merci du fond du cœur je vous aime.

Rayane

Résumé

L'utilisation des Bétons autoplaçants (BAP) c'est considérablement développée au cours des dernières années et une attention très importante est portée à l'étude de leurs propriétés mécaniques et rhéologiques.

L'environnement est un enjeu très important et sa préservation est une responsabilité commune, les déchets jetés par l'être humain composent un grand danger sur l'environnement, il y a donc lieu d'encourager leur élimination par l'opération de recyclage et leur utilisation comme des fibres dans la fabrication des bétons autoplaçants.

L'étude est partie de l'idée que l'incorporation de fibres améliore certains comportements des BAP et valorise l'utilisation des déchets, donc l'incorporation des fibres dans la composition du béton autoplaçant (BAP) à un intérêt qui mérite d'être étudié.

Les bétons de fibres font l'objet d'une très bonne maîtrise technique résultant de plusieurs décennies d'utilisation (formulation, mise en œuvre, dimensionnement...).

L'objectif de ce travail est la valorisation de l'utilisation des déchets, spécialement les pneus usagés comme des fibres en caoutchoucs et consiste aussi à étudier l'influence de l'incorporation de ces fibres sur le comportement mécanique du béton autoplaçant. Les dosages utilisés en fibres sont de l'ordre de 1 et 2 % en masse de béton.

Cette étude a mis en évidence le rôle et l'influence du taux de fibres en caoutchoucs sur les caractéristiques des BAP. L'incorporation des fibres dans le BAP est bénéfique pour l'amélioration de la ductilité du matériau béton connu pour sa fragilité en traction.

Les résultats des essais sur les différentes éprouvettes testées en bétons autoplaçants renforcés par les fibres en caoutchoucs, montrent que l'incorporation de ces fibres a un effet significatif sur les propriétés mécaniques des BAP. Les résultats de ce travail suggèrent que les fibres pneumatiques sont comparables à d'autres fibres utilisées comme renfort dans des bétons autoplaçants. Elles sont complètement aptes à l'utilisation comme renfort dans les bétons autoplaçants.

9) Mots clés : béton auto plaçant, fibres plastiques, pneus usagés, béton de fibre, comportement mécanique...

الملخص

تطور استخدام الخرسانة ذاتية الصب بشكل كبير في السنوات القليلة الماضية وتم إيلاء قدر كبير من الاهتمام لدراسة خصائصها الميكانيكية والريولوجية.

البيئة قضية مهمة للغاية والحفاظ عليها مسؤولية مشتركة، والنفايات التي يلقيها الإنسان تشكل خطرًا كبيرًا على البيئة، لذلك من الضروري تشجيع القضاء عليها من خلال عملية إعادة التدوير واستخدامها كألياف في تصنيع الخرسانة.

تستند الدراسة إلى فكرة أن دمج الألياف يحسن بعض سلوكيات الخرسانة ذاتية الصب ويعزز استخدام النفايات، لذلك فإن دمج الألياف في تكوين الخرسانة ذاتية الصب له مصلحة تستحق الدراسة. خرسانة الألياف هي موضوع تحكم تقني جيد للغاية ناتج عن عدة عقود من الاستخدام (صياغة، تنفيذ، قياس أبعاد ...).

الهدف من هذا العمل هو تبيين استخدام النفايات، وخاصة الإطارات المستعملة كألياف مطاطية، كما يتمثل في دراسة تأثير دمج هذه الألياف على السلوك الميكانيكي للخرسانة ذاتية الصب. الجرعات المستخدمة في الألياف تتراوح بين 1 و 2٪ في كتلة الخرسانة. سلطت هذه الدراسة الضوء على دور وتأثير محتوى الألياف المطاطية على خصائص الخرسانة ذاتية الصب. يعد دمج الألياف في الخرسانة ذاتية الصب مفيدًا لتحسين ليونة مادة الخرسانة المعروفة بهشاشتها في الجر.

أظهرت نتائج الاختبارات التي أجريت على العينات المختلفة المختبرة في خرسانة ذاتية الوضع معززة بألياف مطاطية، أن دمج هذه الألياف له تأثير كبير على الخواص الميكانيكية للخرسانة ذاتية الصب. تشير نتائج هذا العمل إلى أن الألياف الهوائية قابلة للمقارنة مع الألياف الأخرى المستخدمة كتعزيز في الخرسانة ذاتية الصب. إنها مناسبة تمامًا للاستخدام كتعزيز في الخرسانة المضغوطة ذاتيًا.

الكلمات الرئيسية: الخرسانة ذاتية الصب، والألياف البلاستيكية، والإطارات المستعملة، والألياف الخرسانية، والسلوك الميكانيكي ...

Abstract

The use of self-compacting concretes (SCC) has developed considerably in the last few years and a great deal of attention has been paid to the study of their mechanical and rheological properties.

The environment is a very important issue and its preservation is a common responsibility, the waste thrown by the human being compose a great danger on the environment, it is therefore necessary to encourage their elimination by the operation of recycling and their use as fibers in the manufacture of self-placing concretes.

The study is based on the idea that the incorporation of fibers improves some behaviors of the BAP and enhances the use of waste, so the incorporation of fibers in the composition of self-placing concrete (BAP) has an interest that deserves to be studied.

Fiber concretes are the subject of a very good technical control resulting from several decades of use (formulation, implementation, dimensioning ...).

The objective of this work is the valorization of the use of waste, especially used tires as rubber fibers and also consists in studying the influence of the incorporation of these fibers on the mechanical behavior of the self-placing concrete. The dosages used in fibers are of the order of 1 and 2 % in mass of concrete.

This study highlighted the role and influence of the rubber fiber content on the characteristics of the BAP. The incorporation of fibers in the BAP is beneficial for the improvement of the ductility of the concrete material known for its brittleness in traction.

The results of the tests on the various specimens tested in self-placing concretes reinforced by rubber fibers; show that the incorporation of these fibers has a significant effect on the mechanical properties of the BAP. The results of this work suggest that pneumatic fibers are comparable to other fibers used as reinforcement in self-placing concrete. They are completely suitable for use as reinforcement in self-compacting concrete.

Key words: self-placing concrete, plastic fibers, used tires, fiber concrete, mechanical behavior...

Sommaire

Chapitre I : Notions de base sur les bétons autoplaçants

1.1	Introduction	01
1.2	Les bétons autoplaçants	01
1.2.1.	Histoire	01
1.2.2.	Définitions	02
1.3	Les Avantages de béton auto plaçant	02
1.3.1.	Avantages techniques	03
1.3.2.	Avantages économiques	03
1.3.3.	Avantages écologiques	03
1.4	Concept du béton autoplaçant	04
1.4.1.	Cahier des charges d'un béton autoplaçant	04
1.5	Mise en œuvre des bétons autoplaçants	05
1.6	Influence des paramètres de formulation sur les propriétés à l'état frais	07
1.6.1.	Rôle des adjuvants	07
1.6.2.	Volume de pate élevé	08
1.6.3.	Volume de gravillons	09
1.7	Les constituants d'un BAP	09
1.7.1.	Introduction	09
a.	Matériaux de base	09
•	Le ciment	10

• Définitions de ciment portland	10
• Composition chimique du ciment Portland	10
• Les différents types de ciment	10
• Paramètres influençant la qualité du ciment Portland	11
• Granulats	11
• L'eau de gâchage	12
b. Les additions calcaires	12
c. Les adjuvants	13
• Super plastifiants	14
- Mode d'action des super plastifiants	14
- La répulsion électrostatique	14
- La répulsion stérique	15
- Facteurs influençant l'efficacité des super plastifiants	16
d. Les fillers calcaires	17
I.8 Caractérisation des bétons autoplaçants (BAP)	18
I.8.1. Caractéristiques rhéologiques du BAP	18
I.8.2. Caractérisation des bétons à l'état frais	18
1) Essai d'étalement (Slump Flow)	19
Mode opératoire	19
2) Essai de V-Funnel	21
Matériel utilisé	21
Mode opératoire	21

3) Essai de la Boite en L	22
Mode opératoire	22
4) Essai de stabilité au tamis	23
Matériel utilisé	23
Mode opératoire	24
I.8.3. Caractérisation des BAP à l'état durci	25
Les essais de compression	26
Les essais de traction par flexion	26
Module d'élasticité	27
Durabilité	27
I.9 Méthodes de formulations des BAP	27
I.9.1. Formulation des BAP	27
I.9.2. Différentes méthodes de formulation	28
I.9.2.1. La méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires	28
I.9.2.2. La méthode basée sur l'optimisation du mortier (méthode Japonaise)	29
I.10 Domaine d'utilisation des BAP	29
I.11 Fabrication et transport des BAP	30
I.11.1. Fabrication des BAP	30
I.11.2. Transports des BAP	30
I.12 Conclusion	31

Chapitre II : Le béton de fibres

II.1	Introduction	32
II.2	Définition de béton de fibres	32
II.3	Historique du béton de fibres	33
II.4	Les fibres	34
	II.4.1. Les types des fibres	35
	II.4.2. Rôles des fibres dans le béton	36
II.5	Fabrication de béton de fibres	36
	II.5.1. Diverses applications de béton de fibre	37
II.6	Propriétés du béton de fibre	38
	II.6.1. Effet des fibres sur la maniabilité et la résistance du BAP	38
	II.6.1.1. Effet sur la maniabilité	38
	II.6.1.2. Effet sur la résistance	39
II.7	Les avantages du béton de fibres	39
	a) Aspect technique	39
	b) Aspect économique	39
II.8	Bétons autoplaçants fibrés	40
	II.8.1. Définitions	40
	➤ Particularités	40
	II.8.2. Influence des fibres sur les propriétés à l'état frais	40
	II.8.2.1. Effet sur l'étalement	41
	II.8.3. Comportement mécanique des bétons autoplaçant fibrés	41
	II.8.3.1. Comportement à la flexion	41
	II.8.3.2. Comportement à la compression et à la traction	42
	II.8.4. Utilisation des BAP fibres dans les structures	42
	➤ Palplanches	42
	➤ Voussoirs	43
II.9	Conclusion	43

Chapitre III : les pneumatiques usagés

III.1	Introduction	45
III.2	Les déchets	45
III.2.1.	Différents types de déchets	45
	• Les déchets ménagers et assimilés	45
	• Les déchets des collectivités locales	46
	• Les déchets industriels	46
	• Déchets industriels non dangereux	46
	• Déchets industriels dangereux	46
	• Les déchets inertes	46
	• Les déchets fermentescibles	46
	• Les déchets ultimes	46
	• Les déchets radioactifs	47
III.3	Caoutchouc et déchets de caoutchouc	47
	1. Généralité sur le caoutchouc	47
	2. Définitions	47
	3. Composition chimique d'un caoutchouc	48
	4. Processus de fabrication des matières caoutchouc	48
	5. Utilisation des déchets de caoutchouc dans le bâtiment	48
	6. Les caractéristiques des granulats de caoutchouc	49
III.4	Caoutchouc des pneus	50
	a) Généralités sur les pneus usagés	50
	b) Définition et caractéristiques physiques des pneus	51
	1) La carcasse	51
	2) Le talon	51
	3) La bande de roulement	51

4) Le flanc	52
c) Caractéristiques physiques et chimique des pneus	52
d) Les fonctions et la structure du pneumatique	53
III.4.1 Principaux constituants et catégories d'un pneu	53
III.5 Valorisation du pneumatique usagé	55
1. Valorisation Energétique	55
2. Valorisation matière	56
3. Valorisation originale des pneus usagés	57
✓ Pneus entiers	57
✓ Pneus découpés	57
✓ Pneus déchiquetés	57
III.5.1 Valorisation et réalisations en Algérie par le technique pneu sol	58
Projet pilote	59
III.5.2 Valorisation de poudrette de caoutchouc en béton	60
III.6 III.6.1 Avantages d'utilisation du caoutchouc recyclé dans les bétons	62
III.6.2 Conditions de mise en œuvre	62
• Identification des flux / traçabilité	62
• Réception de la marchandise	62
III.7 Exemples concrets d'utilisation des déchets de caoutchouc	63
III.8 Recyclage de caoutchouc	63
III.9 Conclusion	64

Chapitre IV : Matériaux et procédures expérimentales

Partie 1 : Caractérisation des matériaux

IV.1 Introduction	65
IV.2 Caractéristiques des matériaux utilisés	65
IV.2.1. Caractéristiques du sable	65

IV.2.2. Caractéristiques du gravier	66
- Essai de résistance au choc (Essai Los Angeles)	66
- Essai de résistance à l'usure [Essai MD]	66
IV.2.3. Caractéristiques de l'adjuvant	67
IV.2.4. Caractéristiques des fillers calcaires	68
IV.2.5. Caractéristiques de l'eau de gâchage	70
IV.2.6. Caractéristiques du ciment	70
• a/Essai de consistance de ciment	71
• b/Essai mécanique sur ciment	72
IV.2.7. Caractéristiques des fibres en caoutchoucs	73

Partie 2 : Protocol expérimental

IV.3 Introduction	74
IV.4 Programme expérimental	75
IV.5 Méthode de formulation	75
IV.6 Modes opératoires des essais sur bétons autoplaçants	76
IV.6.1.1. Gâchage et malaxage	76
IV.6.1.2 Éprouvettes	77
IV.6.1.3 Remplissage et préparation	77
IV.6.1.4. Conservation des éprouvettes	78
IV.6.2.Essais réalisés sur béton frais	78
IV.6.2.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams NFEN12 350-8 (Slump Flow)	78
a) Matériel nécessaire	79
b) Mode opératoire	79
IV.6.2.2 Essai d'écoulement à la boîte en L	81
• Mode opératoire	81
IV.6.2.3 Essai de stabilité au tamis	82

IV.6.2.4 Essai de l'entonnoir en V (V-Funnel)	83
• Mode opératoire	83
IV.6.2.5 Mesure de la densité réelle du béton frais	84
IV.6.3 Essais réalisés sur béton durci	85
IV.6.3.1 Essai de compression par écrasement	85
IV.6.3.2 La traction par flexion	86
IV.6.3.3 La traction par Fendage	86
IV.6.3.4 Essai au scléromètre	87
IV.6.3.5 Essai ultrasonique	88
IV.7. Conclusion	89

Chapitre V : Analyse et interprétation des résultats

V.1 Introduction	91
V.2 Résultats des essais à l'état frais	91
V.3 Résultats des essais à l'état durci	92
V.3.1 Influence du taux de fibre sur la résistance	92
V.3.1.1 Évolutions de la résistance à la compression	92
V.3.1.2 Évolutions de la résistance à la traction par flexion des BAP	94
V.3.1.3 Évolutions de la résistance à la traction par fendage	97
V.3.2 Influence de la méthode utilisée sur la résistance	99
V.4 Conclusion	100
Conclusion Générale	102

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I :

Figure I.1: Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP.	Page 04
Figure I.2: Coulage d'une dalle en BAP.	Page 05
Figure I.3 : Exemples de mise en œuvre des BAP.	Page 06
Figure I.4: Eléments préfabriqués en BAP à haute résistance.	Page 06
Figure I.5: Action du super-plastifiant Défloculation des grains de ciment.	Page 07
Figure I.6: Influence de la qualité du super-plastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton.	Page 07
Figure I.7 : Défloculation des grains de ciment par l'adjuvant organique (Phan, 2007)	Page 14
Figure I.8 : Dispersion des grains de ciment par la répulsion électrostatique	Page 15
Figure I.9 : Dispersion des grains de ciment par l'encombrement stérique.	Page 15
Figure I.10 : Mesure de l'ouvrabilité pour les bétons autoplaçant utilisé.	Page 20
Figure I.11:L'essai d'écoulement au V-Funnel utilisé.	Page 22
Figure I-12:Essai à la boîte en L utilisé.	Page 23
Figure I.13 : Essai de stabilité au tamis utilisé.	Page 25
Figure I.14 : réalisation des éprouvettes pour les essais de béton durci utilisé.	Page 26

CHAPITRE II :

Figure II.1: Rôle des fibres dans la matrice de béton.	Page 33
Figure II.2 : Des fibres plastiques utilisées.	Page 35
Figure II.3: Différentes formes de fibres.	Page 36
Figure II.4: Effets des fibres sur l'étalement des BAP.	Page 41
Figure II.5: Palplanches précontraintes à base de mortier autoplaçant fibré (a), béton armé ordinaire (b).	Page 43
Figure II.6: Un voussoir à base de BAP fibré.	Page 43

CHAPITRE III:

Figure III. 1: Les différents diamètres des granulats des pneus usés après broyage	Page 49
Figure III. 2: coup transversale d'un pneu michelin.	Page 54
Figure III. 3: poudrette en caoutchouc.	Page 56
Figure III. 4: schéma d'un filère de valorisation matière (Interstate 880/Dixon Landing Roud, 2001).	Page 58
Figure III. 5: Pose des nappes de pneus projet pilote_Route de Bousmail	Page 59
Figure III. 6: stabilité d'un glissement de terrain-cas de tizi Ghenif-wilaya de Tizi ouzou Algérie.	Page 60
Figure III. 7: technique de l'asphalte caoutchouté.	Page 61
Figure III. 8: Exemple d'utilisation des caoutchoucs recyclés.	Page 63
Figure III. 9: Processus de recyclage de déchets de caoutchouc.	Page 64

<u>CHAPITRE IV:</u>	Page 68
Figure IV.1: Adjuvant utilisé.	Page 69
Figure IV.2 : fillers calcaires utilisé.	Page 71
Figure IV.3: Ciment utilisé.	Page 72
Figure IV.4 : Essai de consistance de ciment utilisé.	Page 72
Figure IV.5: Essais de traction par flexion et compression de ciment utilisé.	Page 74
Figure IV.6: Granulats de caoutchouc (0-4mm).	Page 76
Figure IV.7 : Le malaxeur utilisé.	Page 77
Figure IV.8 : Eprouvettes testées.	Page 79
Figure IV.9 : Essai d'étalement utilisé.	Page 80
Figure IV.10 : essai d'étalement du BAP d'étude utilisé.	Page 81
Figure IV.11 : Essai d'écoulement à la boîte en L.	Page 82
Figure IV.12 : Essai de stabilité au tamis utilisé.	Page 84
Figure IV.13 : essai de l'entonnoir en V utilisé.	Page 84
Figure IV.14: Mesure de la densité.	Page 85
Figure IV.15 : Essai de compression par écrasement utilisé.	Page 86
Figure IV.16 : Essai de traction par flexion.	Page 87
Figure IV.17 : Essai de traction par fendage.	Page 88
Figure IV.18 : Essai au scléromètre utilisé	Page 88
Figure IV.19 : Essai ultrasonique utilisé.	

<u>CHAPITRE V:</u>	Page 92
Figure V. 1: Mode de rupture des éprouvettes par la presse.	Page 93
Figure V. 2: Evolution de la résistance en compression en fonction du taux de fibres dans le sable (0%, 1%, 2%).	Page 94
Figure V. 3: Evolution de la résistance en compression en fonction du taux de fibres dans le gravier (0%, 1%, 2%) .	Page 94
Figure V. 4: Mode de rupture en traction par flexion des éprouvettes.	Page 95
Figure V. 5: Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction du taux de fibres dans le sable.	Page 96
Figure V. 6: Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction du taux de fibres dans le gravier.	Page 97
Figure V. 7: Mode de rupture en traction par fendage des éprouvettes.	Page 97
Figure V. 8: Evolution de la résistance à la traction par fendage en fonction du taux de fibres dans le sable (0%, 1%, 2%).	Page 98
Figure V. 9: Evolution de la résistance à la traction par fendage en fonction du taux de fibres dans le gravier..	Page 99
Figure V. 10: Comparaison entre les résistances obtenues par différentes méthodes.	

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I :

Tableau I.1 : Critères sur les propriétés physiques et chimiques.	Page 13
Tableau I.2 : Les normes NF EN 206-9 prévoit une répartition des BAP en trois classes.	Page 20
Tableau I.3 : Classes de la viscosité apparente - t50.	Page 21
Tableau I.4 : Classe l'aptitude à l'écoulement.	Page 22
Tableau I.5 : classement de la formulation selon le pourcentage π .	Page 24

CHAPITRE II :

Tableau II.1 : Application de divers renforcements de fibres dans les produits à base de ciment.	Page 37
--	---------

CHAPITRE III :

Tableau III.1 : distribution granulométrique pour les trous de filière de diamètre 20mm et diamètre 16 mm (technique et procédés KAHL pour le recyclage des pneus usagés	Page 50
Tableau III.2 : composition moyenne d'un pneu VL en Europe	Page 51
Tableau III.3 : caractéristiques physiques d'un pneu	Page 52

CHAPITRE IV :

Tableau IV.1 : Caractéristiques du sable	Page 66
Tableau IV.2 : Caractéristiques mécaniques des graviers	Page 67
Tableau IV.3 : Analyse chimique de l'adjuvant.	Page 68
Tableau IV.4 : Analyse chimique des fillers calcaires.	Page 69
Tableau IV.5 : Caractéristiques Physiques des fillers calcaires	Page 69
Tableau IV.6 : Analyse chimique de l'eau de gâchage.	Page 70
Tableau IV.7 : Caractéristiques physiques du ciment.	Page 71
Tableau IV.8 : Résultats des essais mécaniques sur le ciment.	Page 73
Tableau IV.9 : Caractéristiques chimiques du ciment.	Page 73
Tableau IV.10 : Caractéristiques des granulats de caoutchouc.	Page 74
Tableau IV.11 : Nomenclature des bétons autoplaçants.	Page 75
Tableau IV.12 : les critères utilisés d'après AFGC.	Page 75
Tableau IV.13 : Compositions des BAP (Kg/m ³).	Page 76
Tableau IV.14 : Classes d'étalement des BAP.	Page 80
Tableau IV.15 : Critère de stabilité.	Page 83

CHAPITRE V :

Tableau V.1 : Caractéristiques rhéologiques du BAP (témoin).	Page 91
Tableau V.2 : Variation de la résistance en compression en fonction du taux de fibres dans le sable.	Page 92
Tableau V.3 : Variation de la résistance en compression en fonction du taux de fibres dans le gravier.	Page 93

Tableau V.4 : Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction du taux de fibres dans le sable.	Page 95
Tableau V.5 : Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction du taux de fibres dans le gravier.	Page 96
Tableau V.6 : Variation de la résistance à la traction par fendage en fonction du taux de fibres dans le sable.	Page 97
Tableau V.7 : Variation de la résistance à la traction par fendage en fonction du taux de fibres dans le gravier.	Page 98
Tableau V.8 : Comparaison entre les résistances obtenues par différentes méthodes.	Page 99

Liste des notations

AFM : Atomic Force Microscop.

BAP : béton autoplacant.

BHP : bétons à hautes performances.

BO : béton ordinaire.

E/C : rapport eau sur ciment.

E/L : rapport eau sur lient.

E_{ij} : module d'élasticité.

E_{sp} : équivalent de sable par piston.

E_{sv} : équivalent de sable visuel.

F : la charge de rupture.

f_{cj} : la résistance à la compression.

FM : les fibres métalliques.

FS : les fibres synthétiques.

G/S : rapport gravier sur sable.

I : l'inertie de flexion.

L : la portée.

L_A : indice los Angles.

MEC : modèle d'empilement compressible.

M_f : moment de flexion.

RILEM : Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages.

SCC : en l'anglais self compacting concrete.

SF : slump flow.

SP : superplastifiants.

SR : stabilité au tamis.

MD : micro-deval.

ρ : la densité du béton.

σ_c : résistance à la compression.

Introduction

Introduction générale

La prise en compte du développement durable dans la construction requiert la création de nouveaux matériaux ou d'optimiser des matériaux existants. L'utilisation des Bétons autoplaçant (BAP) a pratiquement explosé au cours des dernières années et une attention importante est portée à l'étude de leurs propriétés mécaniques et rhéologiques. L'incorporation des fibres dans la composition du béton autoplaçant (BAP) a un intérêt qui mérite d'être étudié.

Un béton fibré est un béton dans lequel sont incorporées des fibres. À la différence des armatures traditionnelles, les fibres sont réparties dans la masse du béton, elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement plus homogène.

Le béton fibré est utilisé dans de nombreuses applications similaires au béton ordinaire. Ce type de béton a connu un réel développement grâce aux travaux de nombreux chercheurs. A l'heure actuelle, divers types de fibres sont utilisés comme renforts dans les bétons pour reprendre les efforts au droit des fissures éventuelles. Cependant, dans la plupart des cas, ces bétons contiennent seulement un seul type de fibre.

Dans le monde, s'agissant de l'industrie automobile, l'utilisation des pneus augmente chaque année. On peut citer quelque cas : la France, en 2008, plus de 366 milliers de tonnes de pneumatiques ont été collectés ce qui constitue une progression de 36% par rapport à 2004 ; l'Algérie en 2004 importe en moyenne 49,62 milliers de tonnes de pneumatiques en caoutchouc, après usage on se retrouve avec environ 45,65 milliers de tonnes de pneus usagés chaque année. Ces chiffres continuent à augmenter chaque année avec le nombre de véhicules dans tous les pays.

Les pneus est un mélange de caoutchoucs, d'acier et de textiles divers, les pneus usagés ne sont pas des déchets dangereux mais ils présentent un danger pour l'environnement et la santé en cas d'incendie sur le site de stockage (émissions de limnées toxiques et éventuellement d'un liquide huileux).

Dans certains pays, il est interdit par la loi de brûler les déchets pneumatiques car la pollution et la fumée produit par cette méthode est inacceptable, malgré c'est la moins chère et la plus simple des solutions pour décomposer les déchets.

La valorisation de pneus usagés est un sujet très important pour la planète entière. Les voies de valorisation choisies sont largement diversifiées : le rechapage (Pneus Usagés Réutilisables-PUR), le broyage sous forme des granulats, la valorisation énergétique notamment comme combustible dans les cimenteries et l'utilisation en travaux publics (Pneus Usagés Non Réutilisables-PUNR).

L'incorporation de ces déchets dans le béton réduit le coût du produit final et également crée des sources supplémentaires dans le but de la protection des ressources naturelles.

Des associations de fibres de différentes caractéristiques commencent à être utilisées pour améliorer les propriétés intrinsèques des bétons.

Grâce à leurs propriétés mécaniques, les fibres permettent de mieux mobiliser la résistance intrinsèque du béton, de réaliser des pièces minces de grandes dimensions et d'offrir au concepteur une plus grande liberté architecturale.

Elles confèrent aux bétons de nombreux atouts :

- la maîtrise de la fissuration ;
- une facilité et rapidité de mise en œuvre ;
- un renforcement multidirectionnel et homogène ;
- un remplacement partiel ou total des armatures traditionnelles.

La structure du béton fibré et ses caractéristiques mécaniques dépendent aussi de sa mise en œuvre (effets liés à l'écoulement; orientation préférentielle des fibres parallèlement au sens de l'écoulement du béton et à la géométrie de la structure). Il est donc nécessaire pour la mise au point de la formulation, de connaître la technique de mise en œuvre.

Bien que les connaissances sur les BAP soient suffisantes pour permettre leur utilisation, certains aspects restent à améliorer. En effet, leur composition spécifique nécessite la mise en place d'un contrôle soutenu de leur formulation, ainsi qu'un contrôle de leurs propriétés à l'état frais, avant mise en œuvre. La maîtrise de ces matériaux n'est pas encore acquise, comme on témoigne la diversité des études menées dans ce domaine. Les essais, mis au point pour caractériser le BAP à l'état frais, concernent deux propriétés essentielles et indissociables : la fluidité et l'homogénéité. Apparaissant comme contradictoires, elles sont

toutes deux nécessaires pour l'obtention d'une construction finale d'une qualité esthétique indéniable, mais également conforme aux exigences techniques préconisées.

Par ailleurs, et afin d'améliorer les performances mécaniques en compression et à la traction d'un béton autoplaçant l'incorporation de fibres est souvent une solution qui donne des résultats probants. Le béton de fibres trouve de plus en plus un emploi en pratique, notamment dans la réalisation des dallages, chaussées bétonnées des routes et de piste d'atterrissage des aérodromes, dans les éléments préfabriqués, et dans le renforcement des ouvrages dégradés.

Cependant des problèmes d'élaboration subsistent encore et exigent des études appropriées. L'emploi d'un tel béton nécessite une recherche rigoureuse de l'influence des paramètres tels que, le type de fibres, leur pourcentage, la longueur etc.

L'objectif principal de cette étude est d'obtenir un béton autoplaçant plus résistant en compression et en traction "à noter que cet axe qui n'a pas fait l'objet de nombreuses recherches". La voie la plus évoquée dans la littérature pour pallier à cette faiblesse de comportement en traction consiste en l'ajout de fibre dans la formulation du béton. Ces dernières jouent un rôle de renforcement qui compense la fragilité du béton par couture de la microfissuration et la macrofissuration. Les fibres ont aussi la capacité de contrôler l'ouverture des fissures, jouant le rôle d'absorbeurs d'énergie. Cependant, cette amélioration est fonction de la géométrie et le % des fibres ainsi que leurs caractéristiques. .

Le BAP qui a fait l'objet de cette étude est un BAP avec la substitution de 1 et 2% du sable de fibres en caoutchouc et une substitution de 1 et 2% du gravier, ces fibres sont utilisées pour l'amélioration des performances des bétons autoplaçants.

Pour faciliter leur utilisation, les fibres doivent:

- Etre faciles à incorporer dans le béton et ne pas perturber le malaxage (leur dispersion dans le béton doit être rapide

Se répartir de manière homogène lors du malaxage au sein du béton (pas d'agglomération de fibres) et lors du bétonnage. [Babaieet *al*, 2019], [Guoet *al*, 2018], [Naima, 2015], [Laifaet *al*, 2014] et [Moreillon, 2013]

CHAPITRE I

Généralités sur le béton auto-plaçant
Généralités sur le béton auto-plaçant

Chapitre I

Notions de base sur les bétons autoplaçants

I.1. Introduction

Le premier chapitre de ce mémoire vise à présenter un état de connaissance actuelle sur les propriétés des bétons autoplaçants rhéologique et mécaniques et les différentes méthodes de formulations, les particularités de la composition de BAP et leur caractérisation à l'état frais et à l'état durci.

I.2. Les bétons autoplaçants

I.2.1. Historique

Pendant plusieurs années à partir de 1983, le problème de la durabilité des structures en béton était un sujet majeur d'intérêt pour le Japon. La création de béton durable pour des structures qui nécessitent un compactage adéquat par des ouvriers. Cependant, la réduction progressive du nombre de travailleurs qualifiés dans l'industrie de la construction au Japon a conduit à une réduction similaire de la qualité de la construction du travail. Une solution pour la réalisation des structures en béton durables indépendamment de la qualité des travaux de construction est l'emploi de béton autoplaçant, qui peut être compacté dans tous les coins d'un coffrage, uniquement par son propre poids et sans besoin de compactage par vibration.

La nécessité de ce type de béton a été proposée par [Okamura et al.1986]. Etudes pour développer l'auto-compactage béton, dont une étude fondamentale sur la maniabilité du béton, ont été réalisées par Ozawa, H et Maekawa, K à l'Université de Tokyo [Ozawa et al. 1989 ;Okamura et al. 1993 ;Maekawa et al. 1999]. Le prototype de béton autoplaçant a d'abord été achevé en 1988 avec des matériaux déjà sur le marché. Le prototype a fonctionné de manière satisfaisante en ce qui concerne le retrait de séchage et de durcissement, la chaleur d'hydratation, densité après durcissement et autres propriétés. Ce béton a été nommé « Béton Haute Performance » et a été défini comme suit aux trois étapes de béton :

- (1) Frais : auto-compactable.
- (2) Jeune âge : évitement des défauts initiaux.

(3) Après durcissement : protection contre les facteurs presque à la même époque, le « Béton Haute Performance » était défini comme un béton à haute durabilité.

En raison d'un faible rapport eau-ciment par le professeur [Aïtcin et al]. [Gagne et al. 1989]. Depuis, le terme béton haute performance est utilisé dans le monde entier pour font référence au béton à haute durabilité. Par conséquent, les auteurs ont changé le terme pour le béton proposé en (béton haute performance autoplaçant).

I.2.2. Définitions

Le béton autoplaçant (BAP), dénommé aussi béton autocompactant (en l'anglais Self Compacting Concrete SCC), sont des bétons spéciaux, très fluides, qui se mettent en place et se serrent sous le seul effet de la gravité, donc sans apport de vibration interne ou externe, même dans des coffrages très ferrailés. Le compactage se faisant uniquement par le poids du béton, et conférant à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondant aux bétons classiques mis en œuvre par vibration. Ainsi la technologie des BAP se veut innovante et remplacera à terme la technique classique des bétons vibrés dans bon nombre d'applications. [Younes, 2021].

Le béton autoplaçant a été mis au point au Japon dans les années 80. Depuis cette technique n'a cessé de se développer notamment en Europe et aux Etats-Unis.

Ces bétons se distinguent des bétons ordinaires par leurs propriétés à l'état frais, notamment par :

- Une très grande maniabilité, évaluer à l'aide du cône d'Abram's (avec cependant une démarche différentes).
- Une grande stabilité vis-à-vis de la ségrégation (essai de stabilité au tamis) et du ressuage (essai de ressuage) ;
- Une grande maniabilité en milieu confiné (essai de boîte en L).

Ainsi ces propriétés doivent être étudiées et évaluer avec beaucoup de soins, dans la mesure où ils représentent les principales caractéristiques des BAP. [Grairia, 2010]

I.3. Les Avantages de béton auto plaçant [Kouici, 2016]

Les BAP entraînent de nombreux avantages, on cite :

I.3.1. Avantages techniques

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

I.3.2. Avantages économiques

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

I.3.3. 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).

I.4. Concept du béton autoplaçant [Haddadou, 2015]

Au Japon, le nombre d'ouvriers qualifiés du bâtiment a continué de baisser depuis le début des années 80, entraînant une perte de connaissances, notamment en matière de technologie de vibration du béton. L'utilisation d'un béton très fluide, qui ne nécessite pas d'apport d'énergie externe pour le serrage, semble résoudre ce problème. Ainsi est né le concept de béton autoplaçant. En plus d'être facile à mettre en œuvre, ce béton présente l'avantage de réduire le temps de travail sur chantier.

Ainsi, le béton autoplaçant (BAP) se distingue des bétons dits ordinaires (BO) ou bétons à vibrer par leurs propriétés à l'état frais. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids quel que soit le confinement du milieu et restent homogènes pendant l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique).

Pour obtenir ces propriétés, le BAP est formulé différemment du BO. Dans leur cas, le lisier, défini comme un mélange de ciment, d'eau et d'additifs, était préférentiellement préjudiciable au gravier (Figure I.1). En général, le BAP utilise la même quantité de ciment et d'eau que le BO, et le volume de sable est assez similaire. Par conséquent, un additif est principalement ajouté en remplacement du gravier.

Les proportions exactes de chaque ingrédient dépendront bien sûr de la méthode de formulation choisie.

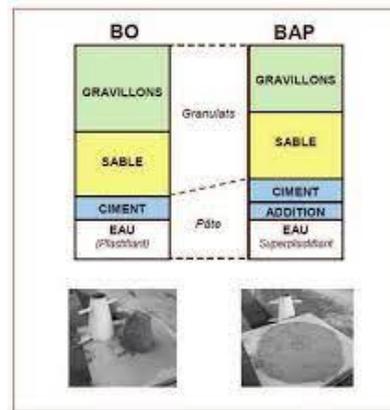


Figure I.1 : Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP.

I.4.1. Cahier des charges d'un béton autoplaçant [Haddadou, 2015]

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

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

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

- De plus, le ressuage d'un BAP ne doit pas être trop fort car ceci peut générer une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées, par rapport à celles situées en zone inférieure lors du coulage, ainsi que l'apparition de fissures.

I.5. Mise en œuvre des bétons autoplaçants [Grairia, 2010]

Il existe plusieurs méthodes permettant de mettre en œuvre les bétons auto-plaçant :

- Faire couler le béton par le haut du coffrage (à l'instar des bétons traditionnels), cependant cette technique présente un inconvénient majeur : elle aggrave le phénomène de la ségrégation du béton frais, et bien que les bétons auto-plaçant soient moins sensible que les bétons ordinaires, il est fortement conseillé de limiter au maximum la hauteur de chute du béton. La **RILEM** préconise une hauteur maximale de chute du béton à 5 mètres.
- Une seconde méthode, couramment utilisée pour le coulage des pieux de fondations, consiste à introduire un tube plongeur par lequel arrive le béton. Cette technique est très recommandée pour les éléments verticaux (les poteaux) et présente l'avantage d'éviter la chute du béton et donc de réduire considérablement les phénomènes de ségrégation.
- La troisième méthode, très utilisée actuellement en Algérie, consiste à placer le béton par le biais d'une pompe : c'est une technique qui évite d'une part les phénomènes de ségrégation, et d'autre part permet de couler le béton sur de grandes profondeurs. Enfin cette technique permet la réduction du nombre d'ouvriers intervenants dans l'opération de mise en place du béton, d'où gain économique non négligeable.



Figure I.2 : Coulage d'une dalle en BAP.



Figure I.3 : Exemples de mise en œuvre des BAP.

L'innovation principale BAP réside essentiellement dans la phase du compactage, dont l'élimination présente plusieurs avantages dont notamment :

- Diminution du bruit (pour la mise en place traditionnel par vibration, nous avons recours à des compresseurs qui fonctionnent avec des sons sonores très élevés qui portent préjudice aux ouvriers et aux riverains).
- Rendements améliorés et exécution plus rapide.
- Liberté accrue des formes de coffrage.
- Facilité de bétonnage d'éléments exigus.
- Qualité accrue des surfaces de béton.
- réduction/suppression des travaux de ragréage.
- Facilité de bétonnage d'éléments avec une armature dense ou importante.
- Remplissage de parties difficilement accessibles.
- Diminution de la pénibilité du travail et suppression de l'apparition du syndrome du vibreur.



Figure I.4 : Eléments préfabriqués en BAP à haute résistance.

I.6. Influence des paramètres de formulation sur les propriétés à l'état frais

I.6.1. Rôle des adjuvants [Fares, 2009]

L'avènement des bétons autoplaçants et des bétons à hautes performances (BHP) est une avancée linéaire forte dans le domaine des adjuvants, notamment des supers plastifiants (SP). La fonction principale des super plastifiants est de défloculer les particules de ciment. Du fait des chaînes moléculaires très longues, la répulsion électrostatique agit par répulsion stérique en neutralisant les charges présentes à la surface des particules et/ou en séparant les particules les unes des autres. L'eau captée par les floccs est à nouveau disponible pour l'ouvrabilité du béton (Figure I.5). On peut alors obtenir un béton très coulant, avec un faible rapport E/C.

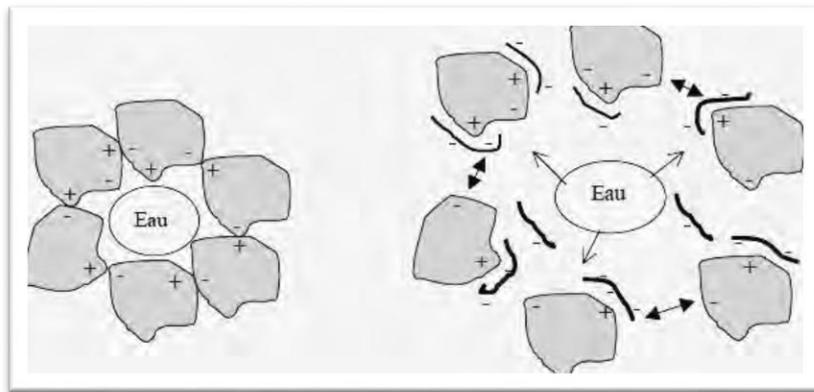


Figure I.5 : Action du super-plastifiant Défloculation des grains de ciment.

L'ajout d'un super plastifiant aide à augmenter la fluidité. La figure I.6 montre par exemple que l'étalement augmente très fortement à partir d'un certain dosage en super plastifiant.

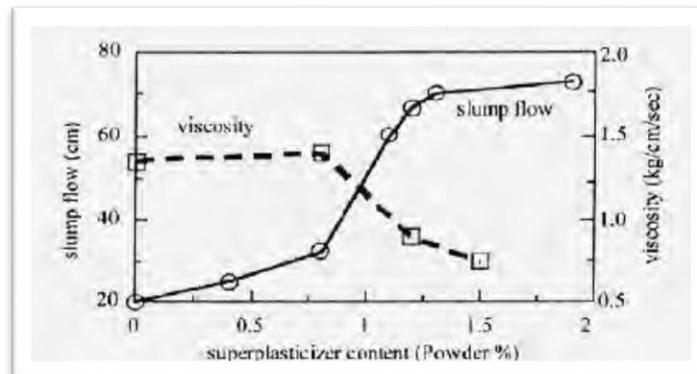


Figure I.6 : Influence de la qualité du super-plastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton.

Flatt et Houst définissent l'action des super-plastifiants en trois mécanismes :

- Une partie est adsorbée.
- Une partie est consommée par les réactions avec les hydrates.
- Une partie, en excès, reste en solution.

Ces auteurs montrent qu'une couche de gel ou de mono sulfo-aluminate (AFM) peut se former autour du ciment ce qui augmente la surface que doit recouvrir le super plastifiant pour disperser les grains. Donc, plus le ciment est réactif plus la quantité de polymère à ajouter sera importante. Squamate et al. ont étudié l'influence de différents super plastifiants et de leurs dosages sur le maintien rhéologique dans le temps d'un mortier. Leurs résultats montrent que l'augmentation du dosage de super plastifiants n'a plus d'influence sur la fluidité du mortier à partir d'une certaine valeur. Cette caractéristique est maintenant bien connue. Il s'agit du dosage à saturation, c'est-à-dire le dosage au-dessus duquel l'adjuvant ne permet plus de modifier de façon significative la fluidité du mélange. Actuellement, les super plastifiants sont donc utilisés à un dosage proche du dosage à saturation. Différents auteurs ont montré que le moment d'introduction du super plastifiant lors du malaxage joue un rôle sur le dosage à saturation. Si l'introduction est retardée, le dosage à saturation est plus faible, et il est obtenu pour une plus faible quantité de super plastifiants. Ceci est en accord avec ce que nous avons vu, car si l'hydratation du ciment est amorcée alors la consommation du super plastifiants par les hydrates sera moins importante.

Ainsi, le fait de retarder son introduction, permet au super plastifiant d'être plus efficace et d'obtenir des mélanges plus fluides que s'il avait été introduit en début de malaxage.

Les BAP contiennent des supers plastifiants permettant d'obtenir la fluidité souhaitée.

Toutefois un dosage trop élevé (proche ou supérieur au dosage de saturation) peut augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage. Il est possible d'utiliser un plastifiant en synergie avec un super plastifiant.

I.6.2. Volume de pâte élevé [Kouici, 2016]

Les formules de bétons auto nivelant actuellement réalisées au Japon et au Canada se caractérisent par un fort dosage en liant. En effet, ces bétons ont souvent des teneurs en liant supérieures à 500 Kg/m³. De plus les chercheurs japonais et canadiens ont montré l'intérêt d'utiliser des fortes teneurs en additions minérales (laitiers, cendres volantes, fumées de silice,

additions calcaires, etc.) et d'obtenir à la fois une grande fluidité et une bonne stabilité du béton. Les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons. C'est pourquoi, les BAP contiennent un volume de pâte (ciment + additions + adjuvants+ eau efficace + air) important, typiquement de 330 à 400 l.m³, dont le rôle est d'écartier les granulats les uns des autres. Le volume de pâte dans un BAP représente 35 à 45 % du volume total, alors que dans un béton traditionnel il est de 20 à 35 % et qu'un super plastifiant est employé pour fluidifier la pâte.

I.6.3. Volume de gravillons [Kouici, 2016]

Il est possible d'utiliser des granulats concassés ou roulés pour la formulation des BAP. Toutefois, comme les gravillons sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée, il faut en limiter le volume. D'un autre côté, la présence de gravillons permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton et donc de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées. En général, ces considérations conduisent à adopter un rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 dans les BAP.

Les BAP présentent à la fois une grande fluidité, l'utilisation de super plastifiants ainsi qu'un volume de pâte importante.

I.7. Les constituants d'un BAP

I.7.1. Introduction [Kechkar, 2021]

Les constituants des BAP peuvent être assez différents de ceux des BO. Ils peuvent différer tant par leurs proportions que par leur choix. Etant donné le mode de mise en place des BAP, 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.

a. Matériaux de base [Kechkar, 2021]

Les granulats, le ciment et l'eau forment les éléments de base de tout 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.

- **Le ciment [Kechkar, 2021]**

En principe tous les ciments conformes à la norme conviennent pour la fabrication des 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.

- **Définitions de ciment portland [Younes, 2021]**

Le ciment Portland est un liant hydraulique, capable de faire prise et durcir au contact de l'eau. Il se présente sous forme de poudre volatile de très grandes finesses de l'ordre de $20\mu\text{m}$ (anhydres), Il est obtenu à partir de la cuisson à haute température, supérieure à 1450°C , et qui mélangé à de l'eau produit un certain nombre de réactions chimiques d'où la formation d'hydrates qui se rigidifient au fil du temps lui conférant des propriétés mécaniques intéressantes.

- **Composition chimique du ciment Portland [Younes, 2021]**

Il est constitué de clinker et des additions minérales de types : Laitier de hauts fourneaux ; Cendres volantes ; Fillers calcaires, Pouzzolanes naturelles, Fumée de silice, Schistes calcinés dont le but est de lui conférer de nouvelles propriétés, capables de résoudre les différents problèmes qui peuvent se poser lors de la réalisation des ouvrages (performances mécaniques améliorées, environnements agressifs...).

Le clinker ayant un caractère durcissant très rapide, afin d'en réduire l'effet, il lui est ajouté du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ de 3 à 5%.

- **Les différents types de ciment [Okamura et Ouchi, 2003]**

Les ciments constitués de clinker et de constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principale. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse) :

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

- CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ).
- CEM V : Ciment composé (CLC).
- **Paramètres influençant la qualité du ciment Portland**

Les paramètres de fabrication du ciment Portland ont une influence indéniable sur les caractéristiques du produit final. Ainsi, la vitesse avec laquelle les résistances du ciment hydraté vont augmenter avec le temps, le dégagement de chaleur concomitant, la résistance aux agents chimiques et plus généralement la durabilité, dépendent de: la composition chimique (les clinkers obtenus peuvent être très différents les uns des autres suivant les matières premières utilisées, le procédé de fabrication et la vitesse de refroidissement), le traitement thermique (chauffage et refroidissement) et de la finesse du clinker [Cyr et al, 2006].

Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation sont élevée et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes. En outre, la finesse de mouture influence la plasticité et la cohésion de la pâte de ciment à l'état frais, ainsi que son pouvoir de rétention d'eau et la ressuier. Pour obtenir de bonnes résistances mécaniques, il est nécessaire de mouler finement le clinker, cela fait augmenter la proportion d'hydrates dans le béton durci par rapport aux anhydres. Pour les bétons à faible rapport E/C, cette augmentation de finesse conduit à l'augmentation de la compacité de la pâte. Par ailleurs, si la proportion de grain de ciment ultrafins devient importante, la prise risque d'être instantanée dès le gâchage et conduira à un ciment, à forte chaleur d'hydratation, générateur de contraintes d'origine thermique, et donc des fissurations dans la peau des pièces massives [Achour et al, 2008].

- **Granulats [Holcim, 2004] [Serdan, 1999]**

Les granulats pour les BAP doivent tenir compte des considérations pratiques suivantes:

- Les granulats roulés présentent un plus petit volume de vide inter granulaire, ce qui nécessite une plus faible quantité de pâte de ciment pour le remplir. La flottabilité des granulats concassés dans la pâte de ciment est cependant meilleure, en raison de leur plus grande surface spécifique.
- Afin d'assurer une bonne stabilité du BAP (éviter toute ségrégation), il est recommandé de choisir un sable spécialement optimisé, au besoin recomposé à partir de plusieurs fractions.

- Pour empêcher tout risque de blocage du BAP par les barres d'armature lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16 mm. L'expérience a néanmoins montré qu'il est également possible d'utiliser des granulats de diamètre maximal différent.
- Le mélange pour béton (granularité) est caractérisé par une teneur élevée en sable et en éléments fins.
- Le choix d'une granularité continue appropriée est très important, étant donné la forte incidence du volume des vides sur la quantité nécessaire de pâte de ciment.
- Le volume des gros granulats dans le béton est l'un des facteurs les plus importants à prendre en considération. En effet plus la teneur en gros granulats augmente, plus la capacité de remplissage diminue.

- **L'eau de gâchage [Kechkar, 2021]**

Toute eau du réseau public d'eau potable convient pour la fabrication de béton autoplaçant.

Etant donné que le dosage en eau influence de manière considérable la viscosité et la capacité d'autoplacant du béton, il est indispensable de s'écarter le moins possible de la valeur planifiée. Il est ainsi très important de mesurer et de prendre en compte l'humidité des granulats et tout spécialement du sable. Cas échéant, on tiendra également compte de la teneur en eau des adjuvants.

b. Les additions calcaires [Michel et al, 2007]

La substitution partielle du ciment par des additions minérales est une pratique de plus en plus courante, aussi bien sur les chantiers que dans les bétons prêts à l'emploi. Différentes additions peuvent être mélangées au ciment pour modifier les propriétés du béton frais et durci. Les principales sont les fillers calcaires, la fumée de silice, le laitier de haut fourneau et les cendres volantes.

Un filler calcaire est une fine minérale obtenue par broyage d'une roche calcaire de manière à répondre aux critères de conformité de la norme sur les additions minérales calcaires (**NF P18-508**). L'appellation de filler calcaire vient du fait que cette addition, si elle est broyée assez finement s'insère dans le squelette granulaire du ciment et permet donc de combler les vides entre les autres particules de dimensions plus importantes du béton (ciment, granulats). Les critères qui les définissent dans la norme **NF P18-508** représentent des

propriétés physiques et chimiques.

Tableau I.1 : Critères sur les propriétés physiques et chimiques.

Catégories	A	B
Teneur CaCO ₃ total (%)	> 95	≥ 65
CaCO ₃ + MgCO ₃ (%)	> 95	≥ 90
Valeur de Bleu de méthylène (g/kg)	< 3	< 10
Surface massique Blaine (cm ² /g)	> 3000	> 2200
Passant à 63 µm (%)	> 70	> 70

D'un point de vue de la composition minéralogique, certaines roches moins « pures » peuvent contenir d'autres composants principaux comme de la dolomie ou du quartz ainsi que des composants secondaires comme Al₂O₃, Fe₂O₃ et des alcalins à des dosages variables. De plus, des impuretés telles que des argiles peuvent être présentes dans les inclusions de la roche en dosages généralement faibles. Ces dernières influent notamment fortement sur la demande en eau.

c. 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 permettant d'améliorer certaines de ses propriétés. [Dupain et al, 2000]

Il existe plusieurs types d'adjuvant qui sont régis par la norme **NF EN 934-2** : [Kouici, 2016]

- ✓ Plastifiants réducteurs d'eau.
- ✓ Super-plastifiants hautement réducteurs d'eau.
- ✓ Rétenteurs d'eau.
- ✓ Entraîneurs d'air.
- ✓ Accélérateurs de prise.
- ✓ Accélérateurs de durcissement.
- ✓ Retardateurs de prise.

- **Super plastifiants [Kechkar, 2021]**

Des adjuvants les plus importants pour le béton moderne. Les réducteurs d'eau à haute efficacité se présentant sous forme de liquide. Ils sont composés de longues molécules de masse élevée. Leur capacité d'améliorer les propriétés rhéologiques du béton et de lui conférer un meilleur comportement mécanique en diminuant le rapport E/C. Ils permettent, soit de réduire le dosage en eau à maniabilité constante, induisant donc un gain de résistance en compression, soit d'augmenter l'affaissement à teneur en eau constante.

- **Mode d'action des superplastifiants [Phan, 2007]**

Lorsqu'ils sont en contact avec un milieu aussi polaire que l'eau, les grains de ciment 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.

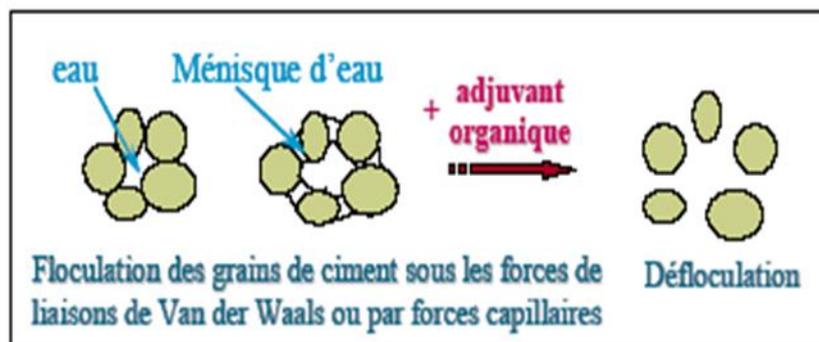


Figure I.7 : Défloculation des grains de ciment par l'adjuvant organique [Phan, 2007].

- **La répulsion électrostatique [Ramachandran et al, 1998]**

Les superplastifiants s'adsorbent à la surface des particules de ciment par des interactions coulombiennes, des forces de Van der Waals ou des liaisons hydrogènes. En se fixant sur les

grains de ciment, les polymères anioniques changent la charge des particules de ciment, comme le montre la figure I.8.

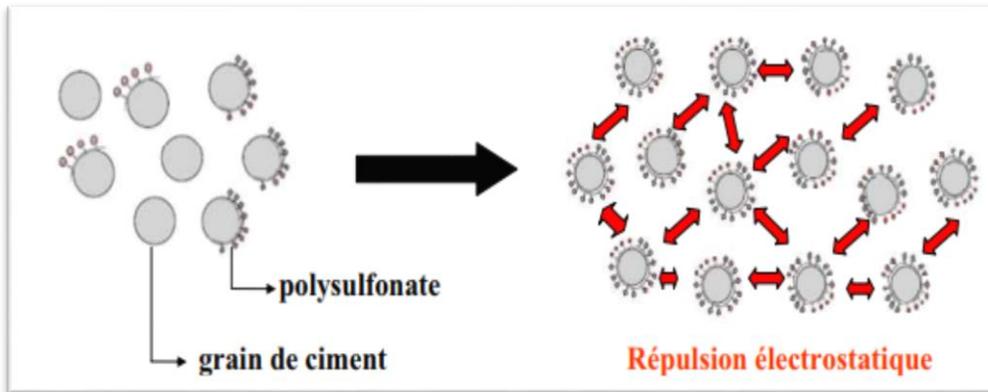


Figure I.8 : Dispersion des grains de ciment par la répulsion électrostatique.

Entre chaque grain de ciment occupé par les polymères, une force répulsive se forme en raison des charges identiques. Cette force provoque une forte dispersion des particules et empêche ainsi la coagulation.

- **La répulsion stérique [Uchikawa et al, 1984]**

Les molécules s'adsorbent à la surface des grains de ciment par le biais des charges présentées sur la chaîne principale de la macromolécule et les groupes «chaîne secondaire» du côté de la chaîne. Ces dernières se prolongent dans l'eau environnant les grains de ciment. Il faut alors plus de temps pour que les hydrates du ciment recouvrent ces groupes. L'effet fluidifiant s'en trouve ainsi prolongé.

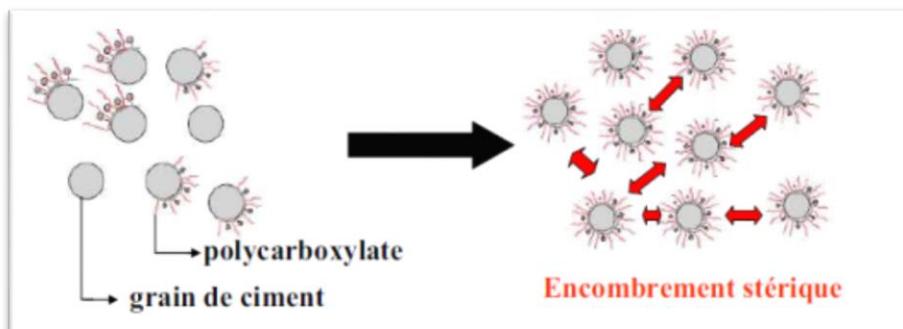


Figure I.9 : Dispersion des grains de ciment par l'encombrement stérique.

L'effet de dispersion des superplastifiants est lié à l'adsorption qui dépend de plusieurs facteurs tels que la quantité des C_3A , le taux d'alcalins dans le clinker, la finesse du ciment ainsi que le type et le dosage de sulfate de calcium utilisé pour régulariser la prise [Puertas et al, 2005]. Leur présence dans un mortier de ciment influence également le flux de chaleur et le degré d'hydratation ainsi que la quantité des produits d'hydratation formés [Knapen et al, 2009].

- Facteurs influençant l'efficacité des superplastifiants

L'efficacité des adjuvants dépend d'une quantité de facteurs qui est entre autres, le dosage de l'adjuvant, le type et le dosage en ciment, le dosage en eau ainsi que la consistance, les conditions de malaxage et la température.

- La structure des superplastifiants de type poly carboxylate a une influence décisive sur leur pouvoir fluidifiant. Les recherches de Yamada et al, 2000 ont montré que de longues chaînes secondaires conduisent, en général, à une fluidité plus grande et à une diminution de la viscosité plastique et du seuil d'écoulement. Par contre, un allongement de la chaîne principale a un effet négatif sur la fluidité. Il semble que ces effets s'expriment surtout pour de faibles rapports E/C.
- Le ciment : à maniabilité constante, plus les grains de ciment sont fins, plus il faut ajouter de superplastifiant. L'efficacité du superplastifiant dépend également du facteur $C_3A/CaSO_4$. Plus ce rapport est élevé, moins l'ouvrabilité sera augmentée.
- Le rapport E/C Pour un même dosage en superplastifiant, la maniabilité de la pâte sera augmentée lorsqu'on augmente le rapport E/C.
- Le moment de l'ajout : l'action des superplastifiants est tributaire du moment auquel on les ajoute au mélange. Ils sont moins efficaces lorsqu'ils sont directement ajoutés à l'eau de gâchage. En retardant quelque peu leur ajout, on laisse le temps aux sulfates de contrôler l'hydratation du C_3A . Les superplastifiants vont s'adsorber plus facilement sur les aluminates tandis que l'adsorption sur les grains de C_3S et C_2S se produit moins rapidement. Ce phénomène est explicable par le fait que les aluminates ont un potentiel zêta positif, contrairement aux silicates [Perche, 2004].
- La présence d'addition : en insérant de fines particules dans les mélanges, on peut supposer qu'une partie du superplastifiant s'adsorbe à la surface de ces éléments. Cette interaction n'est pas reprise dans les fiches techniques des superplastifiants et il n'est donc pas possible d'en tenir compte lors de la formulation des bétons.

d. Les fillers calcaires

Les fillers calcaires sont des produits secs finement divisés obtenus par broyage industriel des roches calcaires, dont les caractéristiques sont définies par la norme **NF P18 – 305**. Parmi ces caractéristiques, deux sont particulièrement significatives :

- Une teneur minimale en carbonates totaux (calcaire + dolomite) ainsi qu'une teneur minimale en carbonate de calcium CaCO_3 .
- Une valeur minimale de l'indice d'activité.

Les dimensions des particules de fillers s'étendent de quelques μm à quelques dizaines de μm , déterminées en utilisant la granulométrie laser.

- Influence des fillers calcaires sur les paramètres rhéologiques.

Neto et Campitelli en utilisant le « tow-points » test pour caractériser la rhéologie de la pâte de ciment qui contient du filler calcaire. Ils observent la réduction du seuil de cisaillement avec l'augmentation de la teneur en filler calcaire, et aussi l'augmentation de la viscosité plastique au-delà d'une certaine valeur de la finesse du calcaire.

Notons que les auteurs ne précisent pas la valeur limite de la finesse du calcaire pour que les résultats soient observés.

Brookbans a étudié l'effet de l'addition de 5 à 28% de poudre calcaire au ciment sur les propriétés du béton frais. Il a observé que le temps de prise est réduit quand on augmente le taux de fillers et que ces derniers réduisent beaucoup la quantité d'eau et probablement n'ont pas un effet d'entraîneur d'air [**Nehdi, 2000**].

- Influence des fillers calcaires sur les paramètres rhéologiques des BAP.

[**Ghezal, 1999**] a formulé deux bétons autoplaçants avec différents pourcentages en fumée de silice et de fillers calcaires dont la dimension des particules est de l'ordre de 3 μm et un ciment portland. Les auteurs ont constaté que les deux bétons présentent des paramètres rhéologiques acceptables mesurés avec le rhéomètre IBB (rhéomètre utilisé à l'université de Sherbrooke), et les valeurs de la capacité de remplissage mesurées avec l'essai du caisson sont très satisfaisantes.

[**Ogawa et coll, 1995**] ont développé des formulations de bétons fluides (Défal = 650 ± 30 mm) qui présentent de faibles pertes d'étalement au cours du temps (maximum 30 mm après 60 min.). Ces bétons de rapports E/C = $0,55 \pm 5\%$, contiennent du filler calcaire, un volume de la pâte supérieur à 300 l, des granulats concassés de diamètre maximum 20 mm, un rapport volumique de Sable / Granulats de $51 \pm 1\%$, 8 kg/m³ de superplastifiant (Naphtalène) et 3 kg/m³ d'agent colloïdal à base de polyacrylate. Ils ont trouvé que pour un remplacement de

20% du volume des granulats par le filler calcaire, on obtient les meilleures fluidités. De même qu'ils ont obtenus de bonnes résistances à la ségrégation et au ressuage rapporté [Turcy, 2004].

I.8. Caractérisation des bétons autoplaçants (BAP)

I.8.1. Caractéristiques rhéologiques du BAP [Sedran, 1999] et [De Larrard, 1998]

Les propriétés essentielles des BAP, à savoir la fluidité, la capacité de remplissage et la stabilité sont obtenues grâce à une teneur très élevée en matière cimentaire (liant) qui ensemble avec l'eau et l'adjuvant fluidifiant constitue la pâte (coulis de ciment), sous forme d'une suspension colloïdale à viscosité élevée, dans laquelle nagent les granulats plus grossiers sans aucune tendance à la ségrégation. En plus de la fluidité élevée généralement obtenue avec les bétons fluides, ce coulis (suspension) présente une certaine viscosité. C'est la combinaison de cette viscosité avec une fluidité très élevée qui confère au béton sa stabilité envers la ségrégation ainsi que sa capacité à se désaérer naturellement. Ainsi, en plus de la fluidité, la viscosité du béton constitue un second critère important pour caractériser le comportement du BAP. Elle peut être déduite à partir de la mesure des frottements internes d'un matériau sous l'effet de sollicitations imposées (contraintes de cisaillement). La viscosité est d'autant plus faible que ces forces de frottement internes sont petites. Le béton s'écoule et s'étale d'autant plus rapidement que la viscosité est faible, son comportement rhéologique est décrit par différents modèles.

Dans la pratique, deux modèles sont couramment utilisés pour les BAP : le modèle de Bingham

$$\tau = \tau^0 + \mu \dot{\epsilon}$$

Et le modèle de Herschel-Bulkley

$$\tau = \tau_0 + k\mu \dot{\epsilon}^n$$

I.8.2. Caractérisation des bétons à l'état frais

Pour évaluer les propriétés et les qualités à l'état frais d'un béton autoplaçant, plusieurs types d'essais normalisés et non normalisés ont été proposés. Certains évaluent la

consistance et la déformabilité, tandis que d'autres s'intéressent aux mesures de la stabilité du béton. De nombreux tests simples ou empiriques ont été mis au point. Ces tests ont pour but de mieux caractériser le comportement du béton autoplaçant ou de valider son utilisation.

En France, trois essais de caractérisation des bétons autoplaçants à l'état frais ont été recommandés par l'Association Française de Génie Civil «AFGC» en Juin 2000. Initialement provisoires, ces recommandations sont devenues par la suite des essais de référence.

Elles comprennent les 4 essais suivants :

- 1) la mobilité et la capacité de remplissage : Etalement au cône d'Abrams SF
- 2) la viscosité apparente : Viscosité VS (t500) ou VF (entonnoir en V)
- 3) l'aptitude à l'écoulement : Aptitude à l'écoulement PL (boite en L)
- 4) la résistance à la ségrégation : Stabilité au tamis SR.

1) Essai d'étalement (Slump Flow)[NF EN 12350-8]

Le premier essai, aussi le plus simple et le plus largement pratique, consiste à mesurer l'étalement au cône d'Abrams au lieu de mesurer l'affaissement. L'essai complet est décrit ci-après [Kouici, 2016] :

Mode opératoire

- ✓ Placer la plaquette sur un support stable et horizontal.
- ✓ Humidifier la surface de la plaque
- ✓ Placer le cône d'Abrams au centre de la plaque, et faire le remplir avec le béton en versant de manière continue, jusqu'à la rase supérieure du cône.
- ✓ Araser si nécessaire à l'aide d'une truelle et nettoyer la plaque si nécessaire avec un chiffon humide.
- ✓ Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées.
- ✓ Une fois que le béton s'est étalé sur la table, mesurer le diamètre final sur deux côtés perpendiculaires.
- ✓ Noter le résultat des deux valeurs.
- ✓ Le résultat final est la moyenne des deux valeurs obtenues.

$$\text{Slump flow} = (D_1 + D_2) / 2$$

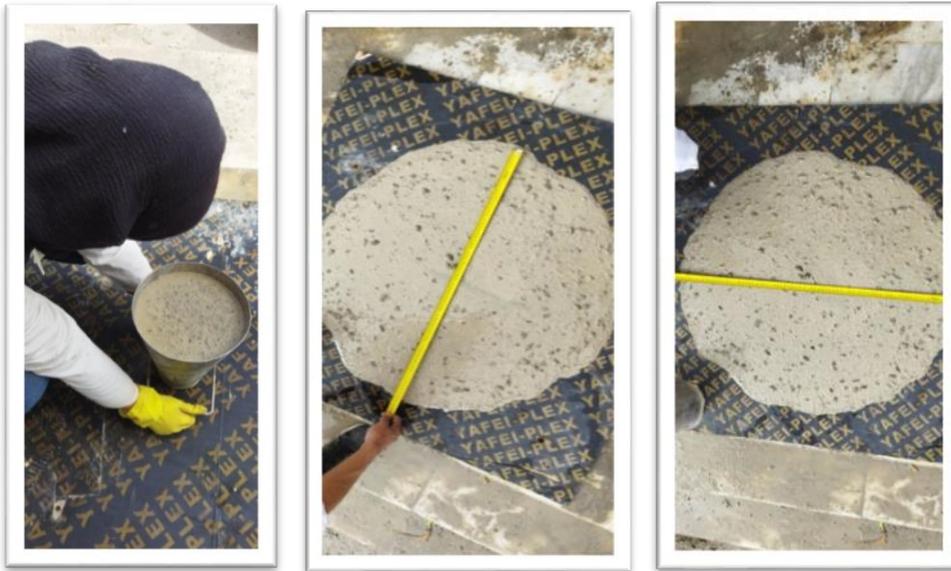


Figure I.10 : Mesure de l'ouvrabilité pour les bétons autoplaçant utilisé.

Tableau I.2 : Les normes NF EN 206-9 prévoit une répartition des BAP en trois classes :

classe	Étalement
SF1	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	760 à 850

- ✓ **La classe SF1** : est souvent appropriée : aux structures en béton non ou faiblement armées, bétonnées par le haut, avec un libre déplacement du point de remplissage.
- ✓ **La classe SF2** : est appropriée à de nombreuses applications courantes.
- ✓ **La classe SF3** : est normalement produite avec un diamètre maximum des granulats peu élevé (inférieur à 16 mm) et est utilisée pour des applications verticales dans des structures qui comportent un ferrailage dense, ou qui sont des formes complexes.

2) Essai de V-Funnel [NF EN 12350-9]

L'essai d'écoulement au V-Funnel mesure le temps d'écoulement d'un échantillon de béton à travers un entonnoir de dimension spécifiée. Des classes de viscosité des BAP sont définies Tableau I.3 [Dupain, 2004] [Kechkar, 2021] .

Tableau I.3: classes de la viscosité apparente - t50

Classe	Temps (s) relatif à l'essai d'écoulement à l'entonnoir en V (valeurs limites applicables aux charges individuelles)
VF1	9.0
VF2	9.0 à 25.0

Matériel utilisé

- ✓ un entonnoir
- ✓ chronomètre

Mode opératoire

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante :

- ✓ s'assurer que le clapet de fermeture à la base de l'entonnoir soit fermé.
- ✓ Remplir l'entonnoir en béton jusqu'en haut
- ✓ Araser si nécessaire à l'aide d'une truelle
- ✓ Ouvrir le clapet de fermeture, le béton va se couler
- ✓ Mesurer le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé

Dans la littérature scientifique, ce temps d'écoulement est souvent un critère utilisé pour définir la viscosité du béton autoplaçant.



Figure I.11: L'essai d'écoulement au V-Funnel utilisé.

3) Essai de la Boite en L [NF EN 12350-10]

Ces essais permettent de tester la mobilité du mélange frais en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables [Kechkar, 2021] .

Mode opératoire

Le principe de l'essai est le suivant :

- ✓ La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton
- ✓ Après arasement, on laisse le béton reposer pendant une minute, puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler la boîte dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage.
- ✓ Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H1 et H2.

Tableau I.4: Classe l'aptitude à l'écoulement.

Classe	Taux de remplissage
PL1	≥ 0.80 avec 2 armatures
PL2	≥ 0.80 avec 3 armatures

- ✓ **PL1** : pour les structures avec un intervalle d'écoulement compris entre 80 mm et 100mm.
- ✓ **PL2** : pour les structures avec un intervalle d'écoulement compris entre 60 mm et 80mm.



Figure I.12: Essai à la boîte en L utilisé.

5) 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. 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 [Kechkar, 2021].

Matériel utilisé

Seau 10 l + couvercle

- ✓ Tamis 5mm + fond
- ✓ Balance précision minimale 20g, portée minimale 20kg.

Mode opératoire

- ✓ après le malaxage du béton, verser le béton dans le seau, le temps d'attente entre l'arrêt de malaxage et le prélèvement ; inférieur à 30s.
- ✓ couvrir le seau pour protéger le béton de la dessiccation, et attendre 15 min
- ✓ peser le fond et le tamis à vide
- ✓ peser le fond seul
- ✓ poser tamis+ fond sur la bascule, et faire la tare
- ✓ après 15min, verser sur le tamis un poids de béton égal à 4.8 kg
- ✓ noter le poids réel lu de l'échantillon
- ✓ attendre 2 min, puis faire le tare
- ✓ peser le fond avec la laitance. On a $P_{\text{laitance}} = P_{\text{fond}} - P_{\text{fond}}$
- ✓ calculer le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon

$$\pi = (P_{\text{laitance}} \times 100) / P_{\text{échantillon}}$$

Tableau I.5 : classement de la formulation selon le pourcentage π .

	pourcentage
SR1	≤ 20
SR2	≤ 15

- **Classe SR1** : est généralement applicable aux dalles de faible épaisseur également être utilisé dans des applications verticales avec une distance maximale de cheminement de 5 m et un intervalle d'écoulement supérieur à 80mm.
- **Classe SR2** : est mieux adapté dans les applications verticales si la distance de cheminement est supérieure à 5m et si l'intervalle d'écoulement est supérieur à 80mm.



Figure I.13 : Essai de stabilité au tamis utilisé.

I.8.3. Caractérisation des BAP à l'état durci [Younes, 2021]

Les résistances mécaniques d'un BAP sont comme pour la plupart des bétons, directement reliées à la qualité du squelette granulaire et au rapport eau efficace sur ciment. Elles dépendent aussi de la composition du liant et de la valeur du liant équivalent. L'optimisation de ces paramètres permet d'obtenir une large gamme de résistance jusqu'à des BAP à hautes performances : 95-100 MPa pour la résistance en compression à 28 jours. À résistance équivalente, l'évolution des résistances à la compression semble voisine pour les BAP et les bétons vibrés. À court terme, l'évolution des résistances peut même s'avérer plus rapide pour les BAP en raison de l'utilisation fréquente de fillers calcaires connus pour avoir un effet accélérateur sur l'hydratation des silicates de calcium. Aux très jeunes âges, les résistances des BAP peuvent être affectées lorsque ces bétons contiennent des quantités importantes de superplastifiant (un dosage trop élevé pouvant conduire à un retard de prise conséquent). Il est possible cependant d'atteindre des résistances mécaniques élevées au démoulage en optimisant le choix et le dosage en adjuvant notamment.

Le rapport entre résistance en traction et résistance en compression des BAP est à priori peu différent des bétons traditionnels. Toutefois, il est conseillé, lorsque la résistance en

traction présente une importance particulière, d'effectuer des mesures au niveau des essais de qualification de la formulation.

La durabilité en général est relative aux paramètres de composition en terme de compacité et de nature chimique du liant (et de la nature minéralogique pour l'alcali réaction).

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

- Les essais de compression.
- Les essais de traction par flexion.

Les essais de compression [Fares, 2009]

Les essais de mesure de la résistance à la compression sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques 15x15 cm conformément aux prescriptions de la norme. Ce test fournit la force de compression [N] qui génère la rupture de l'échantillon. La contrainte de compression à la rupture [Pa] est déduite de cette force en divisant par la surface de la section sollicitée.

Les essais de traction par flexion [Fares, 2009]

Cet essai très utilisé permet de simuler le type de sollicitation le plus courant dans les éléments des ouvrages (Figure I-14). Les éprouvettes utilisées pour ce type d'essai sont propres uniquement aux mortiers, elles sont prismatiques de dimensions 7x7x28cm.

La résistance à la traction par flexion est obtenue par l'application de la formule de résistance des matériaux suivante : $\sigma = Mf \cdot a/2I$, avec le moment de flexion : $Mf = F \cdot L/4$, où F est la charge de rupture, L la portée, I l'inertie de flexion, et a le côté du prisme.

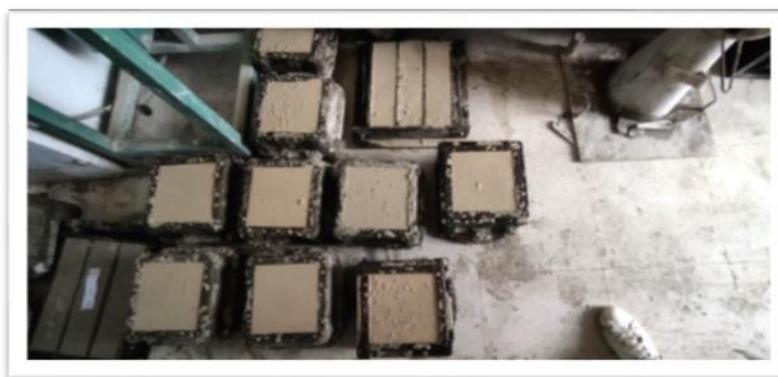


Figure I.14 : réalisation des éprouvettes pour les essais de béton durci utilisé.

Module d'élasticité [Fares, 2009]

Les différents matériaux de BAP peuvent montrer un différent comportement de relation contrainte-déformation si les BAP contiennent une baisse quantité de gros granulats on se réfère à la formule réglementaire du module ($E_{ij} = 11000 f_{cj}^{1/3}$), 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 vibré.

Durabilité [kechkar, 2021]

Les BAP, formulés avec les mêmes composants que les bétons ordinaires, ils sont aussi soumis aux mêmes propriétés de transfert et mécanismes d'altération vis-à-vis des agressions externes et internes. Ils présentent donc une durabilité au moins équivalente à celle des bétons vibrés.

I.9. Méthodes de formulations des BAP

I.9.1. Formulation des BAP [Guellil et al, 2014]

Réaliser un béton autoplaçant (BAP) est une opération complexe qui nécessite de trouver une bonne combinaison de matériaux compatibles, et le dosage convenable de chacun de ces constituants afin d'obtenir une formulation répondant aux propriétés des BAP. De nos jours, il n'existe pas encore de méthode de formulation généralisée permettant de choisir précisément les proportions des constituants en fonction des propriétés souhaitées du BAP. Les méthodes actuelles sont toutes relativement complexes et essentiellement basées sur les résultats empiriques.

Les paramètres recommandés de formulation des BAP [AFGC, 2000], sont rappelées ci-après une quantité de pâte élevée (de l'ordre de 40% du volume total) ;

- une quantité de fines élevée (de l'ordre de 500 kg/m³) ;
- utilisation d'un superplastifiant (à un dosage proche du dosage à saturation) ;
- un faible volume de gravillons (rapport G/S de l'ordre de 1) ;
- un diamètre maximal réduit ;
- éventuellement utilisation d'un agent de viscosité.

I.9.2. Différentes méthodes de formulation

Parmi les techniques de formulation les plus répandues, nous citons :

I.9.2.1. La méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires

Cette approche est basée sur le modèle d'empilement compressible (MEC) développé par le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) [De Iarrard et Sedran, 2008].

Il vise à estimer la compacité d'un mélange grâce aux caractéristiques du squelette granulaire qui le compose. Le modèle s'appuie sur les notions de compacité virtuelle et d'indice de serrage définie comme suit : [Younes, 2021]:

- La compacité virtuelle d'un mélange (γ) est définie comme étant, la compacité maximale qu'on pourrait avoir, en arrangeant au mieux possible la disposition des différents grains, du plus petit grain des additions aux plus gros granulats. En pratique, l'empilement des grains se fait de manière aléatoire et la compacité expérimentale ainsi obtenue, reste toujours inférieure à la compacité virtuelle.
- L'indice de serrage (K) est défini comme une grandeur représentative du degré décompacte d'une classe granulaire donnée. Ainsi pour chaque classe granulaire de diamètre moyen d_i correspond un indice de serrage k_i . Plus cet indice est élevé plus le contact entre les granulats d'une même classe est important et plus le seuil de cisaillement τ_0 est significatif.

Basé sous ces deux précédents concepts, **Bétonlab Pro3** est un logiciel d'aide à la formulation des bétons. Le dernier de sa génération développée par le LCPC en 2008, permet de simuler la réalisation de gâchées de laboratoire. Le logiciel intègre le modèle d'empilement compressible, lui permettant l'optimisation d'une formulation de BAP suivant un cahier des charges précis comportant les données de compacité des fractions granulaires, les caractéristiques mécaniques des granulats, la demande en superplastifiant, la demande en eau du ciment et de l'addition. Il permet aussi la simulation de quelques propriétés des BAP, notamment, les propriétés rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité plastique), les résistances mécaniques, ainsi que les déformations différées, etc.

I.9.2.2 La méthode basée sur l'optimisation du mortier (méthode Japonaise) [Younes, 2021]

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

- Dosage des gravillons : les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m³ de béton est limité à la moitié de sa compacité. 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 Dosage du sable : le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.
- Dosage du liant : la méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m³). Les rapports massiques eau sur ciment et filler sur ciment peuvent également être choisis sur des critères de résistance.
- 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.

I.10. Domaine d'utilisation des BAP

Le béton autoplaçant constitue dans de nombreux domaines une alternative intéressante au béton conventionnel.

Outre l'amélioration de la productivité des entreprises, le BAP permet d'accroître la qualité et la durabilité des ouvrages en béton.

- Il peut servir à réaliser des ouvrages verticaux, mais aussi horizontaux.

- Il peut ainsi être employé pour réaliser des dalles, des poteaux, des voiles, des planchers, mais aussi des fondations. Toutefois, le béton auto nivelant peut aussi être utilisé pour réaliser des escaliers, des panneaux, des blocs à bancher.
- Il servira également dans la mise en œuvre des radiers, des dallages, des terrasses, mais aussi des planchers poutrelle-hourdis.
- La grande fluidité du béton auto nivelant lui permet d'être utilisé dans plusieurs situations où l'usage du béton classique serait inefficace.
- Le BAP peut ainsi être utilisé pour le bétonnage des structures avec des voiles minces ou complexes, des formes complexes, des densités de ferrailage complexes, mais aussi importantes. Il sera aussi adapté aux parties difficilement accessibles.

I.11. Fabrication et transport des BAP

I.11.1. Fabrication des BAP [Sedran, 1999]

En principe tous les types de malaxeurs conviennent pour la fabrication des BAP. Lors de l'introduction des différents constituants dans le malaxeur, on appliquera les mêmes consignes que celles recommandées pour les bétons vibrés.

L'ordre d'introduction des constituants et l'intensité et le temps de malaxage sont des facteurs qui influent fortement sur l'homogénéité du béton, sur l'effet optimal des additions et des adjuvants, pour laquelle on fixe le temps de malaxage à 120 secondes, cette moyenne peut être ajustée selon l'efficacité du malaxeur.

I.11.2. Transports des BAP [Turcy, 2004]

Le béton autoplaçant doit être transporté en camion malaxeur à cause de sa fluidité élevée. Comme dans le cas d'un béton vibré, la fluidité du béton peut se modifier durant le transport, la manière et l'ampleur de cette modification sont fonction de plusieurs paramètres :

Le type d'adjuvant, la durée de transport, le dosage en eau et la température. Dans une certaine mesure il est possible de corriger ces modifications pour vérifier les exigences d'ouvrabilité souhaitées au moment du déchargement sur chantier.

Dans le cas de rajouts d'adjuvant dans le camion, il est recommandé de respecter impérativement le temps de malaxage minimal recommandé pour assurer la dispersion de l'adjuvant et sa répartition homogène dans l'ensemble du chargement de béton. En revanche tout ajout d'eau est à proscrire.

I.12. Conclusion [PNEX]

Le béton autoplaçant est un béton très fluide. Son utilisation facilite la vie aux ouvriers depuis son apparition. Il permet ainsi de bétonner des structures très complexes. On peut aussi assurer les travaux de bétonnage en un temps record. Toutefois, il faut avoir un savoir-faire professionnel et une bonne expérience pour réussir la fabrication de ce béton.

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.

CHAPITRE II

Bétons de Fibres **Bétons de Fibres**

Chapitre II

Le béton de fibres

II.1. Introduction [Kouici, 2016]

Les fibres sont ajoutées dans la matrice, non pour améliorer la résistance à la traction par flexion du béton, mais surtout dans le but de contrôler la fissuration, d'empêcher la coalescence des fissures et de changer le comportement du matériau renforcé de fibres en cousant les fissures. Cependant, le béton renforcé de fibres pneumatiques, en tant que matériau dans les applications industrielles. Il était produit en utilisant du ciment hydraulique classique, des granulats (sable et gravier), de l'eau et des fibres. Afin d'améliorer la maniabilité et la stabilité du béton renforcé de fibres, un super plastifiant peut également être ajouté dans le mélange. Ce béton n'est pas considéré comme un substitut du béton ordinaire, mais comme un matériau de type différent.

II.2. Définition de béton de fibres [Yagoub, 2009]

Le béton avec fibre est un béton conventionnel auquel on a ajouté des fibres durant le malaxage. Les fibres peuvent être utilisées quand on souhaite réduire la fissuration et améliorer la durabilité et elles conviennent particulièrement bien aux dalles sur le sol, dalles surélevées, pavages, piscines, trottoirs, béton projet etc...

Comme armature secondaire utilisée pour assurer le contrôle de la fissuration, elle constitue une solution idéale lorsqu'elle est combinée au treillis métallique soudé ou ferrailage en acier. Cette fibre n'est pas recommandée pour remplacer l'armature exigée par les codes et les normes du bâtiment. Les propriétés de cette fibre sont étonnantes. En effet, sa force majeure est sa capacité à diminuer le retrait plastique et les fissures d'environ 40% et plus. Les propriétés du béton de fibres dépendent de la qualité de la matrice et des caractéristiques de fibres. La matrice considérée est identique à la matrice d'un béton courant, les fibres sont de formes et de dimensions différentes liées aux technologies d'élaboration. Chacune de ces catégories de fibres donne au béton des propriétés spécifiques les quelles dépendent de la nature, la forme géométrique, l'élancement, et la teneur en volume de fibre.

L'ajout des fibres a pour rôle principal dans le béton est de modifier ces propriétés. Les fibres sont des éléments discontinus, de nature variable, répartis uniformément dans la matrice

et ayant une orientation aléatoire (naturelle) ou forcée. Les fibres sont capables de l'arrêt et couvrir les fissures (Figure II.1). Les fibres aussi permettent d'améliorer ainsi le comportement post-fissuration du béton. Ces dernières jouent un rôle de renforcement qui compense la fragilité du béton par couture de la microfissuration et la macro fissuration. Elles ont de plus, la capacité de transférer les charges, dès lors qu'une bonne adhérence fibre/matrice est assurée la distribution homogène des fibres dans le béton est donc la condition principale pour pouvoir parler d'un béton renforcé uniformément, avec les mêmes caractéristiques dans tous les points de la matrice. Par ailleurs, les fibres constituent une sorte de granulats filiforme gênant l'assemblage optimal du squelette des granulats. La géométrie des fibres, leur dosage, ainsi que la mise en place du matériau frais, sont des paramètres affectant très fortement le comportement global du matériau durci.

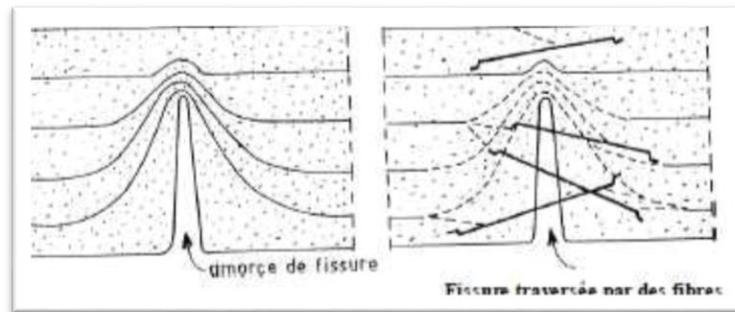


Figure II.1 : Rôle des fibres dans la matrice de béton.

II.3. Historique du béton de fibres [Yagoub, 2009]

Une analyse profonde de ce concept nous indique que cette idée est très ancienne et date depuis l'antiquité. En effet les pharaons ont pensé à l'idée des pailles pour renforcer la brique de boue comme il est le cas Finlandais utilisant pour la 1^{ère} fois, les fibres d'amiante dans le renforcement des poteries en argile, il y'a de cela 5000 années. D'autres sources [Antoine, 1985] et [Acicommitee, 1984] ont indiqué que l'usage de cette technique par le biais de pailles afin de renforcer les briques, tandis que les poils des animaux et les fibres pour renforcer le plâtre et la pâte de ciment. On peut noter aussi la réalisation, au milieu du XX^e siècle, d'alliages métalliques avec fibre de carbone.

En 1910, une série d'essais pour améliorer la résistance du béton a été faite par [Porter, 1910] qui a conclu que la présence des fibres courtes dans le béton augmente sa résistance à l'écrasement et à la traction.

Par la suite en 1911, [**Graham, 1911**] a établi un brevet sur les bétons de fibres. C'était le premier brevet Américain où il a décrit l'emploi des tranches d'acier comme des renforts fibreux dans les matériaux de construction. Un deuxième brevet Américain sur ce sujet a été pris par **WEAKLY**.

En 1912, commence l'utilisation des bandes en fils d'acier fabriquées avec deux fils, avec l'intermédiaire d'un anneau, afin d'assurer une adhérence durable avec le béton.

En 1920, [**Kleinlogel, 1920**] a déposé le premier brevet Allemand qui a décrit la synthèse d'ajouter un volume relativement important, de particules de fer au béton pour produire une masse capable d'être usinée (par tournage) comme une masse d'acier.

Quelques années après, en 1938, un autre brevet a été établi par **N. ZITEVIC** en Grande Bretagne. Son procédé consiste à mélanger avec le béton des petits éléments en fer approximativement avec 100 mm de long et 1.00 mm de diamètre. Ces éléments métalliques sont très semblables aux fibres utilisées aujourd'hui pour armer le béton. Il a conclu qu'il y a une amélioration de la résistance du béton à la compression, à la traction et au cisaillement.

A partir de 1940, plusieurs procédés sont apparus dans de différents pays. Ces procédés recommandent en général l'inclusion des fibres d'acier dans le béton pour améliorer sa performance. Mais on note ici que celui de **G.CONSTANTINESCO**, en 1943 en Angleterre et en 1954 en U.S.A, mérite une attention particulière.

A partir des années 70, il s'est produit une sorte de réveil dans le domaine de la technologie des bétons renforcés de fibres d'acier. La confiance acquise dans certaines propriétés spécifiques des bétons renforcés de fibres d'acier augmente de façon permanente par l'utilisation de ces bétons dans des applications industrielles. Le premier article dans ce concept peut être attribué à **LANKARD** et **SHEETS**.

II.4. Les fibres [**Georges, 2007**]

Les fibres sont définies comme des éléments discontinus, de nature variable, des formes sensiblement cylindriques, d'un diamètre et longueur variable. Elles sont réparties dans la matrice soit d'une façon aléatoire ou orientation préférentielle.

Généralement les fibres sont aussi utilisées pour définir le constituant élémentaire des structures textiles. Par ailleurs, on distingue la fibre de longueur réduite ou fibre courte, de 20 à 150 mm, et la fibre de grande longueur ou filament continu.

Il existe un grand nombre de fibres qui se différencient par leur origine (naturelles, artificielles et synthétiques), leur forme (droite, ondulée, aiguille, ...etc.), leur dimension

(macro ou micro - fibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Cependant, pour faire un choix de fibres à utiliser pour des applications, il est nécessaire de tenir compte de la compatibilité de la fibre avec la matrice, et le mode de performance du composite.

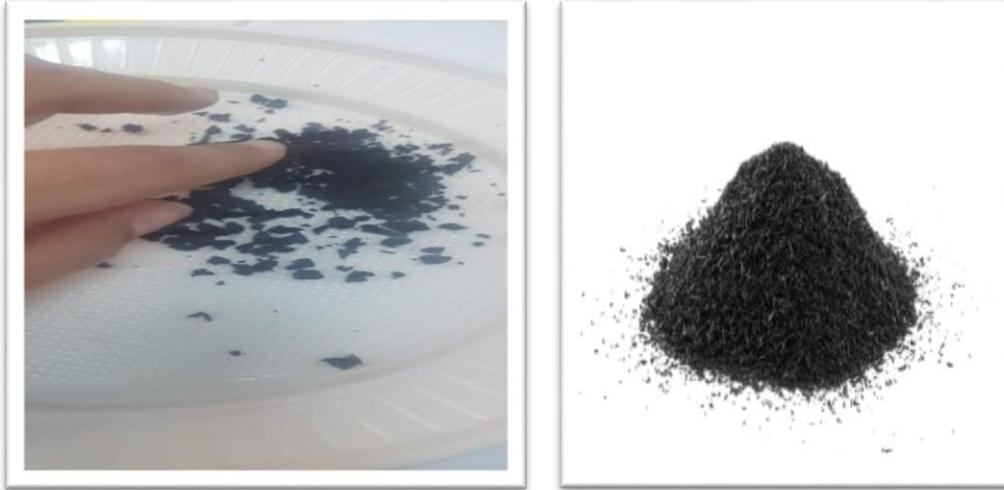


Figure II.2 : Des fibres plastiques utilisées.

II.4.1. Les types des fibres [Yagoub, 2009]

On trouve sur le marché plusieurs types de fibres, elles peuvent être classées par familles, un choix approprié du type de fibre à utiliser est essentiel. Chaque type de fibre possède des caractéristiques particulières qui les rendent apte à servir à une utilisation plutôt qu'à une autre.

Ainsi l'adoption d'une fibre influencera les facteurs suivants:

- Densité.
- Résistance tension et en compression.
- Résistance aux impacts et à la fatigue.
- Module d'élasticité.
- Conductivités thermique et électrique.
- Stabilité dimensionnelle.
- Résistance aux conditions environnementales.
- Coût.

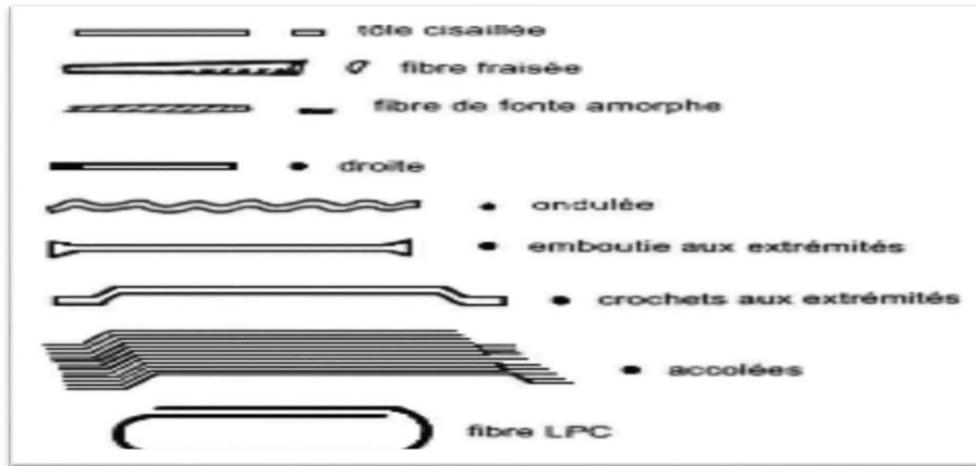


Figure II.3: Différentes formes de fibres.

Les différentes fibres actuellement disponibles peuvent être classées selon leur origine en :

- ✓ Fibres naturelles minérales et végétales : amiante, cellulose.
- ✓ Fibres synthétiques d'origine minérale : verre, carbone, fibres métalliques.
- ✓ Fibres synthétiques organique : polyamides, polypropylène, acrylique, kevlar, aramide.

II.4.2. Rôles des fibres dans le béton [Yagoub, 2009]

Lorsque les charges appliquées au béton s'approchent de la charge de rupture, les fissures se propagent, parfois rapidement. Les fibres noyées dans le béton permettent d'arrêter le développement de la fissuration. Les barres d'armature en acier jouent un rôle analogue, car elles agissent comme des fibres de grande longueur. Les fibres courtes et discontinues ont cependant l'avantage de se mélanger et de se disperser dans le béton de façon uniforme. Les fibres sont ajoutées à la gâchée de béton, qui contient habituellement du ciment, de l'eau et des granulats fins et grossiers.

II.5. Fabrication de béton de fibres [Yagoub, 2009]

Avant de mélanger le béton, la longueur des fibres, leur quantité et la composition du mélange sont choisies pour éviter la formation de boules de fibres. Dans les mélanges renforcés, le mortier occupe d'habitude environ 70 % du volume, contre 50 % pour les mélanges de béton courants, non renforcés de fibres.

Les panneaux en ciment renforcé de fibres ne contiennent pas de granulats grossiers.

Ces produits sont généralement réalisés en projetant simultanément le mortier et les fibres hachées. Un mortier ayant un rapport eau/ciment élevé facilite la projection. Il existe d'autres méthodes de fabrication, dont le coulage, moins universel que la projection, et le moulage sous pression, où le rapport eau/ciment moins élevé permet d'obtenir un produit plus résistant.

Des adjuvants chimiques sont ajoutés au mélange de béton renforcé de fibres, notamment pour augmenter son ouvrabilité. En Amérique du Nord, les entraîneurs d'air et les réducteurs d'eau sont ordinairement additionnés aux mélanges qui contiennent une proportion de 50 % ou plus de granulats très fins.

Les super plastifiants incorporés à des bétons renforcés de fibres peuvent abaisser le rapport eau/ciment et améliorer la résistance, la stabilité volumétrique et l'ouvrabilité des mélanges frais.

II.5.1. Diverses applications de béton de fibre [Yagoub, 2009]

Les nombreuses innovations de la technologie des bétons renforcés de fibres ont permis d'étendre considérablement la gamme des applications (**Tableau II.1**).

Tableau II.1 : Application de divers renforcements de fibres dans les produits à base de ciment*

Type de fibre	Application
Verre	Panneaux préfabriqués, murs, rideaux, tuyaux d'égout, toiture en voile mince de béton, enduit pour blocs de béton.
Acier	Éléments de toiture en béton cellulaire, revêtements de chaussée, tabliers de pont, produits réfractaires, tuyaux en béton, pistes d'atterrissage, réservoirs sous pression, structures résistantes aux explosions, revêtements de tunnel, coques de bateaux.
Polypropylène, Nylon	Pieux de fondation, pieux précontraints, panneaux de revêtement, éléments flottants de débarcadères et amarres pour les marinas, matériaux de réparation des routes, couches de lest pour les tuyaux sous-marins.
Amiante	Voiles, tuyaux, panneaux, matériaux d'isolation thermique et de protection contre le feu, tuyaux d'égout, plaques de toiture plates et ondulées, revêtements de mur.
Carbone	Éléments ondulés pour la construction des planchers, structures de

	membrane simple ou double courbure, coques de bateaux, planches d'échafaudage.
Particules de Mica	Remplacent partiellement l'amiante dans les panneaux à base de ciment, les tuyaux en béton ; matériaux de réparation.

*La combinaison de plusieurs types de fibres peut être utilisée pour des besoins particuliers.

II.6. Propriétés du béton de fibre [Yagoub, 2009]

Les fibres peuvent améliorer la ténacité, la résistance en flexion ou les deux, et sont choisies en fonction de leur disponibilité, de leur coût et de leurs propriétés. Par exemple, les fibres de polypropylène augmentent nettement la ténacité du béton mais ont peu d'effet sur sa résistance en traction. Par contre, les mélanges de fibres de polypropylène et de verre donnent un béton de grande résistance en flexion et très tenace.

II.6.1. Effet des fibres sur la maniabilité et la résistance du BAP [Yagoub, 2009]

II.6.1.1. Effet sur la maniabilité

Dès son apparition, c'est peut-être la maniabilité des BAP qui attire l'attention. Cette propriété qui assure la fabrication et la mise en œuvre des ouvrages peut aboutir toujours à une finition de qualité acceptable.

L'incorporation des fibres que ce soit de polypropylènes ou métalliques, peut apporter quelques modifications sur les comportements rhéologiques ou mécaniques des BAP.

[Y .ROUSSEL] a montré que l'apport en fibres diminue la précision de l'indice d'ouvrabilité qu'apporte l'essai d'étalement, et la maniabilité semble devenir moins bonne lorsque le volume de fibres dépasse le 1% du volume de mélange [Canada, 2000].

D'autres chercheurs ont montré que l'association des fibres synthétiques et des fibres métalliques peut donner aux BAP des comportements plus ductiles que dans le cas des bétons fibrés seulement avec des fibres métalliques [2006].

[HOCINE OUCEIF et COLL] ont montré aussi, que pour une même composition de béton, une teneur de 0.5% de fibres courtes (métalliques) a la même efficacité que l'utilisation de plus de 1% de fibres plus longues (synthétiques). Ils ajoutent également, que pour un BAP bi fibré de différentes dimensions et propriétés (fibres métalliques de fonte amorphe adhérente de 20mm et 30 mm, et fibres synthétiques glissantes de 40mm et 50mm), ils ont pu formuler des BAP répondants aux critères rhéologiques fixés [2006].

II.6.1.2. Effet sur la résistance

Les fibres ont habituellement un faible effet sur la résistance à la compression. Leur effet le plus significatif a trait au comportement en flexion (traction), ainsi dans plusieurs applications, les bétons renforcés de fibres sont utilisés dans des endroits où ils sont soumis à de tels efforts [Roussel, 2000].

Les fibres métalliques utilisées essentiellement en dallages industriels, dallages de parking, les pistes, les pieux, les déversoirs de barrage, les silos [Dreux et Festa, 1996], présentent une bonne résistance à la traction et à la flexion, une augmentation de la ductilité et une réduction du nombre de joints de retrait [BETONS VICAT].

Egalement, les fibres polypropylènes n'assurent pas un renforcement structural du béton, elles s'opposent aux effets du retrait plastique et peuvent se substituer pour cette fonction au treillis anti fissuration [SIKAFIBRES ANTIFISSURES].

II.7. Les avantages du béton de fibres [Kouici, 2016]

Les avantages de l'utilisation des fibres dans le béton sont présentés selon l'aspect technique et économique.

a) Aspect technique

- Un renforcement tridimensionnel uniformément distribué à travers le béton,
- Une augmentation de la ténacité grâce au comportement en post fissuration (résistance résiduelle).
- Une énergie d'absorption élevée.
- Une résistance aux impacts élevée.
- Une résistance à la fatigue élevée.
- Une augmentation de la résistance en cisaillement.

b) Aspect économique

- Une réduction des intervenants sur le chantier, ce qui implique une réduction du coût de mise en place et du temps de construction.
- Une optimisation du dimensionnement.

II.8. Bétons autoplaçants fibrés [Kouici, 2016]

II.8.1. Définitions

Malgré les améliorations appréciables obtenues au niveau du comportement mécanique des bétons, l'incorporation des fibres dans le béton reste problématique du point de vue de l'ouvrabilité et de la répartition homogène des fibres. Pour remédier à ces problèmes, l'association des fibres avec le béton autoplaçant (BAP) paraît prometteuse.

En effet, ce béton de dernière génération se caractérise par une excellente maniabilité qui lui permet de se mettre en place sous l'effet de la simple gravité. L'absence de vibration de ces matériaux évite une distribution hétérogène des fibres dans la matrice.

En béton précontraint, au niveau des zones fortement ferraillées afin de contrôler la fissuration. L'addition des fibres influe directement sur la rhéologie des bétons à l'état frais et donc de manière similaire sur l'ouvrabilité des BAP. Cette influence est fonction du dosage en fibres et de leurs caractéristiques géométriques notamment l'élançement. Ces propriétés ont été mises en évidence par différents essais à l'état frais, par exemple l'essai d'étalement « **SLUMP FLOW** » et l'essai d'étalement modifié dit « **J-RING** » qui permet d'évaluer notamment le risque de blocage. Pour bien déterminer l'effet des fibres, ces essais ont également été effectués avec un béton autoplaçant de référence (non fibré).

➤ Particularités

Les bétons autoplaçants fibrés doivent avoir les mêmes propriétés de base que les BAP non fibrés : étalement maximal, non ségrégation, non ressuage, non blocage etc, et ce malgré l'addition de particules supplémentaires que sont les fines.

II.8.2. Influence des fibres sur les propriétés à l'état frais [Kouici, 2016]

Une étude réalisée par Grünewald a réalisé un programme dédié aux propriétés des BAP fibrés en fonction de la teneur en fibres, du type de fibres (métallique et polypropylène avec différentes géométries) et du rapport massique sable/granulat. Pour la composition de référence, le rapport sable/granulats de 40% était utilisé car considéré comme optimal pour la compacité du béton.

II.8.2.1. Effet sur l'étalement [Kouici, 2016]

L'étalement diminue lorsque la teneur en fibres augmente. Le degré de diminution dépend de la teneur en sable dans composition de référence. On remarque aussi une ovalisation de la galette pour les compositions renforcées de fibres métalliques ayant une grande surface spécifique, ce qui indique que l'étalement est contrecarré par les fibres dans une ou plusieurs directions. En outre, pour certaines compositions avec des fibres plus longues, une ségrégation des granulats et des fibres au centre de la galette a été remarquée.

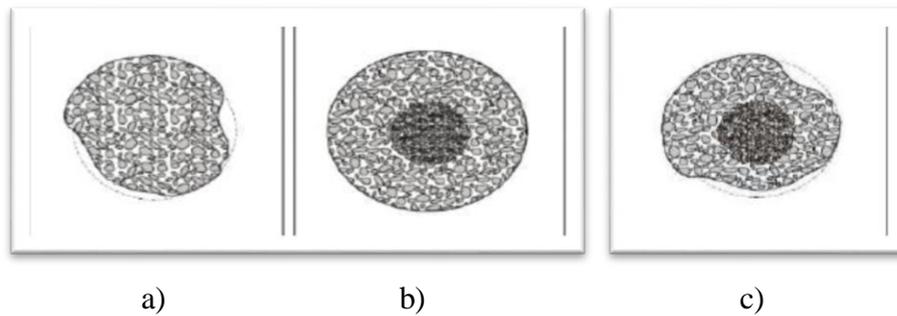


Figure II.4: Effets des fibres sur l'étalement des BAP.

II.8.3. Comportement mécanique des bétons autoplaçant fibrés [Kouici, 2016]

Les propriétés mécaniques permettant de caractériser un BAP fibré à l'état durci sont les résistances à la compression, à la traction, et à la flexion. Les fibres influent directement sur l'ouverture de la fissure et donc sur la rigidité et la ductilité après fissuration.

II.8.3.1. Comportement à la flexion [Kouici, 2016]

Une augmentation de la quantité de fibres conduit à une amélioration de la rigidité, et du comportement en flexion des bétons autoplaçants renforcés de fibres.

Les études effectuées sur le comportement mécanique en flexion sous l'influence de deux types de fibres (métalliques de type Fibrilleux (FM) 30x1,6 x 0,03 mm et synthétiques de type polypropylène (FS) 50x1,6x0,4 mm). Les dosages utilisés étaient de 20 kg/m³ pour FM, 9 kg/m³ pour FS et (10 FM + 4,5 FS) kg/m³ pour un fibrage mixte.

Les fibres métalliques « FM » qui sont réputées très adhérentes à la matrice ont conduit à une augmentation de la capacité portante néanmoins la résistance résiduelle chute rapidement pour des flèches imposées plus élevées.

Les fibres synthétiques « FS » n'ont pas permis d'augmenter la capacité portante, elles confèrent tout de même au système une résistance résiduelle post-pic maintenue jusqu'à des ouvertures des fissures très larges. L'association des deux types de fibres peut constituer un compromis efficace pour améliorer la résistance à la flexion des BAP et prolonger le plateau de la capacité portante résiduelle des structures jusqu'aux larges ouvertures des fissures.

Les BAP semblent conférer une adhérence fibre-matrice supérieure par rapport au béton vibré, que ce soit avec des fibres métalliques ou synthétiques.

II.8.3.2. Comportement à la compression et à la traction [Kouici, 2016]

La résistance à la compression n'était pas significativement sensible à l'adjonction de fibres dans un BAP. La résistance au jeune âge est quelque peu faible, probablement due à un effet retard de l'hydratation des mélanges et/ou des fillers, lié aux adjuvants. Néanmoins, à long terme, la résistance correspond à celle d'un béton ordinaire avec un même rapport E/L.

Les résistances à la compression visées à 28 jours ont été atteintes pour tous les types de bétons, avec une très légère diminution des rapports R_{COMP}/R_{TRAC} entre 7 et 28 jours. Cette réduction modérée est probablement due à l'amélioration de l'adhérence des fibres avec le béton dans le temps, mécanisme dont dépend fortement la résistance à la traction.

Les fibres métalliques réputées très adhérentes agissent dès les plus faibles ouvertures de fissures, elles confèrent au matériau une résistance apparente en traction améliorée en agissant dès la microfissuration.

II.8.4. Utilisation des BAP fibres dans les structures [Kouici, 2016]

Nous allons présenter quelques exemples d'applications des BAP fibrés dans les éléments de structure.

➤ Palplanches

Les palplanches précontraintes en béton autoplaçant renforcé de fibres présentent plusieurs avantages par rapport celles avec un béton standard : le coulage et le remplissage sont facilités, le stockage exige moins d'espace, et un nombre plus élevé d'éléments peut être transporté avec un camion (plus légers et moins encombrants). Enfin, la mise en place dans la terre est plus aisée (moins de résistance à l'enfoncement dans le sol).



Figure II.5: Palplanches précontraintes à base de mortier autoplaçant fibré(a), béton armé ordinaire (b).

➤ **Voussoirs**

Les voussoirs subissent souvent des dommages au cours de la construction. Les fibres, en réduisant la fragilité du matériau, peuvent éviter l'endommagement du béton d'enrobage qui est provoqué par le placement imprécis des voussoirs. Pendant leur durée de service, ils peuvent être accidentellement soumis à une augmentation de la température provoquée par un feu.



Figure II.6: Un voussoir à base de BAP fibré.

II.9. Conclusion [Kouici, 2016]

L'utilisation des fibres dans les mélanges du béton autoplaçant affecte l'étalement ainsi que le taux de remplissage. La composition des bétons autoplaçant donne une grande

fluidité sans ségrégation mais il y'a toujours problème dans le taux de remplissage parce que le phénomène de blocage des fibres apparait dans le BAP fibrés. Cela est causé par la géométrie de la fibre notamment sa longueur.

Le béton de fibres est un matériau composite constitué d'une matrice béton et d'un renfort par inclusion directe de fibres isolées.

L'addition des fibres influe directement sur la rhéologie des bétons à l'état frais et donc de manière similaire sur l'ouvrabilité des BAP. Cette influence est fonction du dosage en fibres et de leurs caractéristiques géométriques notamment l'élanement.

L'ajout des fibres a pour rôle principal dans le béton est de modifier ces propriétés, Les fibres sont introduites dans le béton pour compenser la fragilité du matériau en traction par une couture de la microfissuration.

Les fibres sont classées selon leur origine (naturelle, synthétique ou artificielle, leur forme (droite, ondulée, aiguille, etc.), leur dimension (macro ou microfibre) et aussi par leur propriétés mécaniques.

L'analyse d'effet des fibres sur l'étalement montre que l'étalement diminue lorsque la teneur en fibres augmente. Le degré de diminution dépend de la teneur en sable dans la composition de référence.

CHAPITRE III

Les pneumatiques usagés
Les pneumatiques usagés

Chapitre III

Les pneumatiques usagés

III.1. Introduction

Le recyclage des déchets dans le génie civil est un secteur important car on veut obtenir des produits qui ne soient pas soumis à des normes de qualité trop strictes. Le recyclage des déchets a deux impacts très importants, l'impact environnemental et l'impact économique. Ainsi, dans plusieurs pays du monde, différents déchets sont utilisés dans le secteur de la construction, notamment dans le ciment ou le béton sous forme de poudres, de fibres ou de granulats. Cependant, avant d'introduire la dernière technologie en matière de recyclage des déchets dans le génie civil, introduisons des informations générales sur les déchets et les méthodes utilisées pour les traiter ou les éliminer.

III.2. Les déchets

Selon le domaine d'étude et d'intérêt, les déchets peuvent parfois être définis différemment selon leur origine et leur état. La loi n° 01-19 du 12 décembre 2001, article 3 du Journal Officiel de la République Algérienne n° 77 de 2001, définit comme déchet : tout résidu résultant de la production, de la transformation ou de l'utilisation, plus généralement tout produit et toute bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur de la substance dispose, envisage de disposer, ou est obligé de disposer ou d'éliminer.

D'un point de vue économique, les déchets sont une marchandise sans valeur marchande inhérente. D'un point de vue sociologique, les déchets sont le témoignage d'une culture et de ses valeurs. Il reflète le niveau social de la population et les espaces dans lesquels elle évolue : zones rurales/urbaines, habitats collectifs/individuels.

III.2.1. Différents type de déchets

On distingue généralement diverses sortes de déchets dont :

- **Les déchets ménagers et assimilés**

Comprend principalement les ordures ménagères, les déchets municipaux (propres), les déchets verts et encombrants, doivent s'y ajouter les déchets des commerces, artisans et entrepreneurs, écoles et autres établissements d'enseignement et hôpitaux et autres établissements de santé.

- **Les déchets des collectivités locales**

Il comprend principalement les boues de station d'épuration, les déchets verts, nettoyage des rues et des marchés, déchets des administrations publiques (papier et autres document).

- **Les déchets industriels**

On distingue généralement les déchets industriels banals (DIB), encore appelés non dangereux et les déchets industriels spéciaux (DIS) ou dangereux.

- **Déchets industriels non dangereux**

Ces déchets sont très proches des ordures ménagères dans la mesure où ils sont essentiellement composés de carton, papier, plastique, bois, métal, verre, textiles.

- **Déchets industriels dangereux**

Ceux-ci ne peuvent être jetés ou stockés que dans conditions particulières tous les déchets dangereux ne doivent pas être collectés, éliminés ou stockés dans des conditions optimales.

- **Les déchets inertes**

Tout déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante, qui ne se décompose pas, ne brûle pas, ne produit aucune réaction physique ou chimique, n'est pas biodégradable et ne détériore pas les matières avec lesquelles il entre en contact d'une manière susceptible d'entraîner des atteintes à l'environnement ou à la santé humaine.

- **Les déchets fermentescibles**

Sont des déchets biodégradables, c'est-à-dire se décomposant plus ou moins rapidement sous l'action de micro-organismes aérobies ou anaérobies (bactéries, moisissures). Les ordures ménagères contiennent une part importante de matières fermentescibles que l'on nomme la fraction fermentescible des ordures ménagères. Cette part peut être extrêmement réduite par le tri sélectif dès lors que l'on procède, quand on le peut, au compostage chez soi de cette fraction.

- **Les déchets ultimes**

Un déchet, résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans des conditions techniques et économiques du moment, notamment par de la part valorisable ou part extraction de son caractère polluant ou dangereux (loi du 15 juillet 1975).

Cette définition est plutôt ambiguë dans la mesure, par exemple, où on pourrait considérer qu'un déchet pour lequel on faisait des efforts pour le rendre moins nocif, on ne les fasse plus du jour, par exemple, où pour des motifs de rentabilité économique, on estime plus intéressant de s'en débarrasser à Abidjan.

- **Les déchets radioactifs**

Les hôpitaux et les autres établissements de soins sont à l'origine de nombreux déchets. Certains de ces déchets sont banals et s'apparentent le plus souvent à des ordures ménagères (déchets de bureaux, de cuisines, restes de repas, déchets liés à l'entretien des locaux. D'autres déchets sont particuliers. Il s'agit principalement de déchets radioactifs, de déchets à risques infectieux et de médicaments.

III.3. Caoutchouc et déchets de caoutchouc

1. Généralité sur le caoutchouc

Il existe deux grandes familles de caoutchoucs :

- Les caoutchoucs naturels qui proviennent de l'hévéaculture (hévéa : arbre qui, produit du latex).
- Les caoutchoucs synthétiques fabriqués à partir de dérivés du pétrole.

Les caoutchoucs sont utilisés dans de nombreux secteurs : automobile/transport (pneumatiques, système de freinage, airbag, étanchéité, ..), équipement industriel, bâtiment et travaux publics (BTP), médical (préservatifs, gants, ...), alimentation (tétine...), colles et adhésifs...

Les déchets de caoutchouc ont quatre origines :

- ❖ Les déchets de caoutchouc industriel (8%),
- ❖ Les déchets de fabrication de pneumatiques et chambres à air (3,5%),
- ❖ Les pneumatiques usagés (86,6%),
- ❖ Les déchets du recyclage (poudrettes, copeaux) (2%).

2. Définitions

La matière caoutchouc ou familièrement un caoutchouc désigne un mélange contenant une matière de base (un polymère) qui est susceptible d'être moulé, façonné, en général à chaud

et sous pression, afin de conduire à un produit semi-fini ou à un objet. Comme les matières plastiques, ils sont souvent issus d'un combustible fossile. Un élastomère possède une meilleure déformation élastique sous contrainte que la plupart des matériaux et revient à sa forme initiale sans aucune déformation permanente. Un élastomère est un polymère présentant des propriétés « élastiques », obtenues après réticulation. Il supporte de très grandes déformations avant rupture. Le terme de caoutchouc est un synonyme usuel d'élastomère.

3. Composition chimique d'un caoutchouc

La matière caoutchouc est composée en générale en trois composants qui sont :

- ✓ Résine de base (polymères).
- ✓ Adjuvants.
- ✓ Additifs.

4. Processus de fabrication des matières caoutchouc

La matière première généralement utilisée est le pétrole duquel sont extraites des molécules d'hydrocarbure. Elles sont ensuite unies entre elles pour former des molécules de masse plus importante : c'est les polymères. 4% du pétrole est utilisé pour fabriquer des matières caoutchouc. En sus de la résine, les additifs et adjuvants sont là pour améliorer les propriétés chimiques et physiques du matériau, notamment la résistance aux chocs, la couleur, la plasticité, la résistance au vieillissement, etc.

5. Utilisation des déchets de caoutchouc dans le bâtiment

Le recyclage des déchets du caoutchouc issus des pneus a une grande importance du point de vue environnemental, car ces derniers produisent chaque année d'important flux de déchet ; ils représentent une réelle problématique quand on sait qu'un pneu met 400 ans avant de commencer à se dégrader.

L'emploi de ces déchets et des sous-produits industriels dans le secteur du bâtiment répond simultanément au souci d'économie des ressources naturelles en granulats. Ce sont plusieurs millions de tonnes de pneumatiques usagés et irrécupérables, au moins pour leur usage premier, qui sont abandonnés chaque année. Le moins que l'on puisse dire, c'est que ces objets n'offrent pas vraiment une plus-value esthétique ou artistique aux endroits où ils sont abandonnés (dans les ruisseaux et les fossés), stockés et même réutilisés, par exemple, sur les coques des bateaux pour servir d'amortisseurs ou par les paysans pour maintenir les bâches sur

leurs silos d'ensilage. La revalorisation des pneumatiques présente pourtant des avantages évidents :

- Le premier concerne le rechapage qui permet de multiplier la durée de vie d'un pneu par 3 souvent (1 million de kilomètres pour un pneu de camion au lieu de 300 000 km). Il est intéressant de noter que les particuliers semblent peu enclins à utiliser des pneus rechapés, pourtant deux fois moins chers et tout aussi sûrs et durables que des neufs.
- La deuxième utilisation, c'est la transformation des pneumatiques en granulats (poudrette) utilisés pour la réalisation de revêtements à faible émission sonore.
- La troisième utilisation, c'est la transformation en déchiquetât pour la réalisation de murs antibruit aux abords des voies de circulation routières ou ferrées ou encore pour la confection de couches drainantes dans les centres d'enfouissement techniques et divers autres usages de protection.

L'incinération des pneumatiques est pratiquée par les cimentiers, encore à l'essai dans la métallurgie (hauts-fourneaux).

6. Les caractéristiques des granulats de caoutchouc

D'une manière générale, il est possible de caractériser un granulats de caoutchouc par un certain nombre de propriétés :

- Taille de la particule.
- Distribution de taille des particules.
- Morphologie des particules.
- Composition chimique des particules.
- Energie de surface des particules.



Granulés de 4 à 5mm	Granulés de 2 à 4mm	Granulés de 0.5 à 2mm	Granulés inférieur à 0.5mm
---------------------	---------------------	-----------------------	----------------------------

Figure III.1 : Le différent diamètre des granulats des pneus usés après broyage.

Tableau III.1 : Distribution granulométrique pour les trous de filière de \varnothing 20 mm et \varnothing 16 mm (Technique et procédés KAHL pour le recyclage des pneus usagés).

\varnothing 20 mm	4 à 6 mm~ 25%	2 à 4 mm~ 25%	0 à 2 mm~ 45% à 50%
\varnothing 16 mm	4 à 6 mm~ 20%	2 à 4 mm~ 20%	0 à 2 mm~ 55% à 60%

III.4. Caoutchouc des pneus

Dans un contexte d'augmentation de la production de déchets industriels et d'utilisation accrue des ressources naturelles épuisables. Les déchets de pneus usagés provenant de l'industrie automobiles, ne cessent d'augmenter chaque année avec l'utilisation abusive des véhicules industriels. Selon des statistiques récentes, la production mondiale annuelle des déchets de pneus usagés est estimée à 17 millions de tonnes. Les dernières initiatives mondiales de diminution de la pollution de l'atmosphère, exigent l'utilisation des méthodes propres d'élimination des déchets, afin de protéger l'environnement vis-à-vis leurs effets nocifs [Sienkiewicz, al] [Conférence des Partie à la Convention de BALE].

Pour maîtriser le flux des déchets des pneus usagés, la priorité est désormais donnée à la valorisation par réemploi, recyclage ou toutes autres actions qui visent notamment à obtenir, à partir de ceux-ci, des matériaux réutilisables. Sans doute que le recyclage de ce type de déchet sous forme des granulats de construction constitue une alternative, à faible coût économique et surtout écologique, aux granulats minéraux conventionnels épuisables [Rashad M,A,,] [ETRMA – European Tyre&].

Les bonnes propriétés de caoutchouc qui dure des siècles pour être décomposé (bonne étanchéité, bonne absorption des chocs...), son incorporation dans les matériaux cimentaires, peut améliorer leurs propriétés physiques (mauvaise étanchéité, mauvaise isolation acoustique et thermique,...) [Siddique R,, Naik T,R,,] [Malek K, B,, Marie I,, ASI I,,].

a) Généralités sur les pneus usagés

Un pneu est constitué principalement de caoutchouc et contient également de l'acier (de 16 à 27% en masse selon le type de véhicule). L'ensemble des Pneumatiques Usagés (PU) des véhicules comprend les Pneumatiques Usagés Réutilisables (PUR) et les Pneumatiques Usagés Non Réutilisables (PUNR). Ce sont des déchets industriels non dangereux devant être éliminés.

Le stockage aérien non contrôlé des pneus peut constituer une source de nuisances, et présente des risques potentiels d'incendie et donc de pollution et de sécurité. La première étape consiste, dans le cadre de la filière d'élimination des PU, à séparer Les PUR des PUNR.

Le critère technique de tri entre les PUR et les PUNR porte sur la profondeur de la sculpture et l'intégrité de la structure de l'enveloppe. Les PUNR sont valorisés entiers ou sous forme de demi-produits :

Technique de tri entre les PUR et les PUNR porte sur la profondeur de la sculpture et l'intégrité de la structure de l'enveloppe. Les PUNR sont valorisés entiers ou sous forme de demi-produits :

- **Pneus coupés** : morceaux supérieurs à 300 mm.
- **Déchiquetas** : pneus découpés en morceaux irréguliers de 50 à 300 mm.
- **Granulats** : pneus réduits à une granulométrie comprise entre 1 et 10 mm par processus mécanique, cryogénique ou thermique.
- **Poudrettes** : particules de granulométrie inférieure à 1 mm, obtenue par réduction mécanique, cryogénique ou thermique..... définition LCPC [DEF].

b) Définition et caractéristiques physiques des pneus

Mieux comprendre comment est composé un pneu permet de mieux analyser les produits qui peuvent en être retirés après un recyclage. L'enveloppe du pneu est décomposable en quatre éléments principaux [Malek, K et al]

1) La carcasse

Elle constitue le squelette du pneu, l'ossature du pneu est composée de couches de câble de différents types (nylon, acier, rayonne, polyester, aramide,...).

2) Le talon

Est l'élément rigide de la liaison entre la jante et le pneu. Il est composé d'une tringle de câble d'acier à haute adhérence.

3) La bande de roulement

Elle est composée d'un mélange de caoutchouc devant résister aux chocs, aux coupures, aux échauffements, à l'abrasion...

4) Le flanc

Il est constitué de plusieurs types de caoutchouc ; son rôle est double : il doit, dans sa partie supérieure protéger la carcasse contre les échauffements et l'abrasion, et dans sa partie inférieure (plus épaisse) protéger la carcasse des contacts avec le rebord de la jante.

c) Caractéristiques physiques et chimique des pneus

Sur le plan chimique, un pneu est un mélange à base de caoutchouc synthétique ou naturel, dans lequel sont ajoutées des éléments améliorant les qualités de résistance et de sécurité, tels les plastifiants, les charges renforçant (noir de carbone), et les agents vulcanisant (dont le soufre). D'autres composés chimiques sont ajoutés pour rendre plus performante la délicate opération de vulcanisation (accélérateur ultra accélérateur, activateurs, oxyde de zincodorants) [Turatsinze A;al]. Cependant, il faut savoir que la composition réelle des pneus est largement gardée secrète par les manufacturiers, rendant par là même, leurs recyclages plus difficiles.

Le tableau (III.2), donne la composition moyenne d'un pneu pour véhicule léger (VL) :

Tableau III.2 : Composition moyenne d'un pneu VL en Europe [CONSTANT E,].

Matériaux /éléments	Pourcentage massique
Caoutchouc	48
Noir de carbone	22
Acier	15
Textile	5
Oxyde de zinc	1
Soufre	1
Additif	8

Le tableau (III.3), présente aussi d'autres caractéristiques des pneus telles que :

Tableau III.3 : Caractéristiques physiques d'un pneu [CONSTANT E,].

Caractéristiques	Tourisme (VL)	Poids lourds (PL)
Poids moyen	7 kg	50kg
Densité moyenne	0,2 entier	0,4 décheté
Nombre de pneu/m ³	20	3
Présente de métal	15%	25%

d) Les fonctions et la structure du pneumatique

La structure radiale du pneumatique est constituée d'une carcasse textile très souple verticalement afin de permettre un contact optimal à pression uniforme du pneumatique sur le sol, et d'une ceinture métallique très raide longitudinalement et transversalement, qui permet d'engendrer des efforts longitudinaux et transversaux aussi élevés que possible pour les fonctions de transmission et de guidage. La zone basse, constituée d'une tringle et d'un talon, permet d'assurer le montage de l'enveloppe sur la jante ; l'étanchéité est assurée par une gomme intérieure très imperméable à l'air.

III.4.1. Principaux constituants et catégories d'un pneu

Si on effectue la coupe d'un pneumatique de type radial dans le sens transversal (figure III.2), sa complexité par le nombre de constituants apparaît avec beaucoup de netteté, on distingue alors : (www.michelin.fr).

1. **Une feuille d'un caoutchouc synthétique** : Très étanche à l'air. Cette feuille va se trouver à l'intérieur du pneu et fera fonction de chambre à air.
2. **La nappe carcasse** : Cette carcasse est composée de minces câbles en fibres textiles disposés en arceaux droits et collés au caoutchouc. Ces câbles sont un élément clé de la structure du pneu et vont lui permettre de résister à la pression. Dans une nappe de pneu automobile, il y a environ 1400 câbles qui peuvent chacun résister à une force de 15 kgf.
3. **Un bourrage zone basse** : Son rôle est de transmettre les couples moteurs et freineur de la jante vers l'aire de contact au sol.
4. **Les tringles** : Servent à serrer le pneu sur la jante. Elles peuvent supporter jusqu'à 1800 kg sans risque de rupture.
5. **Les flancs** : En gomme souple vont protéger le pneu des chocs qui pourraient endommager la carcasse, comme les chocs contre les trottoirs, par exemple. Une gomme dure assure la liaison entre le pneu et la jante.
6. **Les nappes sommets** : Armées de câbles en acier très fins mais très résistants, elles sont croisées obliquement et collées l'une sur l'autre. Le croisement de leur fils avec ceux de la carcasse forme des triangles indéformables. Dénommée triangulation, cette disposition assure la rigidification du sommet. Ces nappes, qui ceinturent tout le sommet du pneu, ont un rôle très complexe : Elles doivent

être suffisamment rigides dans le sens circonférentiel du pneu pour ne pas s'étirer sous l'effet de la centrifugation, et maîtriser ainsi parfaitement le diamètre du pneu, quelles que soient les conditions d'utilisation. Elles doivent aussi être rigides dans le sens transversal pour résister aux efforts de dérive. Mais elles doivent également être souples dans le sens vertical pour "boire l'obstacle". Pour obtenir ces nappes, il faut coller l'acier à la gomme. Très difficile à obtenir, la cohésion parfaite entre ces matériaux dissemblables est indispensable.

7. **La bande de roulement** : Est posée par-dessus les nappes sommets. Cette partie du pneu, qui recevra les sculptures, sera en contact avec la route. Dans l'aire de contact au sol, la bande de roulement doit pouvoir résister à des efforts très importants. Le mélange qui la constitue doit être adhérent sur tous types de sols, résisté à l'usure, à l'abrasion et doit s'échauffer faiblement.
8. Il reste ensuite à réaliser les sculptures et à vulcaniser l'ensemble pour rendre tout cet assemblage parfaitement solidaire.

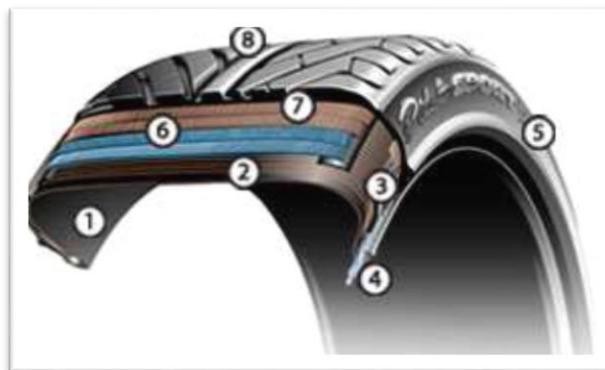


Figure III.2 : Coupe transversale d'un pneu Michelin (www.michelin.com).

En 2004, ALIAPUR (filère de valorisation des pneus usage) a défini quatre catégories de pneus PU en fonction de leur poids :

Catégorie A – Poids moyen : 6,5 kg (Tourisme dont 4x4 tous terrains, enveloppes de secours spéciales ou galettes, camionnettes dont 4x4 tous terrains, petit agricole-agraires roues directrices, motos routières-non routières-trial).

Catégorie B – Poids moyen : 53 kg (Manutention inférieure à 60 kg, poids lourds, remorque agricole).

Catégorie C – Poids moyen : 77 kg (Pneumatiques agraires roues motrices, travaux publics, manutention comprise entre 60 et 200 kg).

Catégorie D – Poids moyen : 365 kg (Génie civil, manutention supérieures à 200 kg).

III.5. Valorisation du pneumatique usagé

Aujourd'hui, les nombreuses possibilités de transformation ou d'élimination offerte par le pneu usagé non réutilisable en font un matériau à fort potentiel. Les chercheurs et les industriels découvrent ses nombreuses qualités : la résistance de sa structure lorsqu'il est conservé en entier, sa souplesse lorsqu'il est transformé en granulats, ou son pouvoir calorifique lorsqu'il est utilisé comme combustible. Enfin a noté aussi que le critère économique nous oblige à nous orienter vers l'utilisation d'un déchet particulièrement abondant, qu'est le pneumatique usagé, qui cause actuellement des problèmes d'environnement (Stockage et Protection de la couche d'ozone). La valorisation concerne principalement les opérations suivantes : (BELABDELOUAHAB F, TROUZINE H [BEL11]).

- Le réemploi.
- Le rechapage.
- Le recyclage.
- L'utilisation comme combustible.
- L'incinération avec récupération d'énergie.
- L'utilisation pour ensilage par des agriculteurs.
- Le broyage ou le découpage uniquement en vue de valorisation.
- L'utilisation dans le domaine des Travaux Publics (ou de génie civil).

Les pneumatiques usagés constituent à eux seuls la presque totalité des déchets de caoutchouc, Cependant avant d'être considérés comme des déchets, un nombre de pneumatiques usagés font l'objet d'une valorisation qui peut se présenter sous l'une des formes suivantes :

1. Valorisation Energétique

Cette valorisation consiste à produire de l'énergie par combustion des vieux pneus jetés dans les décharges et qui créent un problème de stockage.

La valorisation énergétique est rendue possible grâce au pouvoir calorifique du pneu (24-28Mj/kg). Il est proche de celui du charbon et peut être utilisé comme combustible alternatif dans les cas suivants :

- Fours de cimenterie.
- Centrales thermiques.
- Chaudières industrielles.
- Unités d'incinération.

En effet, le pneumatique, de par son origine polymérique, il a un excellent pouvoir calorifique **3 tonnes de pneus = 2 tonnes de fuel**.

Sa composition homogène en fait par ailleurs un combustible de stable.

En Algérie le problème reste posé, la réglementation n'est pas encore claire sur la valorisation énergétique. Les cimenteries Algériennes préfèrent utiliser du gaz naturel qui est nettement moins coûteux, que de la poudrette de caoutchouc.

2. Valorisation matière

Cette valorisation repose principalement sur trois cas :

- Par rechapage.
- Valorisation par transformation mécanique (Poudrettes, Granulés).
- Valorisation par transformation chimique.

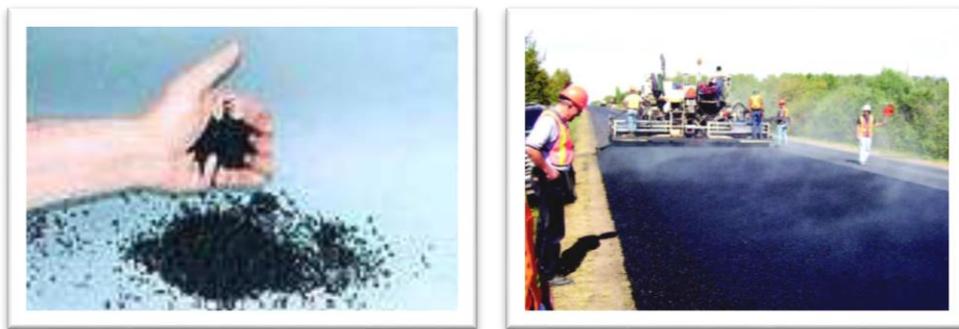


Figure III.3 : Poudrettes en caoutchouc.

Les pneumatiques usagés sont utilisés sous forme de poudrette pour la fabrication des enrobés routiers (l'Asphalte caoutchouté). La poudrette est incorporée dans le mélange lors de la fabrication de l'enrobé. Cette application vise à améliorer les caractéristiques acoustiques de l'enrobé, sa résistance à la fissuration, et l'adhérence, ce qui donne généralement une plus longue vie avant que l'entretien ne soit exigé (réduction d'entretiens).

3. Valorisation originale des pneus usagés

Dans le processus de valorisation matière, le pneu usagé est employé sous différentes formes.

✓ Pneus entiers

- **Pneu sol** : qui consiste à superposer des couches de pneus reliés entre eux et remplis de matériaux de remblai. Cette technique permet la réalisation d'ouvrages de soutènement, de remblais légers, d'ouvrages absorbeurs d'énergie comme protection contre les chutes de blocs, et les répartiteurs de contraintes au-dessus des conduites enterrées.
- **Arma pneu sol** : associe pneus, remblai et armatures en nappes de treillis soudés.
- **Pneu tex** : associe pneus et membranes en géotextile.
- **Pneu résil** : consiste à empiler des pneus de poids lourds en colonnes et à empêcher le sol courant de remplir les
- **vides créés à l'intérieur et entre les pneus** : cette structure, a une masse volumique très faible et peut être utilisée comme soubassement de routes ou comme remblai derrière les culées de pont ou les murs de soutènement.
- **Drainage** : l'utilisation de pneus ligaturés entre eux et mis en place sous forme de tube, permet le drainage de fossés et de parcelles.
- **Protection de quai** : des pneus entiers sont couramment utilisés comme absorbeurs de chocs le long de quais et de jetées.
- **Ensilage** : certaines techniques agricoles utilisent des pneus pour le maintien des bâches d'ensilage.

✓ Pneus découpés

La bande roulement peut être utilisée comme tapis support de voie ferrée pour réduire les bruits et les vibrations.

✓ Pneus déchiquetés

Les propriétés drainantes, la compressibilité, la masse volumique faible du produit permettent aux déchiquetés de pneus d'être utilisé comme remblai léger dans la construction de routes ou comme sous couches drainantes de centres d'enfouissement technique.



Figure III.4 : Schéma d'une filière de valorisation matière (Interstate 880/Dixon Landing Road, 2001).

III.5.1. Valorisation et réalisations en Algérie par la technique pneu sol

Plusieurs réalisations en Pneu sol ont été effectuées dans le monde et en Algérie, nous citons dans ce qui suit quelques réalisations importantes :

Le problème des pneus usagés est non seulement Mondial mais aussi Maghrébin et Africain ; des millions de tonnes sont jetés chaque année dans le monde (déchet encombrant et abondant).

L'Algérie comme certain d'autre pays a compris que la technologie est la clé de l'évolution, sur des méthodes et des techniques nouvelles, tout en pensant à la protection et la conservation de l'environnement dans le cadre du développement durable. **1ier ouvrage [2005]**

Projet pilote

Réalisation d'une planche expérimentale, qui a consisté à l'exécution d'un remblai par la technique 'Pneu sol'. Ce remblai a été mis en place au pied d'un grand talus d'une hauteur de 13m, exécuté dans le cadre des travaux de réalisation de l'évitement de la ville de Bousmail dans la wilaya de Tipaza. Ce projet qui est le premier dans son genre en Algérie, à comme rôle principal d'augmenter stabilité du talus de la route, et de raidir sa pente et enfin alléger les charges sur le côté aval d'un dalot.

- nombre de pneus utilisés : 5353 Pneus [Michelin Algérie].
- inauguration et mise en circulation 12 Mai 2005.



Figure III.5 : Pose des nappes de pneus Projet pilote – Route de Bousmail.

Les différents contrôles et vérifications de la stabilité d'ensemble de cet ouvrage, pour la mesure des déformations dans le temps, en particulier les déplacements en tête de l'ouvrage, ont montrés un comportement et une stabilité parfaite jusqu'à l'heure actuelle. (**2ième ouvrage [2006]**)

Ce cas est similaire au glissement de grande masse. C'est un ouvrage réalisé en Algérie par les propres moyens d'un particulier, suivie particulièrement par l'expert de l'E.N.S.T.P. Les

pneus fournis par Michelin Algérie sont des pneus poids lourds entiers, le sol utilisé pour le remblai «pneu sol» étant le même sol existant sur site.

- Nombre de Pneus utilisés : 1000 Pneus.
- Réalisation et finalisation en 2006.



Figure III.6 : Stabilité d'un glissement de terrain - Cas de Tizi Ghenif – Wilaya de Tizi Ouzou Algérie.

De même, les différents contrôles et vérifications de la stabilité d'ensemble de cet ouvrage, en particulier les déplacements en grande masse, ont montrés une stabilité parfaite jusqu'à l'heure actuelle.

III.5.2. Valorisation de poudrette de caoutchouc en béton

Des études sont en cours afin d'étudier les opportunités résultant de l'incorporation de granulats issus du broyage de pneus usagés dans des mortiers et bétons à base cimentaire .Par cette incorporation, il s'agit à la fois d'alléger le béton et d'en augmenter les performances (accroissement de la résistance à la fissuration et de la capacité de déformation de ces matériaux). Ces différentes utilisations des granulats ou de fibres textiles de pneus usagés dans des matériaux à base cimentaire représentent de voies de valorisation à exploiter. (www.aliapur.com).

Depuis dix ans, l'industrie cimentière s'est engagée à réduire sa consommation d'énergie fossile tout en garantissant le maintien de la qualité des ciments. Avec l'utilisation de broyats de pneus ou de pneus usagés entiers comme combustible de substitution, les cimenteries participent à la préservation des ressources naturelles et au recyclage des produits en fin de vie. Cette solution

permet d'économiser du coke de pétrole, du charbon et du fioul lourd. Bien entendu, le recours à des pneus s'effectue dans des conditions d'utilisation particulièrement strictes et encadrées.

✓ **La recherche en Algérie sur l'utilisation Poudrette de caoutchouc dans les chaussées routières :**

En 2007, une étude particulière a été lancée au niveau de l'ENTP sur l'utilisation de la poudrette de caoutchouc dans les chaussées routières (revêtement des chaussées). Cette recherche s'effectue au laboratoire de l'école, elle s'axe sur les procédés innovants dans le traitement de la fissuration des chaussées routières, principalement dans les zones à haute température et en parallèle avec le Ministère des Travaux Publics des planches d'expérimentation par inclusion d'un pourcentage de poudrette dans l'asphalte sont prévues au sud Algérien, ceci permettra de donner une souplesse aux enrobés afin d'éviter le phénomène de fissuration et en même temps réduire la nuisance sonore. Pour la réalisation de l'asphalta caoutchouté, les pneus sont utilisés sous forme de granulats ou de poudrette pour la fabrication des enrobés destinés aux couches de roulement des routes. Les différentes fractions granulométriques utilisées sont : 0/0,5 mm,

0,5/2 mm, 2/7 mm et 7/15 mm. La poudrette est incorporée comme granulats dans le mélange à la fabrication de l'enrobé (en moyenne 15%).

Cette application vise à améliorer les caractéristiques acoustiques de l'enrobé. Le dosage est de l'ordre de quelques pourcents. Les poudrettes rentrent également dans la fabrication des enrobés drainant. **(BELABDELOUAHAB F, TROUZINE H [BEL11])**



Figure III.7. : Technique de l'asphalte caoutchouté.

III.6.1. Avantages d'utilisation du caoutchouc recyclé dans les bétons

Le composite granulat en caoutchoucs dans le béton a des avantages diverses dans le secteur du génie civil ces derniers peuvent être résumés comme suit :

- Recyclage des caoutchoucs et des pneumatiques évite les coûts de mise en décharge ou d'incinération.
- Absorption des vibrations mécaniques.
- Destiné au domaine de l'amortissement et de l'isolation.
- Excellents résultats aux tests HIC.
- Flexibilité sur le long terme.
- Capacité d'amortissant optimale.
- Capacité calorifique élevée.

III.6.2. Conditions de mise en œuvre

En préalable à toute utilisation en matériaux de substitution, il est indispensable de respecter les points suivants :

- **Identification des flux / traçabilité :**

Les livraisons de broyats de PUNR doivent faire l'objet de l'établissement préalable d'un document de suivi. Ce document, précisera la provenance, la destination et les quantités de broyats de PUNR.

- **Réception de la marchandise :**

Le déchargement des broyats de PUNR doit se faire sur une zone imperméabilisée de type béton ou enrobés. Dans tous les cas, un contrôle visuel des broyats de PUNR doit être réalisé lors du déchargement du camion et lors de la mise en place des broyats afin de vérifier l'absence d'autres déchets.

III.7. Exemples concrets d'utilisation des déchets de caoutchouc

Au désert du Taos aux Etats-Unis, avec des températures extérieures allant de moins 30 à plus 50°C, l'architecte Mickael Reynolds, a eu l'idée de créer une maison réalisée intégralement à partir de matériaux recyclés locaux.



Figure III. 8 : Exemple d'utilisation des caoutchoucs recyclés.

La maison, dans laquelle il vit depuis 20 ans maintenant, est composée intégralement de pneus et de bouteilles recyclés. Elle est quasi indépendante énergiquement grâce au solaire et éolien, tout en ayant un système de récupération d'eau chauffé par l'énergie solaire.

Les granulats en caoutchoucs sont utilisés pour l'isolation et l'amortissement dans les terrains de tennis par exemple ils sont utilisés aussi comme matière première des matériaux de construction.

III.8. Recyclage de caoutchouc

Les difficultés liées au recyclage des caoutchoucs sont nombreuses, à la fois économiques et techniques. La consommation apparente de produits finis vulcanisés s'établit à 700000 Van, ils sont répartis en deux grandes catégories :

Les déchets de pneumatiques (60%) et les déchets de caoutchoucs industriels (40%) Dans une optique de valorisation, il est essentiel de considérer le gisement disponible, c'est-à-dire celui qui peut être récupéré et traité dans des conditions économiquement viables. [Encyclopédie Universel ÉLASTOMÈRES ou CAOUTCHOUCS,].



Figure III.9 : Processus de recyclage de déchets de caoutchouc.

III.9. Conclusion

Dans ce quatrième chapitre nous avons établi un état de l'art pour les pneus usagés.

Les pneus usagés sont un déchet encombrant, mais ils peuvent être très utiles, le génie civil offre donc de nombreuses possibilités d'utilisation des pneus usagés, en les recyclant en matériaux de construction qui possèdent des fonctionnalités originales et très utiles.

CHAPITRE IV

Matériaux et procédures expérimentales
Matériaux et procédures expérimentales

Chapitre IV

Matériaux et procédures expérimentales

Partie 1 : Caractérisation des matériaux

IV. 1. Introduction

Nous allons présenter dans cette partie, les caractéristiques des matériaux utilisés pour la réalisation des différents essais.

IV.2. Caractéristiques des matériaux utilisés

- Nous avons utilisé pour les essais des matériaux disponibles et très utilisés localement dont les caractéristiques ont été déterminées expérimentalement au laboratoire LNHC (laboratoire nationale de l'habitat et de construction -Skikda)

Les différents matériaux utilisés dans cette étude sont :

- ❖ Un sable de carrière d'origine EL FATEH (EL FDJOUJE-GUELMA)
- ❖ Un gravier de carrière de classe 3/8 d'origine EL FATEH (EL FDJOUJE-GUELMA)
- ❖ Un gravier de carrière de classe 8/15 d'origine EL FATEH (EL FDJOUJE-GUELMA).
- ❖ Ciment CPJ-CEM II/A-M (S-L)/42.5N provenant de la cimenterie de GICA Hadjar Essoud-Skikda
- ❖ Fillers calcaires provenant de la carrière de Ben-Azzouz- Skikda.
- ❖ Adjuvant super plastifiant.
- ❖ Eau de gâchage du robinet.

IV.2.1. Caractéristiques du sable

On appelle sable, les matériaux de petites dimensions issus de désagrégation des roches, le sable est l'élément qui assure au béton et au mortier, selon ses qualités, une influence prépondérante, il participe à la résistance, il donne la cohésion du mélange. Il provient des roches, ils sont chimiquement inertes. [Kouici, 2016]

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau IV.1 : Caractéristiques du sable.

Caractéristiques	Equivalent de sable		Coefficient d'absorption	Masse Volumique	
	ESV (%)	ESP (%)	(%)	Apparente (g/cm ³)	Absolue (g/cm ³)
	85.21	85.29	2,05	2.63	2.78

On constate que le sable est un sable très propre : l'absence totale de fine argileuse risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par augmentation du dosage en eau.

IV.2.2. Caractéristiques du gravier [Kouici, 2016]

On appelle « gravier » les matériaux inertes, autres que le sable, qui entrent dans la composition des bétons forment leurs squelettes, tandis que le ciment joue le rôle du liant qui lie les grains de gravier en particulier et granulats en général pour former un corps solide (béton).

Les graviers utilisés dans l'étude du béton, ont été soumis aux essais mécaniques suivants au laboratoire.

- Essai de résistance au choc (Essai Los Angeles) [Kouici, 2016]

L'essai consiste à mesurer la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de gravier [NF18-573, 90].

- Essai de résistance à l'usure [Essai MD]

L'essai consiste à mesurer [NF P18-572, 90] la quantité d'éléments inférieurs à 1.6mm, en soumettant le matériau à l'usure de boulets normalisés dans la machine de MICRO-DEVAL (MD). Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.2 : Caractéristiques mécaniques des graviers.

Caractéristiques	3/8	8/15
Coefficient de Los Angeles L_A %	19.6	19.8
Coefficient Micro-Deval « MD » %	15.3	15.6
Masse volumique Apparente	2,72	2,73
Masse volumique Absolue	2,75	2,77
Coefficient d'absorption (%)	0.48	0,46
Coefficient d'aplatissement A (%)	10.36	10.36

Commentaires :

- a)- Selon le mode opératoire pour le coefficient de Los Angeles, le seuil est fixé à 40%. Pour le gravier utilisé $L_A < 40$, nous pouvons conclure qu'il est utilisable pour le béton hydraulique.
- b)- Selon la norme **NF P18-572**, le seuil est fixé à 35%. Si «MD » < 35% : ce qui est le cas pour notre gravier. Il en résulte que le gravier est acceptable pour le béton.
- c)- Le résultat illustré sur le tableau indique que $A = 10.36\% \leq 30\%$. Donc, le gravier utilisé convient pour la confection des bétons de qualité.

IV.2.3. Caractéristiques de l'adjuvant [Younes, 2021]

L'adjuvant utilisé est un super plastifiant haut réducteur d'eau dit «SIKA VISCO CRETE TEMPO 12», conforme à la norme **NF EN934-2**, fabriqué par SIKA.

Les VISCO CRETE TEMPO 12 sont parmi les super plastifiant haut réducteurs d'eau. Ils ont été développés pour optimiser la production du béton prêt à l'emploi où qualité, durabilité, performance, ouvrabilité, faible viscosité et robustesse sont requises. Ils se différencient des super plastifiants traditionnels par leurs facilités d'utilisations notamment pour les bétons fluides et auto-plaçant, même avec des dosages très faibles. Ces faibles viscosités alliées à une grande robustesse de béton permettent au SIKA VISCO CRETE TEMPO 12 d'améliorer considérablement le comportement dynamique et ainsi la mise en œuvre des bétons, tout en optimisant le dosage en liant du béton.



Figure IV.1 : Adjuvant utilisé.

Tableau IV.3 : Analyse chimique de l'adjuvant.

Paramètres	Résultat	Unité	Observation
Densité	1.06±0.01	l/m ³	/
PH	4.5±1	--	
Extrait sec	29±1.5	%	
Equivalent oxide sodium	≤1	%	
Teneur en ions chlorure	≤0.1	%	

IV.2.4. Caractéristiques des fillers calcaires [Younes, 2021]

Les fillers calcaires provenant de la carrière de Ben Azzouz présentent un passant au tamis 0.08mm de l'ordre de 75%, les propriétés de ces fines sont présentées dans le tableau IV.4 :



Figure IV.2 : fillers calcaires utilisé.

L'analyse chimique de cette poudre est donnée dans le tableau suivant :

Tableau IV.4 : Analyse chimique des fillers calcaires.

Designations	CaO	Al ₂ O ₃	Mgo	Cl ⁻	SO ₂	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	SiO ₂	Na ₂ O
Résultats en %	55.60	1.09	0.77	0.00	20-30	2.31	0.04	0.60	0.05

On constate que l'élément dominant dans calcaire est l'oxyde de calcium CaO.

Tableau IV.5 : Caractéristiques Physiques des fillers calcaires.

Caractéristiques	Résultats
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.051
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.730
Absorption d'eau en %	0.39

On constate que les fillers calcaires présentent une masse volumique inférieure à celle du ciment.

IV.2.5. Caractéristiques de l'eau de gâchage [Younes, 2021]

L'eau de gâchage utilisée provient du robinet sa température est de 28C°. L'analyse chimique est représentée dans le tableau IV.6, les résultats montrent qu'elle répond à toutes les prescriptions des normes **NF P18-404**.

Tableau IV.6 : Analyse chimique de l'eau de gâchage.

Paramètres	Résultat	Unité	Observation
T°	28	C°	Eau de bonne qualité chimique
PH	7.5	--	
Cl	0.1	Mg/l	
TDS	297	Mg/l	
Conductivité	541	Us/cm	
Salinité	0.2	--	

L'échantillon d'eau prélevé de réservoir du laboratoire est conforme pour le gâchage de béton selon **NF EN 1008** du 07/2003.

IV.2.6. Caractéristiques du ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est CPJ de classe 42.5 qui provient de la cimenterie de Hdjar Essoud (CPJ-CEM II/A 42.5) ciment gris pour béton de haute performance destiné à la construction des ouvrages d'arts (ponts viaducs, tunnels.....)[**Kouici, 2016**]



Figure IV.3 : Ciment utilisé.

Tableau IV.7 : Caractéristiques physiques du ciment.

Caractéristiques	Ciment
	CPJ-CEM II-A 42.5
Masse volumique absolue	3.1
Masse volumique apparente	1.12
Surface spécifique	3702

- **a/Essai de consistance de ciment**

La masse du ciment (g) : 500g

La masse d'eau (g) : 148g

Début de prise (h) : 10 :35h

Fin de prise (h) : 13 :06h

La consistance : 25%



Figure IV.4 : Essai de consistance de ciment utilisé.

- **b/Essai mécanique sur ciment**



Figure IV.5 : Essais de traction par flexion et compression de ciment utilisé.

Tableau IV.8 : Résultats des essais mécaniques sur le ciment.

Designation	2jours	7jours	28jours
Résistance en traction par flexion en MPa	3.20	4.45	7.01
Résistance en compression en MPa	14.1	33.48	48.6
Charge à la traction (KN)	4.4	1.3	2.7
Charge à la compression (KN)	53.45	45.1	52.25

Tableau IV.9 : Caractéristiques chimiques du ciment.

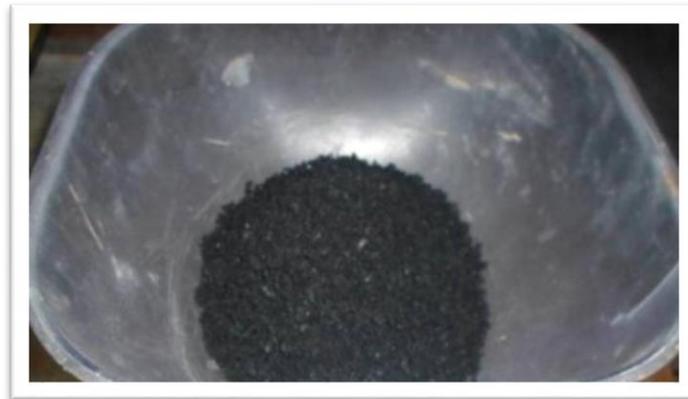
Désignation	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ⁻	SO ₃	CaOLibre	PAF	RI
Résultats en %	64.02	5.12	3.30	22.05	1.25	0.12	0.52	0.005	1.84	1.40	1.40	2.56

IV.2.7. Caractéristiques des fibres en caoutchoucs [Khelaifia et Maléki, 2015]

Les fibres en caoutchouc proviennent d'une usine de broyage de pneus de caoutchouc située dans la Wilaya de SETIF. Ils ont une granulométrie de 0 à 4mm et une masse volumique de 940 Kg/m³. Ces granulats sont issus du broyage des pneus usagés et ils sont traités.

Tableau IV.10 : Caractéristiques des granulats de caoutchouc.

Masse volumique	940 Kg/m ³
Granulométrie	0-4 mm

**Figure IV.6** : Granulats de caoutchouc (0-4mm).

Partie 2 : Protocol expérimental

IV.3. Introduction

Dans cette partie, on présente le programme expérimental, la méthode de formulation des bétons auto-plaçant, les essais réalisés sur le béton frais et durci, les méthodes de fabrication des mélanges, les différentes compositions des mélanges obtenus et les méthodes d'essais. [Younes, 2021]

Le comportement d'un BAP à l'état frais se différencie notablement de celui d'un béton ordinaire. Son ouvrabilité se décline classiquement suivant : sa mobilité en milieu non confiné, sa mobilité en milieu confiné et sa stabilité. En plus de la capacité, à se compacter de lui-même, les propriétés les plus importantes pour la mise en œuvre du BAP sont la fluidité, la viscosité, et la résistance envers la ségrégation. [Kouici, 2016]

IV.4. Programme expérimental

Les comportements des bétons élaborés à l'état frais ainsi qu'à l'état durci ont été évalués et comparés à ceux d'un béton témoin composé initialement de 100% de sable de carrière. [Younes, 2021]. Les variétés de bétons autoplaçants élaborés dans le cadre de cette étude sont représentées dans le tableau (IV.11) :

Tableau IV.11 : Nomenclature des bétons autoplaçants.

BAP 0	Béton autoplaçant témoin sans fibre.
BAP 1	Béton autoplaçant avec 1% de fibre de la quantité de sable.
BAP 2	Béton autoplaçant avec 1 % de fibre de la quantité de gravier.
BAP 3	Béton autoplaçant avec 2% de fibre de la quantité de sable.
BAP 4	Béton autoplaçant avec 2% de fibre de la quantité de gravier.

IV.5. Méthode de formulation

L'approche de formulation qui a été utilisée est empirique, basée sur une méthodologie expérimentale s'appuyant uniquement sur des critères recommandés par l'AFGC (Association Française de Génie Civil). [Youness, 2021]

Ces critères se résument au tableau suivant :

Tableau IV.12 : les critères utilisés d'après AFGC.

Caractéristiques	Valeurs
Rapport G/S	1
Rapport E/L	0.38
Rapport E/C	0.43

Les masses des constituants des BAP confectionnés sont représentées dans le tableau (IV.13)

Tableau IV.13 : Compositions des BAP (Kg/m³).

N°	Notation	C (Kg)	E (Kg)	Fibres (Kg)	S 0/4 (Kg)	G 3 /8 (Kg)	G 8 /15 (Kg)	Adj (l)	Fillers (Kg)
1	BAP 0	400	175	--	857	415	451	7	120
2	BAP 1	400	175	3.087	853.91	415	451	7	120
3	BAP 2	400	175	1.494	857	413.50	451	7	120
4	BAP 3	400	175	6.174	850.62	415	451	7	120
5	BAP 4	400	175	2.988	857	412.01	451	7	120

IV.6. Modes opératoires des essais sur bétons autoplaçants

IV.6.1.1. Gâchage et malaxage [Younes, 2021]

Le malaxage se fait dans un malaxeur à axe vertical, l'introduction des matériaux dans la cuve est de l'ordre :

- Gros éléments,
- Ciment,
- Sable,
- Eau.

Le temps de malaxage suivant la norme **NF P 18-404** est :

- malaxage à sec : 60 secondes
- malaxage humide : 120 secondes



Figure IV.7 : Le malaxeur utilisé.

IV.6.1.2 Éprouvettes

Les moules utilisés sont en acier. Les différents corps d'éprouvettes sont :

- Cubiques : 15x15x15 cm pour l'essai de compression.
- Cubiques : 15x15x15 cm pour l'essai de traction par fendage.
- Prismatiques : 7x7x28 cm pour l'essai de traction par flexion.
- Cubiques : 15x15x15 cm pour l'essai d'auscultation et ultrason.



Figure IV.8 : Eprouvettes testées.

IV.6.1.3 Remplissage et préparation

Le remplissage se fait par couche suivant les dimensions des moules. La mise en place du béton dans les moules a eu lieu directement, en fonction de la maniabilité du béton, l'arasement se fait par une règle métallique.

La préparation du béton autoplaçant demande plus d'attention et de précision que la préparation d'un béton ordinaire. Pour parvenir à effectuer plusieurs essais sur le béton frais, il faut suivre une certaine méthodologie.

Le premier paramètre à prendre en compte est la capacité du malaxeur utilisé.

Après avoir déterminé les proportions de chaque constituant on suit le mode opératoire suivant :

- _ Vérifier en premier le nombre et l'état des moules prismatique cubique nécessaires pour les essais. Ces derniers doivent être graissés à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage.
- _ Réunir tout le matériel nécessaire pour effectuer les essais.
- _ Vérifier que les matériaux ne sont pas humides, si non les sécher préalablement dans l'étuve.

- _ Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée. Le super-plastifiant est ajouté à un quart de l'eau de gâchage.
- _ Peser les matériaux secs (gravier, sable, ciment, filler) et les introduire dans le malaxeur.
- _ Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec.
- _ Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement la première quart de l'eau de gâchage (celle qui contient l'adjuvant).
- _ Ajouter la trois quart d'eau graduellement.
- _ Effectuer immédiatement les essais après arrêt du malaxage, les essais sont réalisés au moins deux fois pour valider les valeurs obtenues.
- _ Remplir les éprouvettes en deux/trois couches sans vibration.

Pour les BAP avec les fibres en effectue les mêmes étapes de préparation puis on ajoute la quantité des fibres en pluies avec malaxage de 4 min.

IV.6.1.4. Conservation des éprouvettes

- a) Avant le démoulage les éprouvettes sont conservées dans un local pendant $24h \pm 1h$ à une température de $20C^{\circ} \pm 2$: humidité relative $60\% \pm 5$.
- b) Après le démoulage, les éprouvettes sont conservées à l'air libre

IV.6.2. Essais réalisés sur béton frais

On a effectué sur le béton frais pour les cinq formulations des mesures de :

- Etalement au cône d'ABRAMS (Mobilité en milieu non confiné).
- Boite en L (Mobilité en milieu confiné).
- Stabilité au tamis 5mm (résistance à la ségrégation).
- Essai de l'entonnoir en V
- La densité.

IV.6.2.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams NFEN12 350-8 (Slump Flow)

La simplicité de cet essai (facile à être mis en œuvre tant au laboratoire que sur chantier) fait de celui-ci un essai incontournable dans la caractérisation de la consistance des bétons. Il permet de tester la capacité des BAP à se déformer uniquement sous le seul effet de leur poids et de s'étaler pour remplir un milieu non confiné par les mesures :

- de la capacité de remplissage (taux de remplissage ou distance atteinte dans l'espace) donnée par le diamètre final atteint par la galette de béton.
- de la vitesse de remplissage donnée par l'inverse du temps (T500) de passage à un diamètre par exemple de 500 ± 1 mm.

- Le matériel et le protocole d'essai [AFGC, 08] sont décrits comme suit [Younes, 2021]:

a) Matériel nécessaire

- un cône d'Abrams.
- une plaque métallique carrée d'au moins 90 cm graduée à un diamètre de 500 ± 1 mm.
- un mètre.
- un niveau à bulle.

b) Mode opératoire

Le temps entre la fin du malaxage et le soulèvement du cône est d'environ 90 secondes.

1. S'assurer que la plaque est placée sur un support stable et horizontal.
2. Humidifier la surface de la plaque (éliminer l'eau en excès avec un chiffon).
3. Humidifier et placer le cône.
4. Remplissage du cône
5. Arasage de la surface du cône et le soulèvement le plus verticalement possible de celui-ci
6. Mesure du temps de passage au diamètre de 500 mm appelé T500
7. Mesure de l'étalement selon deux diamètres perpendiculaires, puis calcul de la moyenne.
Si les deux valeurs différentes de plus de 5 cm, l'essai doit être invalidé et reconduit.
8. Remise du béton dans le seau et la protection de celui-ci contre l'évaporation en attendant d'autres essais.

L'essai d'étalement est présenté sur la figure (IV.9).



Figure IV.9 : Essai d'étalement utilisé.

L'étalement caractérise la fluidité du béton, plus il est grand et plus la fluidité du BAP est grande. L'AFGC a défini trois classes d'étalement pour les BAP [AFGC, 08] présentées dans le tableau IV.14 :

Tableau IV.14 : Classes d'étalement des BAP.

Classe	Étalement (mm)
SF1	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	760 à 850

Cet essai permet aussi d'évaluer visuellement la tendance à la ségrégation du béton. Pour un béton homogène, les granulats sont repartis uniformément. La présence d'une ségrégation se traduit par l'apparition d'une couche de laitance à la périphérie ou par l'accumulation de graviers au centre de la galette. La présence d'une ségrégation se traduit par l'apparition d'une couche de laitance à la périphérie ou par l'accumulation de graviers au centre de la galette.



Figure IV.10 : essai d'étalement du BAP d'étude utilisé.

IV.6.2.2 Essai d'écoulement à la boîte en L

Cet essai permet de tester la capacité du béton à s'écouler dans un milieu confiné, de mesurer le taux de remplissage et le temps d'écoulement. Ce test est aussi connu sous le nom de *L-box* provenant de l'anglais

Le matériel utilisé lors de ce test est une boîte en L et un ferrailage à deux ou trois armatures. L'essai consiste à laisser passer à travers l'espace entre les armatures le béton du compartiment vertical vers la partie horizontale [Younes, 2021].

- **Mode opératoire**

Le protocole d'essai est décrit comme suit :

1. remplissage de la partie verticale de la boîte avec du béton (environ 13 litres), araser et attendre une minute,
2. soulever le volet pour laisser passer le béton au travers d'un ferrailage formé de deux ou trois barres.
3. mesurer les hauteurs H1 et H2 respectivement dans les parties verticale et horizontale de la boîte. La figure IV.11 présente un essai à la boîte en L.



Figure IV.11 : Essai d'écoulement à la boîte en L.

Le ferrailage de la boîte est formé de trois armatures de diamètre 14 mm Le rapport

$PA = H2/H1$ traduit le taux de remplissage du béton. PA dépend de la catégorie de BAP mais en général, le taux de remplissage d'un BAP doit être supérieur ou égal à 0.8 [AFGC, 08]. Un blocage ou une ségrégation dynamique se traduit par un amoncellement de granulats en amont du ferrailage et une valeur faible de PA.

La norme **NF EN 206** classe les bétons auto plaçant selon leur taux de remplissage et selon le nombre de barres en PL1 (2 barres) et en PL2 (3 barres).

IV.6.2.3 Essai de stabilité au tamis

Cet essai vise à qualifier les BAP vis-à-vis du risque de ségrégation statique et se déroule à la fin du malaxage.

Le matériel est composé d'un seau de 10 litres muni d'un couvercle, un tamis d'ouverture 5 mm et de diamètre 315 mm avec fond et une balance.

L'essai consiste à verser dix litres de béton dans le seau et à le laisser au repos.

Le béton est couvert pour éviter une éventuelle évaporation d'eau. Après 15 minutes d'attente, une masse de $(4.8 \pm 0.2 \text{ Kg})$ de béton est versée d'une hauteur de $(50 \pm 5 \text{ cm})$ au centre du tamis posé sur un fond. Deux minutes plus tard, la masse de laitance dans le fond ayant traversé le tamis est pesé. Cet essai est présenté sur la figure IV.12 [Younes, 2021].



Figure IV.12 : Essai de stabilité au tamis utilisé.

Le pourcentage P en masse de laitance par rapport à La masse de l'échantillon est calculé par (AGCF, 08) :

$$P = \text{Masse de laitance} \times 100 / \text{Masse de l'échantillon.}$$

La valeur P permet de classer les BAP. Le tableau IV.15 résume les critères de stabilité des BAP. Pourcentage de laitance SR (%)

Tableau IV.15 : Critère de stabilité.

Pourcentage de laitance SR (%)	Critères de stabilité	Remarque
$0 \leq P \leq 15$	Stabilité satisfaisante	Béton homogène et stable
$15 \leq P \leq 30$	Stabilité critique	Vérifier les autres critères d'ouvrabilité
>30	Stabilité très mauvaise	Ségrégation systématique, béton inutilisable

IV.6.2.4 Essai de l'entonnoir en V (V-Funnel)

L'essai consiste à mesurer le temps d'écoulement du béton dans un espace limité ; Cet essai permet aussi d'évaluer la stabilité du béton lors de l'écoulement, et aussi vérifier la viscosité apparente du béton auto-plaçant [Kechkar, 2021].

- Le matériel est composé de :
 - ✓ Un entonnoir
 - ✓ Seau (± 12 litres).
 - ✓ Déplantoir.
 - ✓ Scoop.
 - ✓ Chronomètre.
 - ✓ Chiffon humide: Pour humidifier la surface de l'entonnoir.
- **Mode opératoire**

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante :

1. S'assurer que le clapet de fermeture à la base de l'entonnoir soit fermé.
2. Remplir l'entonnoir en béton jusqu'en haut.
3. araser si nécessaire à l'aide d'une truelle.
4. ouvrir le clapet de fermeture, le béton va se couler,
5. mesurer le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir soit entièrement vidé.

Dans la littérature scientifique, ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton auto-plaçant.



Figure IV.13 : essai de l'entonnoir en V utilisé.

IV.6.2.5 Mesure de la densité réelle du béton frais

La densité réelle du béton frais est mesurée par la pesée d'un récipient de 8 litres (le récipient de l'aéromètre à béton) rempli de béton selon un moule de remplissage analogue à celui utilisé pour le remplissage des éprouvettes cylindriques.

La densité est calculée par la formule suivante : $\rho = (P - P_0) / V$

Avec : P est la masse du récipient plein de béton (arasé à l'aide d'une règle) P₀ est la masse du récipient vide.

ρ : est la densité du béton frais et V le volume du récipient (8 litres) [Younes, 2021] .



Figure IV.14 : Mesure de la densité.

IV.6.3 Essais réalisés sur béton durci [Younes, 2021]

Les essais réalisés sur le béton durci sont:

- Résistance à la compression à 7, 14 et 28 jours.
- Résistance à la traction par flexion à 7, 14 et 28 jours.
- Résistance à la traction par fendage à 7, 14 et 28 jours.
- Essai au scléromètre à 7, 14 et 28 jours.
- Essai ultrasonique à 7, 14 et 28 jours.

IV.6.3.1 Essai de compression par écrasement

L'essai de compression consiste à rompre le corps d'épreuve entre les deux plateaux d'une presse de compression de 2000 KN conformément la norme **NF P18-406** (figure IV.15). Après un bon centrage de l'éprouvette, on lance la mise en charge, au moment de la rupture, la machine s'arrête on obtient la contrainte en compression qui correspond la charge de rupture.



Figure IV.15 : Essai de compression par écrasement utilisé.

La presse nous donne des charges de ruptures, ces charges sont converties en résistance à la compression σ_c qui est calculée par la formule de la résistance des matériaux suivante :

$$\sigma_c = P_r / S \text{ Avec :}$$

P_r : l'effort enregistré au moment de la rupture de l'éprouvette

S : la section de l'éprouvette.

IV.6.3.2 La traction par flexion

L'essai de flexion est réalisé sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm³ selon les normes **NF P. 18-407**. Il s'agit de déterminer la résistance à la flexion (3 points) de l'éprouvette soumise à un effort centré exercé à l'aide d'une presse hydraulique



Figure IV.16 : Essai de traction par flexion.

La résistance en traction par flexion est donnée par l'équation suivante :

$$F = \frac{2}{3} \times \frac{FL}{B^3}$$

Est la résistance en traction par flexion, en mégapascals ou en newtons par millimètre carré :

- F : est la charge maximale, en Newtons.
- L : est la longueur entre les deux appuis, en millimètres.
- B : Côté de prisme cube, en millimètres.

IV.6.3.3 La traction par Fendage

L'essai de traction par fendage est réalisé sur des éprouvettes cubiques (15×15×15) cm³ selon les normes **NF P. 18-407**. Il s'agit de déterminer la résistance à la traction par fendage de l'éprouvette soumise à un effort centré exercé à l'aide d'une presse hydraulique.



Figure IV.17 : Essai de traction par fendage.

La résistance en traction par fendage est donnée par l'équation suivante :

$$F = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d}$$

Est la résistance en traction par fendage, en méga pascalle ou en newtons par millimètre carré :

- F : est la charge maximale, en newtons ;
- L : est la longueur de la ligne de contact de l'éprouvette, en millimètres ;
- d : est le diamètre nominal de l'éprouvette, en millimètres.

IV.6.3.4 Essai au scléromètre

L'essai au scléromètre (figure IV.18) selon la norme [EN 12504-2] est une méthode non destructive qui permet d'estimer la résistance du béton. Cet essai est simple, rapide à mettre en œuvre et permet d'avoir une meilleure représentativité de la qualité de l'ensemble de l'ouvrage.

Le scléromètre est un appareil simple qui mesure la dureté aux chocs du béton au voisinage de la surface, après avoir disposé selon la norme les points de mesure sur la surface de l'éprouvette, on la bloque entre les deux plateaux d'une presse de compression, en suite on applique le scléromètre sur les points de mesure. La tige en acier sorte du cylindre et appuie sur le béton et comprime un ressort, enfin de cours ce ressort projette une masse dans la tige, cette masse revenu à la surface du béton, et entraîne de son retour un curseur permet de lire l'indice sclérométrique.



Figure IV.18 : Essai au scléromètre utilisé.

IV.6.3.5 Essai ultrasonique

Cet essai est une méthode de détermination de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques longitudinales dans le béton durci. Elle consiste à mesurer le temps de propagation entre deux points désignés sur la surface de l'objet à essayer. En sachant la longueur du parcours entre ces deux points, alors la vitesse d'impulsion peut être déterminée. La détermination de la vitesse de propagation des ultrasons se fait de trois manières (mesure en transparence, mesure en surface, mesure semi directe), pour notre cas nous avons utilisé la méthode de mesure en transparence (directe) selon la norme [EN 12504-4].



Figure IV.19 : Essai ultrasonique utilisé.

La résistance en compressions par ultrasons et scléromètre (Méthode combinée) est donnée par l'équation suivante [Boukhelkhal et al, 2015] :

$$R = 0.013 \times V^{1.756} \times I^{1.401}$$

Est la résistance en compression par la méthode combinée, en Méga Pascals ou en Newtons par millimètre carré :

- I : indice sclérométrique.
- V : la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques : $V = \frac{D}{T}$
- D : la distance.
- T : le temps de propagation des ondes.

IV.7. Conclusion

Aussi bien en termes de volume qu'en termes de finances, les bétons constituent les matériaux les plus utilisés dans le bâtiment. Essentiellement, les bétons sont confectionnés au départ de gravier, de sable, de ciment et d'eau, mais à part ces quatre composants fondamentaux, les bétons actuels contiennent de plus en plus d'additifs et d'adjuvants. Ces derniers permettent de modifier les caractéristiques des bétons de telle manière que ceux-ci, même si la dénomination de "béton" reste d'application, peuvent être considérés comme des matériaux nouveaux.

Les évolutions au niveau du matériau béton ont indiscutablement entraîné de nouvelles applications dont l'impact ne peut être sous-estimé.

Nous avons regroupé dans ce chapitre les différentes valeurs des caractéristiques qui permettront d'optimiser la formulation des bétons que nous allons utiliser pour l'étude du comportement des bétons testés.

La formulation des BAP a été faite d'une manière empirique. Après la conception par calcul, la formule ne peut être optimisée et vérifiée que par des essais effectués la plupart du temps directement sur béton.

La composition des mélanges et les procédures expérimentales vont nous permettre de mieux analyser les résultats et d'avoir une meilleure compréhension de l'influence des différents paramètres étudiés sur le comportement à l'état frais et durci des bétons confectionnés.

Toutes les manipulations à savoir la résistance mécanique à la traction par flexion, la résistance à la compression et les essais à l'état frais pour tous les mélanges étudiées, qui sont exposées sont conformes aux normes en vigueur. Aussi effectués sont déroulés dans des

meilleures conditions. [Younes, 2021]

L'analyse des résultats de ces essais et leurs interprétations seront présentées dans les chapitres qui suivent.

CHAPITRE V

Analyse et interprétation des résultats

Chapitre V : Analyse et interprétation des résultats

V.1. Introduction

On présente dans ce chapitre les résultats des performances mécaniques des essais expérimentaux sur les BAPs à savoir la résistance à la compression par écrasement et par la méthode combinée (ultrasonique et sclérométrique), la résistance en traction par flexion et par fendage. Et ce, aux trois échéanciers 7, 14 et 28 jours.

V.2. Résultats des essais à l'état frais

A partir des mélanges obtenus, il faut procéder à différents essais afin de caractériser les BAP confectionnés. Pour cela, nous utilisons les tests recommandés par l'AFGC.

Le tableau suivant présente les caractéristiques rhéologiques du béton après malaxage

Tableau V.1: Caractéristiques rhéologiques du BAP (témoin).

Essais	Résultats	Unités
Étalement	77.5	Cm
Stabilité au tamis	7.25	%
Boîte en L (H2/H1)	1.05	/
V-Funnel	10	Seconde
Densité	8.26	/

V. 3. Résultats des essais à l'état durci

V.3.1. Influence du taux de fibre sur la résistance

V.3.1.1. Évolutions de la résistance à la compression



Figure V.1 : Mode de rupture des éprouvettes par la presse.

Tableaux V.2: Variation de la résistance en compression en fonction du taux de fibres dans le sable.

Age		7jours	14jours	28jours	
R (Mpa)	Compression	BAP 0	38.58	41.75	48.3
		BAP 1	42.23	45.54	53.26
		BAP 3	46.53	51.65	56.12

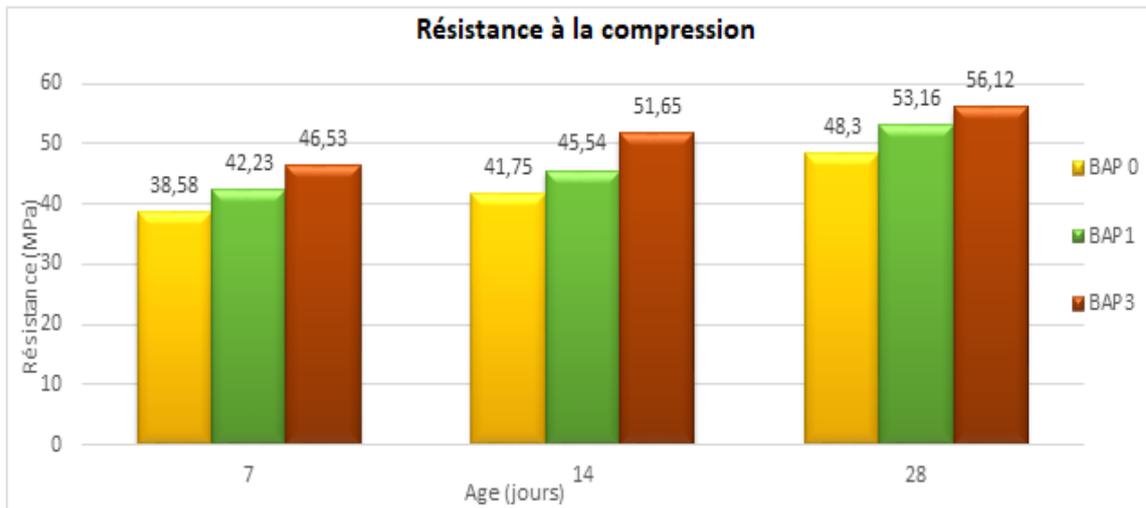


Figure V.2 : Evolution de la résistance en compression en fonction du taux de fibres dans le sable (0%, 1%, 2%)

D'après les résultats obtenus, on note une augmentation de la résistance en fonction de l'âge et aussi le taux de fibres dans le sable pour l'ensemble des compositions. Cette augmentation est de l'ordre de 10 % pour le BAP 1 et de 16 % pour le BAP 2. Cela s'explique par le fait que le taux élevé en fibre influence la bonne formation de la matrice cimentaire.

L'utilisation d'adjuvant réducteur d'eau dont l'effet bénéfique sur la résistance mécanique est connue et la présence d'une quantité importante de filler et fibres dont leur action a un effet positif sur la compacité et par conséquent sur la résistance mécanique donc une amélioration de la résistance.

Tableaux V.3: Variation de la résistance en compression en fonction du taux de fibres dans le gravier.

Age		7jours	14jours	28jours
Compression	BAP 0	38.58	41.75	48.3
	BAP 2	36.97	41.04	49.36
	BAP 4	32.62	38.37	41.74

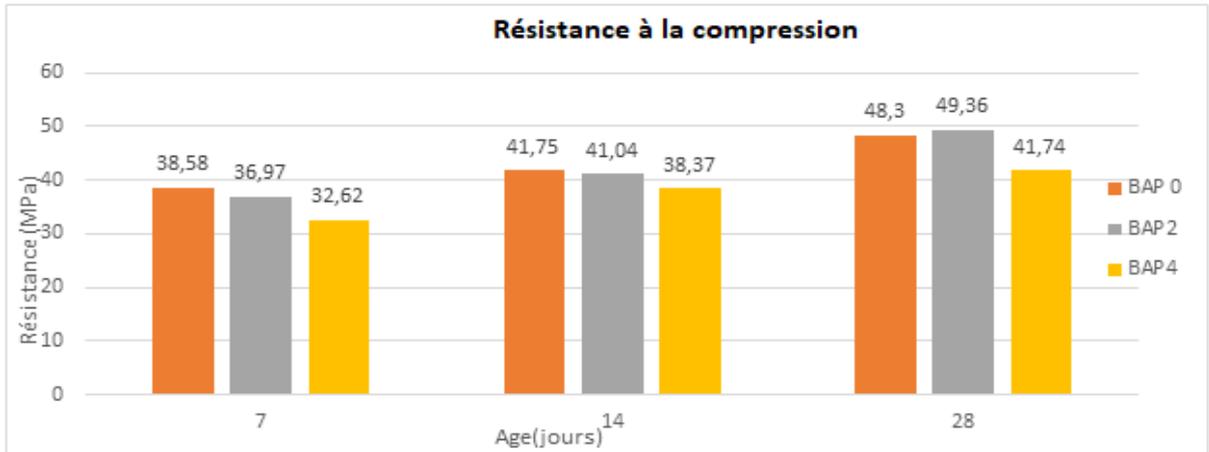


Figure V.3 : Evolution de la résistance en compression en fonction du taux de fibres dans le gravier (0%, 1%, 2%)

Par contre on remarque que, les valeurs de résistance en compression pour chaque BAP contenant des fibres dans le gravier sont une fonction décroissante avec l'âge du béton et le taux de fibres dans le gravier. Donc l'incorporation des fibres en caoutchoucs dans le gravier n'apporte pas d'amélioration de la résistance à la compression.

V.3.1.2. Évolutions de la résistance à la traction par flexion des BAP



Figure V.4 : Mode de rupture en traction par flexion des éprouvettes.

Tableaux V.4: Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction du taux de fibres dans le sable.

Age		7jours	14jours	28jours
Traction par flexion	BAP 0	5.87	6.24	9.64
	BAP 1	6.24	6.88	9.99
	BAP 3	6.88	8.62	10.46

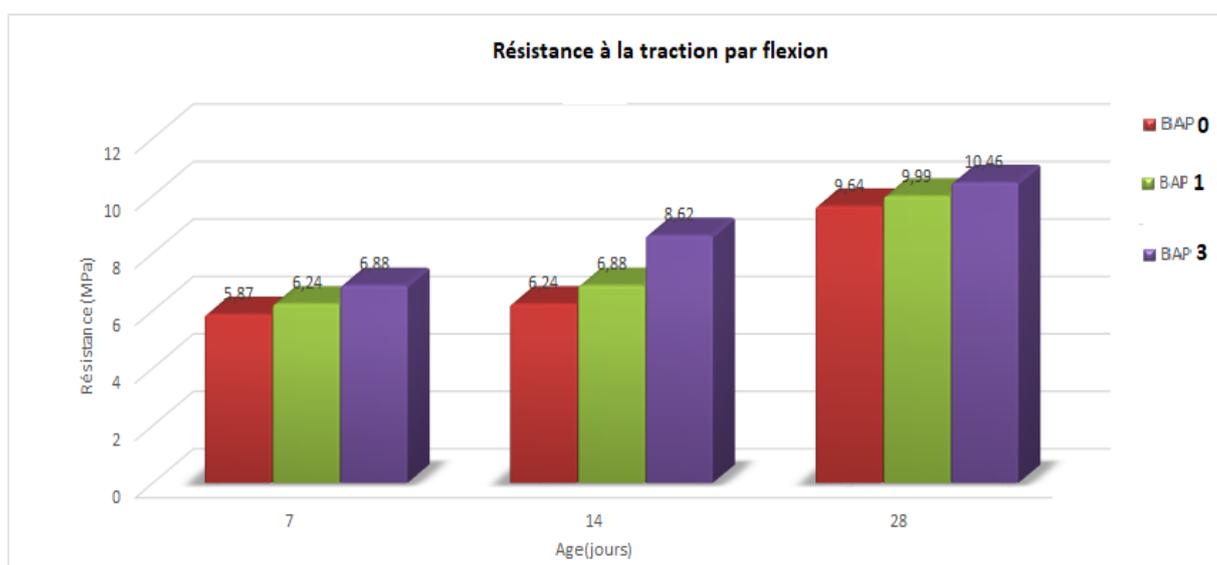


Figure V.5 : Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction du taux de fibres dans le sable.

La figure V.5 montre que le taux de fibres de caoutchoucs influence la résistance à la traction par flexion.

On constate une amélioration de la résistance en traction par flexion pour un taux de fibres de 2% dont le gain est de 4 % pour le BAP 1 et de 8,5 % pour le BAP 3. On peut conclure que les meilleurs résultats obtenus en compression et en traction par flexion sont ceux obtenus avec un dosage en fibre de 2% qui peut être considéré comme dosage optimal.

Tableaux V.5: Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction du taux de fibres dans le gravier.

Age		7jours	14jours	28jours
Traction par flexion	BAP 0	5.87	6.24	9.64
	BAP 2	4.95	6.24	6.70
	BAP 4	3.85	5.59	7.43

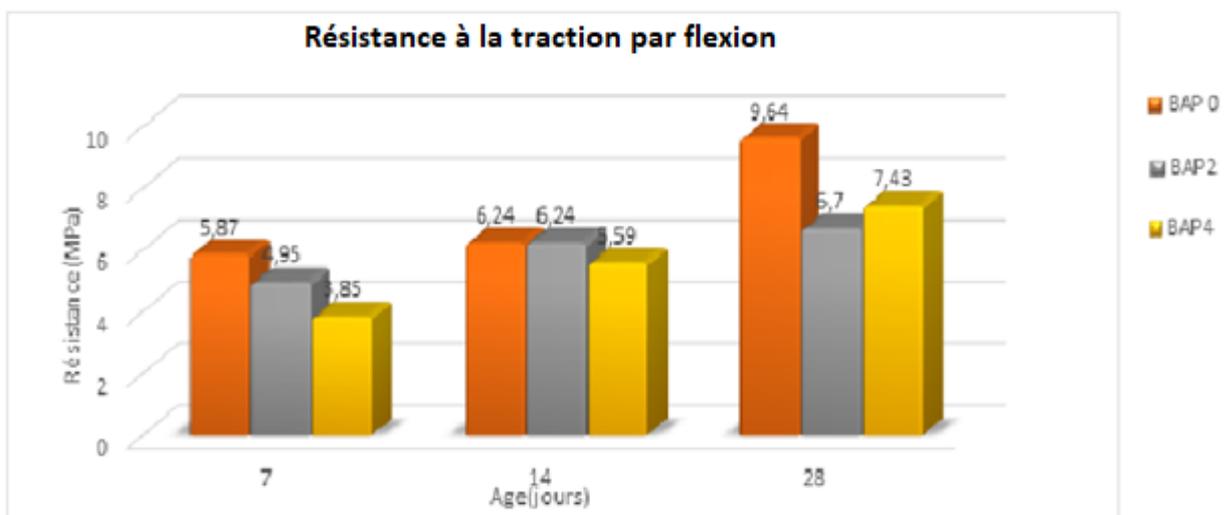


Figure V.6 : Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction du taux de fibres dans le gravier.

Le tableau et la figure ci-dessus présentent l'évolution de la résistance à la traction par flexion en fonction du taux de fibres dans le gravier d'un BAP témoin et deux autres fibrés avec un pourcentage de 1% et 2% de fibres de caoutchoucs de la formulation du béton autoplaçant.

D'après les résultats inscrits dans le tableau et la figure ci-dessus on trouve une diminution de la résistance à la traction de l'ordre de 30 % dans la formulation contenant un pourcentage de 1% de fibres, et de 23 % pour celle qui contient un pourcentage de 2 % de fibres.

L'introduction et l'augmentation du dosage de fibres dans le gravier entraîne une diminution des résistances mécaniques avec des pourcentages élevés. Cette diminution est due à l'effet du

remplissage qui améliore la compacité et à l'effet de surface qui entraîne une meilleure cohésion de la pâte aux granulats.

V.3.1.3. Évolutions de la résistance à la traction par fendage



Figure V.7 : Mode de rupture en traction par fendage des éprouvettes.

Tableaux V.6: Variation de la résistance à la traction par fendage en fonction du taux de fibres dans le sable.

Age		7jours	14jours	28jours
Traction par fendage	BAP 0	2.69	2.98	3.53
	BAP 1	3.15	3.60	3.96
	BAP 3	3.29	3.29	4.26

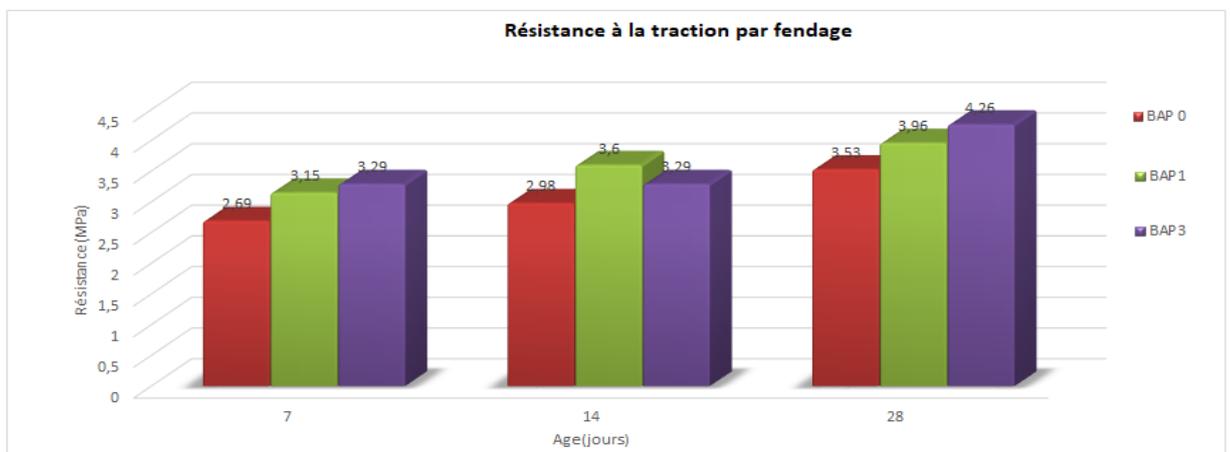


Figure V.8 : Evolution de la résistance à la traction par fendage en fonction du taux de fibres dans le sable (0%, 1%, 2%).

L'évolution de la résistance à la traction par fendage est similaire à celle de la résistance à la compression. Ce qui est évident du fait qu'il y a une proportionnalité entre ces deux caractéristiques. L'augmentation, de cette résistance à la traction est moins prononcée que celle de la compression.

On remarque que, les valeurs de la résistance à la traction par fendage sont petites comparant aux valeurs de la résistance à la traction par flexion, ce qui est connu pour les bétons et on remarque aussi que la variation de ces valeurs pour chaque BAP est une fonction croissante avec l'âge du béton et le taux de fibres dans le sable.

Tableaux V.7: Variation de la résistance à la traction par fendage en fonction du taux de fibres dans le gravier.

Age		7jours	14jours	28jours
Traction par fendage	BAP 0	2.69	2.98	3.53
	BAP 2	2.95	3.22	3.64
	BAP 4	2.59	3.07	3.38

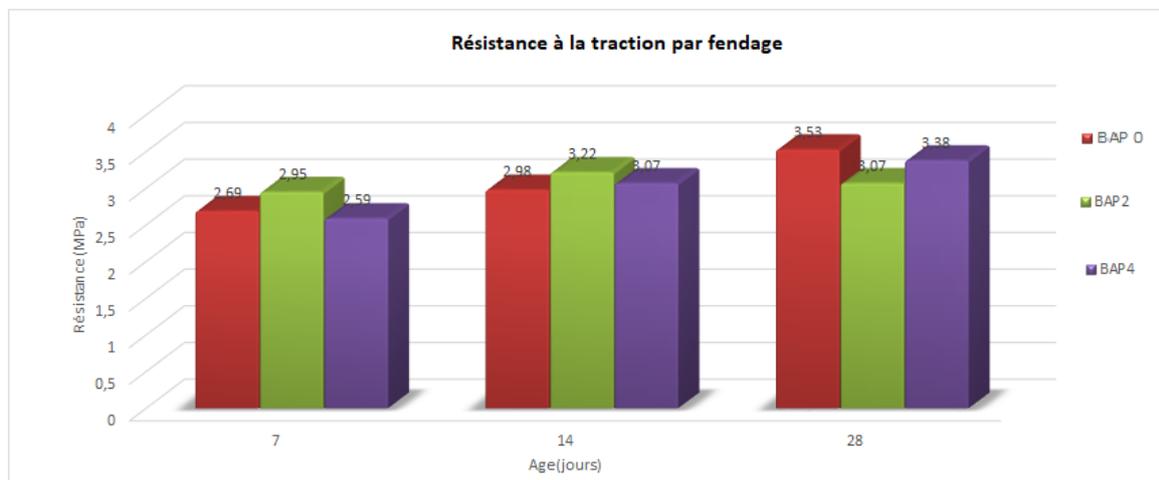


Figure V.9 : Evolution de la résistance à la traction par fendage en fonction du taux de fibres dans le gravier.

La figure V.9 montre que le taux de fibres de caoutchoucs incorporées dans le gravier influence la résistance à la traction par fendage inversement. On constate deux phénomènes

distincts: une amélioration de la résistance en traction par fendage en fonction de l'âge du béton pour toutes les compositions et une chute de résistance dont la diminution est de l'ordre de 4,5 % pour un taux de 2 % de fibres ,cela indique qu'au-delà du dosage optimum en fibres ,il est clair que les fibres n'apportent pas un gain de la résistance à la traction par fendage au béton lorsqu'elles sont introduites dans la quantité de gravier.

V.3.2. Influence de la méthode utilisée sur la résistance

Tableaux V.8 : Comparaison entre les résistances obtenues par différentes méthodes.

Age		7 jours	14 jours	28 jours
Presse	BAP P 0	38.58	41.75	48.3
	BAP P 1	42.23	45.54	53.26
	BAP P 3	46.53	51.65	56.12
Combiné	BAP C 0	27,18	30,04	32,62
	BAP C 1	29,26	32,50	34,73
	BAP C 3	29,93	31,80	35,10

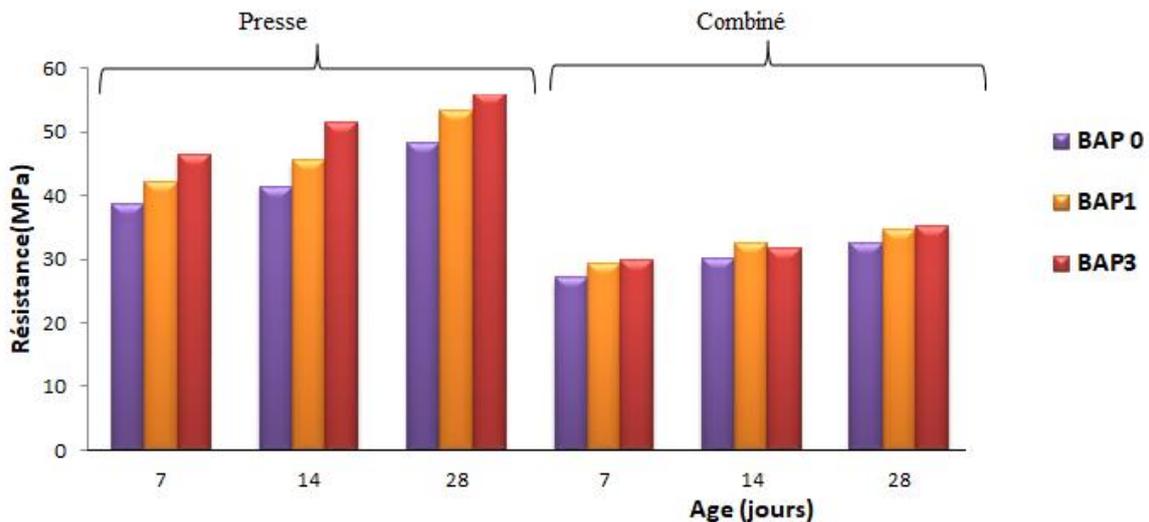


Figure V.10 : Comparaison entre les résistances obtenues par différentes méthodes.

On constate que les courbes des bétons fibrés suivent la même allure que celle du béton non fibré (béton témoin), mais à des résistances moindres pour la méthode combinée. Ce

constat nous informe sur le fait que ce dosage reste non significatif vis-à-vis de la résistance visée. Du fait de la légèreté de ce type de fibres dont un volume à introduire dans la matrice devient conséquent, ceci produit une densité des vides plus importante que dans le cas du béton témoin donc une chute de résistance à travers l'existence de ces pores qui fragilisent notre matrice béton.

Les bétons à 0% de fibres (béton témoin) ont des résistances à la compression par la presse inférieures à celles qui contiennent 1 % de fibres et 2 %, donc l'ajout de 2 % de fibres a donné des meilleures résistances à la compression par presse , on note également la convergence des valeurs de la résistance à la compression par la méthode combinée pour toutes les compositions et tous les âges des bétons.

Et dans le cas du pourcentage de 2 % de fibres, l'augmentation de la résistance à la compression est de 16 % et la résistance à la compression par la méthode combinée est de 8 % par rapport au béton témoin.

Nous concluons que l'essai à la presse s'adapte le mieux pour l'évaluation de la résistance à la compression des bétons autoplaçants fibrés avec des fibres en caoutchoucs introduites dans le sable.

V.4. Conclusion

Le cinquième chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats obtenus lors de cette étude. L'objectif de notre travail consiste à réaliser un béton autoplaçant fibré par l'incorporation des fibres en caoutchoucs avec deux pourcentages (1 et 2 %) afin de voir l'influence de l'ajout de ces fibres sur les caractéristiques des bétons testés à l'état durci et faire une comparaison avec un béton témoin autoplaçant sans fibre.

D'après les résultats obtenus on constate que :

- Pour l'influence du pourcentage de fibres et d'après les résultats obtenus, on observe que l'augmentation du dosage de fibre du béton influe positivement sur les caractéristiques des bétons testés. Donc les essais sur des bétons avec des fibres en caoutchoucs ont montré que l'utilisation de 2 % de fibres introduites dans le sable, donne de bons résultats à la fois en compression qu'en traction.
- La faible résistance à la traction du béton peut être compensée par l'ajout de ces fibres. Les fibres sont introduites dans le sable pour compenser la fragilité du matériau en traction par une couture de la macro- fissuration.

- Les fibres n'apportent pas un gain de la résistance au béton lorsqu'elles sont introduites dans la quantité de gravier. .
- Les meilleures résistances sont celles obtenues par la méthode destructive. Donc l'essai à la presse s'adapte le mieux pour l'évaluation de la résistance à la compression des bétons autoplaçants fibrés avec des fibres en caoutchoucs introduites dans le sable avec un dosage de 2% qui est le dosage optimal pour notre étude.

CONCLUSION

Conclusion générale

Ce travail consiste à étudier l'influence de l'incorporation des fibres sur le comportement mécanique du béton autoplaçant à base de fibrage en caoutchouc en valorisant des fibres de recyclage issus du broyage de pneus usagés avec deux pourcentages (1 et 2 %) afin de voir l'influence de l'ajout de ces fibres sur les caractéristiques des bétons testés à l'état durci et faire une comparaison avec un béton témoin autoplaçant sans fibre.

D'après les résultats obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes :

- ✓ L'utilisation des granulats en caoutchouc dans la formulation des BAP améliore leur stabilité vis-à-vis à la ségrégation.
- ✓ Les BAP incorporant des fibres de 2% dans le sable représentent des valeurs de résistances plus grandes que les BAP incorporant des fibres de 1 % et de référence.
- ✓ La substitution de 2% du sable par des fibres en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés augmente la résistance à la compression et à la traction aux BAP testés.
- ✓ Les essais réalisés montrent que l'incorporation des fibres en caoutchouc dans le sable, est très bénéfique vis-à-vis de la résistance à la compression. Cette résistance mécanique augmente avec l'augmentation du dosage de fibres. Nous avons expliqué cette augmentation de résistance par une compacité très élevée et une adhérence avec la matrice cimentaire.
- ✓ La faible rigidité des fibres a des conséquences sur les résistances mécaniques en compression et à la traction des BAP qui diminuent avec l'augmentation du taux de substitution d'un taux de pourcentage élevé du gravier par ces fibres.
- ✓ Pour l'influence du pourcentage de fibres et d'après les résultats obtenus, on observe que l'augmentation du dosage de fibre du béton influe positivement sur les caractéristiques des bétons testés. Donc les essais sur des bétons avec des fibres en caoutchoucs ont montré que l'utilisation de 2 % de fibres introduite dans le sable, donne de bons résultats à la fois en compression qu'en traction.
- ✓ La faible résistance à la traction du béton peut être compensée par l'ajout de ces fibres. Les fibres sont introduites dans le sable pour compenser la fragilité du matériau en traction par une couture de la macro- fissuration.
- ✓ Les fibres n'apportent pas un gain de la résistance au béton lorsqu'elles sont introduites dans la quantité de gravier. .

- ✓ Les meilleures résistances sont celles obtenues par la méthode destructive. Donc l'essai à la presse s'adapte le mieux pour l'évaluation de la résistance à la compression des bétons autoplaçant fibrés avec des fibres en caoutchouc introduites dans le sable.

Références bibliographiques

A

[**Achour et al, 2008**]: Achour, T., Lecomte, A., Ouezdou, M. B., Mensi, R., & Joudi, I. (2008). «Contribution des fillers calcaires à l'adhérence pâte-granulat, Exemples tunisiens». *Materials and Structures*, 41(5), 815-830.

[**AFGC, 2000**]: AFGC (Association Française de Génie Civil) (2000). «Bétons autoplaçants. Recommandations provisoires».

B

[**Babaie et al, 2019**]: Mechanical properties of steel and polymer fiber reinforced concrete. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*.

[**Boukhelkhal et al, 2015**] : Boukhelkhal, D. Kenai, S. «Determination non destructive de la résistance du béton sur site (scléromètre et ultrason) ». 33^{èmes} rencontres de l'AUGC, ISABTP/UPPA, Anglet, 27 au 29 Mai 2015, p06.

C

[**Cyr et al, 2006**]: Cyr, M. Lawrence, P. & Ringot, E. (2006). «Efficiency of mineral admixtures in mortars: quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength». *Cement and concrete research*, 36(2), 264-277.

D

[**Delarrard et al, 2008**]: Delarrard, F. et Sedran, T. (2008). *Béton Lab Pro 3*. «Logiciel de formulation des bétons», Laboratoire central des ponts et chaussées, Centre de Paris, France.

[**Dupain et al, 2000**]: Dupain, R. Lanchon, R. & Saint-Arroman, J-C. (2000). « Granulats, sols, ciments et bétons ». Paris: Casteilla.

F

[**Flatt et al, 2001**]: Flatt, R.J and Houst, Y.F (2001). « A simplified view on chemical effects perurbing the action of superplasticizer ». *Cement and concrete research*, Vol 31:1169–1176, p18.

G

[Gagne et al, 1989]: Gagne, R. Pigeon, M., and Aïtcin, P-C (1989). «Deicer salt scaling resistance of high performance concrete». Paul Klieger Symposium on Performance of Concrete, SP-122, ACI

[Ghezal, 1999]: GHEZAL, A. (1999). « Modélisation Statique du Comportement des BAP et Optimisation », Mémoire de maîtrise en génie civil, Université de Sherbrooke, pp 88-889, pp 155-156.

[Geroges, 1998]: Geroges Dreux ‘ nouveau guide de béton’, huitième édition 1998, troisième tirage 2007, édition eyrolles paris, P : 123.

[Guellil et al, 2014]: Guellil, M-K.Ghomari, F. Hacene, S. M. E. A. B. & Taleb, O. (2014). « Etude et analyse de la formulation des bétons auto-plaçants par la méthode de la pâte en excès». Nature & Technology (10),p10.

[Guo et al, 2018]: Guo, F., Al-Saadi, S., Raman, R. S., & Zhao, X. L. (2018). Durability of fiber reinforced polymer (FRP) in simulated seawater sea sand concrete (SWSSC) environment. Corrosion Science, 141, 1-13.

[Grairia, 2010]: Grairia Said : «Contribution à l'étude de la formulation des bétons autoplaçants à hautes Résistances». Magister soutenu à l'Université 8 Mai 45 de Guelma le Décembre 2010.

H

[Haddadou, 2015]: Haddadou, N (2015). « Elaboration et caractérisation de béton autoplaçant fibré avec ajout de poudre de marbre ». Thèse de Doctorat. Université M'hamed bougara-Boumerdes, p05-06.

[Fares, 2009]: Fares, H. (2009) « Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons Autoplaçants exposés à une Température élevée ». Thèse de Doctorat de l'Université de Cergy-Pontoise, p17-18.

[Houlcim, 2004]: Houlcim (2004). « Le béton autoplaçant ». Suisse. 32pages.

[Hibino et al, 1998]: Hibino, M., Okuma, M., and Ozawa, K. (1998). «Role of viscosity agent in self-compactability of fresh concrete». Proceedings of the Sixth East-Asia Conference on Structural Engineering & Construction, 2, 1313-1318.

K

[Kechkar, 2021]: Kechkar, C (2021). «Module de Matériaux innovants» et « TP de matériaux innovants »,p02-03-04-06-07-08-09-10-11.

[Kouici, 2016]: Kouici, A (2016). « Etude de l'effet de l'introduction des fibres végétales sur les propriétés des bétons autoplaçant (BAP) à l'état frais et durcis ». Mémoire de Master. Université de Msila, p05-08-13-18-32-45-46-47-48-49-50-51-52-65-76-81-83-91-105.

[Knapen et al, 2009]: Knapen, E., & Van Gemert, D. (2009). «Cement hydration and microstructure formation in the presence of water-soluble polymers». Cement and concrete Research, 39(1), 6-13.

[Khelaifa et al, 2015]: Khelaifa, H., & maléki, T. (2015). «Etude expérimentale sur les mortiers à base de granulats de caoutchouc, de déchets de brique et d'adjuvant résineux ». Mémoire de Master. Université de Guelma, p25.

L

[Laifa et al, 2014] : Laifa, W., Behim, M., Turatsinze, A., & Ali-Boucetta, T. (2014). Caractérisation d'un béton autoplaçant avec addition de laitier cristallisé et renforcé par des fibres de polypropylène et de diss. Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie, 29(1), 100-110.

M

[Maekawa et al, 1999]: Maekawa, K., and Ozawa, K. (1999). «Development of SCC's prototype ». (written in Japanese), Self- Compacting High-Performance Concrete, Social System Institute, 20-32.

[Michel et al, 2007]: Michel, F. Piérard, J. Courard, L.& Pollet, V. (2007). « Influence of physico-chemical characteristics of limestone fillers on fresh and hardened mortar performances ». Self-CompactingConcrete SCC 2007, 205-210.

[Moreillon, 2013]: Moreillon, L. (2013). Shear strength of structural elements in high performance fibre reinforced concrete (HPFRC) (Doctoral dissertation, Université Paris-Est).

N

[Naima, 2015] : Naima, H. (2015). Elaboration et caractérisation de béton autoplaçant fibré avec ajout de poudre de marbre. These de doctorat. universite m'hamed bougara-boumerdes. Algerie.

[NEHDIM, 2000]: NEHDI M, (2000)« Why some carbonate fillers cause rapid increases of viscosity in dispersed cement- based materials », Cement and Concrete Research, Vol 30 pp 1603-1669.

O

[Okamura et al, 1986]: Okamura, H., Barringer, E-A & Bowen, H-K. (1986). «Preparation and Sintering of Monosized Al₂O₃-TiO₂ Composite Powder ». Journal of the American Ceramic Society.

[Okamura et al, 1993]: Okamura, H. Maekawa, K., and Ozawa, K. (1993). «High Performance Concrete ». Gihodo Publishing.

[Okamura et al, 2003]: Okamura, H. Ouchi M., (2003)«Self-compacting Concrete, Journal of advanced concrete technology». vol 1, p5-15.

[Ozawa et al, 1989]: Ozawa, K. Maekawa, K. Kunishima, M. and Okamura, H. (1989). « Development of high performance concrete based on the durability design of concrete structures », Proceedings of the second East- Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2),1, 445-450.

P

[Perche, 2004]: Perche, F. (2004). « Adsorption de polycarboxylates et de lignosulfonates sur poudre modèle et ciments». Thèse de doctorat, Lausanne, école polytechnique fédérale de Lausanne, p320.

[Phan, 2007]: Phan, T-H. (2007). «Rhéologie et stabilité des pâtes de ciment utilisées dans la formulation des bétons fluide». Thèse de doctorat, Cachan, Ecole normale supérieure, p186.

[Puertas et al, 2005]: Puertas, F., Santos, H., Palacios, M., &Martínez-Ramírez, S. (2005). «Polycarboxylates superplasticiser admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behaviour in cement pastes». Advances in Cement Research, 17(2), 77-89.

R

[Ramachandran et al, 1998]: Ramachandran, V-S. Malhotra, V-M. Jolicoeur, C. & Spiratos, N. (1998). «Superplasticizers: Properties and Applications in Concrete », Canmet Publication Mtl, Ottawa. TR) 97-14, ACI International.

S

[Sedran, 1999]: Sedran, T(1999) « Rhéologie et Rhéométrie des bétons : application aux bétons autonivelants». Thèse d'Ecole nationale des Ponts et Chaussées France, p220.

T

[Turcy, 2004]: Turcy, P. (2004). « Retrait et fissuration des bétons autoplacant – Influence de la formulation». Thèse de doctorat en Génie Civil Ecole. Centrale de Nantes, Université de Nantes.

U

[Uchikawa et al, 1984]: Uchikawa, H. Uchida, S. Ogawa, K. & Hanehara, S. (1984). «Influence of $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ and CaSO_4 on the initial hydration of clinker having different burning degree». Cement and Concrete Research, 14(5), 645-656.

Y

[Yamada et al, 2000]: Yamada, K., Takahashi, T., Hanehara, S., & Matsuhisa, M. (2000). «Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer». Cement and concrete research, 30(2), 197-207.

[Younes, 2021]: Younes, A (2021). «Influence de sable de déchets de ciment durci et de CKD sur les propriétés des bétons autoplacants. Caractérisation-Formulation-Performance Durabilité» Mémoire de Master. Université Skikda, p04-05-06-07-46-47-48-63-65-66-67-68-70-72-73-74-79-80.

[Yagoub, 2009]: Yagoub, M (2009). « Évaluation de la qualité de béton de fibres in situ cas de béton autoplacant avec des fibres mixte» Mémoire de Master. Université Biskra, p05-06-07-08-20-22-23-25.

Webographie :

[PNEX] : <https://pavex.be/béton-autoplacant/>

Références normatives

Références Normatives

AFGC, 08 : Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants, 2008.

EN 12350 – 8 : Essai pour béton frais - Partie 8 : béton autoplaçant - Essai d'étalement au cône d'Abrams, novembre 2010.

EN 206-1 : Béton - Partie 1 : spécification, performances, production et conformité. Norme européenne, 2002.

NF EN 12350-10 : Essai pour béton frais - Partie 10 : béton autoplaçant - Essai à la boîte en L, novembre 2010.

NF EN 12350-9 : Essai pour béton frais - Partie 9 : béton auto-plaçant - Essai d'écoulement à l'entonnoir en V.

NF EN 206-9 : Béton, Partie 9 : Règles complémentaires pour le béton autoplaçant, juin 2010.

NF P 18 - 573 : Granulats- Essai de Los-Angeles, décembre 1990.

NF P 18- 407 : Bétons- Essai de flexion, décembre 1981.

NF P 18-451 : Essai d'affaissement, décembre 1981.

NF P 18-508 : Additions pour béton hydraulique - Additions calcaires - Spécifications et critères de conformité, 2012.

NF P18-572, 90 : Essai de Résistance à l'Usure (Micro-Deval).

NF P18-934-2 : Adjuvant pour béton, mortier et coulis – adjuvant pour béton définition, exigences, conformité, marquage et étiquetage, septembre 2002.

NFP18-404 : Bétons - Essais d'étude, de convenance et de contrôle - Confection et conservation des éprouvettes. Norme française, 1981.

XP P 18-305 : Bétons prêt à l'emploi, 1996.