

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LARECHERCHE

SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT GENIE CIVIL

N° :



FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : MATERIAUX

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par :

CHOUTLA ZAHIA

DRIDI CHAIMA

Intitulé

Evaluation de la résistance et la porosité du béton
autoplaçant à base d'agrégats de briques recyclés

Soutenu devant le jury composé de:

Pr. BENCHEIKH MOHAMED

Université de M'sila

Président

Dr. BELOUADAH MESSOUDA

Université de M'sila

Examineur

Dr. AMRIOU ABDERRACHID

Université de M'sila

Encadreur

Année universitaire : 2023 /2024

إهداء

قال الله تعالى " يرفع الله الذين امنوا والذين اوتوا العلم درجات "

إلى سيدة نساء الكون في عيني التي تركتني في منتصف الطريق ويا ندى روعي وبلسمها لكي اهدي تخرجي يا حبيبة الروح
فابنتك اليوم وبكل تواضع قد تخرجت وحصدت ثمار تعبها وجهدها اليك امي ارفع قبعات الفخر والعز اليك ايتها الروح الطاهرة
التي ذهبت بلا عودة رحمك الله امي واسكنك فسيح جناته

الى ذلك الرجل العظيم الذي اخرج أجمل مافي داخلي وشجعني دائما للوصول الى طموحاتي رجل علمني الحياة بأجمل شكل
وبذل كل ما بوسعه ولم يبخل أبي أدامك الله ظلا لنا

الى اخوتي (عبد المجيد .خليل. محمد الأمين وياسين)

الى ملائكة رزقني الله بهن لاعرف من خلالهن طعم الحياة الجميلة تلك الملائكة التي غيرن مفاهيم الحب والصدافة والسند في
حياتي أخواتي صليحة و عائشة جعلني وإياكن من الباريات

الى كل الأساتذة والمعلمين الذين بفضلهم وصلت الى ما انا عليه الان

الى جميع زملائي وزميلاتي طيلة مسيرتي الدراسية

والى دفعة 2024

اهدي هذا العمل المتواضع راجية من المولى عز وجل ان يجد القبول والنجاح

شوتلة زهية

اهداء

من قال انا لها نالها

لم تكن الرحلة قصيرة ولا ينبغي ان تكون لم يكن الحلم قريبا ولا الطريق كان محفوفا بالتسهيلات لكنني فعلتها ونلتها

الحمد لله حبا وشكرا وامتنانا الذي بفضلها ها انا اليوم انظر الى حلم طال انتظاره وقد أصبح واقعا افتخر به

الى ملاكي وقوتي بعد الله داعمتي الأولى والابدية امي عقيلة

اهديك هذا الإنجاز الذي لولا تضحياتك لما كان له وجود ممتنة لان الله قد اصطفاك لي من البشر اما يا خير سند وعوض

الى من دعمني بلا حدود اعطاني بلا مقابل الى من علمني ان الدنيا كفاح وسلاحها المعرفة داعمي في مسيرتي وسندي وقوتي

وملاذي بعد الله فخري واعتزازي ابي الغالي الهاشمي

الى اخوتي الأعزاء التي تعجز كل كلمات الشكر عن وصف مدى امتناني لله لوجودهم في حياتي يزيد نبيل حمزة عادل رياض

الى اختي وامي الثانية التي كانت معي في كل خطوة وحرف تعلمته اختي صليحة

الى اختي الثانية التي كانت داعمتي في الأوقات الصعبة والتي كانت الملجأ الحنون الغالية

الى صديقتي الغاليات اللواتي بهن اعتز هن اللواتي كانوا عائلتي الثانية كرزق من الله عز وجل

اللواتي قضيت معهن أجمل ايامي هن فرحة قلبي وسندي وروحي وفاء رباب عبير هديل

الى زميلتي التي كانت مرافقتي خلال هذا البحث المتواضع زهية

الى كل الزميلات والزملاء في مسيرتي الدراسية كل باسمه ومقامه

الى كل أستاذ علمني حرف واوصلني الى هذا المقام المتواضع

الى الأستاذ المشرف على بحث التخرج الذي كان معنا طوال رحلة البحث العلمي

وأخيرا الى كل عائلتي التي لم اذكرها والى كل اقاربي دون استثناء

اهدي هذا العمل المتواضع لكم جميعا احبكم في الله

دريدي شيماء

REMERCIEMENTS

Loué soit Dieu, qui nous a accordé le succès et la constance, nous a accordé la persévérance et nous a aidés à terminer ce travail après avoir persévéré à mettre des points sur les lettres et à révéler ce qui se cache derrière le rideau de la science et de la connaissance. Ce sont nos mots épars, nous les chuchotons à l'oreille de chacun qui ouvre ces mots pour emporter avec lui ce qu'il veut et désire et critique ce qu'il refuse et veut. Ce sont aussi des mots de remerciement à tous ceux qui nous ont encouragés et insufflé en nous espoir et volonté.

*Nous adressons nos sincères remerciements au professeur superviseur, le Dr, **AMRIOU Abedrachid***

Qui nous a accompagnés tout au long de cette recherche et nous a fourni des informations et des conseils précieux.

Nous espérons que Dieu Tout-Puissant corrigera son erreur et atteindra son objectif. Que Dieu le récompense pour nous comme bon.

A tous les professeurs tout au long du parcours universitaire.

Résumé

Le recyclage et la valorisation des déchets sont considérée comme une solution afin de répondre au déficit entre production et consommation des granulats, pour protéger l'environnement conserver les ressources naturelles. Dans ce cadre, il apparaît opportun d'étudier la possibilité de recycler certains déchets générés par les différentes activités industrielles et autres, dans la confection du béton. Pour cela, plusieurs recherches visent d'étudier la possibilité de valoriser les déchets comme ajout dans la formulation des bétons autoplaçant

Dans ce travail de mémoire de fin d'études, nous proposons d'étudier le potentiel de valorisation des déchets de brique dans la fabrication des bétons autoplaçant avec des proportions de 10%, 20%, 30% et 40% du poids de ciment. Les résultats obtenus sont comparés avec ceux des bétons préparés en utilisant la fumée de silice comme ajout avec les mêmes proportions. Dans ce cadre, des essais de résistance à la compression, à la flexion, des essais d'absorption et de durabilité ont été réalisés.

Les résultats obtenus par la présente étude expérimentale nous permettent de conclure qu'on peut valoriser les fines issues des déchets de briques recyclés concassés pour la confection du béton autoplaçant et les résultats sont comparable avec ceux des bétons utilisant de la fumée de silice.

MOTS CLES : recyclage – déchets de brique – béton autoplaçant – résistance – durabilité.

ملخص

وتعتبر إعادة تدوير النفايات واسترجاعها حلاً لسد العجز بين إنتاج واستهلاك الركام، وذلك لحماية البيئة والحفاظ على الموارد الطبيعية. وفي هذا السياق يبدو من المناسب دراسة إمكانية إعادة تدوير بعض النفايات الناتجة عن مختلف الأنشطة الصناعية وغيرها في صناعة الخرسانة. ولهذا تهدف العديد من الدراسات البحثية إلى دراسة إمكانية استرجاع النفايات كإضافة في تركيب الخرسانة ذاتية الدمك.

في هذه الأطروحة النهائية، نقترح دراسة إمكانية استعادة مخلفات الطوب في صناعة الخرسانة ذاتية الدمك بنسب 10%، 20%، 30% و40% من وزن الأسمنت. وتمت مقارنة النتائج المتحصل عليها مع نتائج الخرسانة المحضرة باستخدام دخان السيليكا كإضافة وبنفس النسب. وفي هذا السياق تم إجراء اختبارات مقاومة الضغط والانتشاء واختبارات الامتصاص والمتانة.

النتائج التي تم الحصول عليها من خلال هذه الدراسة التجريبية تسمح لنا باستنتاج أنه يمكن استخدام الدقائق الناتجة من مخلفات الطوب المعاد تدويره المسحوق في صنع الخرسانة ذاتية الدمك والنتائج قابلة للمقارنة مع نتائج الخرسانة باستخدام دخان السيليكا.

الكلمات المفتاحية: إعادة التدوير – مخلفات الطوب – الخرسانة ذاتية الدمك – المقاومة – المتانة

Abstract :

Recycling and recovery of waste is considered a solution to respond to the deficit between production and consumption of aggregates, to protect the environment and conserve natural resources. In this context, it appears appropriate to study the possibility of recycling certain waste generated by various industrial and other activities in the making of concrete. For this, several research studies aim to study the possibility of recovering waste as an addition in the formulation of self-compacting concrete.

In this final thesis work, we propose to study the potential for the recovery of brick waste in the manufacture of self-compacting concrete with proportions of 10%, 20%, 30% and 40% of the weight of cement. The results obtained are compared with those of concretes prepared using silica fume as an addition with the same proportions. In this context, compressive and flexural resistance tests, absorption and durability tests were carried out.

The results obtained by this experimental study allow us to conclude that fines from crushed recycled brick waste can be used to make self-compacting concrete and the results are comparable with those of concrete using silica fume.

KEY WORDS : recycling – brick waste – self-compacting concrete – resistance – durability

Sommaire

Dédicace

Remerciements

Résumé

Sommaire

Liste de Figure

Liste des tableaux

Introduction générale

Chapitre I : Revue générale sur le béton auto plaçant.....1

I.1.Introduction..... 2

I.2. Généralités sur les bétons auto plaçant.....2

I.3. Historique.....3

I.4. Domaine d'utilisation des BAP..... 4

I.5. Avantages et inconvénients des BAP..... 4

I.6. Les constituants des BAP.....5

I.6.1. Les granulats..... 6

I.6.1.1. Le volume des granulats.....6

I.6.1.2. Rapport Gravillon/Sable.....6

I.6.1.3. La Finesse des granulats.....6

I.6.2. L'eau de gâchage.....7

I.6.3. La Poudre (liant).....7

I.6.3.1. Le ciment.....7

I.6.3.2. Ajouts minéraux.....	8
I.6.4. Les Adjuvants chimiques.....	9
I.7.Facteurs influents la composition des BAP.....	10
I.7.1. Un volume de pâte élevé.....	11
I.7.2 Une quantité de fines élevée.....	12
I.7.3. L'utilisation de super plastifiants.....	12
I.7.4. Un faible volume de gravillons.....	12
I.8. Les formulations des BAP	12
I.8.1. Méthode japonaise	13
I.8.2. L'approche de Suédoise	14
I.8.3. Formulation minimale par volume de pâte.....	14
I. 8.4. Formulation par optimisation du squelette granulaire.....	15
I.8.5. Méthode Française.....	15
I.9. Caractérisation des BAP à l'état frais.....	16
I.9.1. Les Propriétés Essentielles Recherchées.....	16
I.9.2. Les principaux essais de caractérisation des BAP.....	17
I.9.2.1. Essai d'étalement.....	17
I.9.2.2. Essai de la boîte en L (L-box test).....	18
I.9.2.3. Essai de stabilité au tamis.....	19
I.9.2.4. Essai d'entonnoir (V-Funnel NF EN 12350-9)	19
I. 9.2.5. Essai de ressuage.....	20
I.9.2.6. Essai J-Ring.....	21
I.9.2.7. Essai à la boîte en U (U-Box).....	21

I.9.2.8. Essai à la colonne.....	22
I.9.2.9. Essai à la bille.....	22
I.10.Caractérisation d'un BAP à l'état durci (destructif et non destructif)	23
I.10.1. Les essais destructifs du béton	23
I. 10.1. Les essais destructifs.....	23
I. 10.2. Les essais non destructifs.....	23
I.10.1.1. Essais de compression.....	23
I. 10.1.2. Essais de traction par flexion.....	24
I.10.1.3. Module d'élasticité.....	25
I.10.2. Essais non destructifs du béton	26
I.10.2.1. Essai d'auscultation dynamique.....	26
10.2.1.1. Principe d'auscultation dynamique [NF EN 12504-4]	26
10.2.1.2. Détermination de la vitesse de propagation des ondes.....	27
10.2.1.3. Manières de mesure	27
10.2.1.4. Les avantages d'essai d'auscultation dynamique	28
10.2.1.5. Les inconvénients d'essai d'auscultation dynamique	28
I. 11. Durabilité de BAP	28.
I.11.1. Introduction	28
I.11.2. Facteurs Influençant la durabilité.....	29
I.11.3. Porosité accessible à l'eau (AFPC-AFREM, 1998) (NF P 18 – 459)	29
I.11.4. L'Indicateurs de substitution à l'absorption d'eau par capillarité	31
I.12. Conclusion.....	32
Chapitre II : Récupération et valorisation des déchets.....	33

II.1. Introduction.....	34
II.2. Revue sur le recyclage des déchets	34
II.3. Les différents types de déchets.....	35
II.3.1. Déchets ultimes.....	35
II.3.2. Déchets ménagers et assimilés.....	35
II.3.3. Déchets inertes.....	35
II.3.4. Les déchets industriels banals (DIB).....	36
II.3.5. Les déchets médicaux et pharmaceutiques.....	37
II.4. Recyclage des déchets	37
II.4.1. Définition de recyclage	37
II.4.2. Intérêt de recyclage	39
II.5. Technique de recyclage.....	39
II.5.1. Etape de recyclage.....	39
II.5.2. Procédés du recyclage.....	39
II.5.3. Gestion des déchets.....	40
II.6. Différents déchets utilisés dans l'élaboration des bétons	41
II.6.1. Déchets de brique.....	41
II.6.2. Pneus usagés.....	42
II.6.3. Les Laitiers sidérurgiques.....	42
II.6.4. Déchets de marbre	43
II.6.5. Déchets plastiques.....	43
II.7. Conclusion	44
Chapitre III : Etude expérimentale.....	45

III.1. Introduction.....	46
III.2. Matériaux utilisés.....	46
III.3. Caractéristiques des granulats.....	46
III.3.1. Analyse granulométrique (NFP 94-056)	46
III.3.1.1. Analyse granulométrique du sable.....	48
III.3.1.1.1. Module de finesse (EN 196-6).....	48
III.3.1.2. Analyse granulométrique du gravier 3/8.....	49
III.3.1.2. Analyse granulométrique du gravier 3/8	49
III.4. Caractéristiques physiques des granulats	50
III.4.1.1. Sable concassé.....	50
III.4.1.2 Les graviers.....	50
III.4.1.3. Le brique.....	51
III.4.2. Masse volumique apparente (NFEN 1097-6(2001)).....	52
III.4.2.1. Le sable.....	53
III.4.2.2. Les graviers 3/8 et 8/16.....	53
III.4.2.3. Les fines de brique.....	54
III.4.3. Equivalent de sable (NA EN 933-8).....	55
III.4.3.1. Le sable.....	55
III.4.3.2. Les fines de brique.....	57
III.4.4. La porosité.....	57
III.4.5. La Compacité.....	57
III.4.6. Indice des vides.....	58
III.4.7. Résistance à la fragmentation.....	58

III.4.9. Absorption d'eau.....	59
III.4.10. Porosité.....	60
III.4.11. Compacité.....	60
III.4.12. Indice des vides.....	61
III.4.13. Ciment.....	63
III.4.14. Caractéristiques de la fumée de silice.....	63
III.4.15. Super plastifiant (MEDAPLASTSP40).....	64
III.4.16. Essais du Taux de saturation.....	65
III.5. Formulation du béton auto plaçant.....	65
III.5.1. Formulation des mortiers auto plaçant.....	65
III.5.1.1. Essais sur MAP à l'état frais	65
III.5.1.1.1. Essai d'étalement au mini cône.....	66
III.5.1.1.2. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test).....	67
III.5.1.2. Etude du mortier auto plaçant.....	67
III.5.2. Formulation des bétons auto plaçant.....	67
III.5.2.1. Essais de caractérisation du béton auto plaçant à l'état frais.....	68
III.5.2.2. Essai d'étalement au cône d'Abrams NF EN 12 350-8.....	69

III.5.2.3. Essai de stabilité au tamis NF EN 12 350-11.....	70
III.5.2.4. Essai de la boîte en « L » NF EN 12 350-10	72
III.5.2.2. Essais de caractérisation du béton auto plaçant à l'état durci	73
III.5.2.2.1. Essais de compression	73
III.5.2.2.2. Essais de traction par flexion NF P18-408.....	74
III.5.2.2.3. Essai d'ultrasonique	74
III.5.2.3. Essais de durabilité	74
III.5.2.3.1. La porosité accessible à l'eau (NF EN 18 – 459)	75
III.5.2.3.2. Absorption par immersion du béton.....	76
III.5.2.3.3. Porosité capillaire	78
III.5.2.3.4. Essai séchage/mouillage	78
III.6. Résultats et discussion.....	78
III.6.1. Résistance à la compression	80
III.6.2. Résistance à la flexion.....	80
III.6.3. Essai d'ultrasonique	81
III.6.4. Porosité accessible	83
III.6.5. Absorption par immersion d'eau	84
III.6.6. Porosité capillaire.....	85
III.6.7. Essai séchage/mouillage	86
III.7. Conclusion.....	87
III.8. Révérence	88

Liste des figures :

Chapitre I : Revue générale sur le béton auto plaçant

Figure I.1. Béton auto plaçant.	2
Figure I.2. Compositions du béton auto plaçant et du béton conventionnel.	6
Figure I.3. Illustration de l'effet fillers.	8
Figure I. 4. Dispersion des granulats par excès de pâte.	11
Figure I.5. Relation entre l'étalement et la quantité de pâte d'un béton.	11
Figure I.6. Taux de saturation par Super plastifiant (Conne de March).	14
Figure I.8. Essai de la boîte en L (L-box test).	17
Figure I.7. Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow).	18
Figure I.9. Essai de stabilité au tamis.....	19
Figure I.10. L'essai V- funnel.	20
Figure I.11. Essai de ressuage.	20
Figure I.12. Essai J. Ring.....	21
Figure I.13. Essai de la boîte en U.	21
Figure I.14. Essai de stabilité à la colonne.....	22
Figure I.15. Essai à la bille développé par Trude.	23
Figure I.16. Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance.....	24
D'après le modèle réglementaire.	24
Figure I.17. Mesure de la résistance à la compression.	24
Figure I.18. Mesure de la résistance à la traction par flexion.	25
Figure I.19. Comparaison des modules élastiques théoriques et expérimentaux de BAP et de Bétons vibrés.	25
Figure I.20. Appareil d'auscultation sonique.....	26
Figure I.21. Essai de porosité accessible à l'eau.....	31

Chapitre II. Récupération et valorisation des déchets

Figure II.1. Stratégies de traitement des déchets.....	38
Figure II.2. Valorisation des déchets.	38
Figure II.3. Briques en terre crue.	41
Figure II.4. Briques en terre cuite.	42

Chapitre III : Etude expérimentale

Figure III.1. Analyse granulométrique.	47
Figure. III.2. Allure de la courbe granulométrique des granulats.	50
Figure III.3. Essai La masse volumique absolue des sables concassés	51
Figure III.4. Essai La masse volumique absolue des graviers (8/16, 3/8)	52
Figure III.5. Essai La masse volumique absolue des briques	52
Figure III.6. Essai La masse volumique apparente des sables concassés.....	53
Figure III.7. Essai La masse volumique apparente des briques	54
Figure III.8. Essai équivalent de sable et brique	56
Figure III.9. Ciment Matine.....	61
Figure III.10. Super-plastifiant.....	64
Figure III.11. Taux de saturation par Super plastifiant. (Conne de March)	64
Figure III.12. Etalement au mini cône.....	66
Figure III.13. Dispositif de l'essai V-Funnel.....	66
Figure III.14. Essai d'étalement au cône exécuté au laboratoire.....	69
Figure III.15. Essai Stabilité au tamis exécutés au laboratoire.....	70
Figure III.16. Essai de boit L.....	71
Figure III.17. Machine de compression.....	72
Figure III.18. Mesure de la résistance à la traction par flexion.....	73
Figure III.29. Mesure de la résistance à la traction par flexion.....	74

Figure III.20. Mesure de la porosité accessible à l'eau.....	75
Figure III.21. Dispositif expérimental de mesure d'absorption d'eau par capillarité..	77
Figure III.22. Séchage des éprouvettes.....	78
Figure III.23. Résistance à la compression(10x10x10cm).....	79
Figure III.24. Résistance à la flexion (7x7x28cm)	80
Figure III.25. Essai d'ultrasonique.....	81
Figure III.26. Porosité accessible.....	82
Figure III.27. Absorption par immersion d'eau (10x10x10 cm)	83
Figure III.28. Porosité capillaire.....	84
Figure III.29. Résistance à la compression après 5 cycle de séchage/ mouillage....	85

Liste des tableaux :

Chapitre I : Revue générale sur le béton auto plaçant

Tableau I.1. Qualité du béton et vitesse de propagation des impulsions27

Chapitre III : Etude expérimentale

Tableau III.1. Analyse granulométrique du sable.....48

Tableau III.2. Analyse granulométrique du gravier 3/8.....49

Tableau III.3. Analyse granulométrique du gravier 8/16.49

Tableau III. 4. la masse volumique absolue de sable concassée.....51

Tableau III. 5. la masse volumique absolue de gravier 3/8 et 8/16.51

Tableau III. 6 la masse volumique absolue de brique.....52

Tableau III.7. La masse volumique apparente de sable concassé.....53

Tableau III. 8 la masse volumique apparent de gravier 3/8 et 8/16.....54

Tableau III. 9. la masse volumique apparent de brique.54

Tableau III.10. Résultats d'essais d'équivalent de sable concassée.....55

Tableau III. 11. Résultats d'essais d'équivalent de brique.55

Tableau III. 12. Comparaison des résultats.56

. Tableau III.13. La porosité des fractions (3/8) et (8/16) du gravier concassé.....57

Tableau III.14. Compacités des fractions (3/8) et (8/16) du gravier concassé.....57

Tableau III.15. Indice de vide des fraction (3/8) et (8/16).57

Tableau III.16. Los Angeles des fraction (3/8) et (8/16) du granulat concassé.....58

Tableau III.17. Coefficients d'absorption d'eau des fractions (3/8) et (8/16) du gravier concassé..59

Tableau III.18. La porosité, la compacité et l'indice de vide pour le sable concassé....60

Tableau III.19. Composition chimique du ciment.....	61
Tableau III.20. Analyse minéralogique du ciment.....	62
Tableau III.21 : Caractéristique mécanique du ciment.	62
Tableau III.22 : propriétés physiques de ciment.	62
Tableau III.23. Caractéristiques chimiques et physique de la fumée de silice.....	63
Tableau III.24. Caractéristiques physico-chimiques du super plastifiant (SP 40).....	64
Tableau III.25. Essais du Taux de saturation.	65
Tableau III.26. Compositions des mortiers utilisée (dans 1 m3).	67
Tableau III.27. Compositions des bétons utilisée après les essais de BAP à l'état frais (dans 1 m3).	72

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est l'un des matériaux de construction les plus utilisés à travers le monde. Sa simplicité de fabrication et de sa mise en place, son faible prix de revient et ces performances mécaniques et durabilité qu'il assure ont légitimé son utilisation pour réaliser des divers ouvrages.

Depuis sa découverte, le béton a évolué et ces performances ont permis de diversifier les utilisations auxquelles il était destiné. Ainsi, des études menées sur ses constituants du béton ont conduit à améliorer ses propriétés existantes, en particulier avec les bétons à hautes performances (BHP). D'autres familles de béton ont vu ensuite le jour comme les bétons à très hautes performances (BTHP), les bétons de fibres (BFM), les bétons de poudre réactive (BPR) et le béton autoplaçant. Les BAP constituent davantage une nouvelle technologie de construction depuis la fin des années 1980, au Japon.

L'utilisation des déchets recyclés s'est développée au début des années 80, elle répond au besoin d'une autre source de granulats et de la réduction des volumes de déchets. Dans le béton ces déchets recyclés présentent plusieurs avantages tant au niveau environnementale, humain, technologique et économique qui s'intéresse de plus en plus les industriels.

Les pays de l'Europe produisent chaque année environ 500 kg de déchets de construction et de démolition par habitant. Les granulats recyclés trouvent essentiellement des débouchés dans le domaine routier. En Algérie, en plus du déficit important (10 à 20%) connu ces dernières années en granulats et ciment, les déchets de construction et de démolition sont importants, et rarement valorisés. La seule tentative de valorisation des déchets de construction a été réalisée à El-ASNAM (CHLEF actuellement) suite au tremblement de terre de 1982 en collaboration avec le Centre scientifique et technique de Construction (C.S.T.C) belge.

Les déchets peuvent être transformés en granulats recyclés pour être utilisés, en remblais, en couches de forme sur les chantiers des travaux publics ou comme granulats pour le béton.

Le but de ce travail est d'étudier la faisabilité de l'adjonction des fines issues de brique comme addition dans la fabrication du béton autoplaçant.

Pour cela, des essais de résistance et de durabilité ont été réalisés sur des échantillons de béton autoplaçant. Ces échantillons sont fabriqués en utilisant les fines de brique comme additions dont les proportions de 10%, 20%, 30% et 40%. Les résultats ainsi obtenus sont comparés avec ceux des bétons préparés par les mêmes proportions de fumée de silice.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur les bétons autoplaçant d'un point de vue générale. Les informations présentées expriment plusieurs aspects concernant la caractérisation des propriétés BAP. Les particularités de la composition des BAP et leur caractérisation à l'état frais (essais spécifiques) sont présentées.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des déchets, leurs valorisations, leurs natures et leurs provenances ainsi les différents déchets utilisés en génie civil principalement dans l'élaboration des bétons.

Le dernier chapitre de ce mémoire est consacré à présenté une étude expérimentale concernant la valorisation des fines issues de déchets de brique dans la confection des bétons autoplaçant. Ainsi, plusieurs échantillons cubiques et prismatiques ont été préparés et des tests de résistance et de durabilité sont réalisés. Enfin, le présent travail est clôturé par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus en particulier la possibilité d'utiliser les fines de brique dans la confection des béton autoplaçant.

Chapitre I :
Revue générale sur le
béton auto plaçant

I.1. Introduction

L'étude du béton auto plaçant (BAP) est un domaine de recherche très prometteur en raison de ses caractéristiques particulières. Il est crucial de créer un BAP économique qui présente des caractéristiques attrayantes tant à l'état frais qu'à l'état durci afin de pouvoir être utilisé dans le domaine de la construction.

Au cours des dernières années, des études sur les BAP économiques ont été menées afin de découvrir de nouvelles solutions économiques en plus des solutions techniques. Toutefois, l'importance considérable de l'ajout minéral dans la formulation des BAP suggère que l'utilisation d'ajouts minéraux naturels et économiques semble être l'une des options possibles pour l'avenir des BAP.

Il est possible que la technologie des bétons auto plaçant nécessite de grandes quantités d'additions, car la formulation du BAP contient une quantité importante de fines (environ 500 kg/m³). Il est possible que ces dernières puissent améliorer les caractéristiques et les performances de ce genre de béton. L'ajout de fines calcaires, de laitiers, de pouzzolane naturelle et de pouzzolanes artificielles comme le méta kaolin et la vase provenant des dragages des barrages envasés est parmi ces additions [1].



Figure I.1 bétons auto plaçant [1].

I.2. Généralités sur les bétons auto plaçant

Le béton est aujourd'hui l'un des matériaux de construction les plus couramment employés à l'échelle mondiale en raison de sa facilité de fabrication et de sa facilité d'installation. Depuis sa création, le matériau n'a guère connu d'évolutions, mais ces dernières années, des progrès significatifs ont été accomplis en améliorant certaines caractéristiques déjà présentes, notamment avec l'émergence des bétons de haute performance, des bétons de poudres réactives et des bétons de fibre. Tous ces bétons

ont pour but d'accroître leur résistance et leur durabilité, mais ils doivent être mis en place de manière adéquate. À partir de ce moment, une nouvelle étape a été atteinte avec l'introduction du béton auto plaçant, qui représente une nouvelle technologie de construction [2].

I.3. Historique

Pendant plusieurs années commençantes en 1983, le problème de la durabilité des structures en béton était un sujet d'intérêt majeur surtout au Japon, il est considéré comme un problème majeur auquel la société japonaise fait face. Surtout que le nombre d'ouvriers qualifiés dans la construction n'a cessé de diminuer, engendrant une perte de connaissance, notamment dans les techniques de vibration du béton [3].

L'utilisation de béton très fluide, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour le serrage, est apparue comme solution possible à ce problème.

La nécessité de tel sorte du béton est proposé par OKAMURA en 1986, et en 1988, Ozawa a réussi de développer le 1er prototype du béton auto-plaçant BAP. Ces résultats ont été présentés par K. OZAWA pour la première fois au 2ème Congrès de l'Asie de l'Est et Pacifique sur le Génie Civil et la Construction, tenu en Janvier 1989 à Chiangmai (Thaïlande). Trois années plus tard, en Mai 1992, au 4ème Congrès International CANMET & ACI à Istanbul, l'intervention du K. OZAWA a accéléré la diffusion mondiale du concept de cette nouvelle génération de béton [4].

Dans les dernières années, le BAP a été développé un peu partout dans le monde, et les données disponibles à leur sujet commencent par conséquent à affluer dans la littérature.

En France les premières expérimentations remontent à 1995. Après une phase de recherche développement menée dans le cadre du Projet National, les BAP s'affirment aujourd'hui comme une technique porteuse.

En Europe, ont formé un grand consortium en 1996 pour s'embarquer à un projet de développement du BAP et leur application. Et dans les dernières années, un certain nombre de ponts, de tunnels ont été construits.

Aux USA, le BAP a gagné un très grand intérêt surtout de la part des industries du béton préfabriqué, ils ont commencé à l'appliquer dans les projets commerciaux, puis l'application a été étendue vers les ponts.

Donc, les bétons auto-plaçant (BAP) marquent une nouvelle étape de progrès dans l'histoire du

matériau béton.

I.4. Domaine d'utilisation des BAP

Les BAP peuvent être utilisés à la fois pour la construction d'ouvrages horizontaux et verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil, ainsi que pour la fabrication de nombreux produits préfabriqués en béton [5].

Il est possible de réaliser la majorité des travaux en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobilier urbain, etc.).

Les BAP sont spécialement conçus pour la construction de structures où la mise en place d'un béton traditionnel est complexe, c'est-à-dire, présentant des :

Densités de ferrailage importantes ;

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

En Algérie, il existe très peu de rivières, ce qui diminue considérablement la disponibilité des agrégats alluvionnaires et donc roulés, qui sont à la base de la confection d'un bon béton auto plaçant.

Malgré ça on pourra encourager les entreprises de construction algériennes à utiliser ce type de formulation, d'où l'intérêt pour le développement de l'industrie de la construction en Algérie [6].

I.5. Avantages et inconvénients des BAP

Les bétons auto plaçant BAP présente nt de nombreux avantages, on ci te :

a) Avantages techniques :

- Mise en place facile et rapide du béton.
- Création d'éléments de forme complexe.
- Bétonnage en milieux fortement ferraillés.

b) Avantages économiques :

- Réduction du cout de main d'œuvre et du temps de bétonnage.

- Absence de systèmes de vibration réduisant ainsi les couts et les nuisances sonores dans et au voisinage du chantier.

c) Avantages pour l'environnement :

- Mise en valeur des déchets de construction (récupération de ces déchets sur les chantiers, les industries, les carrières et les stations de concassage).

d) Inconvénients de BAP :

La composition des BAP nécessite une sélection précise des matières premières. Il est donc recommandé de solliciter une entreprise spécialisée afin de fabriquer ces bétons. Le niveau de liquidité des BAP est extrêmement précis, ce qui nécessite un partenariat étroit entre la société de production et l'entrepreneur du projet. Effectivement, en fonction du type de coffrage, de sa configuration ou de sa taille, on privilégiera un type de liquidité ou un autre.

Cela entraîne donc des limitations dans les préparatifs du chantier car de nombreuses discussions sont nécessaires. En outre, il est essentiel de respecter les délais, sinon la fluidité du béton peut fluctuer. Cet aspect revêt une grande importance par rapport aux bétons vibrés. En plus de cela, il convient de souligner que les matières premières en elles-mêmes sont particulières et ne sont pas toujours disponibles en stock chez les producteurs [7].

I.6. Les constituants des BAP

Outre les composants du béton traditionnel (gravillons, sable, ciment et eau), afin de garantir ses caractéristiques à l'état frais, le BAP inclut d'autres éléments tels que le super plastifiant et les ajouts minéraux. Étant donné que le BAP est composé d'une grande quantité de fines, il présente un faible volume d'air. En général, la concentration d'eau du BAP est similaire à celle du béton courant. Afin de réduire les frottements entre les granulats, le BAP présente un volume des granulats plus faible que le béton traditionnel (Figure I.2).

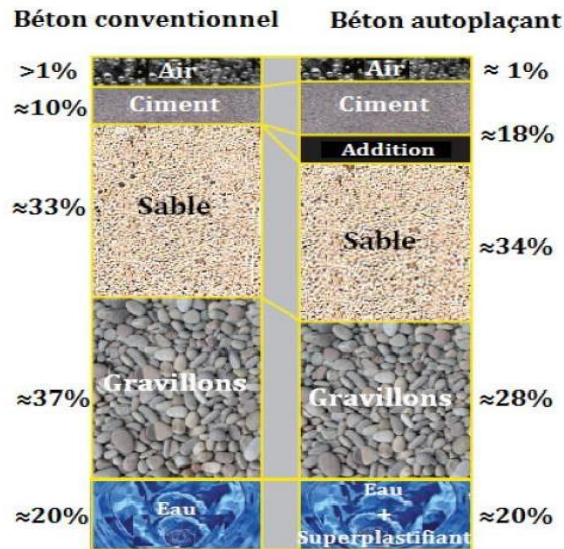


Figure I.2: Compositions du béton auto plaçant et du béton conventionnel [8].

I.6.1. Les granulats

Le volume, la forme, la granulométrie, la taille, l'humidité, le rapport Gravillon/Sable (G/S) et la finesse des granulats ont une grande influence sur leur ouvrabilité et leur résistance à la ségrégation.

I.6.1.1. Le volume des granulats

Le poids du sable est l'un des éléments essentiels qui déterminent les MAP. Une quantité suffisante de sable doit créer un mortier très fluide et homogène. L'augmentation du volume de sable entraîne une augmentation du contact entre les particules de sable, ce qui entraîne une réduction de la déformabilité des MAP [9]. Selon Okamura [9], il est recommandé d'utiliser un volume de sable de 40% de celui du mortier. Selon des études, il a été rapporté que, peu importe la forme des gros granulats, la réduction de la capacité de passage est causée par l'augmentation de leur volume.

Selon les recherches de Yurugi et al [11], il a été démontré que la réduction du volume de gravillons dans les BAP est plus efficace que la réduction du rapport S/M pour accroître la capacité de passage à travers des milieux confinés. Selon Okamura et Ozawa [11], le volume des granulats de grande taille est restreint à 50% du volume des solides présents dans le béton.

I.6.1.2. Rapport Gravillon/Sable

Le rapport entre le gravier et le sable est lié à la taille du squelette granulaire. En ce qui concerne les BAP, un rapport G/S proche de 1 permet d'accroître la granulométrie du squelette granulaire et donc de diminuer la quantité de pâte liante requise pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance désirées [12].

I.6.1.3. La Finesse des granulats

Les granulats avec un module de finesse compris entre 2,4 et 2,6 ont été efficacement employés dans

la fabrication des BAP. Toutefois, il est conseillé d'utiliser du sable fin afin de garantir une résistance adéquate à la ségrégation [13].

I.6.2. L'eau de gâchage

La présence d'eau dans un BAP a un impact significatif sur sa fluidité et sa résistance à la ségrégation. Quand la quantité d'eau est excessive, la résistance à la ségrégation diminue et la pâte ou le mortier se détache facilement des gravillons, ce qui donne lieu à un risque de blocage auprès des fondations. Lorsque la quantité d'eau est insuffisante, le mélange ne sera pas suffisamment fluide, même avec l'emploi du super plastifiant [14].

I.6.3. La Poudre (liant)

La poudre joue un rôle essentiel dans le BAP. Outre sa principale fonction de lier les différents éléments du béton en présence d'eau, la poudre remplit les espaces entre les granules, ce qui renforce la densité du matériau. L'objectif de l'augmentation de son volume est d'améliorer les caractéristiques du béton à la fois à l'état frais (déformabilité, capacité de passage et résistance à la ségrégation) et à l'état durci (force et longévité).

La précision de la poudre est cruciale pour améliorer les caractéristiques des BAP. Améliorer la déformabilité, l'ouvrabilité, la résistance à la ségrégation et la compacité du béton est rendue possible grâce à l'augmentation de la finesse de la poudre. Selon Ozawa et ses collègues [15]. Les BAP contenant des poudres fines (de grande finesse) ont une grande résistance à la ségrégation en raison de la teneur élevée en eau des grains de la poudre fine. Toutefois, la dispersion des poudres contenant de nombreuses particules fines inférieures à 20µm requiert un dosage en SP élevé.

Noumowe et al [16]. Ont montré que la quantité des particules fines inférieures à 100 µm a un effet significatif sur la capacité de remplissage et la résistance à la ségrégation.

La poudre est généralement constituée d'un ciment Portland pur ou d'un ciment Portland combinaison avec des minéraux. Cependant, afin de réduire les coûts de fabrication des BAP et d'éviter des problèmes de température élevée lors de l'hydratation, la poudre est souvent composée de deux composants, voire de trois composants : ciment Portland mélangé avec de la fumée de silice, du laitier de haut fourneau, des cendres volantes, du filler calcaire, etc.

Les performances des BAP sont en relation avec la composition du ciment. Effectivement, les composants

I.6.3.1. Le ciment

C3A et C4AF adsorbent le super plastifiant après le malaxage, ce qui entraîne une corrélation entre l'efficacité de dispersion du SP et la quantité de ciment en C3A et C4AF. Ces éléments ont également

un impact sur la durabilité en raison de leur hydratation rapide. D'après l'EFNARC [17], il est possible d'utiliser tous les ciments qui respectent la norme EN 197-1 pour la fabrication des BAP.

I.6.3.2. Ajouts minéraux

Les minéraux additionnels sont des poudres extrêmement fines avec une taille inférieure à $80\mu\text{m}$. Ils sont classés en deux catégories en fonction de leur réaction pouzzolanique : additions pouzzolaniques et additions inertes ou quasi-inertes (fillers calcaires) [18].

a) Les fillers calcaires

La norme sur les additions minérales calcaires (NFP18-508) définit les additions calcaires comme des produits secs finement divisés, obtenus par broyage et/ou sélection, provenant de gisements de roches calcaires dolomitiques, massives ou meubles. L'utilisation du filler calcaire est due au fait que cette substance, une fois broyée assez finement, s'intègre dans le système granulaire du ciment (Figure I.3) et comble ainsi les espaces entre les autres particules de dimensions plus importantes du béton (ciment, granulats). L'effet, connu sous le nom d'effet filler, se manifeste par une augmentation de la taille du squelette granulaire, ce qui aura des conséquences sur les caractéristiques tant à l'état frais qu'à l'état durci [19].

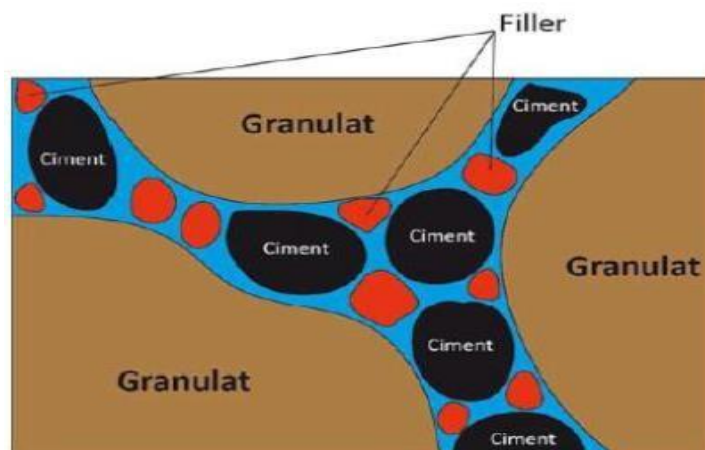


Figure I.3: Illustration de l'effet fillers [19].

b) La fumée de silice :

La fumée de silice est un élément résiduel de l'industrie des alliages de silicium, notamment du ferro silicium, qui est extrait des fumées émises par les fours électriques utilisés pour la fabrication de ces produits. On retrouve des particules sphériques plus ou moins grisâtres et très fines, dont le diamètre moyen est d'environ $0,1\ \mu\text{m}$ (100 fois inférieur à celui du ciment) [20]. Il est nécessaire qu'il contienne au moins 85 % de dioxyde de silicium SiO_2 . La fumée de silice possède des propriétés pouzzolaniques plus élevées que les pouzzolanes naturelles en raison de sa forte teneur en silice amorphe.

c) Les pouzzolanes naturelles :

Les pouzzolanes naturelles sont généralement des roches volcaniques ou des sédiments, très finement broyées avec une finesse à peu près égale à celle du ciment. Elles ne sont pas hydrauliques par nature, mais hydratées avec de l'hydroxyde de chaux libéré par le clinker, elles deviennent aussi des hydrates stables et peu solubles dans l'eau. On appelle pouzzolaniques les composants qui, par le même mécanisme que les pouzzolanes, provoquent également la formation d'hydrates stables [21].

L'essentiel des pouzzolanes naturelles est constitué de silice réactive (plus de 25 %), d'alumine et d'oxyde de fer [20].

d) Le laitier de haut fourneau :

La production de laitier de haut fourneau consiste en un résidu de la fonte qui est brusquement refroidi par aspersion d'eau. Après avoir été broyé, il se divise en nodules dont les diamètres sont compris entre 10 et 45 μm . Le laitier est principalement constitué d'oxyde de calcium, avec environ 40 à 50 %, et de silice, avec environ 25 à 35 % de la composition.

Les teneurs en alumine, qui fluctuent entre 12 et 30 %, ainsi que la magnésie et d'autres oxydes, sont très faibles et sont pratiquement équivalentes à celles du clinker [20].

On considère le laitier granulé broyé comme un ciment réel car il n'est nécessaire d'ajouter un catalyseur activant pour commencer à prendre et à développer des résistances mécaniques [22].

I.6.4. Les Adjuvants chimiques

Les Adjuvants sont des substances chimiques que l'on incorpore dans le mortier ou le béton lors du malaxage en petites quantités pour altérer certaines caractéristiques à l'état frais ou à l'état durci. Les super plastifiants et les agents de viscosité sont parmi les adjuvants les plus couramment employés dans la fabrication des BAP.

a) Les super plastifiants :

Il s'agit de réducteurs d'eau à grande efficacité, et ils sont généralement liquides. Ils sont constitués de molécules organiques longues et de grande masse. Les sels de sodium ou de calcium du poly naphthalène sulfoné et les sels de sodium de la poly mélamine sulfonée sont les plus fréquemment employés. Récemment, les copolymères acrylate-ester ou polyacrylates ont été commercialisés. Les super plastifiants ont un mode d'action très complexe. On peut le décrire comme suit :

Au contact d'un milieu aussi polaire que l'eau, les grains de ciment, qui ont une surface très chargée en charges opposées (positives et négatives), ont tendance à se rassembler en amas (floculation). Ainsi, cette floculation retient une quantité d'eau entre les grains de ciment (eau captive) qui ne peut plus être utilisée pour garantir une bonne maniabilité du béton.

En s'adsorbant à la surface des grains de ciment, les super plastifiants rompent cette dynamique. Les différentes charges sont neutralisées et chaque grain de ciment reçoit la même charge électrostatique. Les forces répulsives entre les particules créées par ces charges de même signe vont entraîner une dispersion des grains de ciment, ce qui libère de l'eau qui est maintenant utilisée pour lubrifier le mélange, ce qui améliore la maniabilité.[23]

b) Les agents de viscosité :

L'incorporation d'un super plastifiant dans un béton accroît sa capacité à s'ouvrir, mais diminue sa viscosité. Par conséquent, le matériau perd sa stabilité en termes de ségrégation et de ressuage. L'objectif de l'utilisation d'agents de viscosité est de maintenir la stabilité du béton en accroissant la fixation de l'eau dans le mélange, ce qui réduit le phénomène de ressuage et renforce la cohésion du béton. Ces produits reposent sur des molécules polymères longues (polysaccharides) ou des dérivés celluloses. En général, ils se présentent sous forme de poudre.

Il est parfois question de l'intérêt de leur emploi du point de vue de leurs effets sur la rhéologie. Cependant, ils sont prouvés pour réduire la sensibilité des bétons auto plaçant aux variations de teneur en eau dans le cadre de la production industrielle.

En règle générale, la quantité de super plastifiant augmente en fonction de l'agent de viscosité pour une ouvrabilité spécifique. La présence d'un agent de viscosité excessif empêche la pâte de se déformer et entraîne une diminution de sa fluidité, ce qui peut également entraîner un entraînement d'air excessif. Les agents de viscosité assurent une fluidité et une capacité de remplissage constantes pendant une durée d'environ une heure [11].

I.7.Facteurs influents la composition des BAP

Les bétons auto plaçant présentent l'avantage de rendre le mélange plus déformable afin de faciliter sa mise en place (sans vibration), tout en maintenant une stabilité élevée (résistance à la ségrégation et au ressuage). Il est donc essentiel d'incorporer un agent de viscosité, d'augmenter la quantité d'additifs minéraux et de sélectionner des quantités adéquates de sable et de granulats [24].

- Un volume de pâte élevée ;

- Une quantité de fines élevée ;
- L'utilisation de super plastifiant ;
- Un faible volume de gravillons ;
- Utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau dit agent de viscosité.

I.7.1. Un volume de pâte élevé

Le béton étant un mélange de pâte et de granulats, il y a une quantité de pâte minimale pour combler les interstices entre les granulats, la quantité de pâte supplémentaire entraîne une dispersion des granulats, limitant ainsi les frottements inter granulaires et conférant au matériau sa fluidité. (Figure I. 4) [25].

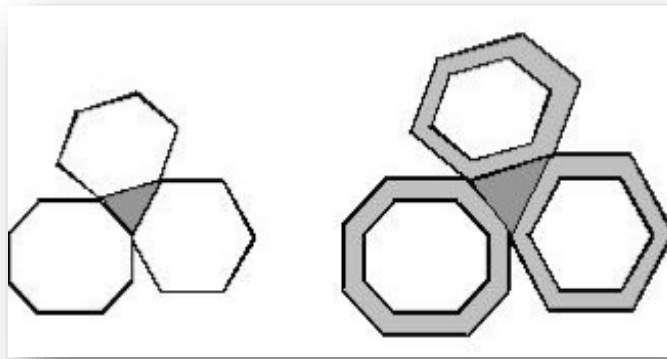


Figure I. 4 : dispersion des granulats par excès de pâte [26].

Certains auteurs ont effectivement mis en évidence l'existence d'une relation entre la quantité de pâte de ciment et l'étalement du béton (Figure I.5) [26].

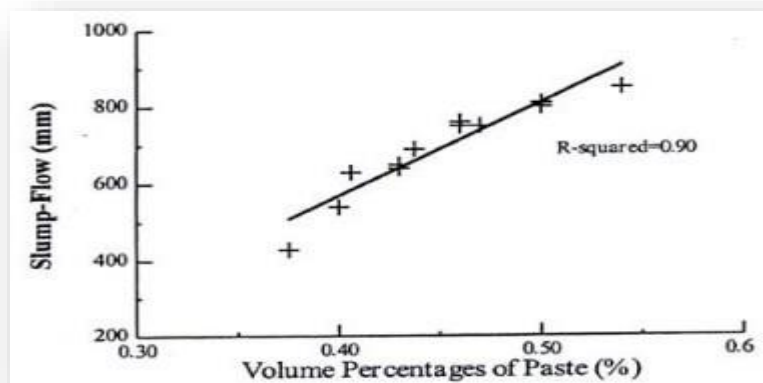


Figure I.5 : Relation entre l'étalement et la quantité de pâte d'un béton [26]

I.7.2 Une quantité de fines élevée

Une grande quantité de fines L'objectif de l'accroissement de la quantité de fines (d'environ 500kg/m³) est de garantir la maniabilité, de réduire les risques de ressuage et de ségrégation. Le plus couramment employé est : [27]

Les fillers calcaires (calcite, dolomite) sont des agents qui accélèrent la prise en créant des hydrates.

- Les fillers siliceux.
- Les fumées de silice.
- Les cendres volantes.
- Les laitiers de haut fourneau.

Ces deux derniers permettent d'obtenir un maintien d'ouvrabilité plus long.

I.7.3. L'utilisation de super plastifiants

Pour améliorer la fluidité d'un BAP, il est indispensable d'employer un superplastifiant. Ce dernier accroît la capacité d'ouverture du béton tout en diminuant sa viscosité. Ainsi, le matériau perd sa stabilité en termes de ségrégation et de ressuage [25].

I.7.4. Un faible volume de gravillons

Lorsque le béton circule dans des zones confinées, les granulats de grande taille ont tendance à entraver le passage et à entraver le déplacement du béton. Afin de réduire les risques de blocage, il est recommandé d'utiliser des granulats dont le diamètre est inférieur à 20 mm (le diamètre maximal doit être compris entre 10 et 20 mm).

Le rapport massique gravier/sable est proche de 1 pour les BAP [25].

I.8. Les formulations des BAP

La formulation d'une BAP est beaucoup plus complexe, car, d'abord, les composants sont au nombre minimum de six, contrairement aux BO. Par la suite, le cahier des charges d'un BAP comprend davantage de dispositions, notamment lorsqu'il est en état frais ; il est nécessaire de garantir, en plus de l'étendue, la capacité de remplissage et la stabilité. Finalement, et surtout, les individus.

Les caractéristiques des BAP sont incompatibles ; un béton qui contient une pâte fluide est extrêmement sensible à la ségrégation [28].

Depuis l'apparition du BAP, aucune méthode pratique de formation n'a été développée. Les différentes caractéristiques recherchées rendent la formulation du BAP assez complexe. Différentes méthodes ont été élaborées à travers le monde pour la création d'un BAP. Nous présentons un aperçu global des méthodes principales.[29].

I.8.1. Méthode japonaise

Les BAP sont formulés de manière sécuritaire en utilisant l'approche développée à l'Université de Kochi (1990), en mettant l'accent sur le volume de pâte plutôt que sur les granulats. Les granulats et donc l'objectif d'atteindre un optimum économique. La formulation et l'application des principes sont les suivants :

a) Les dosages de gravillons

Selon les chercheurs japonais, le risque de blocage est réduit lorsque le volume du gravillon pour 1 m³ de béton est réduit à la moitié de sa taille. La compacité d'un mélange de grains correspond, par définition, au rapport entre le volume des grains et le volume total du système grains + vides. Il est évident que cela dépend du mode de compactage.

b) Dosage du sable

Le volume des eaux usées est fixé à 40 % du volume du mortier du béton. La fluidité du béton est assurée grâce à la diminution des frictions entre les granules.

c) Dosage du liant

Il n'est pas indiqué dans la méthode comment doser le liant. Cependant, il est possible de déterminer la quantité de ciment en se basant, par exemple, sur les normes (soit une masse minimale de ciment de 350 kg/m³). Il est également possible de choisir les rapports massiques d'eau sur ciment (E/C) et de filler sur ciment (F/C) en fonction des critères de résistance.

d) Dosage de l'eau et du super plastifiant

Les quantités d'eau et de super plastifiant sont calculées en effectuant des essais sur le terrain, avec un volume de l'eau fixé à 40%. Des mesures d'extension sont effectuées à l'aide d'un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir [29].



Figure I.6 : Taux de saturation par Super plastifiant (Conne de March).

I.8.2. L'approche de Suédoise

Le principe de cette méthode repose sur la méthode japonaise mentionnée précédemment, qui consiste à intégrer l'approche de l'évaluation du risque de blocage dans le processus de formulation. Après avoir calculé le rapport G/S, nous estimerons le volume de pâte nécessaire pour le blocage. Ensuite, nous vérifierons les propriétés rhéologiques recherchées en utilisant le rapport G/S. Les quantités de fines, d'eau et de super plastifiant sont spécifiées afin d'obtenir une viscosité adéquate, un faible taux de décalage et une résistance souhaitée. Cette méthode permet d'optimiser davantage le squelette. Granulaire. Toutefois, le critère de blocage n'est pas applicable à tous les granulats [29].

I.8.3. Formulation minimale par volume de pâte

Le béton est perçu comme un matériau composé de deux phases, avec une phase solide composée de granulats et une phase liquide qui est la pâte (eau, liant, adjuvants).

Selon les chercheurs, la pâte joue deux rôles principaux dans le cadre du BAP :D'un côté, cela garantit la fluidité du mélange, ce qui réduit les frottements entre les granulats, et de l'autre, cela élimine les gravillons afin d'éviter le blocage. Afin de garantir ces deux fonctions, les chercheurs estiment qu'il est nécessaire d'avoir un volume minimum de pâte [30].

I. 8.4. Formulation par optimisation du squelette granulaire

Étant donné que la résistance à la compression augmente en fonction de la granulométrie de la pâte et que l'ouvrabilité dépend de la structure du squelette granulaire. Le processus de fabrication des bétons repose sur l'amélioration de la porosité du système, en tenant compte de tous les types de grains solides, allant du ciment aux gravillons. Si l'eau de gâchage est utilisée comme phase interstitielle, et non pas la pâte. La suspension est plus fluide lorsque la quantité d'eau qui écarte les grains est élevée. Si l'on maintient une quantité d'eau constante, on réduit la porosité de l'empilement de grains et on optimise ainsi le volume d'eau disponible pour faciliter la fluidification du mélange. Le lien entre compacité et rhéologie est donc illustré par cet exemple simple [30].

I.8.5. Méthode Française

Méthode de la LCPC française :

Le LCPC a développé un modèle mathématique basé sur un modèle de suspension solide (RENE LCPC). Ce modèle repose sur les relations microscopiques entre les divers éléments du mélange. Il offre la possibilité de prédire la granulométrie d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% en utilisant les composants suivants :

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

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

- La proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple) le dosage, à saturation, du super plastifiant est déterminé. Selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente.
- Le besoin en eau de ce mélange (en présence du super plastifiant) est déterminé les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (Effet de paroi).
- La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante. Les proportions granulats/ phase liante sont optimisées.

Une formulation de béton auto plaçant est donc proposée basée sur les prévisions du modèle.

La teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée. Le dosage en super plastifiant est ajusté également afin d'obtenir la valeur d'étalement et le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent les propriétés requises pour le béton auto plaçant sont atteintes [31].

I.9. Caractérisation des BAP à l'état frais

Pour aborder les diverses caractéristiques et les méthodes de contrôle des bétons autoplaçant, nous examinerons les caractéristiques principales recherchées ainsi que les paramètres qui les régulent :

I.9.1. Les Propriétés Essentielles Recherchées

La composition de la pâte de ciment et celle du mélange de béton sont étroitement liées à la rhéologie du béton frais. L'un des avantages des bétons autoplaçants sera d'améliorer la maniabilité du mélange, qui peut être évaluée en mesure de mesurer le diamètre d'étalement du béton. Cela permettra de remplir les coffrages sans avoir besoin de vibrations (l'étalement et la mise en place du béton se font uniquement sous l'effet de la gravité) [32].

La compacité du béton est une caractéristique recherchée pour obtenir une structure homogène, Ce qui permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques et la longévité du béton durci. Les chercheurs ont également pour objectif de garantir la stabilité des bétons autoplaçants en proposant diverses solutions (comme l'utilisation d'agents colloïdaux et de superplastifiants), car en général, il est assez difficile de garantir le critère de fluidité-stabilité [32].

Par stabilité on entend ; la résistance à la ségrégation, à la sédimentation et au ressuage. Aussi, lors de sa mise en place les BAP ne doivent pas présenter des phénomènes de blocage (encombrement des granulats aux alentours des zones ferraillées).

Un BAP est donc, un béton qui est capable de remplir les coffrages les plus complexes (de par leurs formes) et les plus ferraillés (densité d'armatures considérable) sans avoir recours à d'autres moyens de mise en place que l'effet du poids propre du béton même. Ce béton n'aurait en aucun cas présenter de ségrégation ni de blocage de l'écoulement.

Selon Khayat [33] les propriétés essentielles des BAP frais sont :

- Une excellente Fluidité.
- Une bonne stabilité.
- Un risque minime de blocage.

Dans la réalité, il est primordial de vérifier que le béton a réellement les caractéristiques qu'on lui attribue. Il y a de nombreuses études empiriques et rhéologiques disponibles pour évaluer les diverses caractéristiques du béton auto plaçant [33].

I.9.2. Les principaux essais de caractérisation des BAP

I.9.2.1. Essai d'étalement

L'essai d'étalement s'est imposé comme l'essai le plus facile à réaliser, il permet de mesurer la consistance d'un béton. Cet essai s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams (figure I.7).

Cependant l'affaissement étant toujours supérieur à 25 cm, le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue après une minute est mesuré, ainsi que le temps nécessaire pour obtenir le diamètre d'une galette de 50 cm. Cette valeur finale permet d'avoir une idée de la viscosité du matériau. Une observation permet aussi d'évaluer la présence ou non d'une ségrégation horizontale. Cette expérience pratique sur le terrain ne requiert qu'un petit échantillon de béton. En général, on vise une taille de 60 à 75 cm pour obtenir un BAP [34].

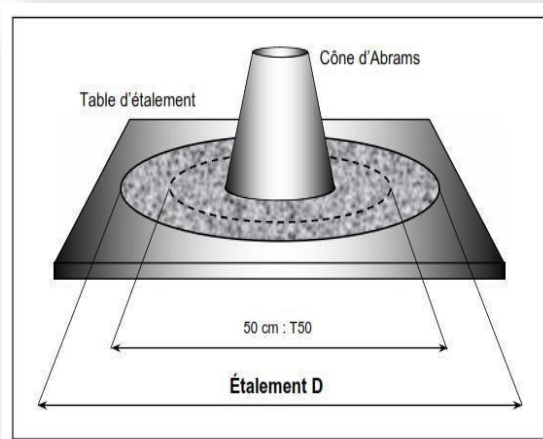


Figure I.7 : Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow) [34]

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

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

l'homogénéité du béton.

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

I.9.2.2. Essai de la boîte en L (L-box test)

Cet essai permet, comme l'essai à l'anneau japonais, de définir la mobilité en milieu confiné, c'est-à-dire la ségrégation dynamique.

Le béton est appliqué en une seule fois à la partie verticale du L (Figure I.8). Une fois que la trappe est ouverte, le béton s'écoule à travers un ferrailage standard (39 mm entre 3 barres Ø 14) qui correspond à des constructions très lourdes, mais qui peut éventuellement être réduit (58 mm d'espace entre deux barres).

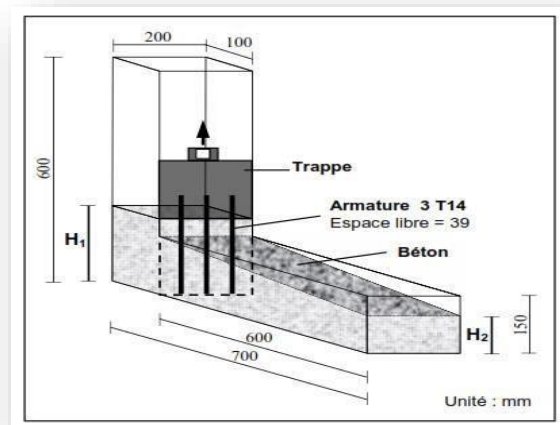


Figure I.8 : Essai de la boîte en L (L-box test) [34]

Afin d'obtenir l'acceptation du béton auto plaçant, il est nécessaire que le taux de remplissage de la boîte en L dépasse 0,8. Il est également possible de mesurer les temps d'écoulement afin d'évaluer la viscosité du béton [34].

I.9.2.3. Essai de stabilité au tamis

Aussi connu sous le nom d'essai de caractérisation de la ségrégation des bétons auto plaçant, il a pour objectif de donner une évaluation du risque de ségrégation des bétons auto plaçant (Figure I.9). Il peut être employé lors de l'élaboration d'un béton auto plaçant en laboratoire, ou pour vérifier la stabilité du béton livré sur le chantier [35].

Cet essai rassemble les expériences qui permettent d'évaluer la mobilité, que ce soit en milieu confiné ou non, en évaluant la stabilité. Le processus implique d'évaluer le taux de laitance (P laitance) d'un échantillon de béton ($4,8 \pm 0,2$ kg) qui passe à travers un tamis de 5 mm.

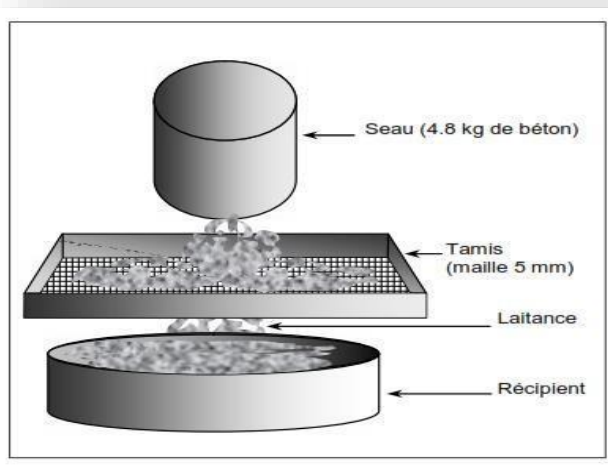


Figure I.9 : Essai de stabilité au tamis [35].

Il existe trois classes de critères d'acceptabilité pour une formulation de béton auto plaçant [34] :

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

I.9.2.4. Essai d'entonnoir (V-Funnel NF EN 12350-9)

L'essai avec l'entonnoir se déroule de la manière suivante : l'entonnoir, dont les dimensions sont indiquées sur la figure I. 10, est rempli de béton jusqu'en haut. Ensuite, on ouvre le clapet de fermeture à sa base, ce qui entraîne l'écoulement du béton, dont on évalue le temps requis jusqu'à ce que l'entonnoir soit complètement vidé. Souvent, ce temps d'écoulement est employé pour évaluer la viscosité du béton auto plaçant. Au fur et à mesure que le béton s'écoule rapidement hors de

l'entonnoir, sa viscosité diminue. Il est conseillé d'avoir un temps d'écoulement de 8 à 14 secondes pour le BAP [36].

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

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

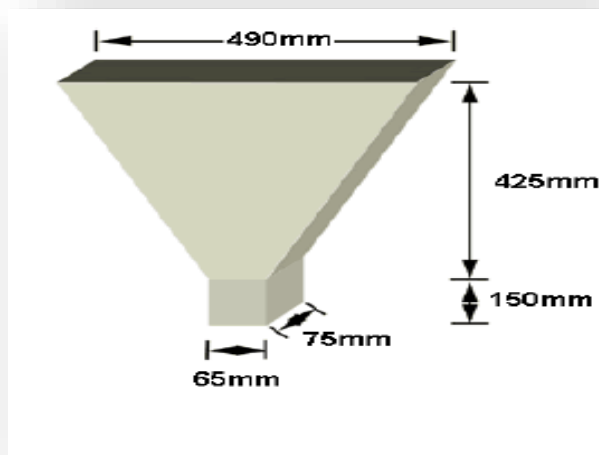


Figure I.10 : L'essai V- funnel [36].

I. 9.2.5. Essai de ressuage

La capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié (développé par le LCPC (figure I.11) le volume d'eau libéré par l'échantillon de béton remonte au-dessus du perchloréthylène (dont la densité est supérieure à celle de l'eau : 1,59) dans une colonne graduée où il est facile de l'estimer [37], ce test semble cependant peu pratique à être utilisé étant donné la nocivité du produit employé.

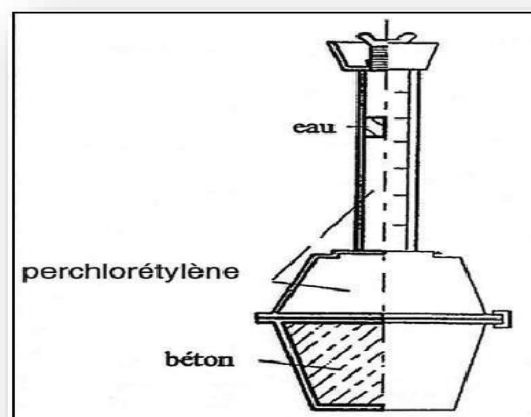


Figure I.11 . Essai de ressuage[37].

I.9.2.6. Essai J-Ring

L'objectif de cette expérience est de faire circuler le béton à travers des barres d'armatures pour évaluer sa tendance à se bloquer. Le béton s'écoule à partir du cône situé au centre d'un anneau métallique (figure I.12). Ainsi, on peut évaluer la tendance à la ségrégation et à l'enrobage des armatures. De plus, il est important que la répartition des granulats soit homogène [36].

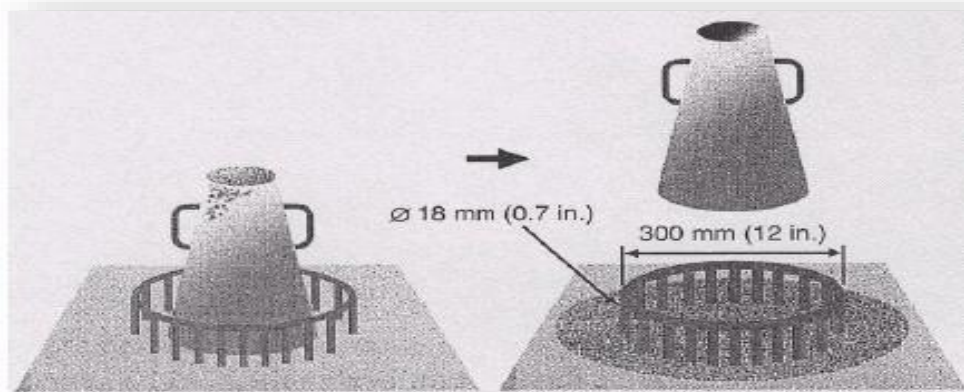


Figure I.12 : Essai J .Ring[36].

I.9.2.7. Essai à la boîte en U (U-Box)

Il est utilisé au Japon et en Angleterre, le principe est sensiblement le même que pour la boîte en L, le béton doit s'écouler à travers des armatures et remonter dans la deuxième partie du **U de la boîte**, une hauteur de remplissage supérieure à 300 mm est requise [38].

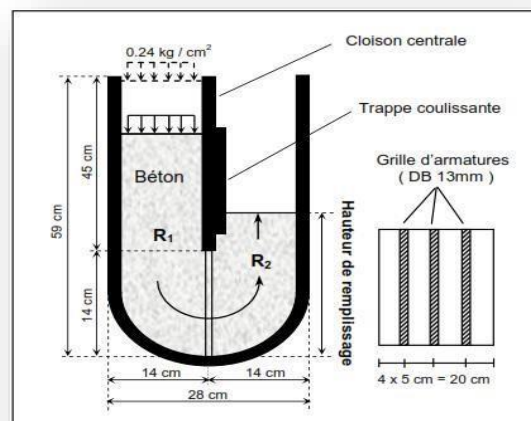


Figure I.13 : Essai de la boîte en U[38].

I.9.2.8. Essai à la colonne

Le centre ACM de l'université de Paisley (en 2002) et l'université de Ghent (en 2001) ont développé cet essai de manière autonome.

Après avoir rempli une colonne et laissé le matériau reposer pendant une minute, la colonne est vibrée à l'aide d'une table à secousses. Les échantillons des différentes parties de la colonne (haut, milieu, fond) sont prélevés, chaque prélèvement est effectué à l'aide d'une table à secousses.

Les granulats sont séparés et tamisés pour ne retenir que les gros granulats qui sont ensuite pesés [38].

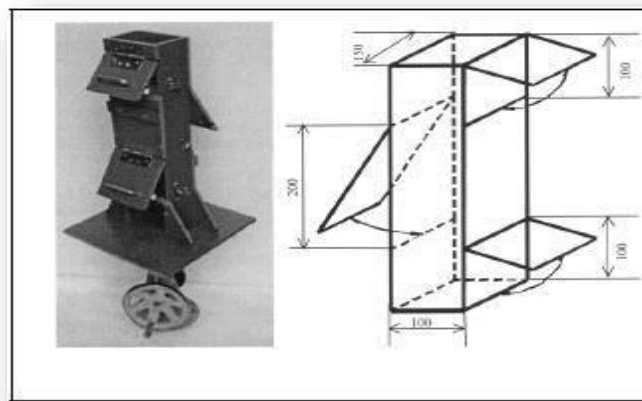


Figure I.14 : Essai de stabilité à la colonne [39].

Le critère de stabilité de cet essai est le suivant :

- Si le rapport entre la masse de l'échantillon supérieur/ masse de l'échantillon inférieur est supérieur à 0,95 alors le béton a une bonne résistance à la ségrégation
- Si ce rapport est inférieur à 0,9 il y a un risque de ségrégation du béton.
- Cet essai permet d'obtenir une certaine appréciation de la ségrégation (gradation de la ségrégation). Le principe est simple et les résultats sont obtenus directement. Cependant, la réalisation d'un essai nécessite un appareillage spécifique (colonne et balances pour les pesées) et prend du temps [38].

I.9.2.9. Essai à la bille

Trudel et Sedran ont développé l'essai au LCPC en collaboration avec l'Université de Sherbrooke. L'objectif est de mesurer l'enfoncement d'une bille de même taille que les gros granulats, immergée dans un échantillon de béton (figure I.15). La densité apparente de la bille peut être ajustée grâce à un contrepoids, tandis que le déplacement de la bille est mesuré à l'aide d'un capteur LVDT connecté à

un ordinateur. Ainsi, les résultats sont directement obtenus [38].

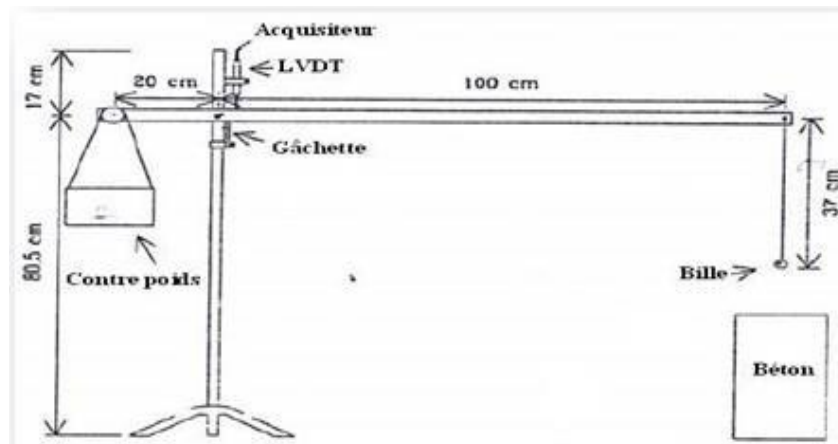


Figure I.15 : Essai à la bille développé par Trude [40].

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

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

I. 10.1. Les essais destructifs

- Les essais de compression ;
- Les essais de traction par flexion ;
- Module d'élasticité ;

I. 10.2. Les essais non destructifs

- Essai au scléromètre ;
- Essai d'auscultation dynamique ;

I.10.1. Les essais destructifs du béton

I.10.1.1. Essais de compression

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

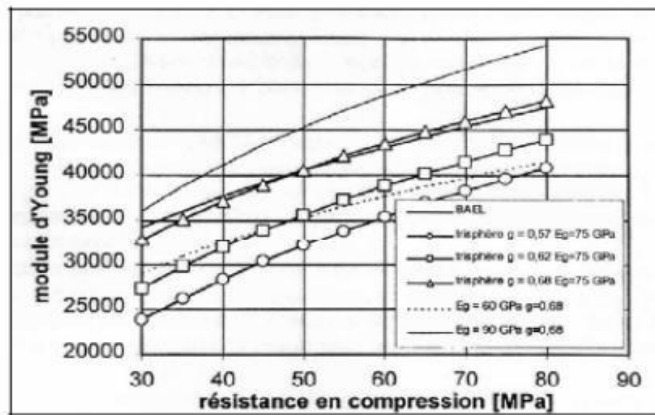


Figure I.16: Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire [41].



Figure I.17 : Mesure de la résistance à la compression.

I. 10.1.2. Essais de traction par flexion

Cet essai très utilisé permet de simuler le type de sollicitation le plus courant dans les éléments des ouvrages (figure I.18). Les éprouvettes utilisées pour ce type d'essai sont proprement uniquement aux mortiers, elles sont prismatiques de dimensions 7x7x28 cm. La résistance à la traction par flexion est obtenue par l'application de la formule de résistance des matériaux

Suivante : $\sigma = \frac{M}{I}$ et la relation du moment de flexion s'écrit $M = F \cdot L/4$:

Où F : Charge de rupture, L : Portée, I : Inertie de flexion et a : Côté du prisme [6].



Figure I.18 : Mesure de la résistance à la traction par flexion.

I.10.1.3. Module d'élasticité

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

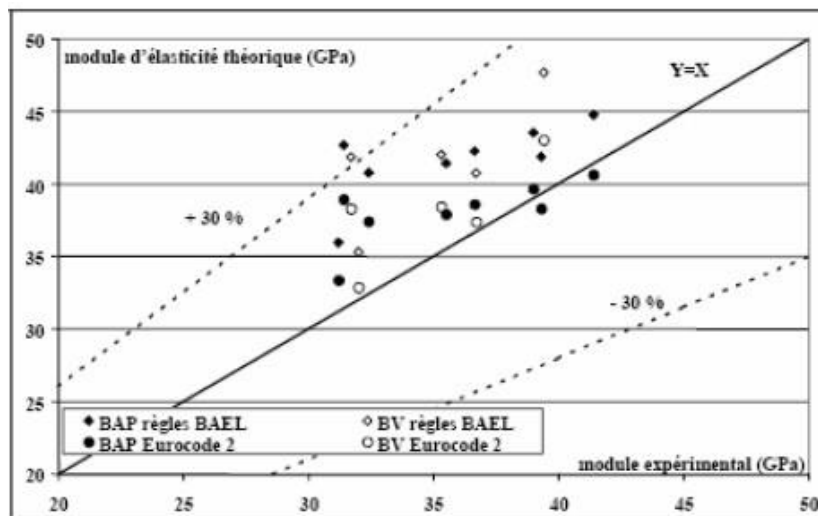


Figure I.19 : Comparaison des modules élastiques théoriques et expérimentaux de BAP et de Bétons vibrés [42].

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

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

I.10.2. Essais non destructifs du béton

I.10.2.1. Essai d'auscultation dynamique

Cet essai, bien connu depuis longtemps, permet d'évaluer la vitesse de propagation des impulsions ultrasoniques qui traversent le béton. (Figure I.20) [44].



Figure I.20 : Appareil d'auscultation sonique.

10.2.1.1. Principe d'auscultation dynamique [NF EN 12504-4] :

La méthode consiste à déterminer le temps requis pour une onde pour parcourir une distance spécifique. Un générateur d'impulsions et un récepteur d'impulsions forment l'ensemble des appareils. La fréquence du générateur d'ondes varie de 10 à 150 Hz. Toutefois, certains facteurs influencent la prise de mesures [44] :

- Les sons se propagent plus rapidement à travers un vide contenant de l'eau qu'à travers un vide contenant de l'air.
- Il est conseillé d'utiliser un matériau intermédiaire entre le béton et les transducteurs pour que la surface sur laquelle l'essai est réalisé soit parfaitement adaptée à la forme de l'appareil qui lui est appliqué.
- La vitesse des impulsions augmente lorsque les températures sont inférieures au point de congélation

en raison du gel de l'eau. Cependant, entre 5 et 30°C, la vitesse des impulsions n'est pas influencée par la température.

10.2.1.2. Détermination de la vitesse de propagation des ondes

En relation principalement avec la masse volumique et le coefficient dynamique du béton. Selon l'équation ci-dessous :

$$v^2 = \frac{E_d \cdot (1 - \nu)}{\rho(1 + \nu) \cdot \nu}$$

Un certain nombre de facteurs influencent la corrélation entre la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques et la résistance à la compression, tels que l'âge du béton et les conditions.

La concentration d'humidité, la proportion des granulats par rapport au ciment, le type de granulats, la localisation des aciers et les fissures [44].

Tableau I.1 : Qualité du béton et vitesse de propagation des impulsions selon Leslie.

Qualité	Excellent	Bonne	Douteuse	Mauvaise	Très mauvaise
Vitesse de propagation m/s	Supérieure à 4000	3200- 4000	2500- 3200	1700- 2500	Inférieure à 1700

10.2.1.3. Manières de mesure :

a) Mesures En Transparence (Directe) :

Sont utilisées dans le cas des éprouvettes, poteaux ou de certaines poutres. Les transducteurs sont appliqués sur les deux faces de l'élément à tester [44].

b) Mesures en surface (indirecte) :

Les dalles et les éléments en longueur sont utilisés avec l'émetteur fixé en un point, tandis que le récepteur est déplacé successivement à des distances prédéterminées. Une fois que le temps a été relevé pour un point donné, on passe au point suivant [44].

c) Mesures semi directes :

Principalement utilisées sur les éléments de structure où les autres méthodes ne peuvent pas être utilisées [44].

10.2.1.4. Les avantages d'essai d'auscultation dynamique :

- C'est une approche parfaite pour évaluer l'uniformité du béton.
- L'énorme bénéfice de la mesure des ondes sonores réside dans sa capacité à fournir des données sur l'intérieur d'un élément en béton.
- L'utilisation de l'essai de propagation des ultrasons peut permettre de surveiller les modifications microstructurales dans un élément, comme après des cycles de gel/dégel répétés [44].

10.2.1.5. Les inconvénients d'essai d'auscultation dynamique :

- Cependant, ces expériences ne sont pas aussi performantes pour évaluer la résistance en raison du nombre élevé de variables qui influencent la corrélation entre la résistance et la vitesse de propagation des impulsions.
- La fiabilité des résultats dépend de l'exactitude de l'étalonnage et de l'homogénéité de la composition du béton de l'ouvrage [44].

I. 11. Durabilité de BAP

I.11.1. Introduction

La pérennité des bétons revêt également une grande importance. Effectivement, malgré le choix de la résistance mécanique comme critère d'équivalence entre les différents bétons, l'objectif de cette étude concerne l'estimation de la durabilité des bétons auto plaçant.

On peut donc définir la durabilité comme la capacité du béton à résister aux agressions chimiques ou physiques, tout en maintenant son comportement et ses performances dans les conditions de service optimales prévues pour l'ouvrage. Dans la plupart des cas, les agressions chimiques sur le béton ont d'abord un impact sur la pâte de ciment. Il est possible d'identifier le béton, le mortier et la pâte de ciment hydraté comme des matériaux multiphasiques qui se composent d'une phase solide (comme les granulats et les hydrates) et d'une phase liquide (comme la solution interstitielle) ainsi que d'une phase gazeuse (comme l'air sec, la vapeur d'eau, le CO₂...) qui se trouvent à l'intérieur du matériau solide. [45].

I.11.2. Facteurs Influençant la durabilité :

Diverses actions physiques ou chimiques néfastes peuvent compromettre la durabilité du béton en perturbant l'écoulement de fluides (liquides ou gaz). Ainsi, pour évaluer les dimensions et comparer les BAP avec les bétons vibrés, il est essentiel de déterminer certaines caractéristiques physico-chimiques.

Le processus de dégradation chimique du béton implique une dégradation graduelle du béton lorsque celui-ci est exposé à un environnement agressif. La détérioration entraîne une hausse de la porosité du béton, ce qui affecte ses caractéristiques physicochimiques et mécaniques.

D'une part Cette porosité accrue accélère d'une part le transport (perméabilité ou diffusion) de matières et accélère la dissolution des hydrates (en particulier la portlandite). Par ailleurs, cela entraîne une altération des caractéristiques mécaniques telles que la diminution de la résistance et la diminution de la rigidité. De plus, les forces mécaniques provoquent la formation de microfissures qui peuvent accélérer le processus de dégradation chimique.

La perméabilité, la diffusion et l'absorption sont les trois principales étapes qui peuvent conduire à l'infiltration de substances agressives dans le béton et à altérer ses caractéristiques mécaniques et protectrices (principalement en ce qui concerne la corrosion des armatures). Le transfert de matière causé par un gradient de pression est responsable de la perméabilité, tandis que la diffusion est le processus par lequel un fluide se déplace sous l'influence d'un gradient de concentration, et l'absorption est le résultat de la différence de tension de surface dans les capillaires. Par ailleurs, les trois fluides naturels susceptibles de se déplacer selon les procédés mentionnés précédemment et compromettre la résistance du béton sont : l'oxygène, l'eau (qui peut contenir ou non des ions agressifs) et le dioxyde de carbone.

Selon les trois mécanismes d'écoulement possibles, la durabilité du béton repose sur sa capacité à résister à la pénétration de ces fluides à l'intérieur du matériau [46].

I.11.3. Porosité accessible à l'eau (AFPC-AFREM, 1998) (NF P 18 – 459) :

La porosité se présente comme le premier élément essentiel dans la caractérisation des bétons. Il est crucial de restreindre la porosité car elle a un impact sur la résistance des constructions et peut entraîner une diminution de la capacité structurale en impactant la résistance en compression et d'autres caractéristiques du béton.

Au fil du temps, la porosité diminue en fonction de l'hydratation du ciment. La porosité joue un rôle essentiel dans les paramètres de transfert tels que la diffusivité ou la perméabilité.

Toutefois, deux bétons peuvent présenter des diffusivités ou des perméabilités différentes pour une même porosité. Effectivement, le pourcentage de vides dans un matériau n'est pas un indicateur adéquat pour évaluer les caractéristiques de transfert des bétons. Deux autres critères doivent être pris en compte :

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

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

L'ensemble des pores (cf. Figure I.21) est constitué :

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

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

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

- Ce n'est pas seulement la valeur de la porosité globale et la taille des pores qui influencent les propriétés de transfert des matériaux, mais également la connectivité et la tortuosité.
- Des pores. Selon Mehta [47]. Trois familles de pores sont identifiées en fonction de l'interconnexion du réseau :
- Les pores interconnectés qui forment un espace continu dans le milieu poreux et qui ont un impact majeur sur les propriétés de transport du matériau.
- Les pores isolés (ou occlus) qui constituent la porosité fermée et ne communiquent pas avec le milieu extérieur.
- Les pores aveugles (ou bras morts) et qui sont connectés uniquement par une voie accessible à un fluide extérieur et qui ne participent pas au transport.
- Calcul de la porosité accessible à l'eau

$$Peau = \{(M_{air} - M_{sec}) / (M_{air} - M_{eau})\} \times 100.$$

Où

Mair : la masse saturée (kg).

Msec : la masse sèche(kg).

Meau : la masse hydrostique(kg).



Figure I.21 : Essai de porosité accessible à l'eau

I.11.4. L'Indicateurs de substitution à l'absorption d'eau par capillarité (AFPC,1997)

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

Ce mécanisme de transfert d'eau dépend, d'une part de la structure poreuse et d'autre part de l'humidité relative du béton. L'absorption capillaire dépend essentiellement de la porosité du béton et de la taille des pores selon la loi de Jurin [48].

Le coefficient d'absorption capillaire est défini par l'équation suivante :

$$C = \frac{M_2 - M_1}{A} \quad (\text{Kg/ m}^2)$$

OÙ

M2 : La masse de l'éprouvette saturée d'eau(kg).

M1 : La masse initiale de l'éprouvette (kg).

A : Section de l'éprouvette (m²).

I.12. Conclusion

Cette synthèse bibliographique a été menée afin de se familiariser avec les bétons auto plaçant.

Il s'agit de les définir et de leurs nombreuses caractéristiques, de les caractériser et de résumer les principales approches de leur formulation.

Le béton auto plaçant se forme de manière autonome grâce à l'effet gravitaire, sans nécessiter d'énergie de compactage (comme les vibrations ou les dommages).

Les propriétés caractéristiques de ce béton à l'état frais sont :

- Fluidité et viscosité élevées, sans aucune tendance à la ségrégation.
- Réduction du cout de main d'œuvre et du temps de bétonnage.
- La capacité à combler les moindres recoins du coffrage avec un béton homogène est remarquable, même en présence de ferrailage dense. Le laborieux processus de vibration est donc éliminé.

Un béton est considéré comme auto plaçant lorsqu'il remplit ces trois critères. De cette manière, de nombreux tests empiriques sont élaborés afin de définir les caractéristiques du béton en ce qui concerne sa capacité à être ouvré.

Chapitre II.
***Récupération et valorisation
des déchets***

II.1. Introduction

Depuis quelques décennies, l'activité du bâtiment et des travaux publics a augmenté, ce qui entraîne une augmentation du volume des déchets provenant des chantiers. La pollution globale du pays est grandement influencée par l'industrie en Algérie, en particulier l'industrie pétrochimique, chimique, métallurgique et de traitement des minerais. Dans le domaine du génie civil, la valorisation des déchets revêt une importance capitale car les produits que l'on souhaite obtenir ne sont pas soumis à des critères de qualité trop stricts. Le processus de recyclage des déchets a deux conséquences majeures, à savoir l'impact sur l'environnement et l'impact économique.

Avant de mettre en valeur un déchet, il est nécessaire d'en avoir connaissance, de l'analyser, de caractériser son état actuel et son comportement dans le temps, ainsi que d'évaluer sa gestion. Il est donc question de "mesurer pour comprendre et comprendre pour agir". La prise en compte globale du déchet permettra de déterminer son avenir, en déterminant le type de valorisation à adopter. « Chaque individu qui génère ou possède des déchets, dans des circonstances susceptibles de causer des dommages au sol, à la flore et à la faune, de dégrader les sites ou les paysages, de polluer l'air ou les eaux, de produire des bruits et des odeurs, et, de manière générale, de porter atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement, est tenu de les éliminer ou de les faire éliminer conformément aux dispositions du Code de l'Environnement, dans des conditions visant à prévenir ces effets. » [49].

II.2. Revue sur le recyclage des déchets

Étant donné l'épuisement effrayant des ressources naturelles de la planète, il est nécessaire d'adopter de nombreuses techniques visant à réduire leur utilisation ou à les réutiliser ou à les recycler en d'autres matériaux pouvant être utilisés dans le même domaine d'où ils ont été extraits, ou dans un autre domaine.

Les résultats du recyclage des déchets ne se limitent pas à réduire leur taille et à maîtriser le problème, mais à le dépasser pour obtenir des bénéfices économiques et des opportunités précieuses pour l'économie, tels que la création d'emplois dans le secteur du travail.

La mise en valeur des déchets de construction est un domaine crucial car les produits que l'on souhaite obtenir ne sont pas soumis à des normes de qualité très rigoureuses. De nombreux déchets sont même utilisés dans le secteur de la construction, notamment dans le ciment ou le béton, tels que la poudre, la fibre ou les granulats.

Si nous avons connaissance du fait que les déchets de construction et de démolition à la fin de la vie utile des bâtiments et des installations représentent entre 10 et 30% de la quantité de déchets destinés aux

décharges sanitaires, il sera évident que ces déchets ont un impact environnemental significatif. Il a été observé que 65% de ces déchets sont des déchets de béton et d'agrégats. Grossier (grain). Il convient de souligner que le sujet revêt une grande importance pour les pays confrontés à des conflits et des crises, car ils génèrent des tonnes de déchets de construction et de démolition suite à des bombardements avec différentes armes. Selon des études, il a été démontré que 80 à 90% des déchets de démolition, y compris les déchets de béton, peuvent être recyclés. En général, le béton, qui est produit à partir d'agrégats recyclés, présente de bonnes caractéristiques de traitement, de résistance et d'antigel. Selon la résistance du béton initial et le rapport eau/liant du béton neuf, la résistance à la compression va varier. En général, les déchets de briques constituent un mortier de sable qui présente une excellente résistance au gel, à la décongélation, au séchage et aux eaux usées.

Par ailleurs, il y a les déchets plastiques, c'est-à-dire les déchets provenant des processus de production, de transformation et de consommation, ainsi que les produits plastiques, en particulier les pneumatiques abandonnés utilisés dans les travaux routiers et le génie civil [50].

II.3. Les différents types des déchets

II.3.1. Déchets ultimes

Les déchets ultimes ont été introduits par la loi du 13 juillet 1992 et ont été définis comme étant : « un déchet, qu'il provienne ou non du traitement d'un déchet, qui ne peut plus être traité dans les conditions techniques et économiques actuelles, comme l'extraction de la part valorisable ou la diminution de son caractère polluant ou dangereux. » Seuls les déchets qui n'ont pas pu être recyclés ou incinérés avec récupération d'énergie pourront être déposés dans des décharges à l'avenir.

Les mâchefers sont des déchets résiduels issus des usines d'incinération d'ordures ménagères et de déchets assimilés, qui peuvent être convertis en granulats et utilisés pour la construction des fondations de routes [51].

II.3.2. Déchets ménagers et assimilés

Cette expression englobe tous les déchets générés dans notre vie quotidienne : emballages, restes de repas, appareils électroménagers, vieux meubles, déchets verts, vêtements anciens, ... [52].

II.3.3. Déchets inertes

Déchet qui ne subit aucune transformation physique, chimique ou biologique significative, ne se décompose pas, ne brûle pas, ne produit aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles il entre en contact, de manière qui pourrait entraîner une pollution de l'environnement ou nuire à la santé humaine. Les installations de stockage peuvent accepter ces déchets provenant principalement des chantiers de construction et de travaux publics, ainsi que des industries de

fabrication de matériaux de construction. Il s'agit en particulier des déchets suivants :

Les matériaux tels que le béton, les tuiles et les céramiques, les briques, les déchets de verre, les terres, les revêtements bitumeux [53].

a) Déchets industriels spéciaux (DIS) :

Ces déchets sont présents en raison de leurs caractéristiques dangereuses, telles que l'arsenic, le plomb, les boues de peinture, les hydrocarbures, les déchets de l'industrie pétrolière, etc.

b) Déchets ménagers spéciaux (DMS) :

Il s'agit des déchets dangereux présents dans les déchets domestiques, comme les aérosols, les colles, les détergents, les détachants insecticides, les peintures, les piles, les tubes néon et les produits de nettoyage. Il peut s'agir de ce que l'on désigne aussi sous le nom de DTQS : résidus toxiques en grande quantité répartis [54].

c) Déchets non dangereux des activités économiques

Ce sont des déchets d'entreprises qui ressemblent, par leur nature et leur composition, aux déchets domestiques tels que les déchets liés aux activités commerciales, les déchets de construction et les déchets des services publics (école, administration, etc.). D'après la loi, ils sont considérés comme "comme des déchets ménagers" et peuvent donc être collectés et éliminés comme des déchets ménagers [52].

II.3.4. Les déchets industriels banals (DIB)

Les déchets non dangereux produits par les industriels et les entreprises du commerce, de l'artisanat, des services et de l'administration, de la métallurgie, de la peinture, de la chimie et de la pétrochimie sont regroupés dans ces registres. Les déchets d'emballage, les déchets d'entretien et les équipements en fin de vie sont concernés.

Les déchets non dangereux et non inertes, également appelés déchets industriels ordinaires, sont similaires aux déchets ménagers. Il s'agit de :

- Les bois non traités ou traités avec des substances non nocives (comme les emballages, les coffrages, les menuiseries, les planchers...).
- Les matériaux plastiques tels que le PVC, le polystyrène et le polypropylène (canalisations, menuiseries, revêtements de sols, emballages...)
- L'aluminium, le cuivre, l'acier, le zinc (toitures, équipements électriques, canalisations, équipements...), ainsi que d'autres métaux ferreux et non ferreux.
- Les matériaux textiles pour les murs et le sol,
- Le polystyrène expansé, le polyuréthane,
- Les produits mélangés provenant de chantiers de rénovation...

- Les couleurs, les vernis, les colles, les mastics, qui ne contiennent ni solvants organiques ni substances nocives [54].

II.3.5. Les déchets médicaux et pharmaceutiques

Tous les déchets provenant des activités de diagnostic, de suivi et de traitement préventif, palliatif ou curatif en médecine humaine ou vétérinaire, ainsi que tous les déchets provenant des activités des hôpitaux publics, des cliniques, des établissements de recherche scientifique, des laboratoires d'analyses opérant dans ces domaines et de tous les établissements similaires [55].

II.4. Recyclage des déchets

II.4.1. Définition de recyclage

Le recyclage consiste à traiter les déchets industriels et les déchets ménagers afin de réintroduire les matériaux qui constituent un produit dans le processus de production.

Deux impacts écologiques importants découlent du recyclage : la diminution du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. Il existe des méthodes simples et abordables, tandis que d'autres sont complexes, coûteuses et peu rentables. Le législateur intervient dans ce domaine lorsque les objectifs de l'écologie et ceux des consommateurs se rejoignent, mais parfois divergent. De cette manière, notamment depuis les années 70, le recyclage joue un rôle essentiel dans l'économie et les conditions de vie des pays industrialisés. Le recyclage fait partie de la stratégie des trois R pour le traitement des déchets :

- Réduire, qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets,
- Réutiliser, qui regroupe les procédés permettant de donner à un produit usagé un nouvel usage.
- Le recyclage joue un rôle essentiel dans la réduction des quantités de déchets à éliminer par enfouissement et incinération, mais il ne peut pas être suffisant pour faire face à l'augmentation de la production de déchets ou y être à peine suffisant. [56]

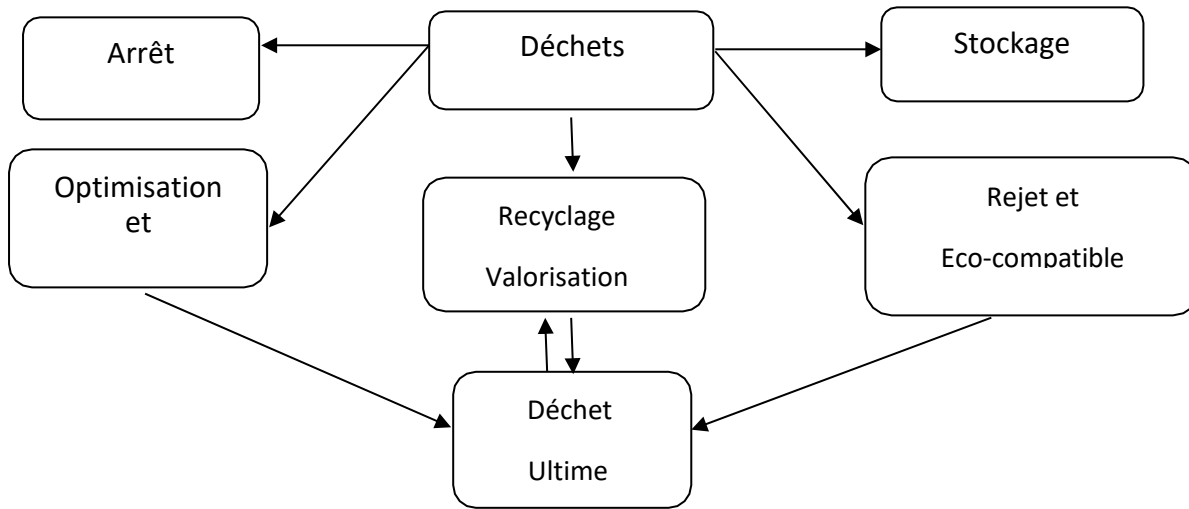


Figure II.1: Stratégies de traitement des déchets. [57]

Leur réalisation concrète implique la mise en place de plusieurs filières techniques, qui se concentrent sur les objectifs généraux suivants :

- Valorisation énergétique.
- Valorisation en matière première organique et minérale.
- Valorisation en science des matériaux.
- Valorisation en agriculture.
- Valorisation en technique de l'environnement.
- Technique dite d'élimination.

Les objectifs précédents sont illustrés dans la figure II.2

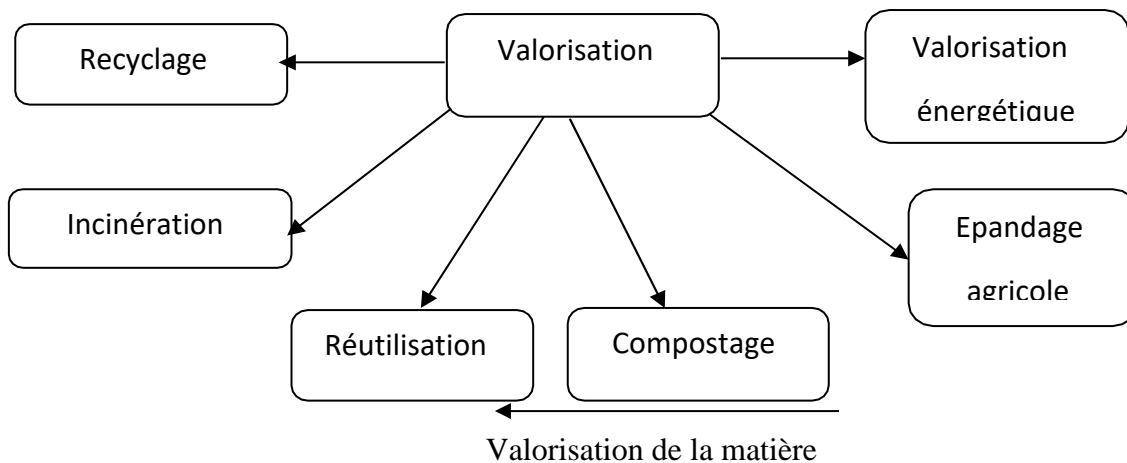


Figure II.2 : Valorisation des déchets [57].

II.4.2. Intérêt de recyclage

Le recyclage présente de nombreux avantages économiques et environnementaux : il assure la préservation des ressources, la diminution des déchets, la création d'emplois, la préservation de la nature et l'économie des matières premières.

L'extraction de matières premières est réduite grâce au recyclage :

- L'acier recyclé permet d'économiser du minerai de fer.
- Chaque tonne de plastique recyclé permet d'économiser 700 kg de pétrole brut.
- Le recyclage de 1 kg d'aluminium peut économiser environ 8 kg de bauxite, 4 kg de produits chimiques et 14 kWh d'électricité.
- L'aluminium est recyclable à 100% ; 1kg d'alu donne 1kg d'aluminium (après avoir été fondu).
- Chaque tonne de carton recyclé fait économiser 2,5 tonnes de bois.
- Chaque feuille de papier recyclé fait économiser 11l d'eau et 2,5 W d'électricité en plus de 15 g de bois [58].

II.5. Technique de recyclage

II.5.1. Etape de recyclage

Les procédures de récupération des déchets débutent par la collecte des déchets. Les déchets qui ne peuvent pas être recyclés sont brûlés ou stockés dans des centres d'enfouissement techniques. Les déchets collectés pour le recyclage ne sont pas destinés ni à être enfouis ni à être incinérés, mais plutôt à être transformés. La collecte est planifiée en conséquence.

La collecte sélective, également connue sous le nom de collecte sélective, est la méthode la plus courante pour collecter les déchets à recycler. La collecte sélective repose sur le principe suivant : celui qui génère le déchet le trie lui-même.

Une fois la collecte terminée, les déchets, qu'ils soient triés ou non, sont envoyés vers un centre de traitement où différentes opérations permettent de maximiser les opérations de transformation. L'une de ces opérations est le tri manuel [58].

II.5.2. Procédés du recyclage

Trois principales catégories de méthodes de recyclage existent : chimique, mécanique et organique. Le recyclage dit « chimique » fait appel à une réaction chimique afin de traiter les déchets, comme si certains composants étaient séparés. Le recyclage dit « mécanique » consiste à métamorphoser les déchets en utilisant une machine, comme pour les broyer. Le recyclage dit « naturel » implique la production d'engrais et de

carburant tels que le biogaz après le compostage ou la fermentation [59].

II.5.3. Gestion des déchets

Il est essentiel pour les autorités en charge de secteur de prendre en compte la gestion des déchets, car il est crucial de comprendre les divers types de déchets dangereux, leurs quantités, leur nature, les contraintes réglementaires, les risques sanitaires et leurs interactions. Différents objectifs définissent la disposition concernant la gestion des déchets [60] :

a. Prévention

Elle concerne :

- La réduction de la production de déchet ;
- La limitation de leur nocivité ;
- L'organisation de transport [61].

b. Réduction de la production à la source

Il s'agit de réduire au maximum les déchets lors de la production, de la distribution et de l'utilisation du produit. Le citoyen a la possibilité de participer à cette réduction en diminuant la quantité de déchets produite en utilisant des produits en vrac plutôt que des emballages, des produits durables plutôt que des produits jetables. C'est le mode le moins coûteux à adopter car il encourage notre façon de consommer et encourage les fabricants à opter pour d'autres méthodes de fabrication de produits [62].

c. Valorisation énergétique des déchets

Le recyclage, le réemploi, la récupération, l'utilisation des déchets comme source d'énergie ou toute autre action visant à obtenir des matières premières ou des produits réutilisables à partir de la récupération des déchets, dans le but de diminuer ou d'éliminer l'impact négatif de ces déchets sur l'environnement [63].

d. Elimination de déchet

Le niveau le plus bas de la gestion des déchets est l'élimination des déchets. Elle n'est destinée qu'aux déchets qui ne sont plus susceptibles d'être réutilisés, recyclés ou valorisés.

Il est essentiel de procéder à l'élimination des déchets dans des installations qui respectent les meilleures techniques disponibles dans ce domaine. Il est essentiel que les méthodes d'élimination soient adaptées à la nature des différentes fractions de déchets. Dans la mesure du possible et de l'avantageux, il est nécessaire de procéder au prétraitement des déchets à éliminer. Les buts sont principalement de modifier les caractéristiques des déchets afin de diminuer leur impact lors de leur élimination (par exemple, le traitement

biologique des déchets municipaux avant leur décharge) ou de séparer les différentes composantes des déchets afin de les soumettre aux opérations d'élimination les plus adaptées [64].

II.6. Différents déchets utilisés dans l'élaboration des bétons

II.6.1. Déchets de briques

Les briques sont des déchets provenant de l'industrie des produits rouges. Parmi les matériaux de construction les plus anciens, ces produits sont des produits céramiques utilisant des argiles comme matière première et parfois comme additifs. En général, les briques ont une forme parallélépipède rectangle. Deux catégories de briques existent : les briques en terre crue et les briques en terre cuite.

a. Briques en terre crue

Les briques en terre crue (figure II.3). Sont généralement composées de terre (environ 75 %), de paille (20 %) et d'eau (5 %). Dans des moules en bois, on verse le mélange afin d'obtenir des briques de (40.20.10) cm³. Les briques sont laissées sécher à l'air libre pendant plusieurs jours, puis sont utilisées [65].



Figure II.3. Briques en terre crue.

b. Briques en terre cuite

L'argile, les adjuvants naturels (sable, sciure de bois) et l'eau constituent les briques en terre cuite (figure II.4). Les éléments sont écrasés jusqu'à ce qu'un mélange homogène soit obtenu. On forme l'argile, puis on la sèche et on la cuit à une température d'environ 1000°C, afin de créer ce que l'on appelle des briques en terre cuite [65].

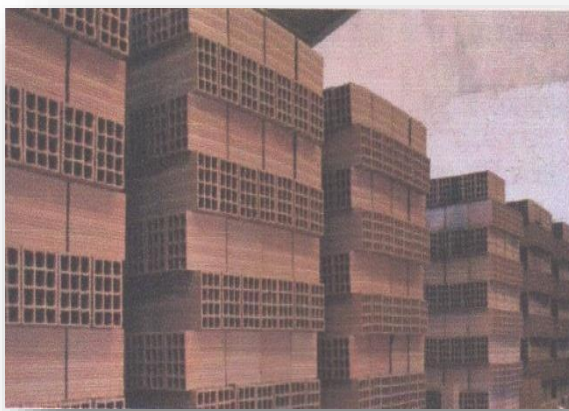


Figure II.4. Briques en terre cuite [65].

Le secteur des produits produit des quantités importantes de déchets. D'après les données statistiques, la production de rebus dans cette industrie représente environ 10 % de la production totale.

II.6.2. Pneus usagés

Les matériaux cimentaires présentent une faible capacité de déformation et une résistance à la traction faible, ce qui les rend vulnérables à la fissuration, en particulier la fissuration.

Causée par le retrait. Par exemple, les revêtements de sol, les chaussées et plus généralement les éléments installés en grande surface se brisent en raison de la pression. De cette manière, l'ajout de granulats en caoutchouc provenant du broyage de pneus usagés dans un mortier permet au composite obtenu d'avoir une capacité de déformation accrue avant de localiser la macro-fissure. Cela entraîne une grande résistance à la fissuration due au retrait du composite cimentaire qui intègre des granulats en caoutchouc.

Effectivement, les pneus usagés représentent une source de matières premières secondaires, leur récupération et leur valorisation sont donc d'une importance économique pour notre pays. La mise en valeur de ce déchets industriels est à ses débuts. Le ministère a lancé un premier chantier expérimental portant sur l'utilisation des pneus réformés comme soutènement d'un talus de remblai dans un projet routier (contournement de Bousmail). Les travaux déjà terminés ont donné lieu à la mise en place de 3500 pneus offerts par Michelin Algérie [66].

II.6.3. Les Laitiers sidérurgiques

Le laitier de haut fourneau est une fraction du minerai de fer qui est transformé en fonte brute. Ensuite, le laitier est légèrement refroidi à l'air, ce qui donne un matériau cristallin et compact appelé « laitier refroidi à l'air », ou bien il est rapidement refroidi et traité à l'aide de jets d'eau pour obtenir un matériau léger appelé « laitier expansé ». On peut utiliser du laitier refroidi à l'air comme granulat pour le béton.

La résistance à la compression du béton composé de granulats de laitier de haut fourneau est comparée à

celle du béton composé de gravier et de calcaire concassé, ce qui suggère que le béton de laitier est plus résistant [67]. Il est possible d'utiliser les fines du laitier pour substituer sans problème le sable. Le béton de laitier armé est adapté à diverses applications en raison de sa stabilité volumique, de sa résistance aux sulfates et de sa résistance à la corrosion par les solutions de chlorure. Le produit de laitier expansé est beaucoup moins important que celui de laitier refroidi à l'air. On utilise du laitier expansé pour produire du béton léger avec une masse volumique apparente allant de 800 à 950 kg/m³.

II.6.4. Déchets de marbre

Le marbre est une roche métamorphique issue du calcaire, qui se présente dans une grande variété de couleurs et peut être orné de veines ou de fossiles. Certaines espèces de marbre ont des appellations spécifiques, comme le cipolin ou la griotte. Le marbre est un carbonate de calcium compact ou cristallin qui est facile à rayer et réagit aux acides siliceux ou argileux. Il se présente en épaisseur homogène ou en différentes épaisseurs mélangées à d'autres matières, avec une densité moyenne de 2,27. Les marbres sont classés en fonction des couleurs ou des motifs : en plus du blanc, ils peuvent être beiges, bleus, roses, gris jaunes, rouges, verts, violettes ou noirs.

La France produit peu de marbre et enregistre une régression constante par rapport à des pays tels que l'Italie, le Portugal et la Grande-Bretagne. Les produits de la marbrerie en Algérie sont extraits et transformés en respectant les normes européennes, notamment italiennes et françaises. Les méthodes employées en Algérie pour manipuler le marbre sont similaires à celles employées à l'échelle mondiale :

- Sciage des masses au fil hélicoïdal, au fil diamanté et haveuse pour l'abatage et le tranchage des masses brutes de marbres naturels en carrières.
- Transformation des produits finis au moyen de lames et disques, débitages secondaires et ponçages avec des pierres ponce.
- Le marbre Algérien est exploité actuellement par l'entreprise nationale du marbre "ENA marbre" qui dispose de dix unités de production implantées dans cinq Wilayas [68].

II.6.5. Déchets plastiques

Le terme "déchets plastiques" désigne les déchets issus des processus de production, de transformation et de consommation, ainsi que les produits plastiques destinés à être recyclés. Il est possible d'intégrer les déchets plastiques dans des matrices cimentaires. Effectivement, des recherches précédentes ont démontré que les déchets plastiques peuvent être utilisés comme liant dans les bétons pour fabriquer un matériau composite à haute performance, ou être ajoutés dans le béton (sous forme de grains et de fibres ondulées et rectilignes) [69].

II.7. Conclusion

Les déchets représentent un véritable défi, qui est intrinsèque à toute vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine. Par conséquent, il est essentiel pour les collectivités de trouver des solutions. Selon sa définition, le déchet est considéré comme une "matière", ce qui implique que la bio-physicochimie, la mécanique et la thermique sont principalement sollicitées pour le traiter.

Cette discipline n'est pas ordinaire. Au fil de son existence, elle a fréquemment changé de lieu pour se retrouver dans les poubelles et les décharges. Il est essentiel de trouver des méthodes pour extraire les fractions valorisables ou réduire les capacités de nuisances en raison de la diversité moléculaire. Différentes catégories de déchets et de sous-produits peuvent servir de granulats. On utilise déjà commercialement le laitier de haut fourneau et les cendres volantes.

Les différents déchets sont utilisés en fonction de leur rentabilité d'exploitation et de leurs caractéristiques. Il est possible que de nombreux types de déchets ne puissent pas être exploités à grande échelle en raison de la variété de leurs constituants physiques et chimiques.

Chapitre III :

Etude expérimentale

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'étude expérimentale de notre sujet. On a réalisé une série de tests physiques et mécaniques des matériaux utilisés, par exemple : analyse granulométrique, Equivalent sable, densité absolue et apparente sur sable, poudre de brique et gravier et ciment.

Ensuite en appliquant la méthode japonaise : on a confectionné plusieurs mortiers pour arriver aux quantités qui justifient le mortier auto plaçant en utilisant les fines de briques et de la fumée de silice avant de passer à la recherche du béton auto plaçant en incorporant les graviers et en ajustant la quantité d'eau de gâchage. En fin, des échantillons de béton ont été confectionnés pour réaliser les différents essais de résistance et de durabilité.

III.2. Matériaux utilisés

Les essais de caractérisation des matériaux utilisés pour la confection des bétons ont été exécutés au laboratoire de génie civil de l'université de M'sila. Les matériaux utilisés sont :

- Le sable concassée « M'sila ».
- Deux fractions de graviers concassés (3/8 et 8/16) mm.
- Ciment mâtiné CEMII/B-L 42.5N « M'sila ».
- Fines de brique < 0.63 mm : le brique concassé est tamisé dans un tamis 0.63 mm.
- Fumée de silice.
- L'adjuvant : super plastifiant (SP40).
- Eau de gâchage.

III.3. Caractéristiques des granulats

III.3.1. Analyse granulométrique (NFP 94-056)

L'analyse granulométrique c'est une opération consiste à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques (poids taille, etc.). Habituellement, l'analyse granulométrique fournit les proportions de grains de différents diamètres.

En fonction de la dimension et du nombre des grains composant un granulat, on dénomme les granulats, fines, sables, gravillons ou caillou. Cependant, pour un granulat donné, ses grains n'ont pas tous la même dimension.

Pour cela, on procède au classement des grains sur une série de tamis emboîtés les uns dans les autres. Les dimensions des mailles des tamis sont décroissantes du haut vers le bas. Le granulat est placé sur le tamis le plus haut et par vibrations, on répartit grains sur les différents tamis selon leur grosseur.



Figure III.1. Analyse granulométrique.

➤ Principe de l'essai

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les masses des différents refus et tamisats sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.

➤ Mode opératoire

- Monter la colonne de tamis dans l'ordre décroissant de l'ouverture des mailles en ajoutant le couvercle et le fond.
- Verser le matériau sec dans la colonne de tamis.
- Agiter automatiquement cette colonne. Reprendre un à un les tamis en commençant par celui qui a la plus grande ouverture, en adaptant un fond et un couvercle.
- Nous prenons le poids de chaque tamis à l'aide d'une balance électronique.
- Varier la validité de l'analyse granulométrique imposée par la Norme NF EN 933-1 (différence entre la somme des masses de refus et de tamisats et de la masse initiale).

III.3.1.1. Analyse granulométrique du sable

Les résultats de l'analyse granulométrique sont représentés dans les tableaux suivants

Tableau III.1. Analyse granulométrique du sable.

TAMIS	REFUS	REFUS PARTIEL	REFUS CUMULES (%)	Tamisâtes cumules (%)
5	3.3	3.3	0.165	99.835
2.5	576.9	580.2	29.01	70.99
1.25	534.3	1114.5	55.725	44.275
0.63	343.9	1458.4	72.92	27.08
0.315	404.3	1862.7	93.135	6.865
0.16	86.8	1949.5	97.475	2.525
FOND	50.5	2000	100	0
	2000			

III.3.1.1.1. Module de finesse (EN 196-6)

Le module de finesse (MF) est une facture très importante qui nous permet de juger la qualité du sable, il est donné par la relation suivant

$$MF = \sum \frac{Rc}{100}$$

RC : Refus cumulé.

Les normes soviétiques spécifient le Mf des sables comme suit :

- Sable gros $Mf \geq 2.5$
- Sable moyen $2 < Mf < 2.5$
- Sable fin $1.5 < Mf < 2$
- Sable très fin $1 < Mf < 1.5$

Donc, dans notre cas $Mf = 3.48$. Le sable concassé avec $Mf > 2,5$: C'est un sable gros

III.3.1.2. Analyse granulométrique du gravier 3/8

Tableau III.2. Analyse granulométrique du gravier 3/8.

TAMIS	REFUS PARTIEL	REFUS cumulés (g)	REFUS CUMULES (%)	Tamisâtes cumules (%)
8	29.3	29.3	1.465	98.535
6.3	904.2	933.5	46.675	53.325
5	533.5	1467	73.35	26.65
4	398.6	1865.6	93.28	6.72
3.15	104.3	1969.9	98.495	1.505
2.5	23.8	1993.7	99.685	0.315
FOND	6.3	2000	100	0
	2000			

III.3.1.2. Analyse granulométrique du gravier 3/8

Tableau III.3. Analyse granulométrique du gravier 8/16.

TAMIS	TAMIS	TAMIS	REFUS CUMULES (%)	tamisâtes cumules(%)
16	307.7	307.7	9.615	90.385
12.5	1393.8	1701.5	53.171	46.829
10	1090.7	2792.2	87.256	12.744
8	356.5	3148.7	98.396	1.604
5	46.1	3194.8	99.837	0.163
FOND	5.2	3200	100	0

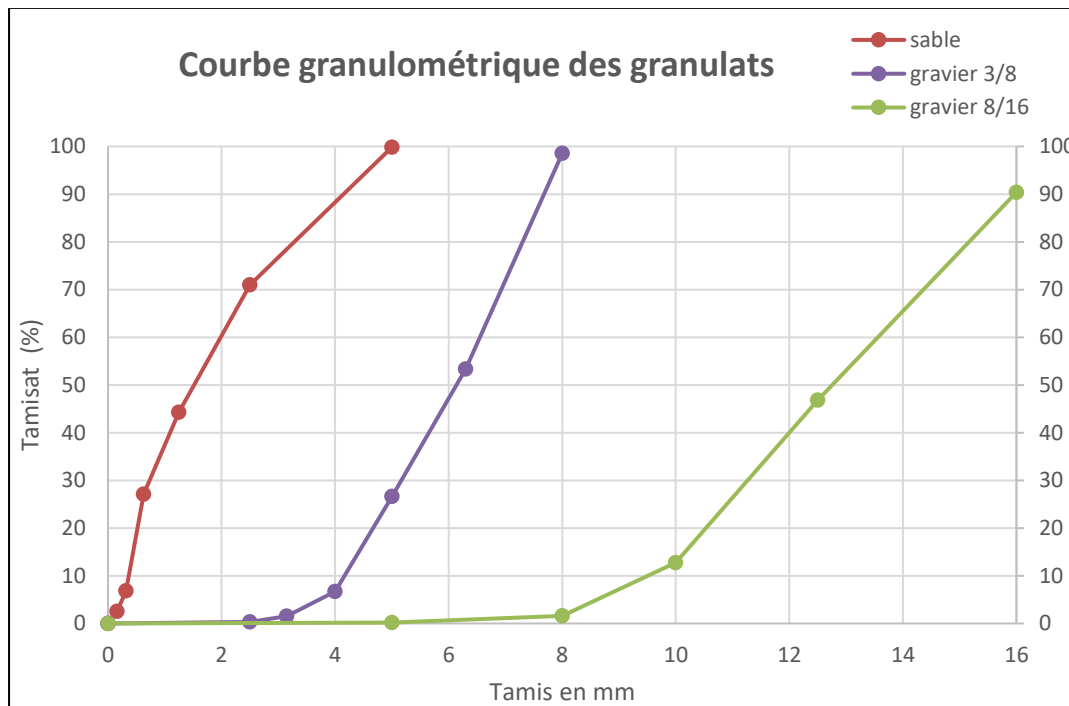


Figure. III.2. Allure de la courbe granulométrique des granulats.

III.4. Caractéristiques physiques des granulats

III.4.1. La masse volumique absolue [NA EN 1097-6]

III.4.1.1. Sable concassé

➤ But de l'essai

Le but de ce test est de pouvoir connaître la qualité de la fraction particulaire lors par exemple de l'élaboration d'une composition de béton. Ce paramètre détermine notamment la masse ou le volume de différentes classes de particules mixtes

Obtenir un béton aux propriétés imposantes. Dans ce travail, nous avons utilisé la méthode du cylindre gradué, qui est simple, rapide et utilise un équipement de laboratoire courant. b.

Procédure :

- Placez le tube à essai dans un récipient en plastique.
- Versez de l'eau dans le tube à essai (presque à mi-hauteur) et notez V1.
- Préparer un échantillon de granulat sec de masse M (environ 400 g).
- Utilisez l'entonnoir pour verser l'échantillon dans le tube à essai et remuez le mélange avec une barre d'agitation pour libérer les vides (air).
- Notez la nouvelle quantité d'eau dans le tube V2.
- Versez l'agrégat dans un seau en plastique et jetez le contenu.
- Répétez l'opération au moins 3 fois. La densité absolue est donnée par la formule

La masse volumique absolue du sable est déterminée par La formule :

$$\rho_{\text{abs}} = M / (V2 - V1) \quad \text{avec : } M=300\text{g}$$

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III. 4. la masse volumique absolue de sable concassée.

Nombre d'essai	M(g)	V1(ml)	V2(ml)	ρ_{abs} (g/cm ³)	ρ_{abs} (g/cm ³)
1	300	250	115	2.61	2..64
2	300	250	114	2.63	2.64
3	300	250	111	2.70	2.64



Figure III.3. Essai La masse volumique absolue des sables concassés au laboratoire.

III.4.1.2 Les graviers.

Tableau III. 5. la masse volumique absolue de gravier 3/8 et 8/16.

Fraction	M	V1	V2	ρ_{abs} (g/cm ³)	$\rho_{\text{abs moy}}$ (g/cm ³)
G 3/8	300	250	116	2,58	2,56
G 3/8	300	250	118	2,54	2,56
G 8/16	300	250	113	2,65	2,59
G 8/16	300	250	118	2,54	2,59
G 8/16	300	250	116	2,58	2,59



Figure III.4. Essai La masse volumique absolue des graviers (8/16, 3/8) au laboratoire.

III.4.1.3. Le brique

Tableau III. 6. la masse volumique absolue de brique.

Nombre d'essai	M(g)	V1(ml)	V2(g/cm3)	ρ (g/cm3)
1	300	250	130	2.38



Figure III.5. Essai La masse volumique absolue des briques au laboratoire.

III.4.2. Masse volumique apparente (NFEN 1097-6(2001))

La masse volumique est nécessaire à connaître lorsque par exemple on élabore une composition de béton. Ce paramètre permet, en particulier, de déterminer la masse ou le volume des différentes classes granulaires mélangées pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées. Parmi les propriétés principales des matériaux de construction on a la masse volumique.

III.4.2.1. Le sable

La masse volumique apparente du sable est donnée par :

$$\rho = M2 - M1/V0 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Tableau III.7. La masse volumique apparente de sable concassé.

N° D'essais	M	V	ρ_{app} (g/cm ³)	ρ_{app} moy (g/cm ³)
1	1526,9	1000	1,53	1,53
2	1526,9	1000	1.53	1,53



Figure III.6. Essai La masse volumique apparente du sable concassé.

III.4.2.2. Les graviers 3/8 et 8/16

Tableau III. 8. la masse volumique apparent de gravier 3/8 et 8/16.

Fraction	N° D'essais	M	V	ρ_{app} (g/cm ³)	ρ_{app} moy (g/cm ³)
G 3/8	1	1470	1000	1,5	1,5
G 3/8	2	1483	1000	1,5	1,5
G 8/16	1	1462,6	1000	1,5	1,5
G 8/16	2	1482,1	1000	1,5	1,5

III.4.2.3. Les fines de brique

Tableau III. 9. la masse volumique apparent de brique.

N° D'essais	M	V	ρ_{app} (g/cm ³)	ρ_{app} moy (g/cm ³)
1	1344,1	1000	1,34	1,35
2	1351,9	1000	1,35	1,35
3	1348,8	1000	1,35	1,35



Figure III.7. Essai La masse volumique apparente des briques au laboratoire.

III.4.3. Equivalent de sable (NA EN 933-8)

Tamiser une quantité de sable (masse supérieure à 500 g).

- Prendre une pesée de 120 g.
- Remplir l'éprouvette de solution la vente jusqu'au premier repère (10cm).

- A l'aide de l'entonnoir verser la prise d'essai (120g) dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main afin de chasser toutes les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.
- Laisser reposer pendant 10 minutes.
- Fermer l'éprouvette à l'aide du bouchon en caoutchouc et lui imprimer 90 cycles de coups horizontaux en 30 secondes à la main à l'aide d'un agitateur mécanique.
- Retirer ensuite le bouchon, le rincer avec la solution la vante au-dessus de l'éprouvette,
- Rincer ensuite les parois de celle-ci.

Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette, le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette et en imprimant en même temps au tube un léger piquage. Cette opération a pour but de laver le sable et de faire monter les éléments fins et argileux. Effectuer cette opération jusqu'à ce que la solution la vante éteigne le 2èmerepère. Laisser ensuite reposer pendant 20 minutes.

III.4.3.1. Le sable

Cet essai nous permet de mettre en évidence la proportion d'impuretés argileuse ou ultra fin contenue dans le sable et pourcentage de poussière nuisible et les éléments argileux qui diminuent la qualité des bétons.

Tableau III.10. Résultats d'essais d'équivalent de sable concassée.

N° D'essais	H1	H2	E.S.V(%)	E.S.V moy (%)
1	15	7,5	50	49,07
2	16,2	7,8	48,14	49,07

III.4.3.2. Les fines de brique

Tableau III. 11. Résultats d'essais d'équivalent de brique.

N° D'essais	H1	H2	E.S.V(%)	E.S.V moy (%)
1	13	10	76,92	74,95
2	13,7	10	72,99	74,95



Figure III.8. Essai équivalent de sable et brique au laboratoire.

Tableau III. 12. Comparaison des résultats.

E.S. V	E.S. P	Nature et qualité du sable
ES<65	ES<60	Sable argileux : Risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
65<ES<75	65<ES<70	Sable légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
75≤ES≤85	70≤ES≤80	Sable propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.
E. S ≥85	E. S >80	Sable très propre : L'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Résultats : Sable argileux : Risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.

III.4.4. La porosité

La porosité des échantillons de granulats est un paramètre important dans la formulation du béton car elle affecte sa compacité et donc ses propriétés mécaniques. Les valeurs P de porosité pour différents agrégats ont été calculées à l'aide de l'équation suivante :

$$P\% = \left(1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}\right) \times 100$$

Tableau III.13. La porosité des fractions (3/8) et (8/16) du gravier concassé.

Graviers	(P %)
3/8	61.11
8/16	56.11

III.4.5. La Compacité :

$$C = \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}$$

Tableau III.14. Compacités des fractions (3/8) et (8/16) du gravier concassé.

Graviers	La compacité C (%)
3/8	38.88
8/16	43.29

III.4.6. Indice des vides

$$I = \frac{P}{C}$$

Tableau III.15. Indice de vide des fraction (3/8) et (8/16).

Fraction	Indice de vide
3/8	1.57
8/16	1.30

III.4.7. Résistance à la fragmentation

Introduire l'échantillon (M=5000 g) avec la charge de boulets (Diamètre important) 500 rotations (30 à 33 tours/min).

Mesurer la masse « m » d'élément < 1,6 mm Coefficient de los Angeles « LA ».

$$LA = \frac{m}{5000} \times 100$$

Si LA<20 : le gravier très dur.

Si 20<LA< 30 : le gravier dur.

Si LA>30 : le gravier friable

Tableau III.16. Los Angeles des fraction (3/8) et (8/16) du granulat concassé.

Nature	Fraction	M1(g)	M2(g)	Nombre des boules	LA
G. concassé	3/8	5000	1205	7	24.4
	8/16		1041	11	22

Résultat : le gravier dur.

III.4.9. Absorption d'eau :

La connaissance du coefficient d'absorption d'eau d'un granulat permet d'ajuster la teneur en eau de gâchage entrant dans la composition du béton. Des mesures de l'absorption d'eau par les granulats ont donc été menées suivant le mode opératoire de la norme [NF EN 1097- 6, 2001]. Le coefficient d'absorption d'eau est défini comme le rapport de l'augmentation de masse de

L'échantillon après imbibition par l'eau à la masse sèche de l'échantillon.

Le coefficient d'absorption Abs est ainsi définie par :

$$Abs = \frac{M_{humide} - M_{sech}}{M_{secg}} \times 100$$

M humide—**M sèche** désigne la masse de l'eau absorbée après 48 heures d'immersion.

M sèches la masse sèche de l'échantillon après passage à l'étuve à 105°C.

Tableau III.17. Coefficients d'absorption d'eau des fractions (3/8) et (8/16) du gravier concassé.

Fraction	Essai	M1(g)	M2(ml)	Abs%	Abs% Moyen
3/8	1	500	526	5.2	5.4
	2		528	5.6	
8/16	1	500	514	2.8	3.2
	25		518	3.6	

III.4.10. Porosité :

La porosité d'un matériau est le rapport du volume total, elle représente donc le degré de remplissage son volume occupé par les vides. Cette propriété ou notion de porosité est importante car elle influe sur certaine caractéristique fondamentale tel que :

- Résistance mécanique élevée, donc porosité faible.
- Capacité d'absorption d'eau (A) élevée, donc la porosité grande.

La porosité est donnée par la relation suivante :

$$P (\%) = [1 - \rho_{app} / \rho_{abs}] \times 100$$

On distingue deux cas pour le sable concassé :

- Etat lâche : $p_l = 50,73\%$
- Etat compacte : $p_c = 45,22\%$

III.4.11. Compacité :

La compacité d'un matériau est la proportion du volume que le matériau occupe réellement La matière solide qui la compose, c'est-à-dire le rapport du volume absolu des particules au volume

L'apparence du matériau.

$$C = (\rho_{app} / \rho_{abs}) = 100 - P$$

On distingue deux cas pour le sable concassé :

- Etat lâche : CL= 49,27 %
- Etat compacte : Cc = 54,78 %

III.4.12. Indice des vides :

L'indice des vides est le rapport entre le volume du vide et le volume de solide.

$$e = V_v / V_s = P / (100 - P)$$

Avec P en pourcent (%).

On distingue deux cas pour le sable concassé :

Etat lâche : e= 1,02 %

Etat compacte : e= 0,82 %

Les résultats de la porosité, la compacité et l'indice de vide sont regroupés dans le tableau

Suivant pour le sable concassé :

Tableau III.18. La porosité, la compacité et l'indice de vide pour le sable concassé.

Porosité P (%)		Compacité C (%)		Indice des vides e	
Lâche	Compact	Lâche	Compact	Lâche	Compact
50.73	45.22	49.27	54.78	1.02	0.82

III.4.13. Ciment

Le ciment utilisé dans notre projet, est un ciment de classe CEM II/A (Matine) (figure III.9) qui est un ciment Portland sa résistance minimale à la compression à 28 jours est de 42,5 MPa. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques de notre ciment, sont représentés dans le tableau suivant (**Tableaux III.19 & III.20**).



Figure III.9. Ciment matine.

Tableau III.19. Composition chimique du ciment.

Composition chimique	Teneur en %
SiO ₂	18,29
Al ₂ O ₃	4,042
Fe ₂ O ₃	2,97
CaO	60,03
MgO	1,69
K ₂ O	0,59
Na ₂ O	0,01
SO ₃	2,28
CaO libre	1,362
Cl ⁻	0,020
Ins	3,59
P. F	9,36

Tableau III.20. Analyse minéralogique du ciment.

Phase	Constituents minéraux du clinker	Teneur rapportée au clinker (%)
Clinker	C ₃ S	56
	C ₂ S	20
	C ₃ A	05
	C ₄ AF	13
	CaO libre	01
Régulateur de prise	gypse	05
Ajouts	Calcaire(L)	20

Les caractéristiques mécaniques du ciment ont été déterminé à la norme **NF EN 196-1**.

Le **Tableau III.21** récapitule les résultats des essais à la compression et à la flexion du ciment.

Tableau III.21. Caractéristique mécanique du ciment.

Échéances jours	Charge à la flexion (KN)	Contrainte de compression (MPa)
28	2.53	41.12

Le temps de prise a été déterminé selon la norme **NF 480-2** par l'observation de la pénétration d'une aiguille dans une pâte de ciment de consistance normalisée, jusqu'au moment où elle atteint une valeur spécifiée (**Tableau III.22**).

Tableau III.22. Propriétés physiques de ciment.

Consistance normale de la pâte de ciment (%)	Temps de prise	
	Début de prise (min)	Fin de prise (min)
27, 50	120	240

III.4.14. Caractéristiques de la fumée de silice

La fumée de silice est un type de poussière très fine, composée de particules de silice cristalline, qui peut être générée lors de la manipulation de matériaux contenant du silicium. Elle est souvent utilisée dans la production de ciment, de verre, de céramiques, de peintures et de revêtements muraux. La fumée de silice peut être dangereuse pour la santé si elle est inhalée, car les particules extrêmement fines peuvent atteindre les poumons et causer des problèmes respiratoires tels que la silicose ou le cancer des poumons. Pour cette raison, il est important de prendre les mesures de protection appropriées lors de la manipulation de matériaux contenant de la silice cristalline et de suivre les directives de sécurité de l'industrie.

Tableau III.23. Caractéristiques chimiques et physique de la fumée de silice.

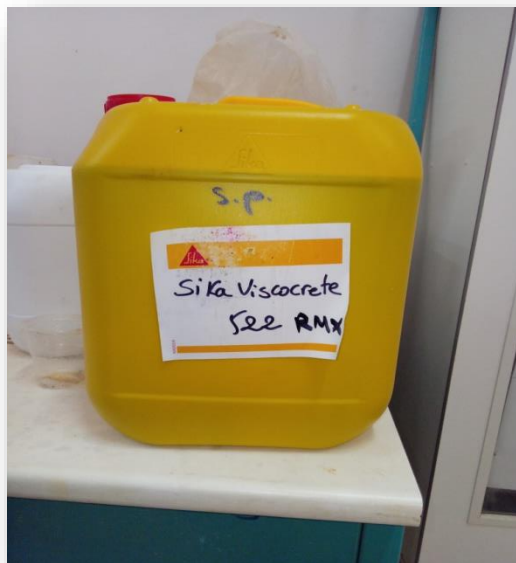
Analyse chimique		Analyse physique		
Oxydes	% Massique	Désignation	Valeurs	Unité
SiO ₂	85_95	Masse volumique absolue	2.2	g/cm ³
CaO	0.8_95		250	Kg/cm ³
MgO	1_2	Densité		
Fe ₂ O ₃	0.005_1	Surface spécifique de Blaine	15000	m ² /kg
Al ₂ O ₃	1_3			
Pert au feu	0.5_1	Taille des particules	<1	µm

III.4.15. Super plastifiant (MEDAPLASTSP40)

Le superplastifiant MEDAPLAST SP40 produit par la société de GRANITEX (W. Alger). C'est un haut réducteur d'eau pour le béton prêt à l'emploi conforme à la norme NF EN 934-2, noté (P)

Tableau III.24. Caractéristiques physico-chimiques du super plastifiant (SP 40).

Super-plastifiant	Extrait sec	Forme	Couleur	PH	Densité	Teneur en Chlore
Medaplast (SP) (40)	40%	Liquide	Marron	8.2	0,01±1,20	<1g/L

**Figure III.10.** Superplastifiant.

III.4.16. Essais du Taux de saturation

**Figure III.11.** Taux de saturation par Super plastifiant. (Conne de March).

C=500 E=180 E /C=0,36

Tableau III.25. Essais du Taux de saturation.

Sp (%) super-plastifiant	0.4	0.5	0.7	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
Temps d'écoulement(s)	30	27	27.5	22.54	19.59	16.25	13	13	12.79	12.77	12.52

III.5. Formulation du béton auto plaçant

En appliquant la méthode japonaise, on cherche un mortier auto plaçant puis on passe au béton auto plaçant

III.5.1. Formulation des mortiers auto plaçant

La formulation est basée sur la méthode d'Okamura dont l'objectif est d'optimisée le dosage en super-plastifiant afin d'obtenir un MAP homogènes et stable sans ressuage et sans ségrégation qui aura les propriétés souhaitées avec une addition de 0, 10, 20 et 30% par les fines de brique (< à 0.63 mm) ou de la fumée de silice avec les mêmes proportions. Le paramètre important considéré dans la formulation est le rapport Eau/Liant (E/L), qui est fixé à 0,40. le Rapport Sable/Mortier (S/M) est fixé à 0,5.

Le dosage en super-plastifiant est fixé à 2% après l'avoir optimisé par des essais d'ouvrabilités à l'état frais.

Afin d'obtenir un mortier auto plaçant, l'étalement au mini cône doit être compris entre 27cm et 30cm et le temps d'écoulement en V-Funnel entre 2 et 10 secondes.

Après plusieurs essais, Nous avons déterminé les quantités des constituants : ciment, fines de brique, fumée de silice, sable, eau et super-plastifiant pour avoir un mortier auto plaçant qui satisfaire les conditions exigées.

III.5.1.1. Essais sur MAP à l'état frais

III.5.1.1.1. Essai d'étalement au mini cône

Cet essai consiste à mesurer l'étalement en remplissant le mini cône posé sur une surface en acier lisse. Afin d'avoir cette mesure, on soulève le moule et on laisse le mortier s'écoule jusqu'à ce qu'il arrête en formant une galette. Celle-ci doit avoir un diamètre compris entre 27cm et 33cm pour un mortier auto plaçant adéquat.

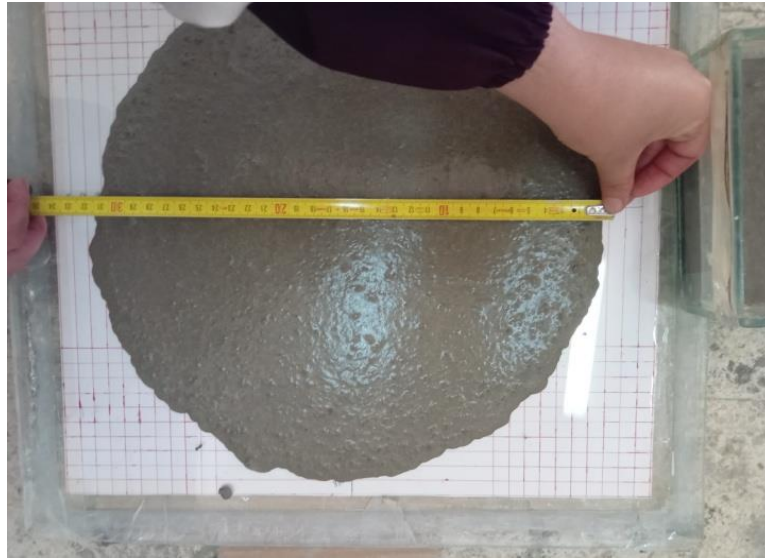


Figure III.12. Etalement au mini cône.

III.5.1.1.2. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

L'essai de l'entonnoir en V (V-Funnel) consiste à remplir l'entonnoir de 1 Litre de mortier et mesurer le temps d'écoulement entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir. Le temps d'écoulement doit être compris entre 2 et 10 secondes pour un mortier auto plaçant. La figure II.13 montre le dispositif de l'essai à l'entonnoir en V.



Figure III.13. Dispositif de l'essai V-Funnel.

III.5.1.2. Etude du mortier auto plaçant

Il est important de rappeler que le travail expérimental que nous réalisons consiste à créer une composition de mortier auto plaçant. Les mortiers ont été confectionnés en utilisant des pourcentages (0, 10%, 20% et 30% du poids de ciment) de fines de briques ou de fumées de silice.

Après plusieurs essais. Les compositions retenues pour 1 m³ de mortier sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau III.26. Compositions des mortiers utilisée (dans 1 m³).

	Sable (Kg)	Ciment (Kg)	Adj (2%) (Kg)	Eau (Kg)	Mini cône (Cm)	Funnel (S)
0%	741.5	400	8	160	33	5
10%B	741.5	400	8	176.66	30	5
20%B	741.5	400	8	176.66	34	5
30%B	741.5	400	8	186.66	33	4
10%F	741.5	400	8	230	28	2
20%F	741.5	400	8	232	33	3
30%F	741.5	400	8	273.33	33	3

III.5.2. Formulation des bétons auto plaçant

Après avoir arrivé au mortiers auto plaçant, on a passé à la recherche du béton auto plaçant en ajoutant les graviers et de l'eau. Plusieurs mélanges ont été confectionnés. Des essais de vérification du béton auto plaçant ont été réalisés.

III.5.2.1. Essais de caractérisation du béton auto plaçant à l'état frais

Dans la suite du document seront présentés les essais proposés par L'AFGC qui servent actuellement de référence à défaut d'être normalisés. Les résultats de ces essais permettent de donner une vision qualitative pour les BAP.

Trois principaux essais permettent de caractériser et de contrôler la rhéologie des BAP :

- Mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement au cône d'Abrams).
- Mobilité en milieu confiné (décrit par l'essai d'écoulement à la boîte en L).
- Stabilité (résistance à la ségrégation décrite par l'essai de stabilité au tamis).

III.5.2.2. Essai d'étalement au cône d'Abrams NF EN 12 350-8

La fluidité des BAP peut être caractérisée par la mesure de l'étalement au cône d'Abrams. Des valeurs cibles de l'ordre de 60 à 75 cm correspondent à l'étalement moyen conseillé d'un BAP. La valeur cible d'étalement doit être définie en fonction des caractéristiques de la formulation et des conditions et méthodes de mise en œuvre.

❖ **Objet d'étalement (slump flow)**

L'essai d'étalement ou slump flow est utilisé pour caractériser la fluidité du béton.

❖ **Matériel nécessaire**

- Plateau équipé en partie supérieure d'une plaque métallique plane constituant un carré d'au moins 90 cm de côté
- Cône d'Abrams disposant d'un empattement à sa base afin qu'il puisse être maintenu contre le plateau avec les pieds par l'opérateur.
- Mètre ou règle de 90 cm.

❖ **Mode opératoire**

- S'assurer que le plateau est placé sur un support stable et horizontal.
- Humidifier la surface de la plaque (éliminer l'eau en excès avec un chiffon).
- Placer et centrer le cône d'Abrams sur le plateau.
- Prélever un échantillon de béton représentatif.
- Equiper la partie supérieure du cône d'un entonnoir. Remplir le cône en déversant de manière continue, jusqu'à l'arase supérieure du cône.
- Retirer l'entonnoir, 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 (au centimètre le plus proche) le diamètre final (D final) sur deux côtés perpendiculaires.
- Noter le résultat des deux valeurs. Exemple :(68/70cm). Si les deux valeurs différentes de plus de 5 cm, l'essai doivent être invalidé et reconduit.

Exprimer le résultat final en termes de moyenne des deux valeurs obtenues, en arrondissant au centimètre supérieur.



Figure III.14. Essai d'étalement au cône exécuté au laboratoire.

❖ III.5.2.3. Essai de stabilité au tamis NF EN 12 350-11

Cet essai vise à qualifier les bétons auto-plaçants vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton auto-nivelant en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier. Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. Cet essai consiste à l'utilisation d'un seau de 10L avec un couvercle, un tamis de 5 mm de diamètre de 315 mm plus fond et une bascule de portée minimale de 20 kg. A la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés dans le seau. Après quinze minutes, un échantillon de 4,8 kg est versé du seau sur le tamis, deux minutes plus tard, on pèse la quantité de pâte (laitance) ayant traversé le tamis. Le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon donne l'indice de ségrégation π la mesure de cet indice conduit à classer les formules de BAP de la façon suivante :

$0\% \leq \pi \leq 15\%$ stabilité satisfaisante.

$15\% < \pi \leq 30\%$ stabilité critique, l'essai à refaire in situ.

$\pi > 30\%$ stabilité très mauvaise, béton inutilisable

- **Objet de l'essai**

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

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité.



Figure III.15. Essai Stabilité au tamis exécutés au laboratoire.

III.5.2.4. Essai de la boîte en « L » NF EN 12 350-10

La cohésion armée peut se mesurer avec l'essai de la boîte en forme de L. Cet essai permet de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des blocages de granulats en amont des armatures. La méthode consiste à remplir de BAP la partie verticale d'une boîte, puis en levant une trappe à laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers un ferrailage (le nombre et le diamètre des du béton, sa mobilité en milieu confiné et son aptitude à traverser une zone fortement armatures peuvent être adaptés pour traduire le ferrailage réellement présent dans la structure). Après écoulement du béton, on mesure la différence de hauteur dans la partie verticales (H1) et horizontale (H2). Le résultat de l'essai s'exprime par le taux de BAP. [Remplissage $H2/H1$. Une valeur de ce rapport supérieur à 0.8 traduit un bon écoulement.

- **Objet de boîte en L**

La boîte en L permet de tester la mobilité de béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables.



Figure III.16. Essai de boîte en L.

➤ **Mode opératoire**

La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton (le volume nécessaire est d'environ 13 litres). Après arasement, on laisse le béton reposer pendant une minute. Puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte en L à travers le ferrailage. La distance libre entre les barres est de 39mm.

Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H_1 et H_2 (figure III.16) et on exprime le résultat en termes de taux de remplissage H_2/H_1 .

Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en aval de la grille, c'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation.

A noter que les temps nécessaires pour des écoulements horizontaux respectifs de 20 cm et 40 cm (à matérialiser sur le fond de la boîte en L) peuvent être mesurés pour estimer la viscosité du béton.

Le tableau suivant représente le résultat des bétons obtenus pour 1 m³

Tableau III.27: compositions des bétons utilisée après les essais de BAP à l'état frais (dans 1 m³).

	0%	10%B	20%B	30%B	40%B	10%F	20%F	30%F	40%F
Ciment (Kg)	400	400	400	400	400	400	400	400	400
Sable (Kg)	741.5	741.5	741.5	741.5	741.5	741.5	741.5	741.5	741.5
Gravier 3/8(Kg)	370	370	370	370	370	370	370	370	370
Gravier 8/16(Kg)	370	370	370	370	370	370	370	370	370
Eau(L)	188.56	195.25	201.19	197.5	222.5	203.13	219.93	253.75	293.75
Déchet de brique (Kg)	/	40	80	120	160	/	/	/	/
Fumées de silice (Kg)	/	/	/	/	/	40	80	120	160
Super plastifiant (Kg)	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Boîte en « L »	0.87	0.83	0.8	0.8	0.8	0.8	0.78	0.82	0.82
Stabilité au Tamis%	21.62	7.27	6.66	5.85	12.0	5.52	3.56	6.85	8.93
D'étalement au cône d'Abrams (Cm)	72.5	72.5	70.73	71.5	76	73	70	70	71

III.5.2.2. Essais de caractérisation du béton auto plaçant à l'état durci

➤ Taille des éprouvettes

Pour notre étude 3 types d'éprouvettes ont été utilisés à savoir :

- **Des éprouvettes cubiques (10x10x10 cm)** : pour les essais de compression, de porosité (accessible à l'eau et capillaire) et d'absorption par immersion.
- **Des éprouvettes cubiques (15x15x15 cm)** : pour les essais ultrasonores et de durabilité (cycle de séchage/mouillage) : on a réalisé 5 cycles.
- **Des éprouvettes prismatiques (7x7x28 cm)** : pour les essais de flexion.

III.5.2.2.1. Essais de compression

Les essais de mesure de la résistance à la compression sont réalisés sur des éprouvettes cubiques (10x10x10 cm) conformément aux prescriptions de la norme ou bien des éprouvettes. Ce test fournit la force de compression qui génère la rupture de l'échantillon.



Figure III.17. Machine de compression.

III.5.2.2.2. Essais de traction par flexion NF P18-408

- **But de l'essai**

Cet essai a aussi pour but de déterminer la résistance à la traction du béton. C'est un essai de traction par flexion qui consiste à écraser un prismatique (7x7x28cm) de béton placé horizontalement entre deux plateaux d'une presse.



Figure III.18. Mesure de la résistance à la traction par flexion.

III.5.2.2.3. Essai d'ultrasonique

Cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'onde longitudinales (de compression) à travers un élément en béton et vérifier l'homogénéité du béton.

- **Objectif de l'essai**

Le principe de la méthode des ultra-sons consiste à mesurer le temps de propagation des impulsions ultrasonique traversant le béton d'un ouvrage. Sans procéder à un prélèvement d'éprouvette par carottage.



Figure III.19. Mesure de la vitesse ultrasonique.

III.5.2.3. Essais de durabilité

III.5.2.3.1. La porosité accessible à l'eau (NF EN 18 – 459)

- **Objectif**

Déterminer la porosité accessible à l'eau en mesurant le pourcentage de vide connecté à la surface du béton des éprouvettes (10x10x10) cm.

- **Mode opératoire**

- Pesée hydrostatique, M_{eau}
- Pesée dans l'air de l'éprouvette saturée d'eau, M_{air}
- Pesée dans l'air de l'éprouvette sèche, M_{sec} Séchage = étuve 105°C jusqu'à obtenir une masse constante.

- **Remarque**

Masse ne varie pas de plus de 0,05% entre deux pesées espacées de 24h.

- **Calcul de la porosité accessible à l'eau :**

$$P_{eau} = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100$$

OÙ

Mair : la masse saturée (kg).

Msec : la masse sèche(kg).

Meau : la masse hydrostique(kg).



Figure III.20. Mesure de la porosité accessible à l'eau

III.5.2.3.2. Absorption par immersion du béton

Le coefficient d'absorption est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par immersion dans l'eau par rapport sa masse sèche.

- **Objectif**

Déterminé le coefficient d'absorption (A_b) d'un échantillon de béton des éprouvettes (10x10x10 cm).

- **Matériels nécessaires**

- Etuve ventilée
- Balance
- Bac d'eau

- **Mode opératoire**

- immersion totale de l'échantillon dans l'eau pendant 28 jours.
- essuyer l'échantillon par un chiffon.
- peser l'échantillon, on détermine la masse M2.
 - Conservé l'échantillon dans l'étuve à 105 °C jusqu'à obtenir une masse constante.
- Peser l'échantillon, On détermine la masse M1.

- **Calculer le coefficient d'absorption**

$$Ab(\%) = \frac{(M2 - M1)}{M1} \times 100$$

OÙ

M1 : La masse initiale de l'éprouvette (kg).

M2 : La masse de l'éprouvette saturée d'eau (kg).

III.5.2.3.3. Porosité capillaire

Cet essai consiste à mesurer le taux d'absorption de l'eau par succion capillaire des éprouvettes de bétons, non saturés, mise en contact l'essai a été réalisé sur des échantillons moulés de formes cubiques (10x10x10 cm), les éprouvettes ont été conservées dans une étuve ventilée à 105°C, jusqu'à ce que la variation de la masse entre deux pesées soit inférieur à 0.1%. Les faces latérales des éprouvettes ont été enduite par une peinture verte pour assurer l'écoulement unidirectionnel et éviter l'évaporation latérale de l'eau absorbée.

L'essai de l'absorption capillaire a été réalisé suite à ce pré-conditionnement. Les éprouvettes ont été émergées dans l'eau du récipient sur une hauteur maximale de 10 mm à l'aide des cales.



Figure III.21. Dispositif expérimental de mesure d'absorption d'eau par capillarité.

Le coefficient d'absorption capillaire est défini par l'équation suivante :

$$C = \left(\frac{M2 - M1}{A} \right) \quad (\text{Kg/ m}^2)$$

OÙ

M1 : La masse initiale de l'éprouvette
(kg).

M2 : La masse de l'éprouvette saturée
d'eau (kg).

A : Section de l'éprouvette (m²).

III.5.2.3.4. Essai séchage/mouillage

L'essai est effectué conformément à la norme ASTM D 559 – 57 sur des éprouvettes (1x15x15 cm). L'essai de mouillage-séchage consiste à soumettre des échantillons de béton à 5 cycles de vieillissement accéléré où chacun de ces cycles est caractérisé par cinq heures d'immersion totale des échantillons dans l'eau, suivie par quarante-deux heures de séchage à l'étuve à 71°C :

Les variations des résistances à la compression avant et après les cycles mouillage-séchage déterminées à 28 jours sont enregistrées et la diminue en résistance.



Figure III.22. Séchage des éprouvettes.

III.6. Résultats et discussion

III.6.1. Résistance à la compression

La Figure III.23 représentent les résultats obtenus concernant la résistance à la compression pour les différents bétons à base des fines de brique et fumée de silice.

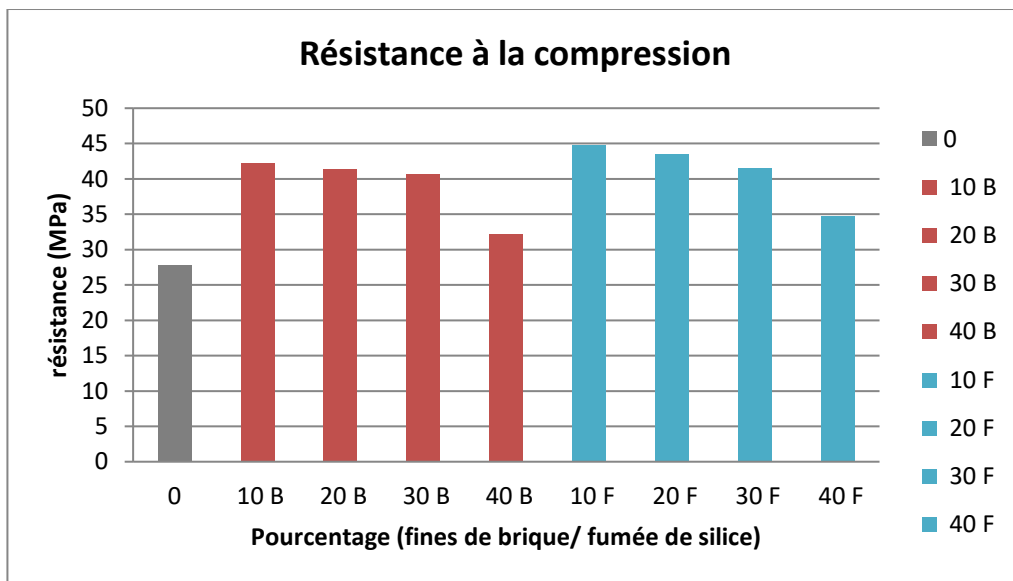


Figure III.23. Résistance à la compression.

Commentaire

La **Figure III.23** montre la résistance à la compression de différents types de béton après 28 jours, comme suit :

- La résistance à la compression est maximale dans le cas de 10% des fines de brique ou de fumée de silice ensuite on remarque une réduction de résistance jusqu'à 40% de fines. C'est-à-dire une diminution progressive de résistance.
- Les résultats de l'ajout de la fumée de silice ont montré une amélioration de la résistance à la compression par rapport aux fines de brique.
- Les résultats ont montré qu'on peut remplacer des fumées de silice par des fines de briques pour la confection du béton autoplaçant. Ces résultats confirment la nécessité d'utiliser les fines pour la confection du béton autoplaçant : la résistance à la compression des échantillons contenant de la poudre de brique ou de fumée de silice, sont supérieures à ceux confectionnés sans fines.

III.6.2. Résistance à la flexion

La **Figure III.24** représentent les résultats obtenus concernant la résistance à la flexion pour les différents bétons à base des fines de brique et fumée de silice.

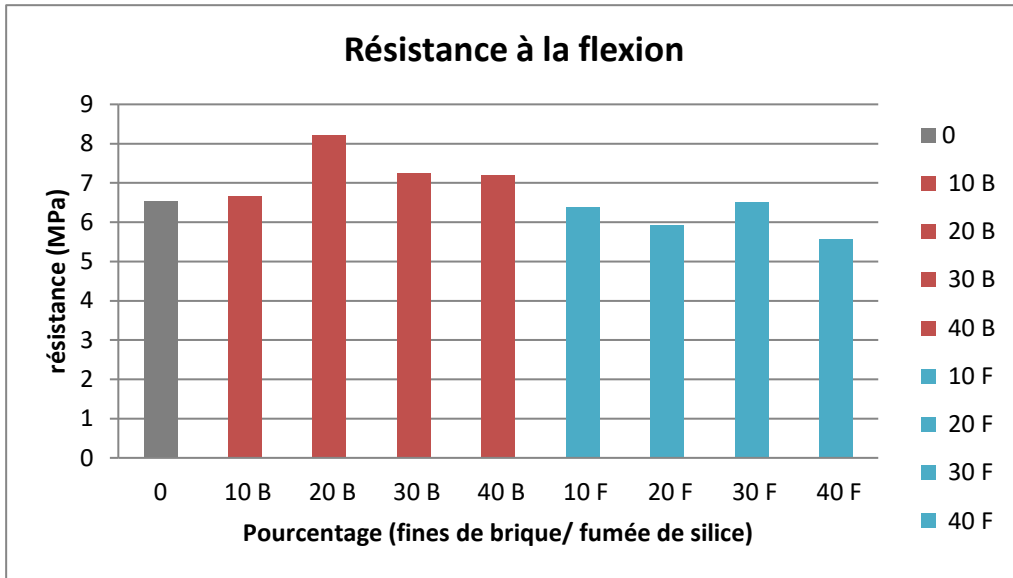


Figure III.24. Résistance à la flexion (7x7x28cm).

Commentaire

La **Figure III.24** montre la résistance à la flexion de différents types de béton après 28 jours, comme suit :

Les résultats présentés sur la **figure III.24** montrent une amélioration de la résistance à la flexion pour les bétons contenant les fines de brique. Les meilleures résistances sont obtenues dans le cas de 20% de fines de brique.

1/la résistance à la flexion des échantillons contenant de la fumée de silice, a subi une légère diminution par rapport à ceux des fines de brique.

2/dans le cas de la fumée de silice, une proportion (**30%**) permet d'obtenir les meilleures résistances à la flexion.

III.6.3. Essai d'ultrasonique

Le **Figure III.25** présentent les vitesses des ondes ultra sonores obtenues à travers des éprouvettes prismatique (15x15x15cm). Pour les différents bétons à base des fines de brique et fumée de silice.

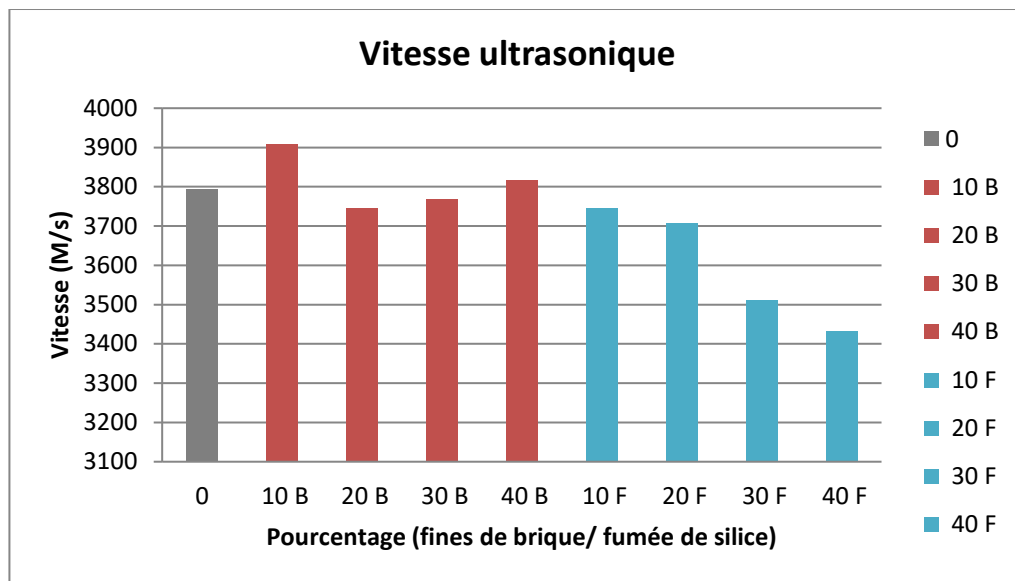


Figure III.25. Essai d'ultrasonique.

La **Figure III.25** représente l'évolution de la vitesse de propagation des ondes ultrason des différents bétons étudié dans le temps. On remarque que tous les bétons ont une cinétique analogique en ce qui concerne l'évolution de la vitesse d'ultrason dans le temps, mais avec des valeurs différentes, ces valeurs dépendent essentiellement à la composition du béton et son pourcentage de fines ; la vitesse d'ultrason nous donne des informations sur la compacité et l'homogénéité du béton et par conséquent une bonne indication sur le comportement mécanique de ces bétons.

On remarqué :

- La vitesse ultrasonique dans le BAP 10% de brique élevé par rapport le BAP sans fines, où la vitesse ultrasonique est égale à 3900 (M/s).
- La vitesse ultrasonique des béton préparés avec les fines de brique, est supérieure a ceux préparés avec de la fumée de silice.
- Les meilleures valeurs sont obtenues avec 10% de fines ensuite on remarque une réduction de vitesse.

III.6.4. Porosité accessible

La **Figure III.26** présente les résultats des essais sur des éprouvettes de béton(10x10x10 cm) pour les tests de porosité accessible après 28jours.

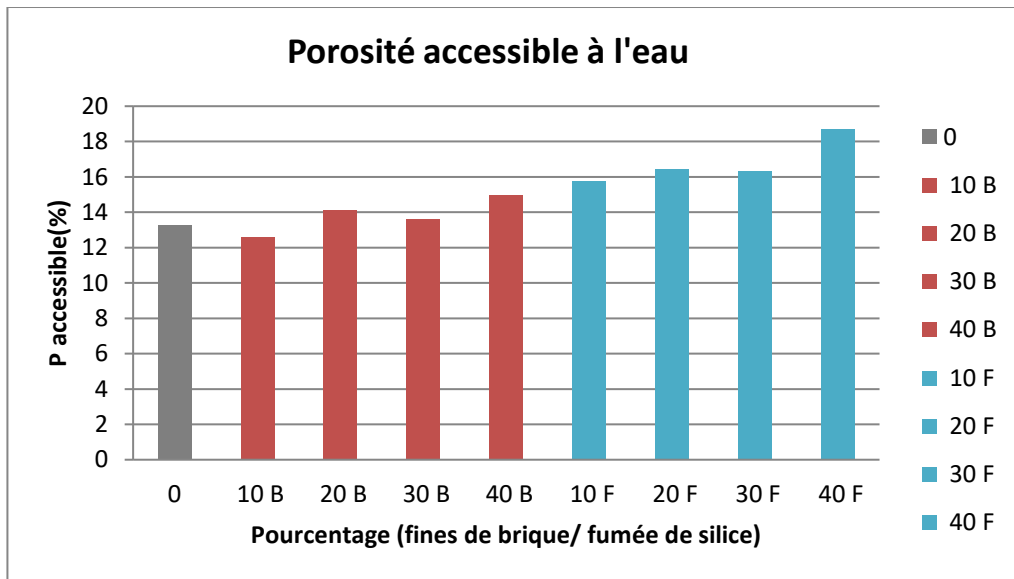


Figure III.26. Porosité accessible.

Commentaire

La **Figure III.26** montre la porosité accessible à l'eau des différents types de béton, on peut constater les remarques suivantes :

- Augmentation progressive de la porosité accessible des bétons contenant des fumées de silice de (10% à 40%).
- La porosité des béton contenant les fines de brique, est faible en comparaison avec ceux des bétons avec la fumée de silice.
- La porosité accessible à l'eau est minimale dans le cas de 10 % de fines.
- La porosité accessible à l'eau est maximale avec une valeur de 18 % dans le cas de 40 % de fumée de silice.

III.6.5. Absorption par immersion d'eau

La **Figure III.27** présente les résultats des essais sur des éprouvettes de béton (10x10x10cm) pour le test d'absorption par immersion après 28 jours.

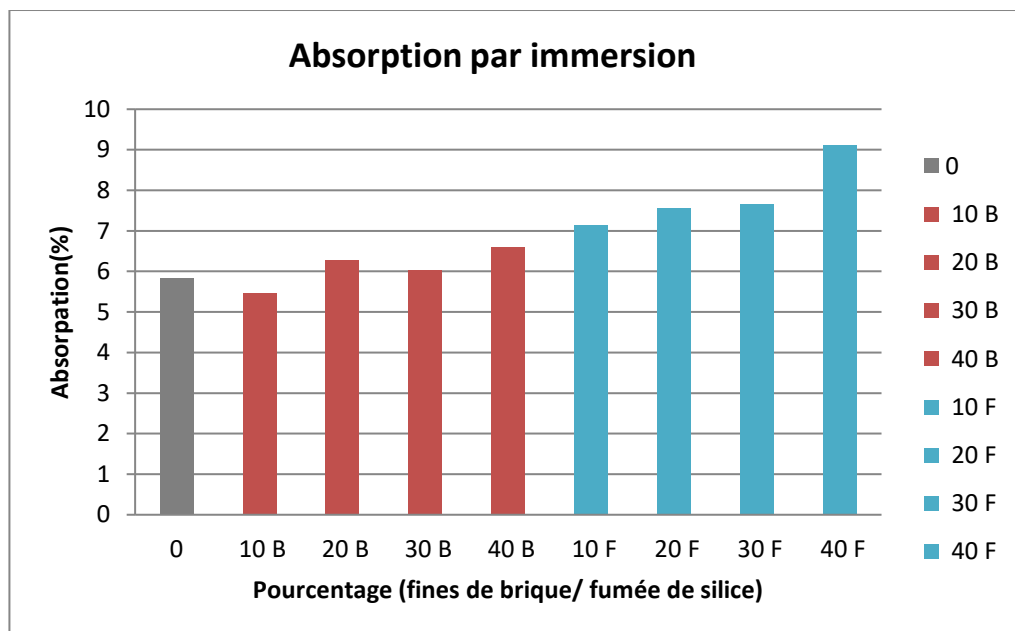


Figure III.27. Absorption par immersion.

Commentaire

L'absorption d'eau du béton a été mesurée après 28 jours, et selon les résultats présentés sur la figure, une augmentation de l'absorption d'eau de (10 à 40).

- L'utilisation des fines de brique permet d'obtenir une absorption réduite par rapport aux échantillons contenant de la fumée de silice.
- L'absorption est minimale dans le cas de 10 % de fines. Ensuite l'absorption subit une augmentation jusqu'à 40 % de fines.

III.6.6. Porosité capillaire

La **Figure III.28** présente les résultats des essais sur des éprouvettes de béton (10x10x10 cm) pour le test d'absorption capillaire

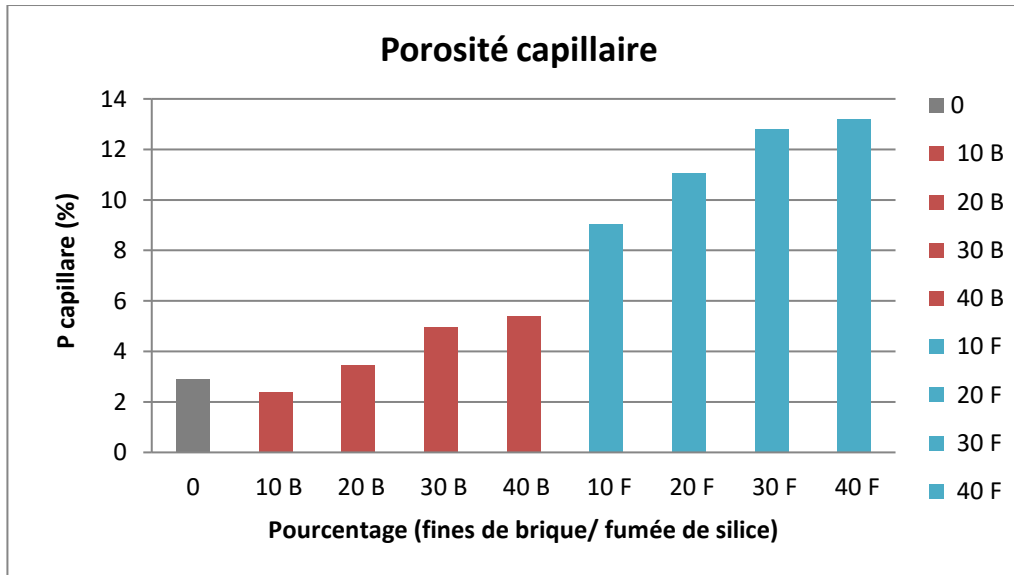


Figure III.28. Porosité capillaire.

Commentaire

Dans la **Figure III.28**, on remarque une augmentation du taux d'absorption capillaire en fonction de la proportion de fine de brique ou de fumée de silice.

L'augmentation du pourcentage d'absorption indique que le béton est poreux, et lors de l'ajout de fines de brique et de fumée de silice en proportions élevées demande une quantité d'eau supérieure pour la manipulation, cela entraîne une augmentation des vides et affaiblit ainsi la résistance et la durabilité du béton.

III.6.7. Essai séchage/mouillage

La **Figure III.29** représente les changements de résistance à la compression après cycles de mouillage et de séchage déterminés après cinq cycles.

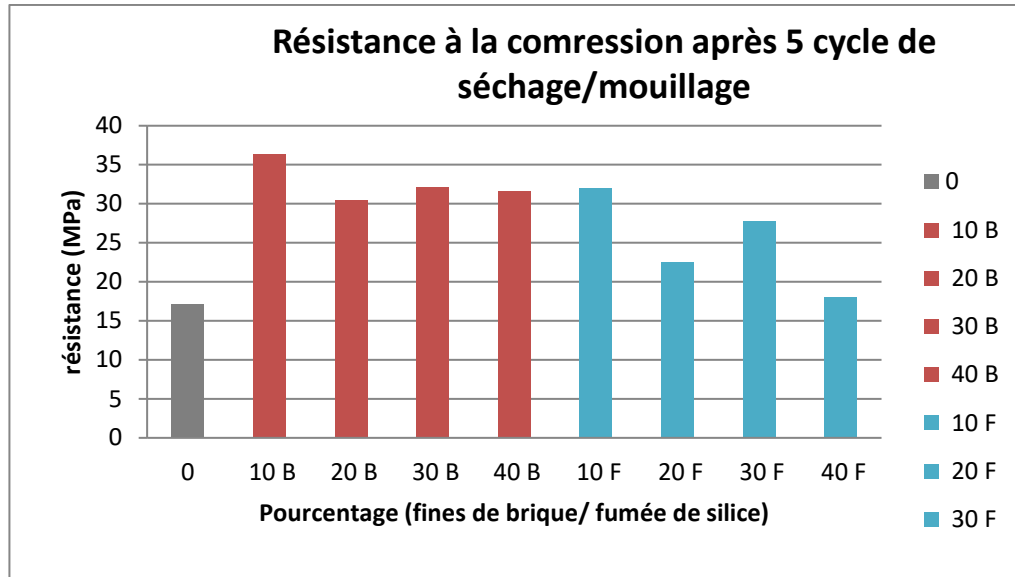


Figure III.29. Résistance à la compression après 5 cycle de séchage/ mouillage.

Commentaire

On remarque dans la **Figure III.29** que la résistance à la compression a diminué après cinq cycles de séchage/ mouillage.

- Les résistances obtenues avec les fines de brique sont supérieures par rapport des bétons avec la fumée de silice.
- Les résistances maximales sont obtenues dans le cas de 10 % de fines.

Discutions

L'essai de séchage/mouillage, après cinq cycles, perd la propriété de durabilité sur tous les types de béton étudiés, ce qui indique l'effet de facteurs naturels tels que la chaleur et l'humidité sur la résistance des structures en béton.

III.7. Conclusion

D'après les résultats expérimentaux obtenus, nous pouvons dire que notre béton autoplaçant se caractérise par un affaissement de cône compris entre (60 à 75 cm), le rapport des caissons est supérieur à 0,8 et la stabilité du tamis est inférieure à 15 %. L'ajout de fines de brique améliore les propriétés rhéologiques mais conduit à augmentation le rapport E/C.

Les fines de briques jouent les mêmes propriétés mécaniques que les fumées de silice ce qui permet de valoriser les déchets de briques dans la confection du béton autoplaçant.

Les propriétés mécaniques du béton sont fortement affectées par la température et l'humidité, ce qui altère sa durabilité. Le BAP avec des fines de brique dans certaines proportions offre un comportement plus acceptable que le BAP sans fines.

Quel que soit le type de béton, la résistance à la compression diminue dans le cas des essais de cycles de séchage/mouillage.

L'augmentation de la porosité est associée à l'augmentation des additifs qui est liés aux quantités d'eau nécessaires pour le gâchage : un pourcentage élevé de fine demande plus d'eau pour le gâchage ce qui provoque des microfissures après durcissement.

Conclusions générales

Les bétons autoplaçant (BAP) constituent une nouvelle technique de fabrication du béton pour la construction. Ils offrent des avantages d'ordre économique, technique et sociaux.

Dans le cas du BAP, l'absence de vibration qui caractérise leur mise en place permet en effet de réduire les coûts de préparation et mise en place et de construire des éléments à géométrie complexe ou fortement ferrillés.

Le présent travail apporte une vue sur la valorisation des fines des déchets issus de brique concassé comme addition pour la confection des bétons auto- plaçant.

Les résultats obtenus montrent l'intérêt de valoriser dans les BAP les fines de brique avec les proportions de 10%, 20%, 30% et 40% par rapport à la masse du ciment, pour la fabrication du béton autoplaçant.

Les remarques tirées de ce travail sont :

- La résistance à la compression est maximale dans le cas de 10% des fines de brique ou de fumée de silice ensuite on remarque une réduction de résistance jusqu'à 40% de fines. C'est-à-dire une diminution progressive de résistance.
- Les résultats de l'ajout de la fumée de silice ont montré une amélioration de la résistance à la compression par rapport aux fines de brique.
- Les résultats ont montré qu'on peut remplacer des fumées de silice par des fines de briques pour la confection du béton autoplaçant.
- La vitesse ultrasonique maximale est obtenue dans le cas de 10% de brique où cette vitesse atteint à 3900 (M/s).
- La vitesse ultrasonique des béton préparés avec les fines de brique, est supérieure à ceux préparés avec de la fumée de silice.
- Augmentation progressive de la porosité accessible des bétons contenant des fumées de silice de (10% à 40%). Elle est maximale avec une valeur de 18 % dans le cas de 40 % de fumée de silice et elle est minimale dans le cas de 10 % de fines.
- La porosité des béton contenant les fines de brique, est faible en comparaison avec ceux des bétons avec la fumée de silice.
- L'utilisation des fines de brique permet d'obtenir une absorption réduite par rapport aux échantillons contenant de la fumée de silice. Elle est minimale dans le cas de 10 % de fines. Ensuite l'absorption subit une augmentation jusqu'à 40 % de fines.
- L'essai de séchage/mouillage, après cinq cycles indique une réduction de résistance à la compression sur tous les types de béton étudiés

Références Bibliographiques

- ✓ [1] BELARIBI.O, « Durabilité des bétons autobloquants à base de vase et de pouzzolane ». Thèse de Doctorat. Université de Mostaganem, 2015
- ✓ [2] Assié.S.,2004–Durabilité des bétons autoplaçants. Thèse de doctorat. Institut national des sciences appliquées de Toulouse. France. 249p.
- ✓ [3] CHIBANI N., « Formulation et propriétés de béton autoplaçants (BAP) a base de granulats recyclés : Cas des fines de marbre ». Mémoire de magister, université Larbi Ben M'hidi Oum Bouaghi, 2013.
- ✓ [4] YAGOUB M., « Evaluation de la qualité du béton de fibres in situ cas de béton auto plaçant avec des fibres mixtes », Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider, Biskra, 2009.
- ✓ [5] Collection Technique CIM béton, Fiches techniques, Tome 2 ", Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre ", Édition octobre, 2006.
- ✓ [6] NASRI.S, « Caractérisation aux moyens des essais non destructifs (NDT) et Essai direct d'un béton auto plaçant (BAP) à base de matériaux locaux (effet de la nature du sable) ». Mémoire de magister. Université de Mohamed Boudiaf-M'sila, 2016.
- ✓ [7] Benaddad. S, Benatsou. N, "Etude à la compression d'un Béton autoplaçant avec additions minérales (Argile cuite et broyée et Fillers calcaires)", Mémoire de Master. Université d'Abderrahmane Mira-Bejaia, 2012.
- ✓ [8] Sheinn, A.M.M, “ Rheological modelling of self-compacting concrete ”, Doctoral Thesis of National University of Singapore, Singapore, 2007.
- ✓ [9] Okamura, H, “ Ferguson lecture for 1996 : self-compacting high-performance concrete ”, Concrete international 1997 ; 19(7) : 50-54.
- ✓ [10] Yurugi, M., Sakata, N., Iwai, M., and Sakai, G, “ Mix proportion for highly workable concrete ”, Conference Concrete 2000, Dundee, UK, 7-9 sept, 1993, 579-89.
- ✓ [11] Okamura, H., Ozawa, K, “ Self-compactable high-performance concrete in Japan ”, in Japan SP-169, ACI 1994 ; 31–44.

Références bibliographiques

- ✓ [12] Association Française de Génie Civil, “ Recommandations pour l'emploi des Bétons autoplaçants ”,2008.
- ✓ [13] Newman, J., and Choo, B.S, “Advanced Concrete Technology: Processes”, ISBN 0 7506 5105 9, Great Britain, 2003.
- ✓ [14] Domone, P.L., Chai, H.W, “ Design and testing of self-compacting concrete ”, Production Methods and Workability of Concrete, RILEM International Conference, EdsP.J.M. Bartos, D.L. Marris and D.J. Cleland, 1996 ; 199–208.
- ✓ [15] Ozawa, K., Maekawa, K., and Okamura, H, “ Développement de high performance concrete ”, Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo, 1992 ; 41(3): 381-439.
- ✓ [16] Noumowe, A., Carre, H., Daoud, A., and Toutanji, H, “ High-strength self-compacting concrete exposed to fire test ”, Journal of Materials in Civil Engineering 2006, 18(6): 754-8.
- ✓ [17] EFNARC, “ Specification and Guidelines for Self-compacting Concrete ”, European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures, EFNARC, Norfolk, UK, February 2002,32pp.
- ✓ [18] BS EN 206 – 1, “Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity ”, 2000.
- ✓ [19] Ferraris, C.F, “ Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete ”, State of the Art Report, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology 1999; 104(5): 461-78.
- ✓ [20] Abderrahmane. S, "Etude de la durabilité des systèmes béton armé mortiers de réparation en milieu marin", Thèse de Doctorat. Université de l'Université de La Rochelle, 2013.
- ✓ [21] DREUX .G, FESTA. J , "Nouveau guide du béton et de ses constituants", 8ème Édition.Eyrolles. Mai 1998.
- ✓ [22] TURCRY.P, "Retrait et fissuration des bétons autoplaçants : Influence de la formulation", Thèse de Doctorat. Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes, Février 2004
- ✓ [23] Marsh, D, “ An alternative to silica fume ”, Concrete Production 1994; 97(11): 24-30.
- ✓ [24] BOUKNI BAZIZA : tenue en feu des bétons autoplaçants ; thèse de magistère, décembre 2007, Mentourie Constantine, Algérie.

Références bibliographiques

- ✓ [25] P. ROUGEAU et CH MARRY DIPPE, O. FRANCY, Les BAP : synthèse des connaissances et compagne
- ✓ [26] YAMMINE JOUMANA., rhéologie des bétons fluides à hautes performances relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés mécaniques, thèse de doctorat, l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 262 p, 2007.
- ✓ [27] ADAM.M. NEVILLE ; propriétés des bétons, traduit par le CRIB, édition Eyrolles.
- ✓ [28] BRAHIM.N, "Etude des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons autoplaçants", Mémoire de magister. Université de Mohamed Khider – Biskra, 2006.
- ✓ [29] Benaddad. S, Benatsou. N, "Etude à la compression d'un Béton autoplaçant avec additions minérales (Argile cuite et broyée et Fillers calcaires)", Mémoire de Master. Université d'Abderrahmane Mira-Bejaia, 2012.
- ✓ [30] TURCRY .PH, LOUKILI. A, "Différentes approches pour la formulation des BAP", Revue Française de Génie Civil, Vol 7, N°4, 2003.
- ✓ [31] [S. Brahim] : Support de cours de matériaux de construction, Chapitre 2: Méthode de formulation des bétons autoplaçants.
- ✓ [32] MENAI Khaled, Etude de l'Effet d'Ajouts Chimiques et Minéraux sur la Maniabilité, la Stabilité et les Performances des Bétons Autonivelants, Mémoire de Maîtrise ès Sciences Appliquées. Spécialité : Génie Civil. Université de Sherbrooke, CANADA, Septembre, 1995.
- ✓ [33] ✓ KHAYAT K. H., Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidating Concrete, ACI Materials Journal, V. 96, No. 3, May-June 1999.
- ✓ [34] Association Française de Génie Civil « AFGC », Bétons auto plaçant–Recommandations provisoires, p 63, Juillet 2002.
- ✓ [35] SAMOUH. H, ROZIERE.E, LOUKILI.A, "Interprétation des mesures du retrait de dessiccation des bétons autoplaçants (BAP)", Conférence XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie, 6 au 8 juin 2012.
- ✓ [36] NF EN 12350–9, "Essai pour béton frais - Partie 9 : béton auto-plaçant - Essai d'écoulement à l'entonnoir en V", 2010.

Références bibliographiques

- ✓ [37] Chahine BELGHIT, "CONTRIBUTION A LA FORMULATION D'UN BÉTON AUTOPLAÇANT A BASE DE MATÉRIAUX LOCAUX Effet du laitier granulé micronisé sur l'ouvrabilité", Mémoire de Magister. Université BADJI-MOKHTAR-ANNABA, 2009.
- ✓ [38] BETHMONT.S, "Mécaniques de ségrégation dans les bétons auto plaçants (BAP)", Thèse de doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Décembre 2005.
- ✓ [39] RILEM, "Workability and Rheology of Fresh Concrete : Compendium of Tests, Report of Technical Committee TC145 WSM", pp.84-92, 2002.
- ✓ [40] SEDRAN.T, "Rhéologie et Rhéométrie des bétons : application aux bétons auto-nivelant", Thèse de Doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, p 220, 1999.
- ✓ [41] DE LARRAR F. BELLOG A. "L'influence du granulats sur la résistance à la compression des bétons", Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées , N°219, jan-Fév 1999, pp 41-52.
- ✓ [42] PONS G. PROUST E. ASSIE S. "Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete", Proceedings of 3 International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp. 645-645, 17-20 août 2003.
- ✓ [43] HADDAD.O, "Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons auto plaçants", 1er Congrès International sur la Technologie et la Durabilité du Béton à Alger, 24- 26 Mai 2004.
- ✓ [44] Mezghiche Bouzidi, « essais non-destructifs du béton », cours de 3ème année licence, université Mohamed Khaider, Biskra, 2013.
- ✓ [45] GUILLON.E, « Durabilité des matériaux cimentaires –modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles ». Thèse de doctorat. Ecole Normale Supérieure de Cachan, France 2004.
- ✓ [46] RISSEL KHELIFA.M, « Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants ». Thèse de Doctorat. Université de Constantine et Université D'Orléans, 2009.
- ✓ [47] MEHTA.P, MONTEIRO.K, « Concrete: Structure, properties, and materials », Prentice Hall, Engle wood cliff, 1993.

Références bibliographiques

- ✓ [48] JURIN.J, « An account of some experiments shown before the Royal Society ; with an enquiry into the cause of the ascent and suspension of water in capillary tubes», Philosophical Transactions of the Royal Society, 30 : 739 - 747. 1718.
- ✓ [49] Article L. 541-3 Code de l'Environnement - Livre V, Titre IV – chapitre 1er relatif à L'élimination des déchets et à la récupération des matériaux. 2007-2017 Le gifrance p. (561- 562).
- ✓ [50] Livre des résumés. Université le rois aoud saoudien,2019.
- ✓ [51] Mehdi C ., «Les déchets de chantier et le recyclage des matériaux dans le secteur du bâtiment» thèse de fin de formation 2007.
- ✓ [52] STAMBOULI M ., « Valorisation de débris de verre dans les infrastructures routières : Application au verre industriel, verre ménager et verre mixte », Mémoire de master recherche, 2016 .
- ✓ [53] CHELABI H , TALEB Z ., « Amélioration des propriétés mécaniques du plâtre de construction avec des déchets plastiques et verre ». Mémoire de master , université de bouira 2017
- ✓ [54] MAEL A , XAVIER GH , CHRISTIAN M , DORIS N ., « Lexique à l'usage des acteurs de la gestion des déchets » , Collection « RéférenceS » du Service de l'Économie, de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable (SEEIDD) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD) , Mai 2012 .
- ✓ [55] EL HAFIANE S ., Gestion des déchets solides au niveau de la Commune Urbaine d'Agadir et leur impact sur le milieu naturel , mémoire de fin d'étude , Marrakech , mars 2012.
- ✓ [56] Karim Ouamane, DG L'AND au service de la gestion des déchets industriels Alger, 25 mai 2017.
- ✓ [57] L. ZEGHICHI Etude des bétons basiques a base des différents granulats 2006.p (6,7,8,13).
- ✓ [58] CHIBANI Naouel « FORMULATION ET PROPRIETES DES BETONS AUTOPLAÇANTS (BAP) A BASE DE GRANULATS RECYCLES :
- ✓ Cas des fines de marbre », Mémoire de master , Université Larbi Ben M'Hidi - Oum-El-Bouaghi 2013.
- ✓ [59] Saadani Sabrina ; Comportement des bétons à base de granulats recyclent ; Master Académique ; Université Mentouri Constantine

Références bibliographiques

- ✓ [60] : AHMED ADDOU, professeur d'université de Mostaganem. « Développement durable, traitement de déchets, valorisation, élimination », édition Ellipses, Algérie, 25 juillet 2009.
- [61] : H. LACHI. Caractérisation physico-chimique des déchets industriels stabilisés/solidifiés par des liants hydrauliques-pats à ciment. Mémoire de fin d'étude (master II) ; Génie des procédés. Université Abderrahmane Mira – Bejaia : 2011-2012.
- ✓ [62] : BENYOUB.A, BERKOUKI. A, Impact de la Stabilisation/Solidification sur la cinétique de relargage des métaux lourds dans les matériaux poreux. . Mémoire de fin d'étude (master II) ; Génie des procédés. Université Abderrahmane Mira – Bejaia : 2013.
- [63] : MARTIN, S., GRISWOLD, W., Human Health Effects of Heavy Metals. Environ. Scien.And Technol. Bri. For Citizen. 2009, p15, 1-6.
- [64] SOUSSOU, S. Adaptation de la symbiose Fabacées-rhizobium aux sites miniers : Absorption du zinc par Anthyllis vulneraria et analyse de la diversité des bactéries symbiotiques d'Hedysarum coronarium, Thèse de Doctorat ; Sousse, Tunis. 2013, 190p
- ✓ [65] NIGRI G ., « Nouvelle élaboration d'un liant hydraulique », thèse de doctorat, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2018.
- ✓ [66] BONNET S, TURATSINZE A et GRANJU J-L., effets de l'incorporation de granulats en caoutchouc, issus du broyage de pneus usagés sur la résistance à la fissuration d'un mortier de ciment, Annales du bâtiment et des travaux publics, décembre 2004-N° 6
- ✓ [67] RAMACHANDRAN V-S ., utilisation des déchets et sous-produits comme granulats du béton, CBD-215-F, conseil national de recherches Canada, juin 1981.
- ✓ [68] BELKBIR H ., « Elaboration d'un béton auto plaçant léger à base des déchets de plastique », mémoire de DEUA, Université de Boumerdes, 2011.