



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar – El-oued

Faculté de technologie
Département Hydraulique et Génie Civil

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER EN GENIE CIVIL

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Présenté par :

1. BOUGOSSA Djamel
2. BADIS Hacene

Intitulé

**Influence D'addition Des Poudres (Déchets de
Construction et Sable de dunes) sur le béton
Auto-plaçant**

Soutenue le : 28 /05 /2025

Devant le jury composé de :

Dr : DJEDID Tarek	Maître de conférence (A)	Président	Université El-oeud
Dr : KAAB Mohammed Zohair	Maître de conférence (A)	Examineur	Université El-oeud
Dr : BEDADI LAID	Maître de conférence (A)	Encadreur	Université El-oeud

Année universitaire : 2024/2025

Résumé

Ce travail comprend une étude expérimentale sur la composition et la propriété des bétons auto-plaçant élaborés à partir des déchets de construction et Sable de dunes où sont été répartis comme ce qui suites: béton auto-plaçant avec poudre de déchet de béton, poudre de Marbre, poudre de Verre, poudre de Brique et poudre de Sable de dunes avec un pourcentage de 20% et 30% pour chaque poudre, avec des comparaisons qui ont été faite par apport au auto-plaçant de l'autre groupe de cette année et des études précédentes. L'objectif principal de cette recherche est de valorisation des déchets de matériaux de construction comme additifs pour le béton auto-plaçant, pour la disponibilité énorme de ces matériaux dans la nature, et pour réduire les déchets et préserver les ressources naturelles, ainsi que l'amélioration des caractéristiques physico-mécanique du béton auto-plaçant. Des études physico-mécanique ont été faites sur le béton auto-plaçant à l'état frais et à l'état durci, et dans notre étude on a utilisés 100 éprouvettes cylindriques (11x22cm) pour les essais de la compression et d'ultrason, et 100 éprouvettes prismatiques (7x7x28cm) pour les essais de retrait et la traction par flexion, et 20 éprouvettes cubique de (15x15x15cm) pour l'essai de perméabilité, et 20 éprouvettes cubique de (10x10x10cm) pour l'essai d'absorption d'eau par capillarité. Les essais effectués dans cette étude ont conclu que le béton auto-plaçant avec ajout de poudre de marbre était le plus performant parmi tous les bétons lors des tests de compression et de perméabilité, et concernant l'essai de traction en flexion, les résultats du béton auto-plaçant avec ajout de poudre de verre ont été les meilleurs, et en ce qui concerne l'essai d'absorption d'eau par capillarité, les résultats du béton auto-plaçant avec ajout de poudre de déchets de béton étaient les meilleurs, et relatif au essai ultrasonique, le béton auto-plaçant avec de la poudre de sable de dunes était le meilleur.

Mots clés : Béton auto-plaçant, Compression, Traction par flexion, Ultrason, Absorption d'eau par capillarité, Perméabilité.

ملخص

يتضمن هذا العمل دراسة تجريبية حول تركيب وخصائص الخرسانة ذاتية التوضع المصنوعة من مخلفات البناء ورمل الكثبان، حيث تم توزيعها كما يلي: الخرسانة ذاتية التوضع مع مسحوق مخلفات الخرسانة، مسحوق الرخام، مسحوق الزجاج، مسحوق الآجر ومسحوق رمل الكثبان بنسبة 20% و30% لكل مسحوق، مع إجراء مقارنات مع الخرسانة ذاتية التوضع من دراسة الفوج الثاني لهذا العام وكذا دراسات سابقة من العام الماضي. الهدف الرئيسي من هذا البحث هو تثمين نفايات مواد البناء كمواد مضافة للخرسانة ذاتية التوضع، وذلك لتوفر هذه المواد بشكل كبير في الطبيعة، وتقليل النفايات والحفاظ على الموارد الطبيعية، فضلاً عن تحسين الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة ذاتية التوضع. تم إجراء دراسات فيزيائية وميكانيكية على الخرسانة ذاتية التوضع في الحالة الطازجة والمتصلدة، وفي دراستنا تم استخدام 100 عينة أسطوانية (11 × 22 سم) لاختبارات الموجات فوق الصوتية والضغط، و100 عينة موشورية (7 × 7 × 28 سم) لاختبارات الانكماش والشد بالانحناء، و20 عينة مكعبة (15 × 15 × 15 سم) لاختبار النفاذية، و20 عينة مكعبة (10 × 10 × 10 سم) لاختبار امتصاص الماء بالخاصية الشعرية. وخلصت الاختبارات في هذه الدراسة إلى أن الخرسانة ذاتية التوضع بإضافة مسحوق الرخام كانت الأفضل من بين جميع الخرسانات في اختبار الضغط والنفاذية أما في اختبار الشد بالانحناء كانت نتائج الخرسانة ذاتية التوضع بإضافة مسحوق الزجاج هي الأفضل وبعدها الخرسانة ذاتية التوضع بإضافة مسحوق الرمل وبخصوص اختبار امتصاص الماء بالخاصية الشعرية فقد جاءت الخرسانة ذاتية التوضع بإضافة مسحوق نفايات الخرسانة هي الأفضل وفيما يتعلق باختبار الموجات فوق الصوتية فقد جاءت الخرسانة ذاتية التوضع بإضافة مسحوق رمل الكثبان هي الأفضل.

الكلمات المفتاحية: خرسانة ذاتية التوضع، الضغط، الشد بالانحناء، الموجات فوق الصوتية، امتصاص الماء بالخاصية الشعرية، النفاذية.

Abstract:

This work includes an experimental study on the composition and property of self-compacting concrete made from construction waste and dune sand where they were distributed as follows: self-compacting concrete with concrete waste powder, marble powder, glass powder, brick powder and dune sand powder with a percentage of 20% and 30% for each powder, with comparisons that were made with respect to the self-compacting concrete of the other group of this year and previous studies. The main objective of this research is to valorize construction material waste as additives for self-compacting concrete, for the enormous availability of these materials in nature, and to reduce waste and preserve natural resources, as well as the improvement of the physico-mechanical characteristics of self-compacting concrete. Physico-mechanical studies were carried out on self-compacting concrete in the fresh and hardened state, and in our study 100 cylindrical specimens (11x22cm) were used for compression and ultrasound tests, and 100 prismatic specimens (7x7x28cm) for shrinkage and flexural traction tests, and 20 cubic specimens of (15x15x15cm) for the permeability test, and 20 cubic specimens of (10x10x10cm) for the capillary water absorption test. The tests in this study concluded that self-locating concrete supplemented with marble powder performed best among all concretes in the compression and permeability tests. In the flexural tensile test, self-locating concrete supplemented with glass powder performed best, followed by self-locating concrete supplemented with sand powder. Regarding the capillary water absorption test, self-locating concrete supplemented with concrete waste powder performed best, and relative to the ultrasonic test, self-compacting concrete with dune sand powder was the best.

Key words: Self-compacting concrete, Compression, Flexural tension, Ultrasound, Capillary water absorption, Permeability.

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail :

*À cher parents qu'Allah les protèges qui nous ont
toujours soutenus durant toutes les périodes de vie et
de nos études.*

*Et une dédicace toute particulière à ma femme qui
nous ont toujours encouragé à mener à bien ce travail*

Et À tous nos familles grandes et petit.

*Et À tous nos amis que nous aimons et que nous
respectons beaucoup et à toute la promotion 2025.*

BOUGOSSA DJAMEL

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail :

À cher ma mère qu'Allah la protège et mon père « qu'il repose en paix l'accorde son paradis éternel » qui nous ont toujours soutenus durant toutes les périodes de vie et de nos études.

Et une dédicace toute particulière à ma femme qui nous ont toujours encouragé à mener à bien ce travail

Et À tous nos familles grandes et petit.

Et À tous nos amis que nous aimons et que nous respectons beaucoup et à toute la promotion 2025.

BADIS Hacene

Remerciements

Tout d'abord, grâce à ALLAH qui nous a aidés et nous a donné la force, le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

*Nous tenons à remercier spécialement et gratitude notre professeur et notre encadrant **BEDADI LAID** pour ses orientations, ses conseils et ses grandes bienveillances et le temps considérable qu'il a consacré durant l'élaboration de ce travail.*

Enfin, nous remercions également de nos enseignants qui nous ont apporté un complément scientifique tout au long de notre parcours universitaire ainsi que les dirigeants de laboratoire et le hall technologie de l'université, où nous avons effectué la plupart des essais et un remerciement spécialement nos amis Hamza et Ibrahim et nous n'oublions pas non plus nos collègues d'études et de travail et tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour la réalisation de ce mémoire.

Sommaire

Résumé	I
ملخص	II
Abstract	III
Dédicace	IV
Dédicace	V
Remerciements	VI
Introduction générale	1

Chapitre I: Etude bibliographique sur le béton auto-plaçant

I.1. Introduction	3
I.2. Histoire du béton auto-plaçant	4
I.3. Définition de béton auto-plaçant	4
I.4. Domaine d'utilisation des BAP	5
I.5. Avantages et inconvénients des BAP	6
I.5.1. Avantages techniques	6
I.5.2. Avantages économiques	6
I.5.3. Avantages écologiques	6
I.5.4. Inconvénients de BAP	6
I.6. Structure des BAP	6
I.6.1. Quantité importante de fines	6
I.6.2. Volume de pâte élevé (ciment + additions + eau efficace + air)	6
I.6.3. Un faible volume en gravillons	7
I.6.4. Dosage en super-plastifiant	7
I.6.5. L'utilisation d'agent de viscosité dans des cas particulier	7
I.7. Principaux constituants des BAP	7
I.7.1. Matériaux de base	8
I.7.1.1. Le ciment	8
I.7.1.1.1. Définition	8
I.7.1.1.2. Constituant des ciments	8
I.7.1.2. L'eau de gâchage	8
I.7.1.3. Granulats	8
I.7.2. Les additions ou les ajouts (les fines)	9
I.7.3. les adjuvants	9
I.8. Propriétés des BAP à l'état frais	11

I.8.1. Le remplissage	11
I.8.2. La résistance à la ségrégation	11
I.8.3. La capacité de passage	11
I.9. Caractérisation d'un béton auto-plaçant à l'état frais	13
I.9.1. La mesure d'étalement au cône d'Abrams (NF EN 12350-8)	13
I.9.2. Essai à la boîte en L (NF EN 12350-10)	15
I.9.3. Essai d'écoulement à l'anneau (J-Ring) (NF EN 12350-12)	16
I.9.4. L'essai de stabilité au tamis (NF EN 12350-11)	17
I.10. Spécification d'un BAP à l'état durci (destructif et non destructif)	18
I.10.1. Les essais destructifs du béton	19
I.10.1.1. Essai de compression (NF EN 12390-4)	19
I.10.1.2. La résistance en traction	20
I.10.1.2.1. La résistance en traction par flexion (NF P18-407)	20
I.10.2. Essais non destructifs du béton	21
I.10.2.1. Essai de la variation dimensionnelle du béton (Norme NF P 18-427) ...	21
I.10.2.2. Essai d'auscultation sonique (Essai Ultrasonique) (NF EN 12504-4) ...	21
I.10.2.3 Absorption d'eau par capillarité des éléments de maçonnerie (NF EN 772-11)	26
I.10.2.4. Perméabilité à l'eau des béton (EN 12390-8)	27
I.11. Méthodes de formulation des BAP	29
I.11.1. Méthode japonaise par (Okamura)	29
I.11.2. Méthode suédoise CBI (Cément Och Betong Institute)	29
I.11.3. Méthode dite Française LCPC (Laboratoire Central de Ponts et Chaussées) .	30
I.11.4. Méthode de l'AFGC (Association Française de Génie Civil)	30
I.11.5. Conclusion	31
I.12. Confection des BAP	31
I.13. Le transport et la livraison	31
I.14. Mise en place des BAP	32

Chapitre II: Description des matériaux

II.1. Introduction	34
II.2. Matériaux utilisés	34
II.2.1. Ciment	34
II.2.2. Granulats	35
II.2.2.1. Essais sur granulats	35

II.2.2.1.1. Echantillonnage (NF P 18-553)	35
II.2.2.1.2. Analyse granulométrique (EN 933-1 et EN 933-2)	36
II.2.2.1.3. Module de finesse du sable NF XP P 18-540	40
II.2.2.1.4. Equivalent de sable (NF P18-598)	40
II.2.3. L'eau de gâchage	41
II.2.4. Adjuvant (Super-plastifiants)	41
II.2.5. Additions minérales	42
II.2.5.1. Les déchets de brique	43
II.2.5.2. Les déchets de marbre	44
II.2.5.3. Les déchets de verre	45
II.2.5.4. Les déchets de béton	47
II.2.5.5. Le sable de dunes	48
II. 3. Conclusion	50

Chapitre III: Fabrication des bétons

III.1. Composition des bétons auto-plaçant	52
III.1.1. Formulation du béton auto-plaçant (BAP1) avec la poudre de brique	53
III.1.2. Formulation du béton auto-plaçant (BAP2) avec la poudre de marbre...	54
III.1.3. Formulation du béton auto-plaçant (BAP3) avec la poudre de verre	55
III.1.4. Formulation du béton auto-plaçant (BAP4) avec la poudre de béton	56
III.1.5. Formulation du béton auto-plaçant (BAP5) avec sable de dunes	57
III.1.6. Formulation du béton auto-plaçant (BAP1') avec la poudre de brique ...	59
III.1.7. Formulation du béton auto-plaçant (BAP2') avec la poudre de marbre ..	60
III.1.8. Formulation du béton auto-plaçant (BAP3') avec la poudre de verre	61
III.1.9. Formulation du béton auto-plaçant (BAP4') avec la poudre de béton	62
III.1.10. Formulation du béton auto-plaçant (BAP5') avec sable de dunes	63
III. 2. Conclusion	65

Chapitre IV: Essais effectués sur bétons: résultats et interprétations

IV.1. Introduction	67
IV.2. Elaboration des bétons	68
IV.2.1. Préparation de la gâchée	68
IV.2.2. Démoulage et conservation des éprouvettes	68
IV.3. Essais sur béton frais	68
IV.3.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams	68

IV.3.2. Essai de la boîte en L	70
IV.3.3. Essai de stabilité au tamis	71
IV.3.4. Essai J-Ring	72
IV.4 Essais sur béton durci	74
IV.4. 1 Essai de compression	74
IV.4.2 Essai de traction par flexion	78
IV.4.3 Essai d'absorption d'eau par capillarité	82
IV.4.4 Essai de perméabilité du béton	88
IV.4.5 Essai d'auscultation sonique (Essai Ultrasonique)	94
IV.5 Récapitulatif et discussion	98
IV.6. Conclusion et Recommandations	100
IV.6.1 Conclusion	100
IV.6.2 Recommandations	101
Références bibliographiques	i
Annexe I	vi
Annexe II	vii

Liste Des Tableaux

Chapitre I: Etude bibliographique sur le béton auto-plaçant

Tableau I.1 : Propriétés d'ouvrabilité des BAP	12
Tableau I.2 : Classes d'étalement au cône d'Abrams	14
Tableau I.3 : Classes d'aptitude à l'écoulement : boîte en	15
Tableau I.4 : Critères de stabilité à la ségrégation des BAP	18
Tableau I.5 : Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation	26

Chapitre II: Description des matériaux

Tableau II.1 : Quelques caractéristiques de ciment	35
Tableau II.2 : analyse granulométrie de gravier 8/16	37
Tableau II.3 : analyse granulométrie de gravier 3/8	38
Tableau II.4 : analyse granulométrie de sable 0/5	39
Tableau II.5 Les normes soviétiques spécifient le module de finesse des sables	40
Tableau II.6 : valeur de l'équivalent de sable	41
Tableau II.7 : Quelques caractéristiques de TEMPO-12	42
Tableau II.8 : Composition chimique du déchet de brique broyé	44
Tableau II.9 : Quelques caractéristiques de déchet de brique broyé	44
Tableau II.10 : Composition chimique du déchet de marbre broyé	45
Tableau II.11 : Quelques caractéristiques de déchet de marbre broyé	45
Tableau II.12 : Composition chimique du déchet de verre broyé	46
Tableau II.13 : Quelques caractéristiques de déchet de verre broyé	47
Tableau II.14 : Composition chimique du déchet de béton broyé	48
Tableau II.15 : Quelques caractéristiques de déchet de béton broyé	48
Tableau II.16 : Composition chimique de sable de dunes broyé	49
Tableau II.17 : Quelques caractéristiques de sable de dunes broyé	49
Tableau II.18 : Masse volumique apparente et absolue des matériaux utilisées	50

Chapitre III: Fabrication des bétons

Tableau III.1 : Composition du béton auto-plaçant avec ajout de poudre de brique « BAP1 »	53
Tableau III.2 : Composition du béton auto-plaçant avec ajout de poudre de marbre « BAP2 »	54
Tableau III.3 : Composition du béton auto-plaçant avec ajout de poudre de verre « BAP3 »	55

Tableau III.4 : Composition du béton auto-plaçant avec ajout de poudre de béton « BAP4 »	56
Tableau III.5 : Composition du béton auto-plaçant avec ajout de sable de dunes « BAP5 »	57
Tableau III.6 : Composition des différents bétons pour 1 m³ (proportion de 20%)	58
Tableau III.7 : Quantité des compositions des bétons pour différents types des éprouvettes (proportion de 20%)	58
Tableau III.8 : Composition du béton auto-plaçant avec ajout de poudre de brique « BAP1' »	59
Tableau III.9 : Composition du béton auto-plaçant avec ajout de poudre de marbre « BAP2' »	60
Tableau III.10 : Composition du béton auto-plaçant avec ajout de poudre de verre« BAP3' »	61
Tableau III.11 : Composition du béton auto-plaçant avec ajout de poudre de béton« BAP4' »	62
Tableau III.12 : Composition du béton auto-plaçant avec ajout de sable de dunes « BAP5' »	63
Tableau III.13 : Composition des différents bétons pour 1 m³ (proportion de 30%)	64
Tableau III.14 : Quantité des compositions des bétons pour différents types des éprouvettes (proportion de 30%)	64
Chapitre IV: Essais effectuées sur bétons: résultats et interprétations	
Tableau IV.1 : résultats de l'essai d'étalement au cône d'Abrams	69
Tableau IV.2 : résultats essai de la boîte en L	71
Tableau IV.3 : résultats essai de stabilité au tamis	72
Tableau IV.4 : résultats essai de J-Ring	73
Tableau IV.5 : Tableau récapitulatif des résultats d'essais à l'état frais des BAP	73
Tableau IV.6 : Valeurs des résistances pour les essais de compression sur les bétons étudiés pourcentage de 20%	75
Tableau IV.7 : Valeurs des résistances pour les essais de compression sur les bétons étudiés pourcentage de 30%	76
Tableau IV.8 : Valeurs des résistances pour les essais de traction par flexion sur les bétons étudiés pourcentage de 20%	79
Tableau IV.9 : Valeurs des résistances pour les essais de traction par flexion sur les bétons étudiés pourcentage de 30%	80

Tableau IV.10 : Valeurs des coefficients d'absorption d'eau par capillarité sur les bétons étudiés proportion de 20%	83
Tableau IV.11 : Valeurs des coefficients d'absorption d'eau par capillarité sur les bétons étudiés proportion de 30%	85
Tableau IV.12 : Valeurs du coefficient de perméabilité sur les bétons étudiés proportion de 20%	89
Tableau IV.13 : Valeurs de la profondeur d'eau à l'intérieur des échantillons étudiés proportion de 20%	90
Tableau IV.14 : Valeurs du coefficient de perméabilité sur les bétons étudiés proportion de 30%	91
Tableau IV.15 : Valeurs de la profondeur d'eau à l'intérieur des échantillons étudiés proportion de 30%	92
Tableau IV.16 : Les valeurs des mesures aux ultrasons sur les bétons étudiés dosage de 20%	95
Tableau IV.17 : Les valeurs des mesures aux ultrasons sur les bétons étudiés dosage de 30%	96
Tableau IV.18 :Récapitulatif des résultats des différents bétons	99

Liste Des Figures

Chapitre I: Etude bibliographique sur le béton auto-plaçant

Figure I.1 : Comparaison entre composition de BAP et d'un BO.....	7
Figure I.2 : représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures.	12
Figure I.3 : Cône d'Abrams	14
Figure I.4 : la boîte en L	16
Figure I.5 : Essai écoulement (J-Ring)	17
Figure I.6 : L'essai de stabilité au tamis	18
Figure I.7 : Essai sur l'éprouvette	20
Figure I.8 : machine de la presse	20
Figure I.9 : Schématisation du dispositif d'essai de traction par flexion	20
Figure I.10 : Appareillage pour la mesure de la variation dimensionnelle du béton	21
Figure I.11 : Appareil d'auscultation sonique et ses accessoires	22
Figure I.12 : Mesures en transparence directe	24
Figure I.13 : Mesures en surface	25
Figure I.14 : Mesures semi directe	25
Figure I.15 : Essai de capillarité sur un échantillon (exemple: de pierre calcaire)	27
Figure I.16 : mécanisme essai de perméabilité	28
Figure I.17 :Appareil de perméabilité à l'eau	28

Chapitre II: Description des matériaux

Figure II.1 : Echantillons de gravier 8/16 et de gravier 3/8 et sable 0/5	36
Figure II.2 : Courbe Analyse granulométrique de gravier 8/16	37
Figure II.3 : Courbe Analyse granulométrique de gravier 3/8	38
Figure II.4 : Courbe Analyse granulométrique de sable 0/5	39
Figure II.5 : Essai Equivalent de sable	41
Figure II.6 : Le Super-plastifiant TEMPO-12	42
Figure II.7 : Machine de broyage	42
Figure II.8 : déchets de brique	43
Figure II.9 : Diagramme d'analyse de (DRX) sur Poudre de Brique	43
Figure II.10 : Déchets de marbre	44
Figure II.11 : Diagramme d'analyse de (DRX) sur Poudre de Marbre	45
Figure II.12 : Déchets de verre	46
Figure II.13 : Diagramme d'analyse de (DRX) sur Poudre de Verre	46

Figure II.14 : Déchets de béton	47
Figure II.15 : Diagramme d'analyse de (DRX) sur Poudre de Déché de Béton	47
Figure II.16 : sable de dunes	48
Figure II.17 : Diagramme d'analyse de (DRX) sur Poudre de Sable de dunes	49
Figure II.18 : Exemple mesure la masse volumique absolue	50

Chapitre IV: Essais effectuées sur bétons: résultats et interprétations

Figure IV.1 : Essai d'étalement au cône d'Abrams	69
Figure IV.2 : Essai de la boîte en L	70
Figure IV.3 : Essai de stabilité au tamis	71
Figure IV.4 : Essai J-Ring	73
Figure IV.5 : essai d'écrasement	75
Figure IV.6 : Courbes graphique montrant l'évolution de la résistance à la compression en (MPa) de tous les six échantillon en fonction du temps pourcentage de 20%	75
Figure IV.7 : Courbes graphique montrant l'évolution de la résistance à la compression en (MPa) de tous les six échantillon en fonction du temps pourcentage de 30%	76
Figure IV.8 : Colonne graphique de comparaison entre les valeurs des bétons dosage de 20% et 30%	77
Figure IV.9 : Échantillon sous l'essai de traction par flexion	78
Figure IV.10 : Courbes graphique montrant l'évolution de la résistance à la traction par flexion en (MPa) de tous les échantillons en fonction du temps dosage de 20%	79
Figure IV.11 : Courbes graphique montrant l'évolution de la résistance à la traction par flexion en (MPa) de tous les échantillons en fonction du temps dosage de 30%.....	80
Figure IV.12 : Colonne graphique de comparaison entre les valeurs des bétons dosage de 20% et 30%	81
Figure IV.13 : Echantillons pour l'essai de l'absorption d'eau par capillarité	82
Figure IV.14 : Courbes graphique montrant l'évolution d'absorption de l'eau par capillarité sur les bétons étudiés dosage de 20%	84
Figure IV.15 : Courbes graphique montrant l'évolution d'absorption de l'eau par capillarité fonction de la masse d'eau absorbée en Kg/m ² et de la racine carrée du temps ($S^{1/2}$) sur les bétons étudiés dosage de 20%	84
Figure IV.16 : Courbes graphique montrant l'évolution d'absorption de l'eau par capillarité sur les bétons étudiés dosage de 30%	85

Figure IV.17 : Courbes graphique montrant l'évolution d'absorption de l'eau par capillarité fonction de la masse d'eau absorbée en Kg/m² et de la racine carrée du temps ($S^{1/2}$) sur les bétons étudiés dosage de 30%	86
Figure IV.18 : Colonne graphique de comparaison entre les valeurs des bétons dosage de 20% et 30%	87
Figure IV.19 : Etapes de l'essai de Perméabilité du béton	88
Figure IV.20 : Colonnes graphiques montrant les valeurs du coefficient de perméabilité sur les bétons étudiés dosage de 20%	89
Figure IV.21 : Colonnes graphiques montrant les valeurs de la profondeur d'eau à l'intérieur de l'échantillons étudiés dosage de 20%	90
Figure IV.22 : Colonnes graphiques montrant les valeurs du coefficient de perméabilité sur les bétons étudiés dosage de 30%	91
Figure IV.23 : Colonnes graphiques montrant les valeurs de la profondeur d'eau à l'intérieur de l'échantillons étudiés dosage de 30%	92
Figure IV.24 : Colonne graphique de comparaison des valeurs du coefficient de perméabilité sur les bétons étudiés dosage de 20% et 30%	93
Figure IV.25 : Colonne graphique de comparaison des valeurs de la profondeur d'eau à l'intérieur de l'échantillons étudiés entre les bétons dosage de 20% et 30%	93
Figure IV.26 : Essai d'auscultation sonore	94
Figure IV.27 : Courbes graphiques montrant l'évolution des valeurs des mesures ultrasoniques sur les bétons étudiés dosage de 20%	95
Figure IV.28 : Courbes graphiques montrant l'évolution des valeurs des mesures ultrasoniques sur les bétons étudiés dosage de 30%	96
Figure IV.29 : Courbes graphiques de comparaison des valeurs des mesures ultrasoniques sur les bétons étudiés dosage de 20% et 30%	97

Liste des abréviations

- ACI : **A**merican **C**oncrete **I**nstitute (En anglais).
- AFGC : **A**ssociation Française de **G**énie **C**ivil.
- BAP : **B**éton **A**uto **P**laçant.
- CANMET/ACI: International Conference on Recent Advances in Concrete Technology.
- CBI: **C**ement **O**ch **B**etong **I**nstitute.
- D max : **D**iamètre **M**aximal des Granulats Utilisés.
- EASEC-2: The Second **E**ast **A**sia-Pacific Conference on **S**tructural **E**ngineering and **C**onstruction (En anglais).
- E/C : Grandeur exprimant le rapport entre le poids d'Eau de gâchage et le poids de **C**iment d'un béton.
- G/S : La quantité qui exprime le rapport entre le poids de **G**avier et le poids de **S**able dans le béton.
- LCPC : **L**aboratoire **C**entral de **P**onts et **C**haussées.
- m/s : mètre/seconde.
- NF EN/ : **N**orme Française **E**uropean **N**orm.
- RILEM : **R**éunion **I**nternationale des **L**aboratoires et **E**xperts des **M**atériaux.
- **T500** : **T** : temps d'écoulement en secondes, **500** : diamètre de mesure en millimètre.
- Mg: masse de gravier.
- Vg : Volum de gravier.
- ρ_g : La masse volumique de gravier
- Vc : volume absolu du ciment.
- Mc : masse du ciment.
- ρ_c : La masse volumique du ciment.
- Vgt : volume absolu des granulats.
- Vs : volume absolu du sable.
- Mg : masse du gravier.
- NA 442 : Ciments : composition, spécification et critères de conformité des ciments courants.
- CEM II / B-L : Ciment portland au calcaire.
- 42,5 N : classes de résistance courante à 28 jours, à court terme ordinaire.

Introduction générale

L'avènement du béton a été l'une des avancées les plus révolutionnaires dans l'histoire de l'ingénierie et de la construction. Depuis son invention, le béton a joué un rôle crucial dans la réalisation d'infrastructures durables et dans le bâtiment d'infinies structures emblématiques à travers le monde. Sa polyvalence, sa durabilité et sa résistance en ont fait un pilier fondamental de l'industrie de la construction.

La consommation mondiale de béton est très importante, avec des quantités massives utilisées chaque année pour des projets de toutes tailles, des trottoirs aux gratte-ciel. Cette demande constante a également stimulé la recherche et le développement continus dans le domaine du béton, conduisant à l'émergence de nouveaux types de béton offrant des caractéristiques améliorées, des performances supérieures et une durabilité accrue.

Parmi ces innovations, le béton auto-plaçant représente une avancée majeure. Le BAP est formulé de manière à s'écouler et à se répartir uniformément dans les coffrages, remplissant ainsi efficacement les espaces les plus complexes sans intervention humaine (de manière autonome sans nécessiter de vibration), telles qu'une fluidité exceptionnelle, une capacité d'auto-nivellement et une adhérence améliorée aux armatures, permettant ainsi une mise en œuvre plus rapide et plus efficace sur le chantier. Cette caractéristique en fait un matériau idéal pour les structures qui contiennent des éléments à géométrie complexe ou fortement ferraillés.

Dans le cadre de cette mémoire, nous avons utilisé les déchets de matériaux de construction comme additifs pour le béton auto-plaçant.

Objectif de la recherche :

L'objectif principal de cette étude est de prouver la possibilité d'utiliser des déchets de matériaux de construction comme additifs pour le béton auto-plaçant. Cette étude vise également à exploiter les matériaux disponibles, à réduire les déchets et à préserver les ressources naturelles, ainsi que l'amélioration des caractéristiques physico-mécanique du béton auto-plaçant.

Pour cette raison, nous avons mené plusieurs expériences au cours desquelles nous avons évalué ce béton auto-plaçant dans des conditions fraîches et durcies, et l'avons comparé avec des études précédentes et les résultats de l'autre groupe.

Partie 1 : Recherche bibliographique

Chapitre I : Étude bibliographique sur le béton auto-plaçant

Étude bibliographique sur le béton auto-plaçant

I.1. Introduction

Le béton auto-plaçant (ou BAP) est un type de béton dont la mise en place ne nécessite pas de compactage, car le serrage du béton s'effectue par le seul effet de la gravité, sans nécessiter de vibration. Sa grande fluidité et sa résistance à la ségrégation (répartition hétérogène des granulats) lui permettent en effet de remplir les coffrages les plus complexes ou fortement ferrailés, même en présence d'une grande densité d'armatures, une capacité d'auto-nivellement et une adhérence améliorée aux armatures, tout en assurant une homogénéité parfaite du matériau.

Le BAP présente des résistances, des performances à l'état durci et une durabilité analogues à celles d'un béton traditionnel mis en œuvre par vibration, mais il s'en distingue principalement par ses propriétés à l'état frais. Aisance et rapidité de mise en œuvre, réduction du bruit et plus efficace sur les chantiers, diminution de la pénibilité (vibration du béton), possibilité de créer des formes architecturales innovantes et des parements de grande qualité en assurant le bon enrobage des armatures, ... les atouts du béton auto-plaçant sont nombreux et contribuent à son adoption croissante. [11]

En plus, le BAP offre des performances mécaniques supérieures, particulièrement une résistance élevée à la compression et à la traction, ainsi qu'une durabilité accrue, ce qui en fait un choix favorisé pour une large gamme d'applications structurelles et Architecturales. Sa capacité à réduire les anomalies de surface et à améliorer la qualité esthétique des structures en béton en fait également un matériau attractif pour les projets demandant une finition de haute qualité.

En raison de ses propriétés exceptionnelles, le BAP est devenu un élément essentiel dans de nombreux projets de construction modernes, allant des infrastructures civiles aux bâtiments commerciaux et résidentiels. Son emploi permet non seulement de diminuer les coûts de main-d'œuvre en éliminant le besoin de compactage manuel, mais aussi d'augmenter la cadence des calendriers de construction grâce à une mise en place plus rapide et plus efficace.

En conclusion, le béton auto-plaçant représente une avancée significative dans le domaine de la construction, offrant une combinaison unique de performances techniques, d'efficacité de mise en œuvre et de qualité esthétique. Son adoption croissante dans l'industrie de la construction témoigne de son importance en tant que matériau de choix pour les projets nécessitant des résultats de haute qualité et une productivité accrue sur le chantier.

Le sujet de cette recherche basé alentour de la formulation et des caractéristiques de béton auto-plaçant fabriqué à partir de déchets de construction et de comparer les performances, en termes de résistance mécanique, par rapport à un béton ordinaire des études passées.

L'étude consiste en l'investigation de l'impact des ajouts minéraux, à connaissance, la poudre de sable de dunes, et les déchets broyés de (marbre, verre, béton, brique) sur le comportement à l'état frais, et à l'état durci. [3]

I.2. Histoire du béton auto-plaçant

L'histoire du béton auto-plaçant (BAP) remonte à la fin des années 1980. La nécessité du BAP était déclarée la première fois par le prof. Hajime Okamura à l'université de technologie de Kochi au Japon en 1986. Pendant cette période, il y avait un manque dans le nombre des ouvriers qualifiés au Japon qui a directement affecté la qualité du béton. À ce problème, le BAP a été édifié pour répondre au besoin d'un béton durable de haute résistance qui possède une bonne fluidité et qui est capable de remplir les coffrages de forme complexe et fortement ferrailés sans aucune nécessité de moyens de vibration ou de compactage. [1]

Les chercheurs K. OZAWA ET K. MAEKAWA de Université de Kochi (Tokyo) ont développé le premier prototype de BAP pendant l'été de 1988. Ces résultats ont été présentés par K. OZAWA pour la première fois au 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. [7]

En janvier 1997, le comité RILEM (**R**éunion **I**nternationale des **L**aboratoires et **E**xperts des **M**atériaux, systèmes de construction et ouvrages) sur le béton auto-plaçant a été formé et le 1er symposium sur le BAP a eu lieu à Stockholm en septembre 1999.

Depuis cette date, la recherche sur le BAP a débuté d'accroître dans le monde entier jusqu'à nos jours. Plusieurs études ont été publiées traitant les caractéristiques fraîches et durcies du BAP dans de nombreux pays. [1]

En Algérie, ce type de béton présente un intérêt supplémentaire lié à la densité du ferrailage imposée par le règlement parasismique notamment dans les zones à forte sismicité. [9]

I.3. Définition de béton auto-plaçant

Ces bétons sont des bétons spéciaux, un béton auto-plaçant (BAP) est un béton très fluide, homogène et stable, qui se met en place par gravitation et sans vibration. Il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique.

Le terme de béton auto nivelant peut aussi être utilisé mais il concerne plutôt des applications horizontales (dallage par exemple). [5]

Les propriétés caractéristiques de BAP sont :

- Viscosité et fluidité hautes, sans aucune tendance à la ségrégation.
- Capacité de passage dans les milieux confinés
- Des aérations du béton pendant son écoulement.
- Excellente aptitude au remplissage des moindres recoins du coffrage par un béton homogène, même en présence de ferrailage dense et sans utilisation de vibreur.

I.4. Domaine d'utilisation des BAP

Les principaux domaines d'application sont les suivants :

- Génie civil : ponts, tunnels et autres ouvrages d'art, pour les structures à haute densité d'armatures ou dont les coffrages sont à géométrie complexe ;
- Bâtiment : éléments structuraux verticaux (poteaux, voiles, voiles de grande hauteur, poutres, ...) éléments architecturaux de forme complexe et de finitions de haute qualité ;
- Préfabrication : le béton auto-plaçant est désormais largement utilisé dans la réalisation des éléments structurels préfabriqués ;
- Rénovation et réparation : le BAP est particulièrement efficace dans les réparations structurelles nécessitant une fluidité optimale du béton afin d'assurer un bon enrobage et une bonne adhérence des armatures dans des zones difficiles d'accès ;
- Applications industrielles et maritimes : lorsque les structures sont exposées à des conditions sévères et à des exigences de résistance chimique élevées, le BAP offre une solution robuste et durable.

Pour des applications horizontales, comme les dalles ou les planchers, le béton auto-plaçant est plus spécifiquement appelé BAP horizontal, ou parfois encore dénommé béton auto-nivelant.

[11]

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

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

I.5. Avantages et inconvénients des BAP

Le béton auto-plaçant BAP présentent de nombreux avantages notamment :

I.5.1. Avantages techniques

- Exécution d'éléments de forme compliqué.
- Facilité et rapidité la mise en œuvre du béton.
- Coulage de béton en milieux fortement ferraillés.

I.5.2. Avantages économiques

- Diminution du coût de main d'œuvre et de la durée de réalisation.
- Absence d'utilisation de vibreur diminuant les coûts et les bruits sur chantier et leur voisinage.

I.5.3. Avantages écologique

- Valorisation des déchets de construction (récupération de ces déchets au niveau des chantiers, industries, carrières, zone de concassage). [27]

I.5.4. Inconvénients de BAP

- La composition des BAP implique un dosage délicat des matières premières. Il est donc préférable de faire appel à une entreprise spécialisée pour réaliser ces bétons. [6]
- Le coût BAP est partiellement élevé due les additifs et les adjuvants sont cher.

I.6. Structure des BAP

Après plusieurs recherches effectuées en laboratoires, les essais ont montré que pour répondre aux exigences du cahier des charges, la composition d'un béton auto-plaçant doit avoir certaines caractéristiques. [2]

I.6.1. Quantité importante de fines

D'après AFGC les BAP intègrent dans leurs formulations une certaine quantité de fines de l'ordre de 500 kg/m^3 , pour assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage.

I.6.2. Volume de pâte élevé

Il faut maintenir un volume important de pâte pour limiter les frottements entre granulats. Le rôle de la pâte (ciment + additions + eau efficace + air) étant précisément d'écarter les granulats, son volume dans les B.A.P. est donc élevé ($330 \text{ à } 400 \text{ l/m}^3$).

I.6.3. Un faible volume de gravillons

Les gros granulats sont à l'origine des blocages du béton en zone confinée, c'est la raison pour laquelle leur volume est limité dans les BAP. Il y a deux facteurs à prendre en compte, pour les BAP le rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 1 et le diamètre maximal des gravillons (D_{max}) dans un BAP compris classiquement entre 10 et 20mm.

I.6.4. Dosage en super-plastifiant

Les super-plastifiants sont des réducteurs d'eau à haute efficacité. Leur mode d'action principal est d'augmenter la maniabilité des bétons. Il est possible de les utiliser comme réducteurs d'eau afin de diminuer le rapport E/C.

I.6.5. L'utilisation d'agent de viscosité dans des cas particuliers

Les agents de viscosité sont utilisés essentiellement pour améliorer la cohésion et la stabilité des mélanges de béton notamment lorsque ce dernier est coulé sous l'eau. [10]

I.7. Principaux constituants des BAP

Les constituants des BAP peuvent être assez différents de ceux des bétons ordinaires. Ils peuvent différer tant par leurs proportions que par leur choix. Étant donné le mode de mise en place des BAP, les constituants entrant dans la fabrication du BAP, selon leur utilisation, en trois catégories ; les matériaux de base (ciment, granulats et eau de gâchage), les additions minérales, ainsi que les adjuvants chimiques. [7]

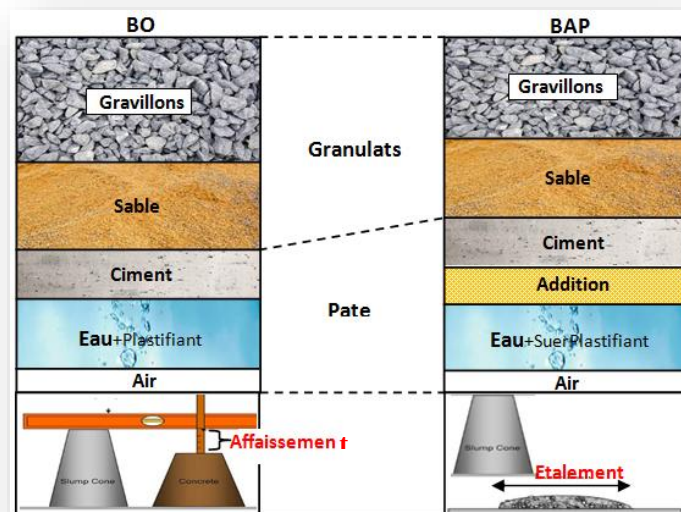


Figure I.1 : Comparaison entre composition de BAP et d'un BO [1]

I.7.1. Matériaux de base**I.7.1.1. Le ciment**

En principe, tous les types normalisés de ciment conviennent pour élaborer le BAP. Cependant, l'utilisation du ciment portland (contenant seulement le clinker) nous donne toute latitude pour varier et contrôler les quantités introduites des additions minérales. Les analyses chimiques et minéralogiques du ciment sont d'une grande importance, mais elles sont souvent transparentes à l'utilisateur puisque celles-ci sont exécutées à la cimenterie et sont des critères d'assurance qualité. [6]

I.7.1.1.1. Définition

Le ciment est un liant hydraulique. C'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui, mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.

I.7.1.1.2. Constituant des ciments

Les ciments courants ont pour constituant principal le clinker, auquel il peut être ajouté d'autres matériaux (calcaire, laitier de haut fourneau, les cendres volantes, etc.) dont le but est de modifier certaines de leurs propriétés et de proposer une gamme de produits capables de résoudre les différents problèmes qui se posent lors de la réalisation de certains ouvrages, soit en raison des conditions environnementales, soit pour des raisons de performances mécaniques. On distingue des constituants principaux, secondaires et additifs. [28]

I.7.1.2. L'eau de gâchage

En général toutes les eaux conviennent si elles ne contiennent pas d'éléments dangereux qui influenceraient défavorablement sur le durcissement (matières organiques telles que le huiles, les graisses, et les sucres ...) ou la corrosion des armatures (acides humiques, eaux de mer...). L'eau potable du réseau de distribution convient très bien mais l'eau puisée en eau courante ou dans la nappe phréatique peut en général convenir.

I.7.1.3. Granulats

On définit les granulats comme l'ensemble des grains inertes compris entre 0 et 40 mm (Sable, graviers, cailloux) dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant de recyclage. On distingue les granulats roulés extraits de ballastières naturelles ou de rivière et les granulats concassés, obtenus à partir des roches exploitées en carrières.

Les granulats sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent. La courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage, des poids des matériaux passants dans des tamis de dimensions normalisées. [29]

Et pour notre étude les BAP sont réalisés avec :

- Granulats roulés ou concassés : (Le coefficient de frottement est plus faible entre les granulats roulés qu'entre les granulats concassés).
- Afin d'empêcher tout risque de blocage lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16 mm.
- La proportion des gravillons par rapport au sable est plus faible qu'avec un béton ordinaire afin de permettre l'écoulement du matériau dans les zones confinées.
- Le rapport G/S est de l'ordre entre 1 et 1.2. [3]

I.7.2. Les additions ou les ajouts (les fines)

Différentes additions minérales peuvent être ajoutées au béton, substituant ou non une partie du ciment, afin d'améliorer certaines de ses propriétés ou de lui conférer des propriétés particulières. Ce sont des matériaux finement divisés parmi lesquelles nous citons les fillers calcaires, la fumée de silice, les cendres volantes, pouzzolanes et le laitier de haut fourneau, etc... qui proviennent principalement de l'industrie. Ces fines présentent plusieurs avantages dans l'industrie et la formulation des bétons. L'avantage principale des additions minérales influencent fortement les propriétés des bétons à l'état durci ; elles permettent d'améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons. [4]

I.7.3. Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits solubles dans l'eau qui incorporés aux bétons à des doses qui doivent être inférieures ou égales à 5% du poids du ciment permet d'améliorer certaines de ces propriétés comme la rhéologie, les propriétés mécaniques et la durabilité. [6]

Les principaux adjuvants sont :

✓ Les super-plastifiants

Ce sont des réducteurs d'eau à haute efficacité, et se présentent généralement sous forme de liquide. Ils sont composés de longues molécules organiques de masse élevée et ils permettent d'obtenir des bétons maniables et ouvrables par défloculation des grains de ciment. Les plus couramment utilisés sont les sels de sodium ou de calcium du poly-naphtalène sulfoné, et les sels de sodium de la poly-mélatamine sulfonée. [7]

✓ Les retardateurs de prise

Les retardateurs de prise ont pour fonction principale d'augmenter le temps de début de prise du ciment. Ils augmentent le temps de début de transition du mélange pour passer de l'état plastique à l'état rigide. Ils permettent aussi de réguler le dégagement de chaleur dû à l'hydratation du ciment.

✓ Les accélérateurs de prise

L'accélérateur de prise a pour fonction principale de diminuer les temps de début et de fin de prise du ciment. Il agit sur la prise en diminuant les potentiels électriques à la surface des grains, ce qui favorise la diffusion des ions et donc accélère le processus d'hydratation. Il permet d'augmenter la densité d'hydrates à un temps donné donc de diminuer le temps de début de transition du mélange pour passer de l'état plastique à l'état rigide.

✓ Les accélérateurs de durcissement

Les accélérateurs de durcissement ont pour fonction principale d'accélérer le développement des résistances initiales des bétons, avec ou sans modification du temps de prise.

✓ Les entraîneurs d'air

Les entraîneurs d'air ont pour fonction d'entraîner la formation dans le béton, pendant le malaxage, de microbulles d'air (de diamètre inférieur à 100 microns) uniformément réparties dans la masse qui subsistent après durcissement. La résistance au gel du béton durci ainsi que sa résistance aux sels de déverglaçage sont considérablement améliorées. Les microbulles qui coupent les réseaux capillaires limitent le développement des contraintes dues au gel de l'eau interstitielle (en créant de petits vases d'expansion pour l'eau interstitielle)

✓ Les hydrofuges de masse

Les hydrofuges de masse ont pour fonction principale de diminuer l'absorption capillaire des bétons durcis et permettent de limiter la pénétration de l'eau dans les pores et les capillaires du béton (colmatent les pores capillaires), sans altérer ses qualités plastiques et esthétiques, ils trouvent leur utilisation dans la réalisation des réservoirs d'eau, piscines, bêche à eau. [12]

I.8. Propriétés des BAP à l'état frais**I.8.1. Le remplissage**

Le remplissage du béton, ou la déformabilité, est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le béton auto-plaçant est capable de remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné, en se déformant sous l'effet de son propre poids, et sans sollicitations. Le remplissage est observé sous deux aspects : la capacité de remplissage et la vitesse de remplissage. Le premier aspect est lié à la capacité de déformation du béton, il traduit le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace. Le second est lié à la vitesse de déformation, il traduit ainsi la vitesse d'écoulement du béton. Le test d'étalement au cône d'Abrams donne des indications sur les deux aspects. [3]

I.8.2. La résistance à la ségrégation

La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité dans la distribution des constituants ce qui provoque généralement une séparation de phases solide et liquide ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions. La ségrégation peut donc se manifester dans un béton de façons différentes, comme la séparation entre la pâte et les granulats, la séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinées, et une répartition non homogène de l'air occlus.

Pour éviter la ségrégation, il faut réduire la quantité d'eau libre dans le béton en réduisant le rapport E/C du béton. La résistance à la ségrégation du béton peut aussi être augmentée en élevant la viscosité de l'eau dans la suspension, avec certains agents de viscosité.

I.8.3. La capacité de passage

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

En effet, le blocage des granulats est provoqué par la quantité importante de granulats dans le béton, et par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armatures ou dans un confinement. Le mécanisme de blocage peut être illustré dans un plan par le schéma de la Figure I.2 ci-dessous qui montre un béton s'écoulant entre deux armatures avant et au moment du blocage. [1]

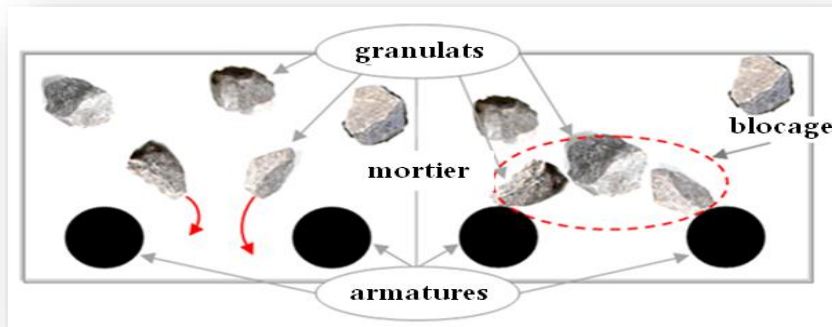


Figure I.2 : représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures [1]

Donc, un béton est qualifié d'auto-plaçant s'il satisfait les propriétés citées ci-dessus, en trouvant le bon compromis entre des caractéristiques presque contradictoires : fluidité et résistance à la ségrégation. Pour résumer, on présente les propriétés des BAP, les moyens de les obtenir et les actions entreprises pour leur mise en œuvre dans le Tableau I.1 :

Tableau I.1 : Propriétés d'ouvrabilité des BAP [3]

Propriétés d'un BAP	Moyens d'obtention	Actions à mener dans la formulation
Remplissage(fluidité)	Réduction des frictions entre les particules	Augmentation du volume de pâte
	Optimisation de la pâte	Utilisation des super-plastifiants Optimisation du rapport E/C
Résistance à la Ségrégation	Réduction de l'eau libre dans le béton	Réduction du rapport E/C
		Utilisation de matériaux de grande surface Utilisation d'agents de viscosité
	Réduction de la séparation de phases	Réduction du rapport E/C
		Utilisation d'agents de viscosité Réduction de la taille maximale des granulats
Capacité de passage	Réduction de blocage des granulats	Réduction du volume de gravier
		Réduction de la taille maximale des granulats

I.9. Caractérisation d'un béton auto-plaçant à l'état frais

Lors de la formulation, la caractérisation des BAP est nécessaire. Cela consiste à connaître son comportement à l'état frais à partir de tests mis en place depuis son développement. Les principaux tests réalisés sont empiriques, et ont pour objectif de vérifier les différentes propriétés citées ci-dessus. Ils sont destinés à caractériser le béton de part : sa fluidité, sa stabilité et son absence au blocage. Ce qui suit résume les différents tests d'ouvrabilité qui caractérisent les bétons auto-plaçant.[22]

Parmi ces tests :

I.9.1. La mesure d'étalement au cône d'Abrams (NF EN 12350-8) [36]

L'essai le plus courant, car le plus facile à mettre en œuvre, permettant d'évaluer sa fluidité cette essai est réalisée avec au cône d'Abrams, et aussi connu en anglais sous le nom de (slump flow).

✓ Objectif

Ce test réalisé pour déterminer sa consistance et aussi de détecter visuellement les premiers signes de ségrégation du béton.[1]

✓ Mode opératoire

Pour réaliser cet essai une table d'étalement et un cône d'Abrams sont utilisés. Cône d'Abrams est un cône en acier galvanisé. Il a un diamètre intérieur à sa base de 200 mm, un diamètre intérieur à son sommet de 100 mm et une hauteur de 300 mm.

Déroulement de l'essai comme ce qui suit :

- Placer la plaquette sur un support stable
- Humidifier la surface de la plaque, et éliminer l'eau en excès avec un chiffon.
- Placer le cône d'Abrams au centre de la plaque, et le faire remplir avec le béton en versant de manière continue jusqu'à la face supérieur du cône.
- Araser si nécessaire à l'aide d'une truelle et nettoyer la plaque si nécessaire avec chiffon humide.
- Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées.
- Une fois le béton s'est étalé sur la table, mesurer le diamètre final sur les deux coté perpendiculaire.
- Notez les résultats des deux valeurs. Si les deux valeurs est différent de plus de 5cm, l'essai doit être invalidé et reconduit. [21]

$$slump\ flow = \frac{D1 + D2}{2}$$

- Classification des résultats

La norme classe l'étalement du béton en trois groupes selon le Tableau I.2.

Tableau I.2 : Classes d'étalement au cône d'Abrams [35]

Classe	Étalement en mm	Domaine d'application de BAP
SF1	550 - 650	- Structures en béton non armées ou faiblement armées, béton coulé à partir du haut (ex : dalles). - Bétonnage à la pompe par injection (ex : tunnels). - Petites sections (ex: les piles et les fondations profondes).
SF2	660 – 750	- La majorité des applications.
SF3	760 – 850	- Application vertical. - Structures trop ferrillées. - Coulage à partir du dessous du coffrage. - Structures de forme complexe.

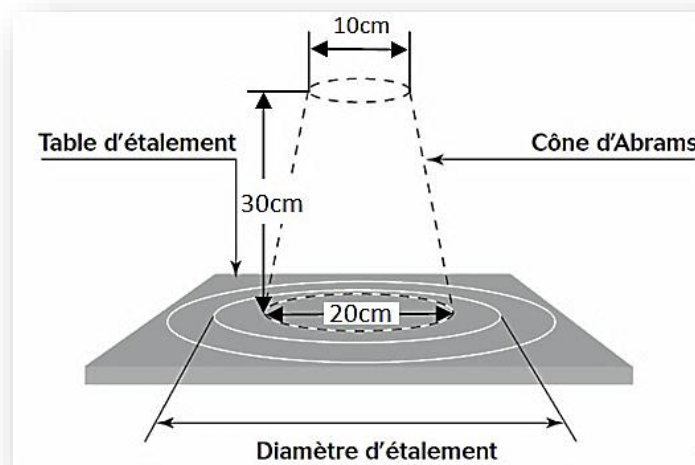


Figure I.3 : Cône d'Abrams [30]

I.9.2. Essai à la boîte en L (NF EN 12350-10) [37]

Ce test est aussi connu sous le nom de (L-box) provenant de l'anglais.

○ Objectif

La boîte en L permet de tester la mobilité du béton frais en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptable tel que la présence d'armatures par exemple. [21]

○ Mode opératoire

La boîte en L est une boîte en acier avec deux parties, l'une verticale et l'autre horizontale, séparées par une trappe et une grille de deux ou de trois barres de diamètre et d'espacement fixé. L'essai se déroule en suivant les étapes suivantes :

- Remplir la partie verticale de la boîte en L.
- Patienter une minute avant de soulever la trappe, le béton s'écoule à travers la grille.
- Calculer le rapport de la hauteur de béton dans la partie verticale de la boîte après l'essai et la hauteur du béton dans l'extrémité de la partie horizontale.

Ce rapport correspond au taux de remplissage.

- Classification des résultats

Plus le taux de remplissage est élevé, moins le béton est susceptible de ségréguer. Pour pouvoir utiliser ce béton, le taux de remplissage (H_2/H_1) doit être supérieur ou égale à **0,8**.

La norme classe les bétons auto-plaçant selon leur taux de remplissage et selon le nombre de barres.

Tableau I.3 : Classes d'aptitude à l'écoulement : boîte en L [35]

Classe	Taux de remplissage de la boîte en L
PL1	≥ 0.80 avec 2 armatures
PL2	≥ 0.80 avec 3 armatures

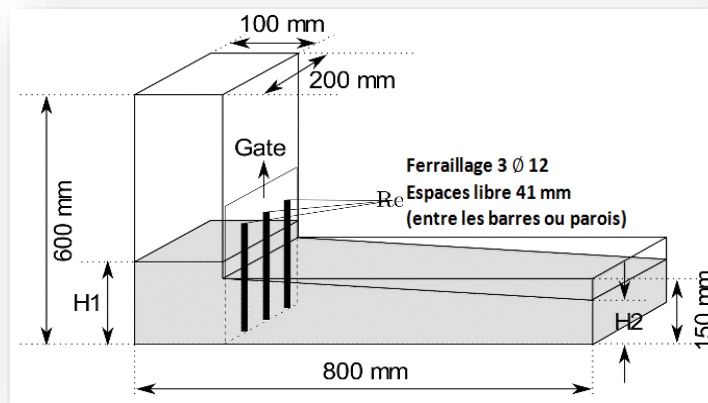


Figure I.4 : la boîte en L [30]

I.9.3. Essai d'écoulement à l'anneau (J-Ring) (NF EN 12350-12) [38]

Le test J-Ring (Japanese-Ring) permet d'évaluer la différence entre le comportement du béton avec obstacles, l'étalement et le temps d'étalement t_{500j} du béton auto-plaçant lorsque le béton s'écoule à travers un anneau supportant une grille d'armatures. [4]

Cet essai ne convient pas lorsque le diamètre maximum des granulats excède 40 mm.

○ Objectif

Permet de mesurer la mobilité du BAP en milieu confiné ou avec des obstacles.

○ Mode opératoire

- Placer une plaque métallique de manière plane sur le sol.
- Placer l'anneau de (j-ring) au centre de la plaque.
- Ensuite, placer le cône d'Abrams au centre de l'anneau sur la plaque.
- Remplissez le cône de béton jusqu'au milieu, puis nivelez la surface avec une tige spéciale, puis terminez le remplissage du cône.
- Soulevez délicatement le cône verticalement.

Méthode de mesure des résultats

- ✓ Mesure de l'étalement final (Moyenne de deux diamètres perpendiculaires) en mm.
- ✓ Mesure du temps d'écoulement T_{500} en secondes.
- ✓ Mesure du blocage qui est donné par la différence de niveau entre le béton du centre de la galette formée et le béton au périmètre externe de l'anneau (mm).

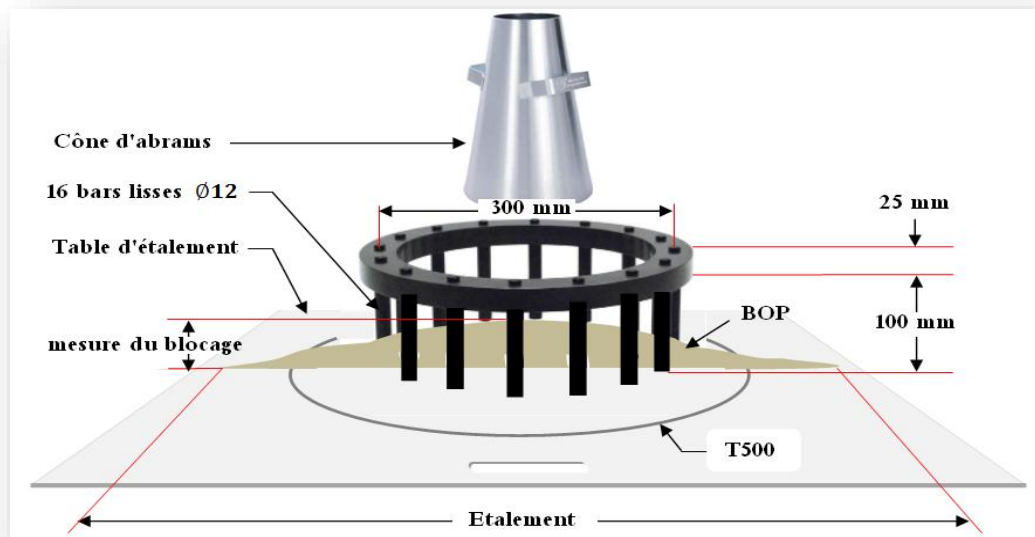


Figure I.5 : Essai écoulement (J-Ring) [1]

I.9.4. L'essai de stabilité au tamis (NF EN 12350-11) [39]

Une résistance à la ségrégation statique se traduit par la capacité qu'a un BAP à maintenir ses particules en suspension, sans risque de tassement des particules par gravité. Pour caractériser la ségrégation statique d'un BAP on utilise l'essai de stabilité au tamis. [4]

○ Mode opératoire

Pour réaliser cet essai un seau et un tamis sont utilisés. Le tamis a une ouverture de maille de 5 mm, et ensuite en suivant les étapes suivantes :

- Remplir un seau de 10 litres avec du béton ;
- Le laisser reposer 15 minutes ;
- Verser la partie supérieure (4,8 kg de béton $\pm$ 0.2 kg) sur le tamis(5mm) depuis une hauteur de 50cm.
- Attendre 2 minutes puis peser la laitance qui est passée au travers le tamis(5mm).
- Calculer le pourcentage de laitance en divisant la masse de la laitance par la masse initiale du béton.

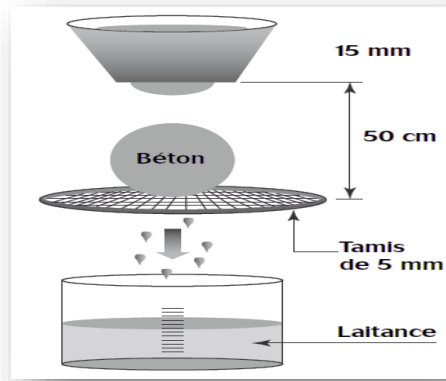


Figure I.6 : L'essai de stabilité au tamis [30]

- Classification des résultats

Plus le pourcentage de laitance est faible, plus la stabilité à la ségrégation statique est grande.

La norme classe les bétons selon leur résistance à la ségrégation statique en trois classe présente au Tableau I.4.

Tableau I.4 : Critères de stabilité à la ségrégation des BAP [23]

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

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

Le béton à l'état durci a soumis à différents essais pour déterminer sa résistance notamment :

a) Les essais destructifs :

- Essais de compression.
- Essais de traction.

b) Les essais non destructifs :

- Essai de la variation dimensionnelle du béton.
- Essai d'auscultation dynamique.

I.10.1. Les essais destructifs du béton**I.10.1.1. Essai de compression (NF EN 12390-4) [40]**

Les essais de mesure de la résistance à la compression sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques ou bien cubiques conformément aux prescriptions de la norme. Ce test fournit la force de compression [F] qui génère la rupture de l'échantillon. [6]

✓ Objectif

Le but de l'essai est de déterminer la résistance à la compression du béton.

✓ Mode opératoire

- Préparer l'échantillon d'essai (en s'assurant que les deux surfaces exposées à la pression sont planes et propres).
- S'assurer que les deux plaques de la presse en contact avec l'échantillon à tester sont bien propres.
- Installer l'échantillon au centre de la plaque principale de l'appareil.
- Notez les informations nécessaires sur la machine (type d'échantillon - tailles d'échantillon - accélération de la compression etc.).
- Puis appuyez sur le bouton de démarrage. La charge est appliquée progressivement sans choc et se poursuit jusqu'à rupture de l'éprouvette. [1]

Expressions des résultats

Après la rupture les valeurs de la force et de la résistance à la compression R_c sont lues directement sur l'écran de la machine (avec courbe), ou calculé par l'équation suivante :

$$.R_c(N/mm^2) = \frac{F}{S}$$

Avec :

- F : la force maximale relevée au moment de la rupture de l'éprouvette sur l'écran de la presse exprimée en (N).
- S : L'aire de l'éprouvette laquelle la force de compression est appliqué (mm^2).

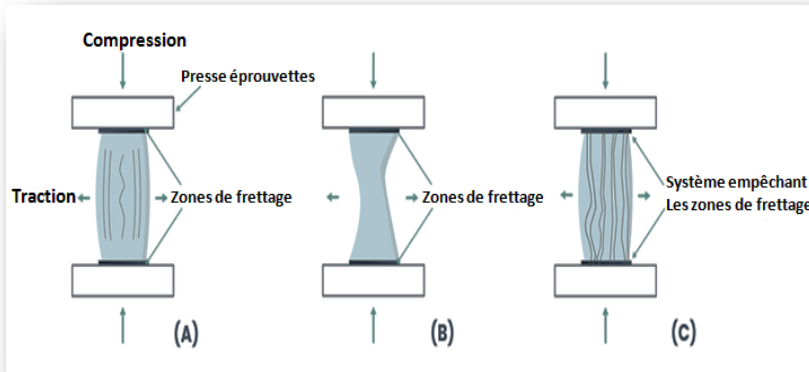


Figure I.7 : Essai sur l'éprouvette [32]



Figure I.8 : machine de la presse [31]

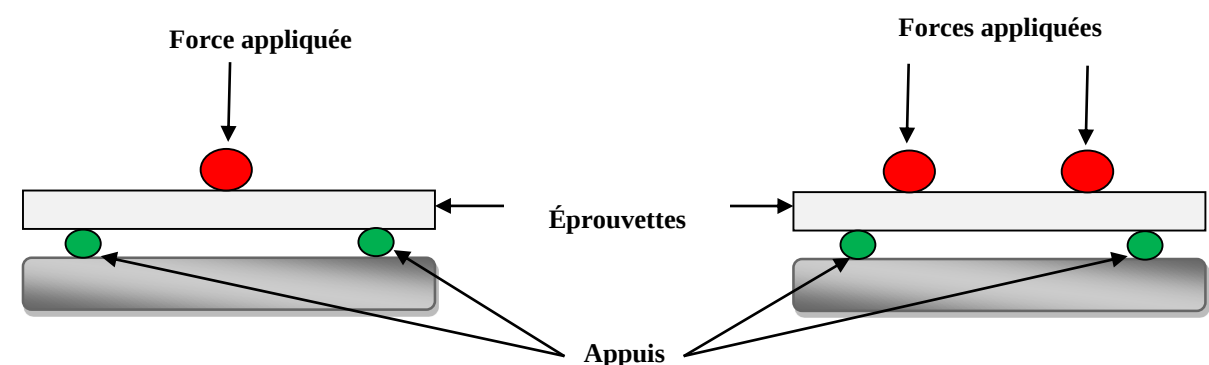
I.10.1.2. La résistance en traction

La résistance à la traction (f_{t28}) est peu étudiée en comparaison à la résistance à la compression. Du fait qu'elle est beaucoup plus faible que cette dernière. De plus, la résistance à la traction s'annule même complètement si des fissures de retrait se sont développées. Selon les normes en vigueur, il existe 3 principal méthodes d'essais de tractions :

I.10.1.2.1. La résistance en traction par flexion (NF P18-407) [41]

Cet essai s'effectue en général selon l'une des deux procédures :

- Avec une seule charge concentrée au milieu de l'éprouvette.
- Avec deux charges concentrées, symétriques, égales, appliquées au tiers de la portée (Figure I.9).



Avec une seule charge concentrée au milieu

Avec deux charges concentrées, symétriques, égales

Figure I.9 : Schématisation du dispositif d'essai de traction par flexion

I.10.2. Essais non destructifs du béton

I.10.2.1. Essai de la variation dimensionnelle du béton (Norme NF P 18-427) [42]

En dessiccation, les bétons auto-plaçant et les bétons ordinaires vibrés possèdent en général un retrait total équivalent. En mode endogène, les bétons auto-plaçant et les bétons ordinaires présentent un retrait similaire à 28 jours.

Au-delà d'un an, les BAP présentent un retrait légèrement supérieur à celui des BO. Il est vraisemblable que les légères différences entre les retraits des deux types de béton sont dues l'évaporation de l'eau et au volume de pâte qui est plus important dans les bétons auto-plaçant. [3]

- **Objectif**

Cette essai Il s'agit d'évaluer les valeurs de retrait ou de gonflement du béton étudié.

- **Méthode de mesure :**

L'essai de la variation dimensionnelle du béton consiste à mesurer l'évolution de la distance entre deux plots en laiton positionnés aux deux extrémités d'une éprouvette prismatique et assurant le contact avec les détecteurs de l'appareil de mesure.

La mesure s'effectue le plus souvent à l'aide d'un appareil appelé **rétractomètre**, équipé d'un capteur de déplacement et d'une barre en acier de (28 cm ou autre), servant de référence.

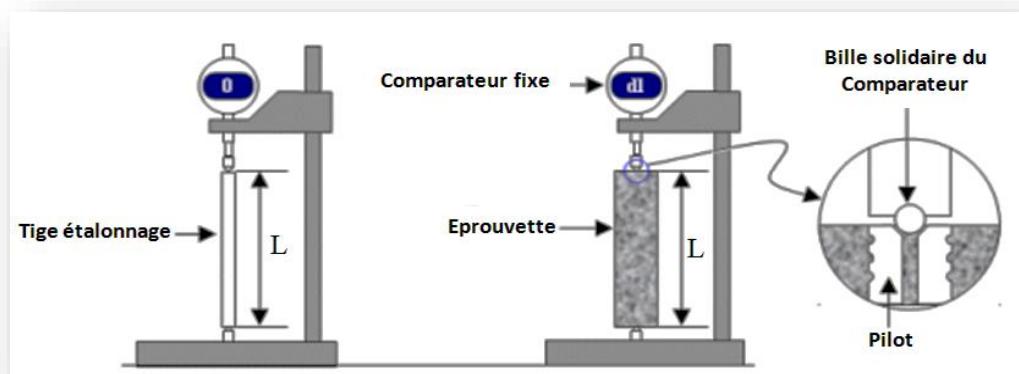


Figure I.10 : Appareillage pour la mesure de la variation dimensionnelle du béton [1]

I.10.2.2. Essai d'auscultation sonore (Essai Ultrasonique) (NF EN 12504-4) [43]

Connu sous le nom d'essai aux ultrasons c'est le temps mis par une impulsion ultrasonique pour parcourir la distance entre le transducteur-émetteur et le transducteur-récepteur à travers le béton. L'essai consiste à mesurer le temps de propagation de la première impulsion d'un trait d'ondes appelées ondes longitudinales, généré par un transducteur, entre deux points déterminés du béton.

▪ Objectif :

Le but de l'essai est d'évaluer la qualité du béton durci de l'ouvrage en déterminant la vitesse de propagation des ondes ultrasonores longitudinales dans celui-ci.

▪ Appareillage

L'appareillage est constitué d'un générateur d'impulsions électriques, d'une paire de transducteurs, d'un amplificateur et d'un dispositif électronique de mesure de temps permettant de mesurer la durée écoulée entre le départ d'une impulsion générée par le transducteur-émetteur et son arrivée au transducteur-récepteur. Un barreau de calibrage est fourni pour permettre d'obtenir une ligne de référence du mesurage de la vitesse.

Il existe deux sortes d'appareils électroniques de mesure du temps :

- a) un oscilloscope sur lequel le premier front de l'impulsion est visualisé par rapport à une échelle de temps appropriée ;
- b) un compteur avec affichage numérique direct (Figure I.15).



Figure I.11 : Appareil d'auscultation sonore et ses accessoires [33]

❖ Facteurs influant sur les mesurages de la vitesse de propagation du son

Pour que le mesurage de la vitesse de propagation du son soit reproductible, il est nécessaire de prendre en compte les différents facteurs susceptibles d'avoir une influence sur les mesurages. Ces facteurs sont les suivant :

A. Teneur en humidité

Les effets de l'humidité sont importants pour l'établissement de corrélations destinées à fournir une estimation de la résistance du béton. Il est important de bien tenir compte de ces effets pour estimer la résistance.

B. Température du béton

Il a été constaté que des variations de température du béton comprises entre 10 °C et 30 °C n'entraînent pas de changement significatif en l'absence de changements correspondants des propriétés de résistance ou d'élasticité.

C. Longueur de parcours

Il est recommandé, à l'exception des conditions indiquées en 8.4.1.D, que la longueur de parcours soit d'au moins 100 mm pour le béton dont la dimension maximale nominale du plus gros granulat est de 20 mm ou moins, et de 150 mm pour le béton dont la dimension maximale nominale du plus gros granulat est comprise entre 20 mm et 40 mm.

D. Forme et dimension des éprouvettes

Le Tableau 8.1 indique la relation qui existe entre la vitesse de propagation du son dans le béton, la fréquence du transducteur et donne des recommandations sur la dimension latérale minimale admissible de l'éprouvette.

E. Influence des armatures

Dans la mesure du possible, il convient de ne pas effectuer les mesurages à proximité immédiate des armatures en acier parallèles à la direction de propagation de l'impulsion.

F. Fissures et vides

Lorsqu'une impulsion ultrasonique traversant du béton rencontre une interface béton-air, la transmission d'énergie est négligeable au niveau de cette interface. Si la longueur du vide traversé est supérieure à la largeur des transducteurs et à la longueur d'ondes du son utilisé, le temps de transit sera plus long que dans un béton similaire exempt de défaut. [13]

▪ Mode Opératoire**• Travaux préparatoires :**

- Poncer et égaliser la partie de la surface de l'élément à ausculter où le transducteur sera Fixé.
- Employer un matériau intermédiaire entre les deux comme la vaseline, un savon, etc. et en prenant soin de vérifier que l'appareil est bien appliqué contre la surface à tester.

• Points de mesures :

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

- Distances minimales entre points de mesures :
 - On recommande une distance minimale de parcours de 400 mm pour les mesures en Surface.
 - Étalonnage de l'appareil :
 - L'ultrason doit toujours être contrôlé par des essais d'étalonnage avant chaque utilisation. L'étalonnage consiste à vérifier le temps de propagation à travers la tige étalon dont le temps est connu à l'avance. Il faut ajuster l'ultrason dans le cas où le temps mesuré ne correspond pas à celui marqué sur la tige étalon.
 - Manières de mesure :
 - La détermination de la vitesse de propagation des ultrasons se fait de trois manières, suivant le type de l'élément à tester :
- ✓ **Mesure en transparence directe :**
- Les mesures en transparence sont utilisées dans le cas des éprouvettes, des poteaux ou de certaines poutres. Les transducteurs sont appliqués sur les deux faces de l'élément à tester (Figure I.16)

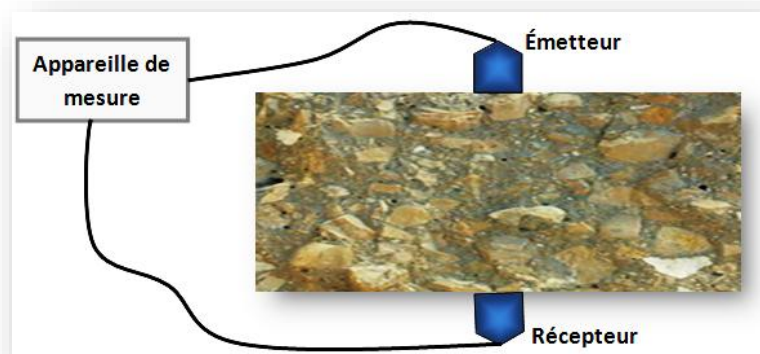


Figure I.12 : Mesures en transparence directe [1]

✓ **Mesures en surface indirecte:**

Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les dalles et éléments en longueur, montré sur la Figure I.17.

L'émetteur est maintenu en un point fixe, le récepteur est déplacé successivement à des distances marquées à l'avance et après avoir relevé le temps correspondant à un point considéré, on passe au point suivant.

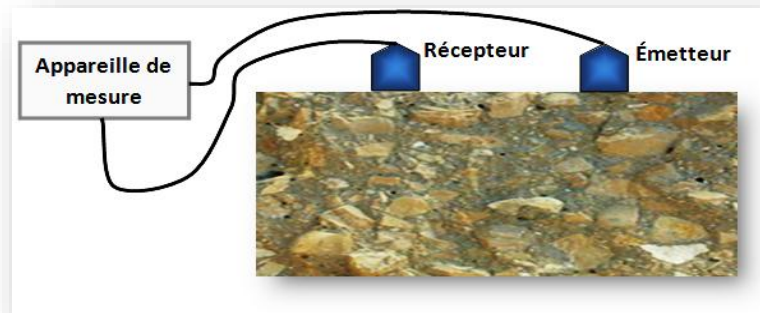


Figure I.13 : Mesures en surface [1]

✓ Mesures semi directe :

Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les éléments de structure où l'on ne peut pas utiliser les deux autres manières (Figure I.18). [14]

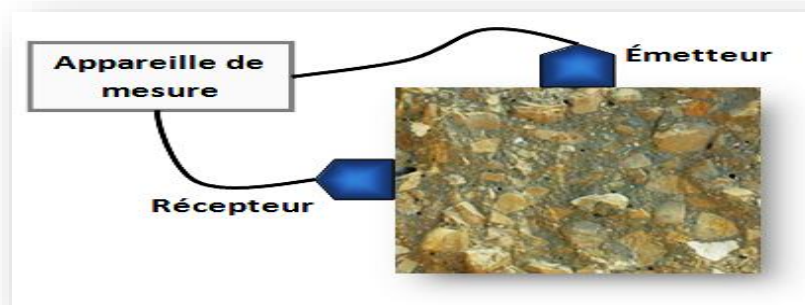


Figure I.14 : Mesures semi directe [1]

Interprétation Des Résultats De Mesure Aux Ultrasons :

Formule de calcul comme suite :

$$V = d/t$$

$$Rc = 0,08177 \times e^{(0,00147 \times V)}$$

Avec :

V : la vitesse de son en mètre/seconde.

d : la distance entre l'émetteur et récepteur en mètre.

t : le temps propagation d'onde par seconde.

Rc : résistance en compression exprimée en MPa.

Tableau I.5 : Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation [14]

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

I.10.2.3 Absorption d'eau par capillarité des éléments de maçonnerie (NF EN772-11) [44]

L'absorption capillaire est le transfert d'eau dans un matériau poreux dû à des tensions de surface dans les capillaires et il consiste à mesurer le taux d'absorption de l'eau par succion capillaire des éprouvettes de bétons, non saturés, mise en contact avec l'eau sans pression hydraulique. Ce mécanisme de transfert est lié à la structure poreuse et à l'humidité relative du béton. L'absorption d'eau à l'intérieur du béton sec est connue par deux paramètres majeurs à savoir la porosité effective du béton et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (absorptivité). Étant donné que le remplissage des capillaires et des vides a lieu en même temps que la montée de l'eau durant l'absorption. L'absorptivité est influencée par le rapport E/C et le type d'ajout minéral utilisé dans la formulation du béton.

La détermination de cette caractéristique intrinsèque s'avère particulièrement importante pour les éléments et les structures en contact avec le sol, par exemple, plinthes, soubassements et pavage.

▪ Objectif :

C'est la mesure du coefficient d'absorption d'eau par capillarité.

▪ Méthode de travail

- Les échantillons sont préalablement séchés à une température de 70 °C jusqu'à obtention d'une masse constante.
- Puis pesés afin d'en déterminer la masse sèche.
- Les échantillons sont ensuite placés dans un bac permettant une mise en contact constante d'une face avec 3 ± 1 mm d'eau.
- Une pesée des éprouvettes est assurée au cours du temps, à des instants définis par la norme.

A noter que les éprouvettes testées peuvent se présenter sous la forme d'un cube ou d'un cylindre.

▪ Interprétation des résultats

Le coefficient d'absorption d'eau par capillarité est défini comme la pente de la régression linéaire de la partie de la courbe reliant la quantité d'eau absorbée par unité de surface à la racine carré du temps.

$$C_{w,s} = \frac{m_{so,s} - m_{dry,s}}{As\sqrt{t_{so}}} \times 10^6$$

Avec :

$C_{w,s}$: coefficient d'absorption d'eau par capillarité, en $g/m^2.S^{1/2}$.

$m_{so,s}$: Masse de l'éprouvette après immersion pendant un temps t , en g.

$m_{dry,s}$: Masse de l'éprouvette après séchage, en g.

As : Surface brute de la face de l'éprouvette immergée dans l'eau, en mm^2 .

t_{so} : Temps d'immersion, en s.

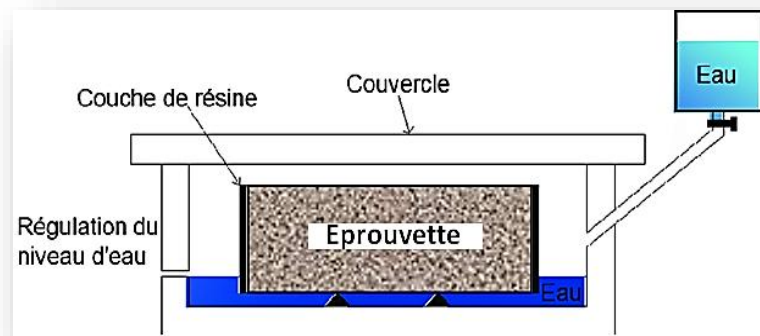


Figure I.15 : Essai de capillarité sur un échantillon (exemple de pierre calcaire) [17]

I.10.2.4. Perméabilité à l'eau des béton (EN 12390-8) [45]

La perméabilité du béton est un autre paramètre pour contrôler la durabilité des structures. C'est la capacité de matériau à laisser passer l'eau sous pression. Elle est liée avec les caractéristiques du réseau poreux (forme, dimension, distribution, sinuosité, etc.). [6]

▪ Objectif

C'est la détermination de coefficient de perméabilité et la profondeur de pénétration d'eau sous pression dans un béton durci.

▪ Mode opératoire

L'essai de perméabilité consiste à :

- Alimenter l'appareil en eau propre et en air comprimé.
- Assurez-vous que l'appareil fonctionne correctement.
- La mise en place et la fixation des échantillons dans l'appareil.
- Appliquer une pression avec l'eau constante de 5 ± 0.5 bar sur l'échantillon en ouvrant les vannes pendant 72 ± 2 heures.

▪ Détermination du coefficient de perméabilité K

Le coefficient de perméabilité **K** est défini par la loi de Darcy. Le principe de l'essai consiste à déterminer les volumes d'eau écoulés à travers un échantillon pendant une certaine durée de temps. Ces volumes d'eau sont délimités par des graduations des cellules de l'appareil. La vitesse d'écoulement **Q** est déterminée par le calcul du rapport entre le volume d'eau écoulé et le temps d'écoulement.

La perméabilité est déterminée par une loi simple de DARCY [25]

$$Q = A \cdot K \cdot i \text{ Alors } K = Q / A \cdot i$$

Avec :

Q : le volume d'eau par unité de temps (vitesse d'écoulement) en (m^3/s).

A : section traversée par l'eau (m^2).

i : gradient hydraulique à travers le spécimen.

i = (la pression à l'intérieur de L'éprouvette - la pression à l'extérieur) / épaisseur du béton.

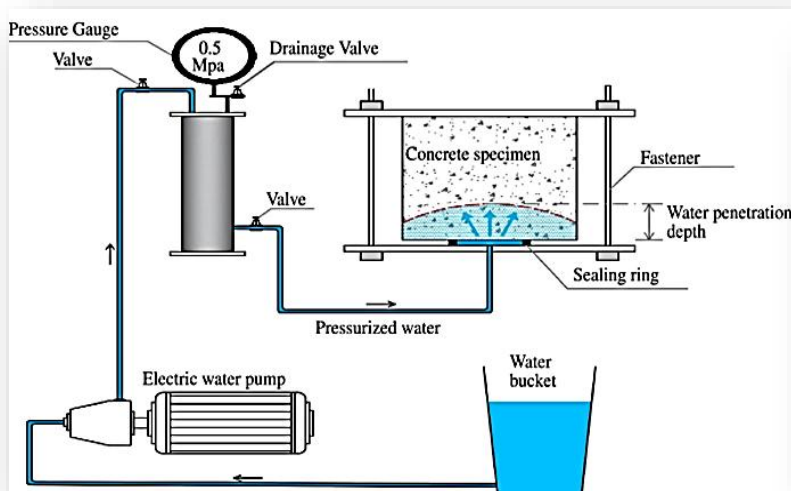


Figure I.16: mécanisme essai de perméabilité [1]

Figure I.17: Appareil de perméabilité à l'eau

I.11. Méthodes de formulation des BAP

La formulation des bétons auto-plaçant est plus élaborée que celle d'un béton ordinaire. En effet, en plus des critères habituellement choisis pour la formulation des bétons ordinaire notamment (résistance mécanique, durabilité...) les bétons auto-plaçant contient deux propriétés qui sont contradictoires : une bonne fluidité pour assurer une bonne mise en place ; et une bonne viscosité pour éviter les problèmes des ségrégations. [10]

I.11.1. Méthode japonaise

La formulation japonaise a été développée à l'Université de Tokyo par Okamura et al. Cette méthode consiste premièrement à fixer le dosage de gravier dans le béton et celui du sable dans le mortier, ensuite à procéder à l'optimisation de la pâte de ciment afin de donner au béton les meilleures performances, le principe de base de cette Méthode s'appuie sur les points suivants :

- La teneur des granulats est limitée à 50% de leurs compacités, réduisant ainsi le phénomène de blocage,
- Le volume du sable représente 40% du volume total de mortier,
- L'optimisation de la pâte, notamment, du rapport E/L (eau / liant) et du dosage en super-plastifiant se fait d'une manière empirique sur mortier en effectuant des essais d'étalement au mini-cône et au V-funnel. [10]

La fluidité du mortier est donnée par :

$$Rm = 10/t$$

$$Tm = \frac{d^2 - d_0^2}{d_0^2}$$

Avec :

Rm : Vitesse relative d'écoulement.

Tm : Étalement relatif.

d et **d₀** : successivement est le diamètre l'étalement et le diamètre inférieur du cône (mm).

t : Temps d'écoulement du béton en (sec). [15]

I.11.2. Méthode suédoise CBI (Cément Och Betong Institute) :

La méthode de formulation suédoise est développée par CBI (Cément Och Betong Institute) par (Petersson et al 1996) et se caractérise par la prise en compte des conditions des chantiers. En effet, cette Méthode est basée sur l'évaluation des risques de blocage des granulats dans les milieux ferraillés. Elle permet d'optimiser la taille maximale des granulats par rapport à l'espacement entre les armatures, et le volume des granulats dans le béton. Le principe de cette méthode s'appuie sur des tests effectués sur des mélanges de pâte de ciment et de granulats de différentes tailles, passant à travers différents espacements d'armatures.

Pour chaque taille de granulats, ils ont montré qu'il existe une teneur volumique critique de granulats en deçà de laquelle le risque de blocage est nul et au-dessus de laquelle le blocage est systématique.

Cette teneur volumique critique est fonction, de l'espacement, entre les armatures (par rapport à la taille des granulats), et de la forme des granulats (roulés ou concassés). Cette méthode suppose que le phénomène de blocage est indépendant de la nature de la pâte, pourvu que celle-ci soit suffisamment fluide. Ainsi, dans la formulation d'un béton, la méthode CBI consiste à déterminer le risque de blocage. [20]

I.11.3. Méthode française de Laboratoire Central de Ponts et Chaussées (LCPC)

La Méthode développée en France au LCPC par de **Larrard** et **Sedran** est basée sur le modèle d'empilement compressible qui passe par l'optimisation de la porosité du système formé par les grains solides. Le modèle permet de prévoir la compacité du squelette granulaire à partir des caractéristiques des constituants telles que la densité apparente, les proportions du mélange, les distributions granulaires et la compacité propre. Cette Méthode, basée sur la synthèse d'une quinzaine d'années de recherches est simplifiée par la mise en œuvre d'un logiciel (BétonlaPro 2). Une proportion de liant est fixée à priori, pour laquelle on détermine le dosage à saturation du super-plastifiant utilisé. Selon l'expérience des auteurs, le dosage de saturation pourrait conférer au béton une viscosité élevée, par conséquent la moitié de ce dosage serait plus pertinente. Le besoin en eau du liant en présence du super-plastifiant est déterminé, et conduit au calcul de la compacité propre du liant, qui est une donnée d'entrée nécessaire. Grâce au logiciel, les dosages des constituants sont déterminés, en prenant en compte tous les paramètres de calcul, et de l'effet de paroi.

Le dosage du super-plastifiant peut être ajusté pour obtenir les critères d'ouvrabilité désirés, celui de l'eau pour obtenir la résistance à la compression ciblée. [20]

I.11.4. Méthode de l'AFGC (Association Française de Génie Civil)

Des conseils et fourchettes sont mises en place la spécification des BAP à l'état frais :

- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m³ (de l'ordre de 40% du volume total).
- Une quantité de fines élevée (de l'ordre de 500 kg/ m³) pour assurer une bonne maniabilité tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage.
- Un volume de gravillons limité basant sur rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1 afin d'éviter le «blocage du béton» dans les zones confinées.
- Un diamètre maximal réduit, en général un D max compris entre 10 et 16 mm afin d'améliorer l'écoulement.

- Utilisation d'un super-plastifiant (à un dosage proche du dosage de saturation) pour obtenir la fluidité souhaitée.
- Emploi éventuel d'un agent de viscosité.

Donc la formulation se fait sur la base de ces plages, et ne peut être vérifiée que par des essais effectués directement sur béton. [16]

I.11.5. Conclusion

Il n'existe pas à ce jour une méthode de formulation du béton auto-plaçant, et le plus part des formules sont conçues actuellement de manière empirique, suivant les caractères à l'état frais on peut juger la formulation acceptable ou non.

A cet effet l'Association Française de Génie Civil [AFGC], a émis des recommandations qui se limitent en trois essais : mesure d'étalement, essai de la boîte en L, et l'essai de stabilité au tamis.

I.12. Confection des BAP

- En principe tous les types de malaxeurs conviennent pour la fabrication des BAP. Lors de l'introduction des différents constituants dans le malaxeur, on appliquera les mêmes consignes que celles recommandées pour les bétons vibrés, en les adaptant aux conditions locales dans chaque cas particulier.
- L'intensité et le temps de malaxage ainsi que l'ordre d'introduction des constituants sont des facteurs qui influent fortement sur l'homogénéité du béton, sur l'effet optimal des additions et des adjuvants, c'est la raison pour laquelle on fixe le temps de malaxage à 120 secondes, cette moyenne peut être ajustée selon l'efficacité du malaxeur.
- Certaines formules peuvent nécessiter des séquences de malaxage spécifiques (optimisation de l'ordre d'introduction des constituants dans le malaxeur, temporisation, temps de malaxage adaptés...).
- L'un des points les plus importants de la fabrication est le contrôle strict de la teneur en eau du mélange. Il est donc impératif de mettre en œuvre des dispositions visant à maîtriser la teneur en eau du béton.
- Il est de plus nécessaire d'effectuer un contrôle renforcé des constituants tout au long de la fabrication afin d'assurer la régularité de l'ensemble des constituants. [26]

I.13. Le transport et la livraison

En raison de sa fluidité élevée, le béton auto-plaçant doit être transporté en camion malaxeur. Comme dans le cas d'un béton vibré, la fluidité du béton peut se modifier durant le transport, la manière et l'ampleur de cette modification sont fonction de plusieurs paramètres : le type d'adjuvant, la durée de transport, le dosage en eau et la température.

Dans une certaine mesure il est possible de corriger ces modifications pour vérifier les exigences d'ouvrabilité souhaitées au moment du déchargement sur chantier.

Le BAP doit être transporté dans des camions malaxeurs propres et en bon état.

Le chauffeur devra respecter les consignes suivantes :

- Malaxage à vitesse lente pendant le transport jusqu'au point de déchargement.
- Remise du Bon de Livraison au représentant du chantier pour valider la réception.
- Adaptation de la hauteur de la goulotte afin de limiter la hauteur de chute du béton.

Dans une certaine mesure il est possible de corriger ces modifications pour vérifier les exigences d'ouvrabilité souhaitées au moment du déchargement sur chantier.

Dans le cas de rajouts d'adjuvant dans le camion, il est recommandé de respecter impérativement le temps de malaxage minimal recommandé pour assurer la dispersion de l'adjuvant et sa répartition homogène dans l'ensemble du chargement de béton. En revanche tout ajout d'eau est à proscrire. [8]

I.14. Mise en place des BAP

Selon NF EN 206/CN. L'Article 8.4.2.2 – Béton auto-plaçant (fascicule 65)

Lors de la livraison, un brassage du béton à grande vitesse est effectué pendant une minute au moins avant le début du déchargement. Il est réalisé une inspection visuelle à chaque charge livrée et une mesure d'étalement au minimum sur la première charge de la journée de bétonnage et systématiquement en cas de doute. Il convient de limiter à une longueur maximale de 10 m le cheminement horizontal dans les coffrages. De même, la hauteur de chute libre est limitée à 5 m. [18]

Par rapport au béton vibré la mise en place du béton auto-plaçant est grandement facilitée, elle peut être réalisée par une seule personne et selon trois méthodes différentes :

- ✓ La première méthode est celle utilisée pour les bétons ordinaires vibrés, la mise en place se fait à l'aide d'une goulotte. Pour limiter le phénomène de ségrégation favorisé par ce procédé il convient de fixer la hauteur de chute maximale du béton à 5m.
- ✓ La deuxième méthode consiste à utiliser un tube plongeur immergé dans le béton frais, dans la partie inférieure du coffrage.
- ✓ La mise en place des BAP peut se faire par pompage, par cette troisième méthode il y a réduction du bullage et obtention de parements lisses. Pour réussir les ouvrages en béton auto-plaçant il est capital d'appliquer scrupuleusement les recommandations de fabrication, de transport et de mise en œuvre. [4]

Partie 2 : Étude expérimentale

Chapitre II : Description des matériaux utilisées

II. Description des matériaux

II.1 Introduction

La formulation d'un BAP requiert une étude précise notamment dans le choix des constituants, et l'optimisation de la teneur en ajout chimique et de la quantité d'eau.

L'étape de formulation consiste à choisir une proportion optimale et bien précise des différents constituants dans le but d'obtenir les meilleures caractéristiques du béton. [3]

Dans ce qui suit sont décrits les différents constituants entrant dans la composition d'un béton courant « vibré » et d'un béton auto-plaçant (granulats, ciment, additions minérales, adjuvants et eau).

Les constituants de base d'un béton ordinaire (ou courant) sont le ciment, l'eau et les granulats. Les bétons auto-plaçant sont obtenus par ajouts d'adjuvants et d'additions minérales.

Avant d'entamer une formulation, il convient de connaître les caractéristiques des matériaux utilisés à cet effet par le biais d'essais normalisés au laboratoire.

II.2. Les matériaux utilisés

Les matériaux utilisés (granulats, ciment, eau) sont locaux et naturels, et pour les additions (marbre, brique, verre, béton) ces déchets des constructions, les sable de dunes sont locaux et naturels.

II.2.1 Ciment

Le ciment utilisé pour l'ensemble des compositions est un ciment portland composé de type **NA442 CEM II /B-L42,5N** provenant de la cimenterie de groupe LAFARGE de Msila.

Les différentes caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques du ciment utilisé sont sur la fiche technique (**Annexe I**) fabriqué par le producteur au niveau d'un laboratoire spécialisé conformément aux normes **NA 442** et **EN 197-1**. [46] ; [47] ;

Tableau II.1 : Quelques caractéristiques de ciment [1]

Analyse chimiques	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	10.0±2
Teneur en sulfates (SO ₃) (%)	2.5±0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.7±0.5
Teneur en Chlorures (NA5042) (%)	0.02-0.05
Propriétés physiques	Valeur
Consistance Normale (%)	26.5±2.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	3700-5200
Retrait à 28 jours (μ m)	1000<
Expansion (mm)	≤ 3.0
Temps de prise à 20 ° (NA231)	Valeur
Début de prise (min)	150±30
Fin de prise (min)	230±50
Résistance à la compression	Valeur
2 jours (MPa)	≥ 10.0
28 jours (MPa)	≥ 42.5
Composition minéralogique du clinker	Valeur
C3S (%)	60±3
C3A (%)	7.5±1

II.2.2. Granulats

Nous avons utilisé dans cette étude des granulats dont l'identification est la suivante :

- Gravier 3/8 et Gravier 8/16 : concassés provenant d'une carrière (Haoud El Hamra située entre Ouargla et Hassi Messaoud).
- Sable 0/5 : provenant d'une carrière (DJAMAA située au niveau RN 123 reliant entre ElOued et Djamaa).

II.2.2.1. Essais sur granulats

II.2.2.1.1. L'échantillonnage (NF P 18-553) [48]

C'est l'opération qui consiste à prélever un échantillon représentatif du matériau pour effectuer les essais. Elle peut se faire par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur. [8]

II.2.2.1.2. Les analyse granulométrique (EN 933-1 et EN 933-2) [49] ; [50]

Elle consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant l'échantillon en utilisant des tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur et le classement des grains est obtenu par vibration de la colonne de tamis.

La courbe granulométrique est importante car elle apporte les renseignements sur les limites des granulats, la proportion d'éléments fins ainsi que la continuité de la granularité. Plus une courbe est régulière plus le squelette granulaire formé est compact (meilleure compacité du squelette du béton). Par ailleurs, la courbe granulaire a aussi un effet sur l'ouvrabilité du béton. Sur les Figures II.2, II.3, II.4 sont représentées les courbes granulaires (gravillons 8/16, gravillons 3/8 et Sable 0/5). [1]



Figure II.1 : Echantillons de gravier 8/16 et de gravier 3/8 et sable 0/5

Résultats de l'essai pour les gravier 8/16 :

Tableau II.2 : analyse granulométrie de gravier 8/16 [1]

Type	Gravier 8/16			
Source	Carrière de Haoud El Hamra Hassi Messaoud			
Date d’analyse	19-02-2024			
Caractérisation faite selon EN 933-1				
Analyse granulométrique				
Poids de l’échantillon : 5000g				
Ouverture des tamis (mm)	Poids des refus partiel (g)	Poids des refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
16	0	0	0	100
12.5	2825	2825	56.5	43.5
10	1260	4085	81.7	18.3
8	800	4885	97.7	2.3
6.3	100	4985	99.7	0.3
5	10	4995	99.9	0.1

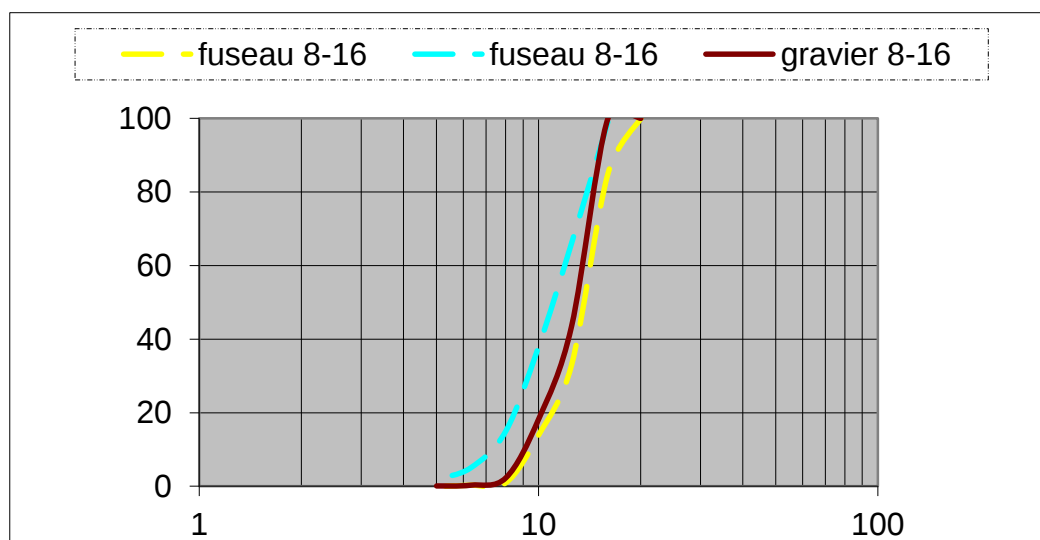


Figure II.2 : Courbe Analyse granulométrique de gravier 8/16 [1]

En conclusion, Après avoir tracé la courbe granulaire du gravier 8/16, nous avons remarqué qu'un grand pourcentage de la courbe se situe à l'intérieur du fuseau.

Les résultats de l'essai pour les gravier 3/8 :

Tableau II.3 : analyse granulométrie de gravier 3/8 [1]

Type	Gravier 3/8			
Source	Carrière de Haoud El Hamra Hassi Messaoud			
Date d’analyse	19-02-2024			
Caractérisation faite selon EN 933-1				
Analyse granulométrique				
Poids de l’échantillon : 3000g				
Ouverture des tamis (mm)	Poids des refus partiel (g)	Poids des refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
10	00	00	00	100
8	125	125	4.16	95.83
6.3	995	1120	37.33	62.66
5	795	1915	63.83	36.16
4	750	2665	88.83	11.16
2.5	65	2730	91	9
2	250.2	2980.2	99.34	0.66
1	15	2995.2	99.84	0.16

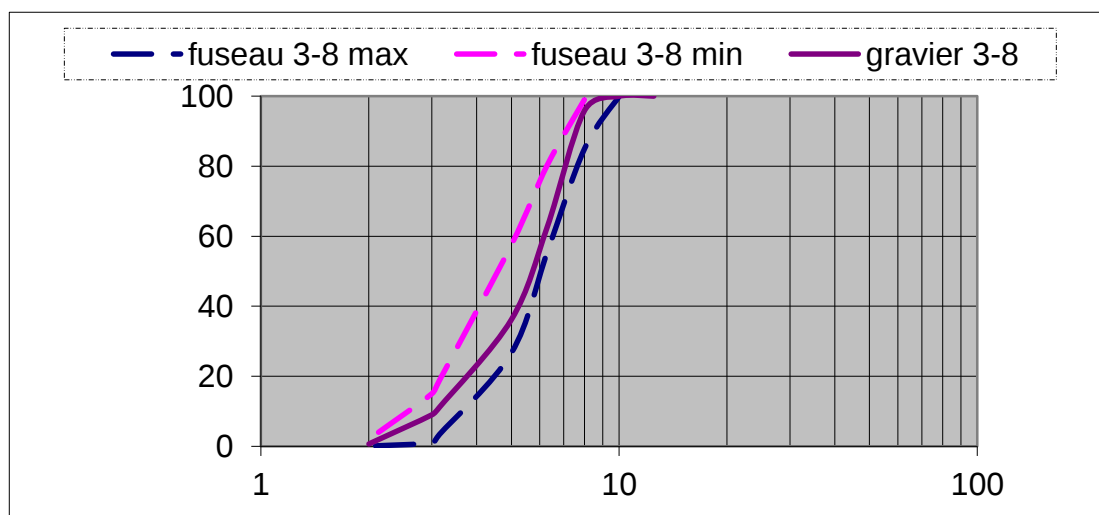


Figure II.3 : Courbe Analyse granulométrique de gravier 3/8 [1]

En conclusion, Après avoir tracé la courbe granulaire du gravier 3/8, nous avons remarqué que la courbe se situe à l'intérieure du fuseau.

Résultats de l'essai pour les sables 0/5 :

Tableau II.4 : analyse granulométrie de sable 0/5 [1]

Type	Sable 0/5			
Source	Carrière de Djamaa			
Date d’analyse	19-02-2024			
Caractérisation faite selon EN 933-1				
Analyse granulométrique				
Poids de l’échantillon : 2000g				
Ouverture des tamis (mm)	Poids des refus partiel (g)	Poids des refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
5	8	8	0.4	99.6
4	10	18	0.9	99.1
2.5	30	48	2.4	97.6
2	13	61	3.05	96.95
1.25	90	151	7.55	92.45
1	84.4	235.4	11.77	88.23
0.63	317.6	553	27.65	72.35
0.315	960	1513	75.65	24.35
0.16	373	1886	94.3	5.7
0.08	99	1985	99.25	0.75

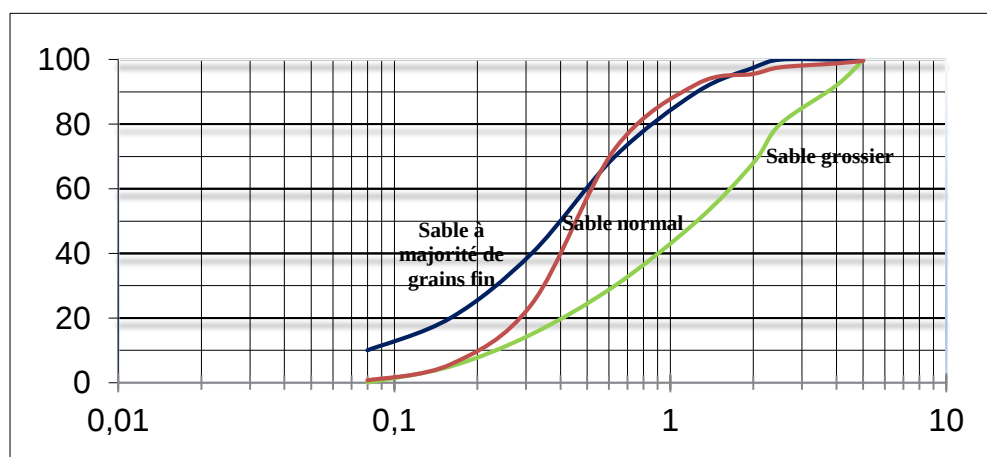


Figure II.4 : Courbe Analyse granulométrique de sable 0/5 [1]

En conclusion, Après avoir tracé la courbe granulaire du sable 0/5, nous avons remarqué que 73% se trouvent à l'intérieure du fuseau et 27% à l'extérieure du fuseau, et caractérisé par une granulométrie étalée.

II.2.2.1.3. Module de finesse du sable NF XP P 18-540 [51]

Le module de finesse (FM) est plus particulièrement appliqué aux sables dont il est une caractéristique importante. Généralement, le module de finesse (FM) est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés, exprimés en pourcentages, sur les différents tamis de la série suivante (mm) : 5, 2.5, 1.25, 0.63, 0.315, 0.16, ce paramètre est en particulier utilisé pour déterminer la finesse des sables à bétons.

$$M_f = 1/100 \times \sum \text{refus cumulés en \% des tamis} \{0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5, 5\}$$

Plus ce module est faible et plus le sable est riche en éléments fins. Selon le module de finesse mesuré, il est possible de classer le sable en termes de grosseur ou de finesse.

Présente les résultats sont indiqués dans le Tableau II.5 suivant :

Tableau II.5 : Les normes soviétiques spécifient le module de finesse des sables [1]

Granulats	Sable (0/5)	Spécifications
Module de finesse M_f	2,08	$M_f > 2,5$ sable gros $2 < M_f < 2,5$ sable moyen $1,5 < M_f < 2$ sable fin $1 < M_f < 1,5$ sable très fin

Nous concluons que le sable est moyen.

II.2.2.1.4. Equivalent de sable (NF P18-598) [52]

L'essai d'équivalent de sable, permettant de mesurer la valeur « ES » qui exprime la propreté d'un sable, est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5 mm.

L'absence de fines ne permet pas d'obtenir un béton compact.

L'excès de fines est défavorable dans la mesure où il augmente la demande en eau, donc le rapport E/C donc une faible valeur de la résistance.

L'essai a donné les résultats présentés dans le Tableau II.6.

Tableau II.6: valeur de l'équivalent de sable [1]

Granulats	Sable (0/5)	Spécification
Equivalent de sable visuel (ESV) (%)	82.20	70 à 80 pour un sable roulé
Equivalent de sable sous le poids d'un piston (ES) (%)	74.15	> 65 pour un sable concassé

Donc le sable est propre.



Figure II.5 : Essai d'équivalent de sable [1]

II.2.3. L'eau de gâchage

Lors d'élaboration des bétons on a utilisé pour le gâchage l'eau de robinet disponible au niveau de notre université.

II.2.4. Adjuvant (Super-plastifiants)

Le Super-plastifiant haut réducteur d'eau polyvalent TEMPO -12 a été fourni par les produits Sika® Visco Crète® TEMPO-12. Il permet d'obtenir des bétons et mortiers de grande qualité en termes de résistance et de fluidité. En plus de sa fonction principale de Super-plastifiant, il diminue considérablement la teneur en eau du béton voire la fiche technique en (annexe 2) pour plus d'indications sur ce produit.



Figure II.6 : Le Super-plastifiant TEMPO-12 [34]

Tableau II.7 : Quelques caractéristiques de TEMPO-12 [1]

Caractéristique	Forme	Couleur	PH	Densité	Teneur en chlore	Le dosage
Résultats	liquide	brun clair à foncé	$4,5 \pm 1,0$	$1,06 \pm 0,01$	$\leq 0,1 \%$	0,5% à 2%

II.2.5. Additions minérales

Les quatre types d'ajouts sont récupérées des ateliers ou de chantiers de construction plus sable de dunes, où le broyage fait avec une machine de broyage (fabriqué par soudeur à l'atelier), ensuite nous avons tamisé les poudres jusqu'à obtenir des fines d'un diamètre de 80 μ m, les ajouts sont :



Figure II.7: Machine de broyage

II.2.5.1. Les déchets de brique :

Cet ajout provient de déchets de construction, où le broyage fait avec une machine de broyage, ensuite nous avons tamisé les poudres jusqu'à obtenir des fines d'un diamètre inférieur à $80\mu\text{m}$.



Figure II.8 : déchets de brique

Dans cette étude, nous avons réalisé une analyse par diffraction des rayons X sur les additifs de BAP sous forme de poudre afin de déterminer leur structure cristalline.

La Figure suivante illustre le diagramme résultant de l'analyse DRX de l'échantillon de poudre de brique.

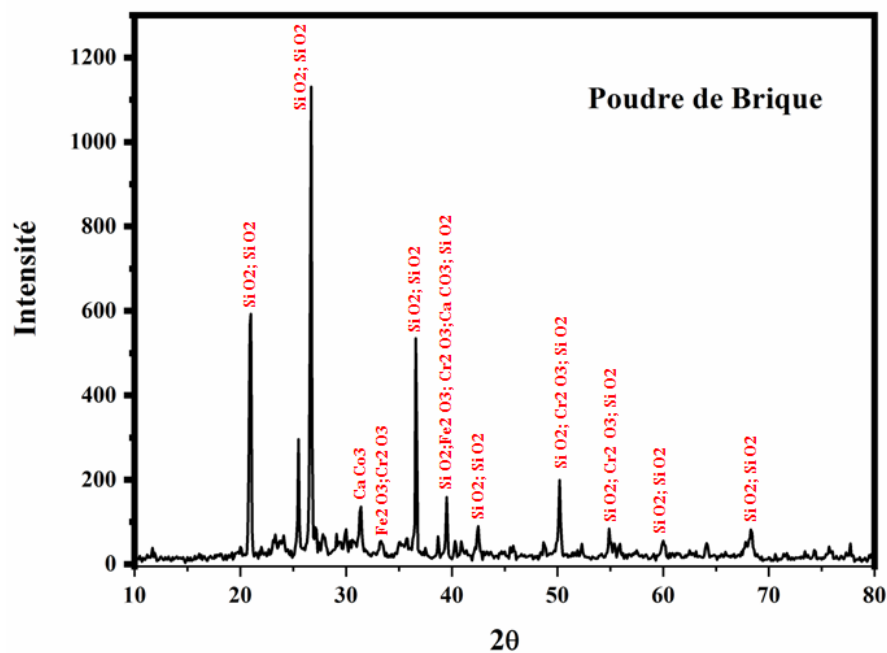


Figure II.9 : Diagramme d'analyse de (DRX) sur Poudre de Brique [1]

Après comparaison et analyse du diagramme ci-dessus, nous avons obtenu les résultats indiqués dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.8 : Composants chimique du déchet de brique broyé [1]

Nom du composé	Formule chimique	Score
Oxyde de silicium	SiO ₂	61
Phosphore de potassium	K ₃ PO ₄	36
Sulfate de calcium et de dysprosium	CaDy _{0.2} SO ₄	26

Tableau II.9 : Quelques caractéristiques de déchet de brique broyé [1]

Caractéristique	Forme	Couleur	Densité absolue	Densité apparent	Le dosage utilisé
Résultats	Poudre	Marron	2.59	1.104	20% et 30%

II.2.5.2. Les déchets de marbre :

Cet ajout provient de déchets des ateliers de fabrication de marbre, où le broyage fait avec une machine de broyage, ensuite nous avons tamisé les poudres jusqu'à obtenir des fines d'un diamètre inférieur à 80µm.



Figure II.10 : Déchets de marbre.

La figure suivante illustre le diagramme résultant de l'analyse DRX de l'échantillon de déchets de marbre broyés.

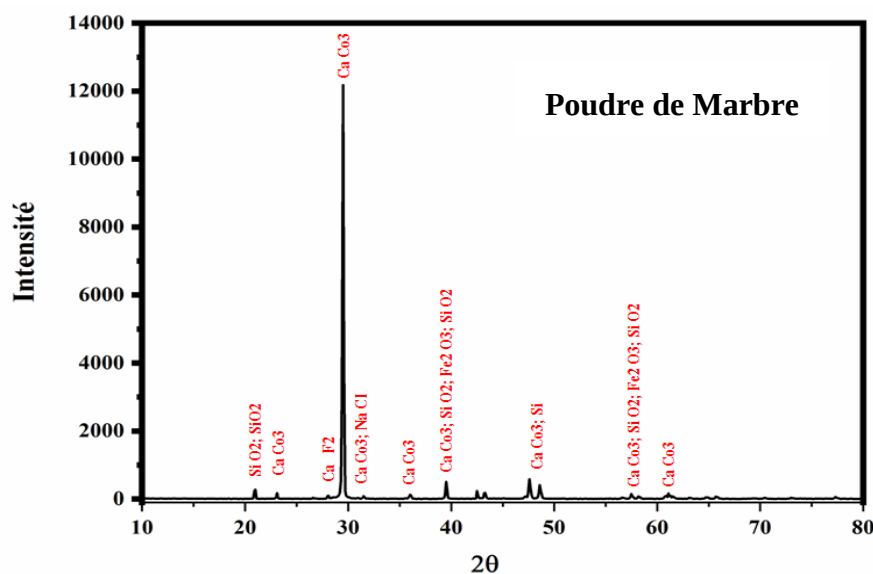


Figure II.11 : Diagramme d'analyse de (DRX) sur Poudre de Marbre [1]

Après comparaison et analyse du diagramme ci-dessus, nous avons obtenu les résultats indiqués dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.10 : Composants chimique du déchet de marbre broyé [1]

Nom du composé	Formule chimique	Score
Carbonate de calcium	Ca(CO ₃)	55
Oxyde de calcium	CaO	19

Tableau II.11: Quelques caractéristiques de déchet de marbre broyé [1]

Caractéristique	Forme	Couleur	Densité absolue	Densité apparent	Le dosage utilisé
Résultats	poudre	Blanche	2.41	1.288	20% et 30%

II.2.5.3. Les déchets de verre :

Cet ajout provient de déchets des ateliers de fabrication de verre, où le broyage fait avec une machine de broyage, ensuite nous avons tamisé les poudres jusqu'à obtenir des fines d'un diamètre inférieur à 80µm.



Figure II.12 : Déchets de verre.

La figure suivante illustre le diagramme résultant de l'analyse DRX de l'échantillon de déchets de verre broyés en poudre.

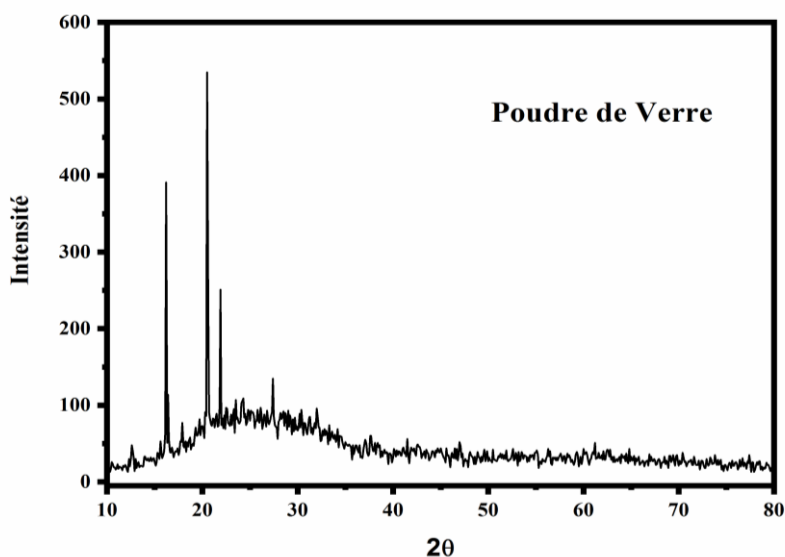


Figure II.13 : Diagramme d'analyse de (DRX) sur Poudre de Verre [1]

Après comparaison et analyse du diagramme ci-dessus, nous avons obtenu les résultats indiqués dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.12 : Composants chimique du déchet de verre broyé [1]

Nom du composé	Formule chimique	Score
Sodium	Na	58
Oxyde de silicium	SiO ₂	38

Tableau II.13 : Quelques caractéristiques de déchet de verre broyé [1]

Caractéristique	Forme	Couleur	Densité absolue	Densité apparent	Le dosage utilisé
Résultats	poudre	Blanc	2.295	1.112	20% et 30%

II.2.5.4. Les déchets de béton :

Cet ajout provient de déchets de construction, où le broyage fait avec une machine de broyage, ensuite nous avons tamisé les poudres jusqu'à obtenir des fines d'un diamètre inférieur à 80µm.



Figure II.14 : Déchets de béton

La figure suivante illustre le diagramme résultant de l'analyse DRX de l'échantillon de déchets de béton broyés en poudre.

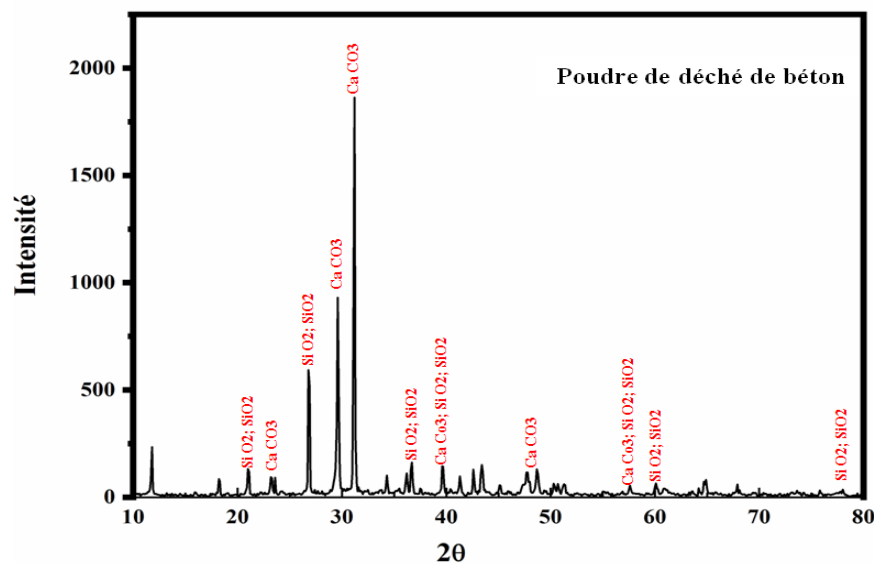


Figure II.15: Diagramme d'analyse de (DRX) sur Poudre de Déché de Béton [1]

Après comparaison et analyse du diagramme ci-dessus, nous avons obtenu les résultats indiqués dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.14 : Composition chimique du déchet de béton broyé [1]

Nom du composé	Formule chimique	Score
Carbonate de calcium	$\text{Ca}(\text{CO}_3)$	45
Oxyde de silicium	SiO_2	41
Carbonate de calcium et de magnésium	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	34

Tableau II.15 : Quelques caractéristiques de déchet de béton broyé [1]

Caractéristique	Forme	Couleur	Densité absolue	Densité apparent	Le dosage utilisé
Résultats	poudre	Gris	2.641	1.264	20% et 30%

II.2.5.5. Le sable de dunes :

Cet ajout provient des dunes du sable d'el Oued, où le broyage fait avec une machine de broyage, ensuite nous avons tamisé les poudres jusqu'à obtenir des fines d'un diamètre inférieur à $80\mu\text{m}$.



Figure II.16 : sable de dunes.

La figure suivante illustre le diagramme résultant de l'analyse DRX de l'échantillon sable de dunes broyés en poudre.

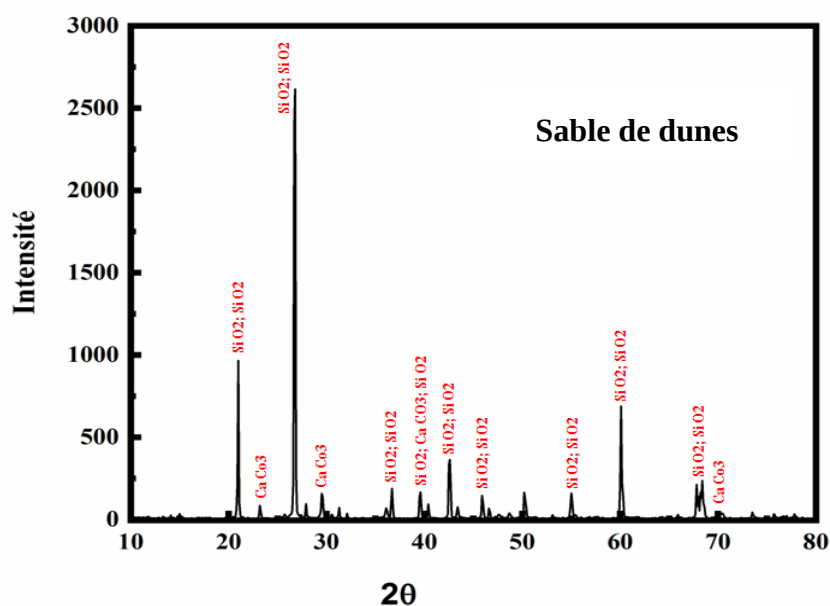


Figure II.17: Diagramme d'analyse de (DRX) sur Poudre de Sable de dunes [1]

Après comparaison et analyse du diagramme ci-dessus, nous avons obtenu les résultats indiqués dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.16 : Composants chimique de sable de dunes broyé [1]

Nom du composé	Formule chimique	Score
Oxyde de calcium	Si O2	70
Carbonate de calcium	Ca (C O3)	36

Tableau II.17 : Quelques caractéristiques de sable de dunes broyé [1]

Caractéristique	Forme	Couleur	Densité absolue	Densité apparent	Le dosage utilisé
Résultats	poudre	Beige	2.37	1.44	20% et 30%

- **Masse volumique apparente et absolue (NF P 18-554 et NF P 18-555) [53] ; [54]**

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps. Le volume absolu ne prend pas en considération les vides inclus et le volume apparent fait intervenir les vides intra et inter-granulaires. Les résultats sont indiqués dans le Tableau II.18. [1]

Tableau II.18 : Masse volumique apparente et absolue des matériaux utilisés [1]

Granulats	Sable (0/5)	Gravier (3/8)	Gravier (8 /16)	Poudre de Brique	Poudre de Marbre	Poudre de Verre	Poudre de Béton	Poudre Sable de dunes
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.44	2.58	2.63	2.59	2.41	2.29	2.64	2.37
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1.60	1.33	1.32	1.10	1.28	1.11	1.26	1.44



Figure II.18 : Exemple mesure la masse volumique absolue [1]

II. 3. Conclusion

Nous concluons ce chapitre dans les caractéristiques des matériaux utilisés :

- Le ciment utilisé est le NA442 CEM II / B-L42,5 N.
- Le Super-plastifiant utilisé Pour BAP TEMPO -12 haut réducteur d'eau polyvalent a été fourni par les produits Sika® Visco Crète® TEMPO-12.
- Les mélanges ont été réalisés par les mêmes types de gravier (3/8) et (8/16) provenant de la carrière (Haoud El Hamra située entre Ouargla et Hassi Messaoud).
- Les mélanges ont été réalisés par les mêmes types de sable (0/5) provenant de la carrière (DJAMAA située au niveau RN 123 reliant entre El Oued et Djamaa), le sable inscrit dans le fuseau granulaire sauf petit partie à l'extérieur.

Pour notre étude, l'utilisation donc de ces granulats présentant de bonnes caractéristiques permettra l'obtention de bétons de qualité, satisfaisant les critères de maniabilité, d'aspect des surfaces, de résistances et de durabilité.

Partie 2 : Étude expérimentale

Chapitre III : Fabrication des bétons.

III. Fabrication des bétons

III.1. Composition des bétons auto-plaçant

La majorité des formules de BAP sont conçues maintenant de façon expérimentale. La méthode de Dreux-Gorisse n'est pas adaptée parce qu'elle ne prend pas en compte ni les adjuvants ni les ajouts, donc ce sont des constituants essentiels d'un BAP. La formulation est alors basée sur l'expérience obtenue ces dernières années.

Quelques ordres de grandeurs pour les proportions des composants sont actuellement connus et utilisés :

- Un rapport G/S = 1,2.
- Un rapport E/C = 0,5.
- Un dosage en ciment de 400kg/m³.
- Le volume d'air occlus (A) est de l'ordre de 0.5%.
- Un pourcentage en ajouts (Super-plastifiant, poudre de marbre, poudre de brique, poudre de verre, poudre de béton et sable de dunes) déterminé par tâtonnement.

Pour pouvoir comparer les performances des différents bétons indépendamment de l'action du ciment, on a fixé le dosage de ce dernier à 400 kg/m³, ainsi le rapport E/C à 0,5 pour tous les bétons testés.

✓ Bétons fabriqués :

- **BAP1**avec addition poudre de brique (20%C) et un dosage en super-plastifiant de 1,1% C.
- **BAP2**avec addition poudre de marbre (20%C) et un dosage en super-plastifiant de 0,66%C.
- **BAP3**avec addition poudre de verre (20%C) et un dosage en super-plastifiant de 1,05%C.
- **BAP4**avec addition poudre de béton (20%C) et un dosage en super-plastifiant de 0,55%C.
- **BAP5**avec addition sable de dunes (20%C) et un dosage en super-plastifiant de 0,67 %C.
- **BAP1'**avec addition poudre de brique (30%C) et un dosage en super-plastifiant de 1,11%C.
- **BAP2'**avec addition poudre de marbre (30%C) et un dosage en super-plastifiant de 0,67%C.
- **BAP3'**avec addition poudre de verre (30%C) et un dosage en super-plastifiant de 1,07 %C.
- **BAP4'**avec addition poudre de béton (30%C) et un dosage en super-plastifiant de 0,6 %C.
- **BAP5'**avec addition sable de dunes (30%C) et un dosage en super-plastifiant de 0,68 %C.

III.1.1. Composition du béton auto-plaçant « BAP1 » avec poudre de brique

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

Le dosage poudre de brique est fixé à 20 % C, avec $C = 400\text{kg}/\text{m}^3$, alors $400/3,1 = 129.03\text{ l/m}^3$

Donc $P_{\text{brique}} = 20\% \times 129.03 = 25.8\text{ l/m}^3$

Gravier (G) + Sable (S) + Ciment (C) + Eau (E) + Air (A) + ajout (Pbrique) = 1000l

Avec :

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

$E/C = 0,5$ avec $C = 400\text{ kg}/\text{m}^3$

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

On obtient alors $G + S = 1000 - 129.03 - 200 - 5 - 25.8$

$G + S = 640.17\text{ l/m}^3$

Vu que on a fixé $G/S = 1,2$

- $G + S = 640.17\text{ l/m}^3$
- $G/S = 1,2$

Donc $S = 640.17 / 2.2 = 290.98\text{ l/m}^3$

$G + 290.98 = 640.17$

Donc $G = 349.19\text{ l/m}^3$.

On utilise $1/3$ de gravier (3/8) = 116.39 l/m^3

$2/3$ de gravier (8/16) = 232.79 l/m^3

Le dosage en Super-plastifiant est de 1.1 % de C, alors $400/1.06 = 377.35 \times 1.1\% = 4.15\text{ l/m}^3$

Le Tableau III.1 suivant résume le calcul pour le BAP1.

Tableau III.1 : Formulation du béton auto-plaçant avec poudre de brique.

Constituants	Constituants (l/m^3)	Densité absolue	Constituants (kg/m^3)
Ciment	129.03	3.1	400
Poudre de brique	25.8	2.59	66.82
Sable (0/5)	290.98	2.44	709.99
Gravier (3/8)	116.39	2.58	300.28
Gravier (8/16)	232.79	2.63	612.23
Eau	200	1	200
Super-plastifiant	4.15	1.06	4.39

III.1.2. Composition du béton auto-plaçant « BAP2 » avec poudre de marbre

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

Le dosage poudre de marbre est fixé à 20%C, avec $C = 400\text{ kg/m}^3$, alors $400/3,1 = 129.03\text{ l/m}^3$

Donc $P_{\text{marbre}} = 20\% \times 129.03 = 25.8\text{ l/m}^3$

Gravier (G) + Sable (S) + Ciment (C) + Eau (E) + Air (A) + ajout (Pmarbre) = 1000 l

Avec :

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

$E/C = 0,5$ avec $C = 400\text{ kg/m}^3$

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

On obtient alors $G + S = 1000 - 129.03 - 200 - 5 - 25.8$

$G + S = 640.17\text{ l/m}^3$

Vu que on a fixé $G/S = 1,2$

- $G + S = 640.17\text{ l/m}^3$
- $G / S = 1,2$

Donc $S = 640.17 / 2.2 = 290.98\text{ l/m}^3$

$G + 290.98 = 640.17$

Donc $G = 349.19\text{ l/m}^3$.

On utilise $1/3$ de gravier ($3/8$) = 116.39 l/m^3

$2/3$ de gravi er ($8/16$) = 232.79 l/m^3

Le dosage en Super-plastifiant est de 0.66 % de C, alors $400/1.06 = 377.35 \times 0.66\% = 2.49\text{ l/m}^3$

Le Tableau III.2 suivant résume le calcul pour le BAP2.

Tableau III.2 : Formulation du béton auto-plaçant avec poudre de marbre.

Constituants	Constituants (l/m^3)	Densité absolue	Constituants (kg/m^3)
Ciment	129.03	3.1	400
Poudre de marbre	25.8	2.41	62.17
Sable (0/5)	290.98	2.44	709.99
Gravier (3/8)	116.39	2.58	300.28
Gravier (8/16)	232.79	2.63	612.23
Eau	200	1	200
Super-plastifiant	2.49	1.06	2.63

III.1.3. Composition du béton auto-plaçant « BAP3 » avec poudre de verre

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

Le dosage poudre de verre est fixé à 20 % C, avec $C = 400\text{ kg/m}^3$, alors $400/3,1 = 129.03\text{ l/m}^3$

Donc $P_{\text{verre}} = 20\% \times 129.03 = 25.8\text{ l/m}^3$

Gravier (G) + Sable (S) + Ciment (C) + Eau (E) + Air (A) + ajout (Pverre) = 1000 l

Avec :

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

$E/C = 0,5$ avec $C = 400\text{ kg/m}^3$

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

On obtient alors $G + S = 1000 - 129.03 - 200 - 5 - 25.8$

$G + S = 640.17\text{ l/m}^3$

Vu que on a fixé $G/S = 1,2$

- $G + S = 640.17\text{ l/m}^3$
- $G / S = 1,2$

Donc $S = 640.17 / 2.2 = 290.98\text{ l/m}^3$

$G + 290.98 = 640.17$

Donc $G = 349.19\text{ l/m}^3$.

On utilise $1/3$ de gravier ($3/8$) = 116.39 l/m^3

$2/3$ de gravi er ($8/16$) = 232.79 l/m^3

Le dosage en Super-plastifiant est de 1.05 % de C, alors $400/1.06 = 377.35 \times 1.05\% = 3.96\text{ l/m}^3$

Le Tableau III.3 suivant résume le calcul pour le BAP3.

Tableau III.3 : Formulation du béton auto-plaçant avec poudre de verre.

Constituants	Constituants (l/m^3)	Densité absolue	Constituants (kg/m^3)
Ciment	129.03	3.1	400
Poudre de verre	25.8	2.29	59.08
Sable (0/5)	290.98	2.44	709.99
Gravier (3/8)	116.39	2.58	300.28
Gravier (8/16)	232.79	2.63	612.23
Eau	200	1	200
Super-plastifiant	3.96	1.06	4.19

III.1.4. Composition du béton auto-plaçant « BAP4 » avec poudre de béton

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

Le dosage poudre de béton est fixé à 20 % C, avec $C = 400\text{ kg/m}^3$, alors $400/3,1 = 129.03\text{ l/m}^3$

Donc $P_{\text{béton}} = 20\% \times 129.03 = 25.8\text{ l/m}^3$

Gravier (G) + Sable (S) + Ciment (C) + Eau (E) + Air (A) + ajout (Pbéton) = 1000 l

Avec :

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

$E/C = 0,5$ avec $C = 400\text{ kg/m}^3$

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

On obtient alors $G + S = 1000 - 129.03 - 200 - 5 - 25.8$

$G + S = 640.17\text{ l/m}^3$

Vu que on a fixé $G/S = 1,2$

- $G + S = 640.17\text{ l/m}^3$
- $G / S = 1,2$

Donc $S = 640.17 / 2.2 = 290.98\text{ l/m}^3$

$G + 290.98 = 640.17$

Donc $G = 349.19\text{ l/m}^3$.

On utilise $1/3$ de gravier ($3/8$) = 116.39 l/m^3

$2/3$ de gravier ($8/16$) = 232.79 l/m^3

Le dosage en Super-plastifiant est de 0.55 % de C, alors $400/1.06 = 377.35 \times 0.55\% = 2.07\text{ l/m}^3$

Le Tableau III.4 suivant résume le calcul pour le BAP4.

Tableau III.4 : Formulation du béton auto-plaçant avec poudre de béton.

Constituants	Constituants (l/m^3)	Densité absolue	Constituants (kg/m^3)
Ciment	129.03	3.1	400
Poudre de béton	25.8	2.64	68.11
Sable (0/5)	290.98	2.44	709.99
Gravier (3/8)	116.39	2.58	300.28
Gravier (8/16)	232.79	2.63	612.23
Eau	200	1	200
Super-plastifiant	2.07	1.06	2.19

III.1.5. Composition du béton auto-plaçant « BAP5 » avec sable de dunes

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

Le dosage sable de dunes est fixé à 20 % C, avec $C = 400\text{ kg/m}^3$, alors $400/3,1 = 129.03\text{ l/m}^3$

Donc Sable de dunes = $20\% \times 129.03 = 25.8\text{ l/m}^3$

Gravier (G) + Sable (S) + Ciment (C) + Eau (E) + Air (A) + ajout (Sable de dunes) = 1000 l

Avec :

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

$E/C = 0,5$ avec $C = 400\text{ kg/m}^3$

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

On obtient alors $G + S = 1000 - 129.03 - 200 - 5 - 25.8$

$G + S = 640.17\text{ l/m}^3$

Vu que on a fixé $G/S = 1,2$

- $G + S = 640.17\text{ l/m}^3$
- $G / S = 1,2$

Donc $S = 640.17 / 2.2 = 290.98\text{ l/m}^3$

$G + 290.98 = 640.17$

Donc $G = 349.19\text{ l/m}^3$.

On utilise $1/3$ de gravier ($3/8$) = 116.39 l/m^3

$2/3$ de gravier ($8/16$) = 232.79 l/m^3

Le dosage en Super-plastifiant est de 0.67 % de C, alors $400/1.06 = 377.35 \times 0.67\% = 2.52\text{ l/m}^3$

Le Tableau III.5 suivant résume le calcul pour le BAP5.

Tableau III.5 : Formulation du béton auto-plaçant avec sable de dunes

Constituants	Constituants (l/m^3)	Densité absolue	Constituants (kg/m^3)
Ciment	129.03	3.1	400
Poudre de sable de dunes	25.8	2.37	61.14
Sable (0/5)	290.98	2.44	709.99
Gravier (3/8)	116.39	2.58	300.28
Gravier (8/16)	232.79	2.63	612.23
Eau	200	1	200
Super-plastifiant	2.52	1.06	2.67

La composition de différents bétons avec pourcentage de **20%** sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.6 : Composition de différents bétons pour 1m³ (proportion de 20%)

Constituants (kg/m ³)	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5
Ciment	400	400	400	400	400
Sable (0/5)	709.99	709.99	709.99	709.99	709.99
Gravier (3/8)	300.28	300.28	300.28	300.28	300.28
Gravier (8/16)	612.23	612.23	612.23	612.23	612.23
Eau	200	200	200	200	200
Super-plastifiant	4.39	2.63	4.19	2.19	2.67
Brique	66.82	/	/	/	/
Marbre	/	62.17	/	/	/
Verre	/	/	59.08	/	/
Béton	/	/	/	68.11	/
Sable de dunes	/	/	/	/	61.14

Tableau III.7 : Quantité des compositions des bétons pour différents types des éprouvettes (proportion de 20%)

Constituants (kg/m ³)	Éprouvettes				BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5	Total
Ciment	50 éprouvettes Cylindrique 11 x 22	50 éprouvettes Prismatique 7 x 7 x 28	10 éprouvettes Cubique 15 x 15 x 15	10 éprouvettes Cubique 10 x 10 x 10	17,35	17,35	17,35	17,35	17,35	86,75
Sable (0/5)					30,80	30,80	30,80	30,80	30,80	154
Gravier (3/8)					13,03	13,03	13,03	13,03	13,03	65,5
Gravier (8/16)					26,56	26,56	26,56	26,56	26,56	132,8
Eau					8,68	8,68	8,68	8,68	8,68	43,4
Super-plastifiant					0,191	0,115	0,182	0,095	0,116	0.699
Brique					2,90	/	/	/	/	
Marbre					/	2,70	/	/	/	
Verre					/	/	2,56	/	/	
Béton					/	/	/	2,96	/	
Sable de dunes					/	/	/	/	2,65	

III.1.6. Composition du béton auto-plaçant « BAP1' » avec poudre de brique

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

Le dosage poudre de brique est fixé à 30%C, avec $C = 400\text{ kg/m}^3$, alors $400/3,1 = 129.03\text{ l/m}^3$

Donc $P_{\text{brique}} = 30\% \times 129.03 = 38.7\text{ l/m}^3$

Gravier (G) + Sable (S) + Ciment (C) + Eau (E) + Air (A) + ajout (Pbrique) = 1000 l

Avec :

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

$E/C = 0,5$ avec $C = 400\text{ kg/m}^3$

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

On obtient alors $G + S = 1000 - 129.03 - 200 - 5 - 38.7$

$G + S = 627.27\text{ l/m}^3$

Vu que on a fixé $G/S = 1,2$

- $G + S = 627.27\text{ l/m}^3$
- $G / S = 1,2$

Donc $S = 627.27 / 2.2 = 285.12\text{ l/m}^3$

$G + 285.12 = 627.27$

Donc $G = 342.15\text{ l/m}^3$.

On utilise $1/3$ de gravier ($3/8$) = 114.05 l/m^3

$2/3$ de gravi er ($8/16$) = 228.1 l/m^3

Le dosage en Super-plastifiant est de 1.11% de C, alors $400/1.06 = 377.35 \times 1.11\% = 4.18\text{ l/m}^3$

Le Tableau III.8 suivant résume le calcul pour le BAP1'.

Tableau III.8 : Formulation du béton auto-plaçant avec poudre de brique.

Constituants	Constituants (l/m^3)	Densité absolue	Constituants (kg/m^3)
Ciment	129.03	3.1	400
Poudre de brique	38.7	2.59	100.23
Sable (0/5)	285.12	2.44	695.69
Gravier (3/8)	114.05	2.58	294.24
Gravier (8/16)	228.1	2.63	599.90
Eau	200	1	200
Super-plastifiant	4.18	1.06	4.43

III.1.7. Composition du béton auto-plaçant « BAP2' » avec poudre de marbre

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

Le dosage poudre de marbre est fixé à 30%C, avec $C = 400\text{ kg/m}^3$, alors $400/3,1 = 129.03\text{ l/m}^3$

Donc $P_{\text{marbre}} = 30\% \times 129.03 = 38.7\text{ l/m}^3$

Gravier (G) + Sable (S) + Ciment (C) + Eau (E) + Air (A) + ajout (Pmarbre) = 1000 l

Avec :

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

$E/C = 0,5$ avec $C = 400\text{ kg/m}^3$

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

On obtient alors $G + S = 1000 - 129.03 - 200 - 5 - 38.7$

$G + S = 627.27\text{ l/m}^3$

Vu que on a fixé $G/S = 1,2$

- $G + S = 627.27\text{ l/m}^3$
- $G / S = 1,2$

Donc $S = 627.27 / 2.2 = 285.12\text{ l/m}^3$

$G + 285.12 = 627.27$

Donc $G = 342.15\text{ l/m}^3$.

On utilise $1/3$ de gravier ($3/8$) = 114.05 l/m^3

$2/3$ de gravier ($8/16$) = 228.1 l/m^3

Le dosage en Super-plastifiant est de 0.67% de C, alors $400/1.06 = 377.35 \times 0.67\% = 2.52\text{ l/m}^3$

Le Tableau III.9 suivant résume le calcul pour le BAP2'.

Tableau III.9 : Formulation du béton auto-plaçant avec poudre de marbre.

Constituants	Constituants (l/m^3)	Densité absolue	Constituants (kg/m^3)
Ciment	129.03	3.1	400
Poudre de marbre	38.7	2.41	93.26
Sable (0/5)	279.25	2.44	695.69
Gravier (3/8)	111.70	2.58	294.24
Gravier (8/16)	223.4	2.63	599.90
Eau	200	1	200
Super-plastifiant	2.52	1.06	2.67

III.1.8. Composition du béton auto-plaçant « BAP3' » avec poudre de verre

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

Le dosage poudre de verre est fixé à 30 % C, avec $C = 400\text{ kg/m}^3$, alors $400/3,1 = 129.03\text{ l/m}^3$

Donc $P_{\text{verre}} = 30\% \times 129.03 = 38.7\text{ l/m}^3$

Gravier (G) + Sable (S) + Ciment (C) + Eau (E) + Air (A) + ajout (Pverre) = 1000 l

Avec :

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

$E/C = 0,5$ avec $C = 400\text{ kg/m}^3$

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

On obtient alors $G + S = 1000 - 129.03 - 200 - 5 - 38.7$

$G + S = 627.27\text{ l/m}^3$

Vu que on a fixé $G/S = 1,2$

- $G + S = 627.27\text{ l/m}^3$
- $G / S = 1,2$

Donc $S = 627.27 / 2.2 = 285.12\text{ l/m}^3$

$G + 285.12 = 627.27$

Donc $G = 342.15\text{ l/m}^3$.

On utilise $1/3$ de gravier ($3/8$) = 114.05 l/m^3

$2/3$ de gravier ($8/16$) = 228.1 l/m^3

Le dosage en Super-plastifiant est de 1.07% de C, alors $400/1.06 = 377.35 \times 1.07\% = 4.03\text{ l/m}^3$

Le Tableau III.10 suivant résume le calcul pour le BAP3'.

Tableau III.10 : Formulation du béton auto-plaçant avec poudre de verre.

Constituants	Constituants (l/m^3)	Densité absolue	Constituants (kg/m^3)
Ciment	129.03	3.1	400
Poudre de verre	38.7	2.29	88.62
Sable (0/5)	279.25	2.44	695.69
Gravier (3/8)	111.70	2.58	294.24
Gravier (8/16)	223.4	2.63	599.90
Eau	200	1	200
Super-plastifiant	4.03	1.06	4.27

III.1.9. Composition du béton auto-plaçant « BAP4' » avec poudre de béton

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

Le dosage poudre de béton est fixé à 30%C, avec $C = 400\text{ kg/m}^3$, alors $400/3,1 = 129.03\text{ l/m}^3$

Donc $P_{\text{béton}} = 30\% \times 129.03 = 38.7\text{ l/m}^3$

Gravier (G) + Sable (S) + Ciment (C) + Eau (E) + Air (A) + ajout (Pbéton) = 1000 l

Avec :

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

$E/C = 0,5$ avec $C = 400\text{ kg/m}^3$

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

On obtient alors $G + S = 1000 - 129.03 - 200 - 5 - 38.7$

$G + S = 627.27\text{ l/m}^3$

Vu que on a fixé $G/S = 1,2$

- $G + S = 627.27\text{ l/m}^3$
- $G / S = 1,2$

Donc $S = 627.27 / 2.2 = 285.12\text{ l/m}^3$

$G + 285.12 = 627.27$

Donc $G = 342.15\text{ l/m}^3$.

On utilise $1/3$ de gravier ($3/8$) = 114.05 l/m^3

$2/3$ de gravier ($8/16$) = 228.1 l/m^3

Le dosage en Super-plastifiant est de 0.6 % de C, alors $400/1.06 = 377.35 \times 0.6\% = 2.26\text{ l/m}^3$

Le Tableau III.11 suivant résume le calcul pour le BAP4'.

Tableau III.11 : Formulation du béton auto-plaçant avec poudre de béton.

Constituants	Constituants (l/m^3)	Densité absolue	Constituants (kg/m^3)
Ciment	129.03	3.1	400
Poudre de béton	38.7	2.64	102.16
Sable (0/5)	279.25	2.44	695.69
Gravier (3/8)	111.70	2.58	294.24
Gravier (8/16)	223.4	2.63	599.90
Eau	200	1	200
Super-plastifiant	2.26	1.06	2.39

III.1.10. Composition du béton auto-plaçant « BAP5' » avec sable de dunes

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

Le dosage sable de dunes est fixé à 30 % C, avec $C = 400\text{ kg/m}^3$, alors $400/3,1 = 129.03\text{ l/m}^3$

Donc Sable de dunes = $30\% \times 129.03 = 38.7\text{ l/m}^3$

Gravier (G) + Sable (S) + Ciment (C) + Eau (E) + Air (A) + ajout (Sable de dunes) = 1000 l

Avec :

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

$E/C = 0,5$ avec $C = 400\text{ kg/m}^3$

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

On obtient alors $G + S = 1000 - 129.03 - 200 - 5 - 38.7$

$G + S = 627.27\text{ l/m}^3$

Vu que on a fixé $G/S = 1,2$

- $G + S = 627.27\text{ l/m}^3$
- $G / S = 1,2$

Donc $S = 627.27 / 2.2 = 285.12\text{ l/m}^3$

$G + 285.12 = 627.27$

Donc $G = 342.15\text{ l/m}^3$.

On utilise $1/3$ de gravier ($3/8$) = 114.05 l/m^3

$2/3$ de gravier ($8/16$) = 228.1 l/m^3

Le dosage en Super-plastifiant est de 0.68% de C, alors $400/1.06 = 377.35 \times 0.68\% = 2.56\text{ l/m}^3$

Le Tableau III.12 suivant résume le calcul pour le BAP5'.

Tableau III.12 : Formulation du béton auto-plaçant avec sable de dunes.

Constituants	Constituants (l/m^3)	Densité absolue	Constituants (kg/m^3)
Ciment	129.03	3.1	400
Poudre de sable de dunes	38.7	2.37	91.71
Sable (0/5)	288.05	2.44	695.69
Gravier (3/8)	115.22	2.58	294.24
Gravier (8/16)	230.44	2.63	599.90
Eau	200	1	200
Super-plastifiant	2.56	1.06	2.71

La composition de différents bétons avec pourcentage de **30%** sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.13 : Composition de différents bétons pour 1m³ (pourcentage de 30%)

Constituants (kg/m ³)	BAP1'	BAP2'	BAP3'	BAP4'	BAP5'
Ciment	400	400	400	400	400
Sable (0/5)	695.69	695.69	695.69	695.69	695.69
Gravier (3/8)	294.24	294.24	294.24	294.24	294.24
Gravier (8/16)	599.90	599.90	599.90	599.90	599.90
Eau	200	200	200	200	200
Super-plastifiant	4.43	2.67	4.27	2.39	2.71
Brique	100.23	/	/	/	/
Marbre	/	93.26	/	/	/
Verre	/	/	88.62	/	/
Béton	/	/	/	102.16	/
Sable de dunes	/	/	/	/	91.71

Tableau III.14 : Quantité des compositions des bétons pour différents types des éprouvettes (proportion de 30%)

Constituants (kg/m ³)	Éprouvettes				BAP1'	BAP2'	BAP3'	BAP4'	BAP5'	Total
Ciment	50 éprouvettes Cylindrique 11 x 22	50 éprouvettes Prismatique 7 x 7 x 28	10 éprouvettes Cubique 15 x 15 x 15	10 éprouvettes Cubique 10 x 10 x 10	17,35	17,35	17,35	17,35	17,35	86,75
Sable (0/5)					30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	150.9
Gravier (3/8)					12,76	12,76	12,76	12,76	12,76	63.8
Gravier (8/16)					26,02	26,02	26,02	26,02	26,02	130.1
Eau					8,68	8,68	8,68	8,68	8,68	43,4
Super-plastifiant					0,193	0,116	0,186	0,104	0,118	0.717
Brique					4,35	/	/	/	/	
Marbre					/	4,05	/	/	/	
Verre					/	/	3,85	/	/	
Béton					/	/	/	4,43	/	
Sable de dunes					/	/	/	/	3,98	

III. 2. Conclusion

La méthode de formulation du béton auto-plaçant, et la majorité des formules sont conçues maintenant de façon expérimentale, selon les caractères à l'état frais on peut juger que la formulation acceptable ou non, nous avons utilisé différents ajouts (poudre de brique, poudre de marbre, poudre de verre, poudre déchet de béton et sable de dunes avec un pourcentage de (20%) et pour chaque ajout un dosage en super-plastifiant de 1,1%, 0,68%, 1,1%, 0,9% et de 0,67% successivement, et un pourcentage de (30%) pour les mêmes ajouts et un dosage en super-plastifiant de 1,11%, 0,67%, 1,07%, 0,6% et de 0,68% respectivement où on a fixé les données suivantes : (l'air $A = 5 \text{ l/m}^3$, rapport eau sur ciment $E/C = 0,5$, rapport gravier sur sable $G/S = 1,2$).

Dans ce chapitre on a déterminés les quantités des matériaux utilisés pour les différents BAP de notre étude où on a obtenu les quantités suivantes :

- ❖ Ciment : 173.5 kg (3.47 sac de 50kg)
- ❖ Sable : 304.9 kg
- ❖ Gravier 3/8 : 129.3 kg
- ❖ Gravier 8/16 : 262.9 kg
- ❖ Eau : 86.8 kg
- ❖ Super-plastifiant : 1.416 kg
- ❖ Poudre de brique : 7.25 kg
- ❖ Poudre de marbre : 6.75 kg
- ❖ Poudre de verre : 6.41 kg
- ❖ Poudre de béton : 7.39 kg
- ❖ Poudre sable de dunes : 6.63 kg

Partie 2 : Étude expérimentale

**Chapitre IV : Essais effectués sur bétons : résultats et
interprétations**

Chapitre IV : Essais effectuées sur bétons : résultats et interprétations.**IV.1. Introduction**

Dans cette partie, un premier temps, pour but de développer les étapes de formulation et de confection des différents bétons. Ensuite, de s'intéresser aux essais sur béton, permettant ainsi de caractériser leurs performances physiques et mécaniques et d'évaluer le comportement des BAP par rapport aux bétons traditionnels vibrés.

Pour cela on a choisi de faire varier quelques paramètres tels que la nature des fines (poudre de marbre, déchets de brique, déchets de béton, déchets de verre, sable de dunes) pour un même type de matériau et un dosage en ciment constant. Le dosage en eau n'a pas été modifié lors de l'élaboration des BAP. Les résultats obtenus ont été comparés avec les résultats de l'autre groupe de cette année et des études précédentes. Les bétons ont été élaborés avec les mêmes granulats :

- Gravier concassé de classe : 3/8 et 8/16.
- Sable de classe : 0/5.
- Ciment type NA442 CEM II /B-L42,5N.
- Type de poudre (déchet de brique, déchet de marbre, déchet de verre, déchet de béton) et sable de dunes.
- Le super-plastifiant TEMPO-12, fabriqué par l'entreprise Sika® Visco Crète®. Variables de l'étude :

Dans notre étude, ont été réalisées :

- 100 éprouvettes cylindriques (11×22), soit 10 pour chaque type de béton, pour la mesure de la résistance à la compression à 7 jours, 14 jours, 28 jours, 45 jours, 60 jours.
- 100 éprouvettes prismatiques (7×7×28), soit 10 pour chaque type de béton, pour l'essai de traction par flexion à 07 jours, 14 jours, 28 jours, 45 jours, 60 jours, et avec les 100 éprouvettes il y a 20 éprouvettes prismatiques (7×7×28), soit 2 pour chaque type de béton, pour la mesure du retrait à 01 jours, 02 jours, 03 jours, 04 jours, 07 jours, 14 jours et 28 jours.
- 20 éprouvettes cubiques (10×10×10), soit 2 pour chaque type de béton, pour l'essai d'absorption d'eau.
- 20 éprouvettes cubiques (15×15×15), soit 2 pour chaque type de béton, pour l'essai de perméabilité.

IV.2. Élaboration des bétons**IV.2.1. Préparation de mélange (gâché)**

La préparation du béton auto-plaçant demande plus d'attention et de précision que la préparation d'un béton ordinaire. Pour parvenir à effectuer plusieurs essais sur le béton frais, il faut suivre une certaine méthodologie. [8]

Le premier paramètre à prendre en compte est la capacité du malaxeur utilisé. Dans notre cas elle est de capacité de 130 litres selon la fiche technique.

Après avoir déterminer les proportions de chaque composant, ensuite nous suivons les étapes suivantes :

- Préparer les moules nécessaires pour les différents essais, vérifier leur nombre et qu'ils sont bien graissés afin de faciliter par suite le décoffrage.
- Vérifier que tout le matériel est à disposition et que les matériaux sont bien séchés, sinon les sécher préalablement dans l'étuve.
- Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée. Le super-plastifiant est ajouté à la première moitié de l'eau de gâchage.
- Peser les matériaux secs (gravier, sable, ciment, ajouts), les introduire dans le malaxeur.
- Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec pendant 30 secondes.
- Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement la première moitié de l'eau de gâchage (celle qui contient l'adjuvant) et mélanger pendant 1 minute 30 secondes.
- Introduire la partie restante d'eau graduellement et malaxage pendant 2 minutes.
- Effectuer immédiatement les essais de caractérisation du béton frais.
- Remplir les éprouvettes sans vibration.

IV.2.2. Démoulage et conservation des éprouvettes

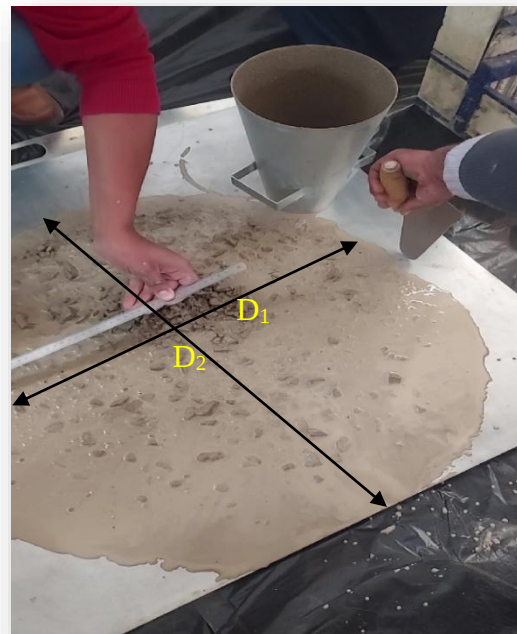
Après le coulage, les éprouvettes sont laissées à température ambiante et sont démoulées après 24 heures. Une fois démoulées, pour assurer un bon mûrissement du béton, les éprouvettes sont conservées à laboratoire universitaire.

IV.3. Essais sur béton frais**IV.3.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams :**

L'essai le plus courant, car le plus facile à mettre en œuvre, permettant d'évaluer sa consistance et l'ouvrabilité, cette essai est réalisée avec le cône d'Abrams au cône d'Abrams, et aussi connu en anglais sous le nom de (slump flow).

Déroulement de l'essai comme ce qui suit :

Le cône d'Abrams est placé à l'envers et maintenue sur une plaque en acier ayant une surface dure et non-absorbante, ensuite le cône est rempli avec du béton frais et arasé avec une tige, après le cône est levé immédiatement, verticalement et doucement où le béton très fluide s'étale sous la forme d'une galette sur la table d'étalement, enfin on mesure les deux diamètres perpendiculaire et l'étalement est la moyenne de ces deux diamètres.

**IV.1: Essai d'étalement au cône d'Abrams**

Les résultats des essais effectués sur les différents BAP sont présentés dans le Tableau IV.1

Tableau IV.1 : Résultats essai d'étalement au cône d'Abrams

Béton	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5
Étalement moyenne $(D1+D2)/2$	76	60	74	71	76.5

On remarque que l'étalement était que le BAP1 et BAP5 les plus étaler et selon la norme ce type de béton on peut utiliser dans les structures trop ferrillées et de forme complexe. Alors que le BAP3 et BAP4 est moins étalement que le précédent où les domaines d'utilisation de ce type de béton au la majorité des applications et le BAP2 est le plus moins que les autres et son utilisation dans le domaine de structures en béton non armées ou faiblement armées, béton coulé à partir du haut (ex : dalles) ...

IV.3.2. Essai de la boîte en L

L'essai de la boîte en L (Figure IV.2) est effectué uniquement pour le béton auto-plaçant, il permet de tester la mobilité du béton frais en milieu confiné (ségrégation dynamique) et de vérifier que la mise en place du béton se fait sans blocage, ni formation de voûtes au voisinage des armatures.

La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton. Après arasement, on laisse le béton reposer pendant une minute. Puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le 3 barres. La distance libre entre les barres est de 39 mm.

Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H_1 et H_2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H_2/H_1 qui doit être $\geq 0,8$. [7]



Figure IV.2: Essai de la boîte en L

Les résultats des essais effectués sur les différents BAP sont présentés dans le Tableau IV.2

Tableau IV.2 : Résultats essai de la boîte en L

Béton	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5
Taux de remplissage (H2/H1)	0.84	0.85	0.82	0.89	0.84

On constate que l'étalement horizontal était répondu aux exigences du béton auto-plaçant, Lorsque tous les résultats de H2/H1 étaient supérieurs à 0,8 m dans tous les BAP.

IV.3.3. Essai de stabilité au tamis

Pour ce test, on verse le béton au centre du tamis 15min après l'avoir prélevé. Deux minutes après, on retire le tamis et on pèse le fond avec la laitance. On calcule le pourcentage en masse de laitance par rapport à la masse de l'échantillon. L'essai de stabilité du tamis vise à qualifier les bétons vis-à-vis du risque de ségrégation. On vérifie la bonne homogénéité du béton réalisé. En effet, cet essai met en évidence la ségrégation et le ressuage du béton. (Figure IV.3). [6]



Figure IV.3: Essai de stabilité au tamis

On calcule les résultats comme ce qui suit :

$$P(\%) = \frac{\text{masse de laitance (kg)}}{\text{masse de l'échantillon(kg)}} \times 100$$

Les résultats des essais effectués sur les différents BAP sont présentés dans le Tableau IV.3

Tableau IV.3 : Résultats essai de stabilité au tamis

Béton	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5
Pourcentage de laitance (P en %)	25.6	15.24	18.04	21.86	21.76

Commentaire sur les résultats :

D'après les résultats du test de stabilité au tamis pour déterminer la stabilité du béton 15 minutes après le malaxage, où tous les résultats ont montré que tous les bétons avaient une stabilité modérée en termes de résistance à la séparation statique de plus de 15 % mais BAP2 et BAP3 sont les meilleures parmi les autres résultats, cela peut s'expliquer par une modification de la qualité et du dosage de l'additif.

Ces résultats sont considérés comme les meilleurs si l'on prend en compte le degré d'accord avec les tests précédents (étalement au cône d'Abrams et essai de la boîte en « L »), qui sert des premières références pour l'ajustement.

IV.3.4. Essai J-Ring

Le test J-Ring permet d'évaluer l'aptitude à l'écoulement du béton auto-plaçant aux travers des zones confinées comprenant les espaces entre les armatures sans aucune ségrégation ou aucun blocage. Il est utilisé conjointement avec l'essai d'étalement au cône d'Abrams. L'anneau (Figure IV.4), et le cône d'Abrams sont centrés sur la plaque, avant de soulever le cône et avant d'observer l'écoulement du béton à travers les armatures.

NB : La différence entre les diamètres moyens des deux essais met en évidence la perte de remplissage due à la présence d'armatures. Pour un béton auto-plaçant cette différence doit être inférieure à 5 cm.

Les valeurs cibles pour un béton auto-plaçant correspondent à un étalement compris entre 45 et 65 cm. [21]



Figure IV.4: Essai J-Ring

Les résultats des essais effectués sur les différents BAP sont présentés dans le Tableau IV.5

Tableau IV.4 : Résultats essai de J-Ring

Béton	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5
écoulement J-Ring (cm)	71	63	66	71	69

Commentaire sur les résultats :

D'après les résultats obtenus, nous avons constaté que le BAP1 et BAP4 sont les plus étaler, ensuite successivement par BAP5, BAP3 et BAP2.

Tableau IV.5 : Tableau récapitulatif des résultats d'essais à l'état frais des BAP

TYPE	La boîte en L (%)	Stabilité au tamis (%)	écoulement J-Ring (cm)	écoulement au cône d'Abrams
BAP1	0.84	25.6	71	76
BAP2	0.85	15.24	63	60
BAP3	0.82	18.04	66	74
BAP4	0.89	21.86	71	71
BAP5	0.84	21.76	69	76.5

NB : Concernant les autres types de béton (BAP1', BAP2', BAP3', BAP4' et BAP5') nous avons gardé les mêmes constituants avec une légère augmentation du pourcentage des poudres et de super-plastifiant afin de gardé la même maniabilité.

IV.4 Essais sur béton durci

IV.4.1 Essai de compression

La résistance à la compression du béton est mesurée par la charge conduisant à l'écrasement par compression axiale d'une éprouvette cylindrique de 11 cm de diamètre et de 22 cm (Figure IV.5) où les essais sont réalisés à 7,14,28,45 et 60 jours. Les éprouvettes sont chargées jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression, La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression est affichée sur l'écran de la machine ou calculée par l'équation ci-dessous.



Figure IV.5: essai d'écrasement

L'objectif de cet essai est de connaître la résistance à la compression du béton des éprouvettes et suivre l'évolution de la résistance à la compression et le comportement des différents échantillons pour BAP à chaque âge de béton.

Résultats :

Après avoir enregistré les données nécessaires sur la machine, les valeurs de la force et de la résistance à la compression R_c sont lues directement sur l'écran de la machine (avec courbe), ou calculé par l'équation suivante :

$$R_c(N/mm^2) = \frac{F}{S}$$

Avec :

- **F** : la force maximale relevée au moment de la rupture de l'éprouvette sur l'écran de la presse exprimée en (N).

- **S** : L'aire de l'éprouvette laquelle la force de compression est appliqué (mm^2).

La résistance à la compression correspond à la contrainte moyenne d'écrasement de deux éprouvettes à chaque âge d'essai.

Les essais effectués sur les différents bétons à différents âges (7,14,28,45,60 jours) ont donné les résultats sont présentés dans le tableau suivant : (Tableau IV.6) :

Tableau IV.6 : Valeurs des résistances pour les essais de compression sur les bétons étudiés pourcentage de 20%

Béton	Résistance à la compression (bars)				
	7 ^{ème} jour	14 ^{ème} jour	28 ^{ème} jour	45 ^{ème} jour	60 ^{ème} jour
BAP1 avec Poudre de Brique	31.53	36.99	40.80	42.52	43.29
BAP2 avec Poudre de Marbre	35.83	39.24	41.21	42	42.33
BAP3 avec de Poudre verre	23.66	30.53	35.72	38.17	39.28
BAP4 avec Déchet de Béton	12.96	16.72	19.72	20.91	21.52
BAP5 avec Sable de dunes	19.46	25.12	29.39	31.41	32.32

Les résultats d'écrasement enregistrés dans le tableau ci-dessus pour différents échantillons représentés avec des courbes graphiques dans les Figures IV.6.

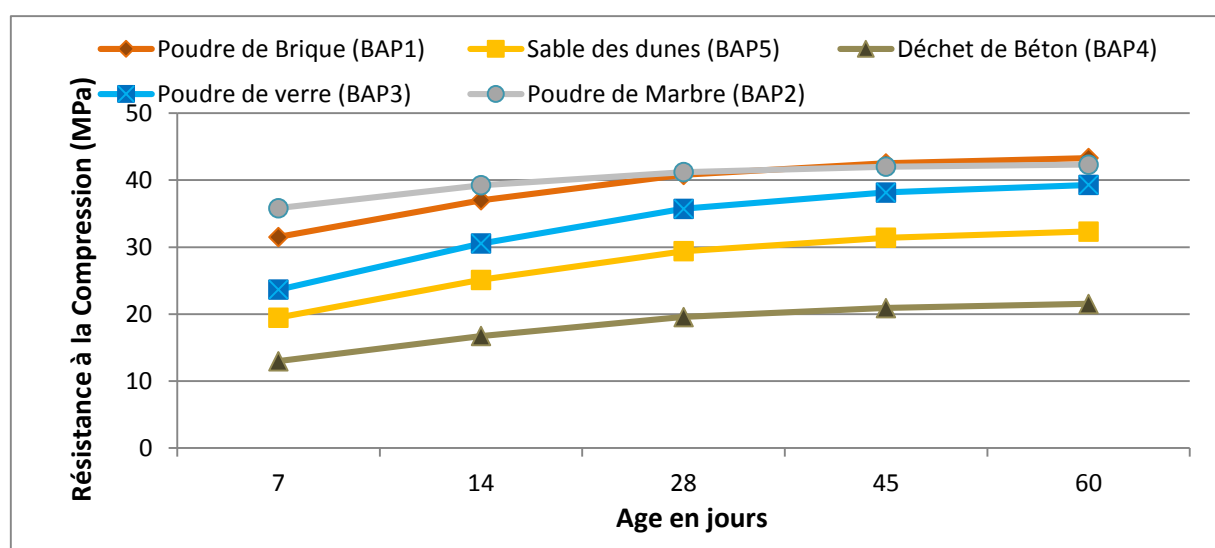


Figure IV.6: Courbes graphique montrant l'évolution de la résistance à la compression en (MPa) de tous les échantillons en fonction du temps pourcentage de 20%

Commentaire sur les résultats :

D'après les résultats du test d'écrasement, il a été constaté ce qui suit :

1. La résistance à la compression augmente avec l'âge de béton.
2. La résistance à la compression du BAP2 (poudre de marbre) à l'âge de 28 jours était la plus élevée, suivie par la suite le BAP1, BAP3, BAP5 et le BAP4.

Cela peut s'expliquer comme suit :

- Différence dans le type d'ajout, leurs composants chimique ou leurs doses

Les résultats présentés dans le tableau suivant : (Tableau IV.7) :

Tableau IV.7 : Valeurs des résistances pour les essais de compression sur les bétons étudiés pourcentage de 30%

Béton	Résistance à la compression (bars)				
	7 ^{ème} jour	14 ^{ème} jour	28 ^{ème} jour	45 ^{ème} jour	60 ^{ème} jour
BAP1' avec Poudre de Brique	19.21	24.7	28.9	30.88	31.78
BAP2' avec Poudre de Marbre	24.14	31.15	36.45	38.95	40.08
BAP3' avec de Poudre verre	17.04	22	25.74	27.5	28.3
BAP4' avec Déchet de Béton	14.99	19.35	22.64	24.19	24.9
BAP5' avec Sable de dunes	18.75	24.2	28.32	30.26	31.14

Les résultats d'écrasement enregistrés dans le tableau ci-dessus pour différents échantillons représentés avec des courbes graphiques dans les Figures IV.7.

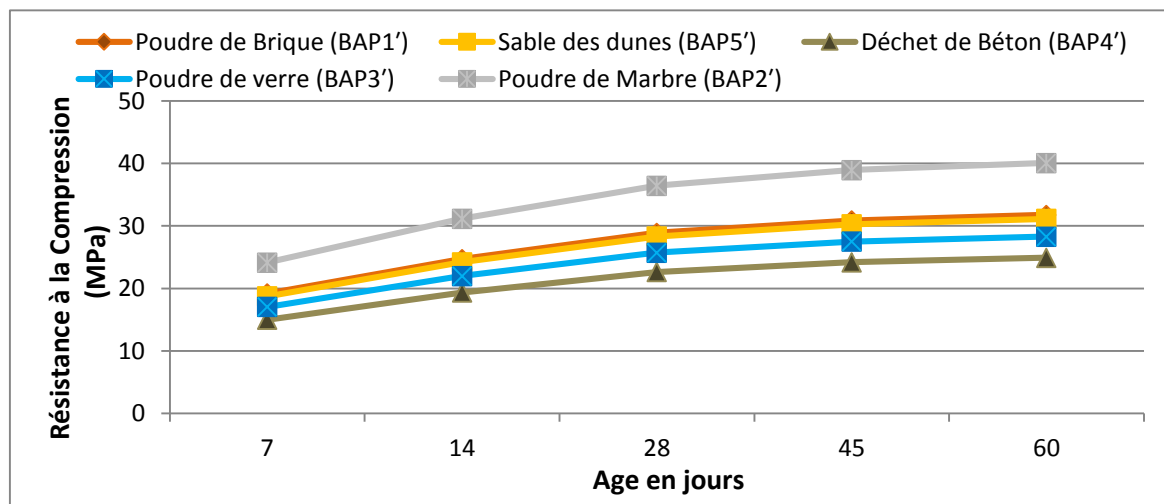


Figure IV.7: Courbes graphique montrant l'évolution de la résistance à la compression en (MPa) de tous les échantillons en fonction du temps pourcentage de 30%

Commentaire sur les résultats :

D'après les résultats du test d'écrasement, il a été constaté ce qui suit :

1. La résistance à la compression augmente avec l'âge de béton.
2. La résistance à la compression du BAP2' (poudre de marbre) à l'âge de 28 jours était la meilleur, suivie par la suite le BAP1', BAP5', BAP3'et le BAP4'.

Cela peut s'expliquer comme suit :

- Différence dans le type d'ajout, leurs composants chimique ou leurs doses

➤ **Comparaison entre les résultats de deux pourcentage :**

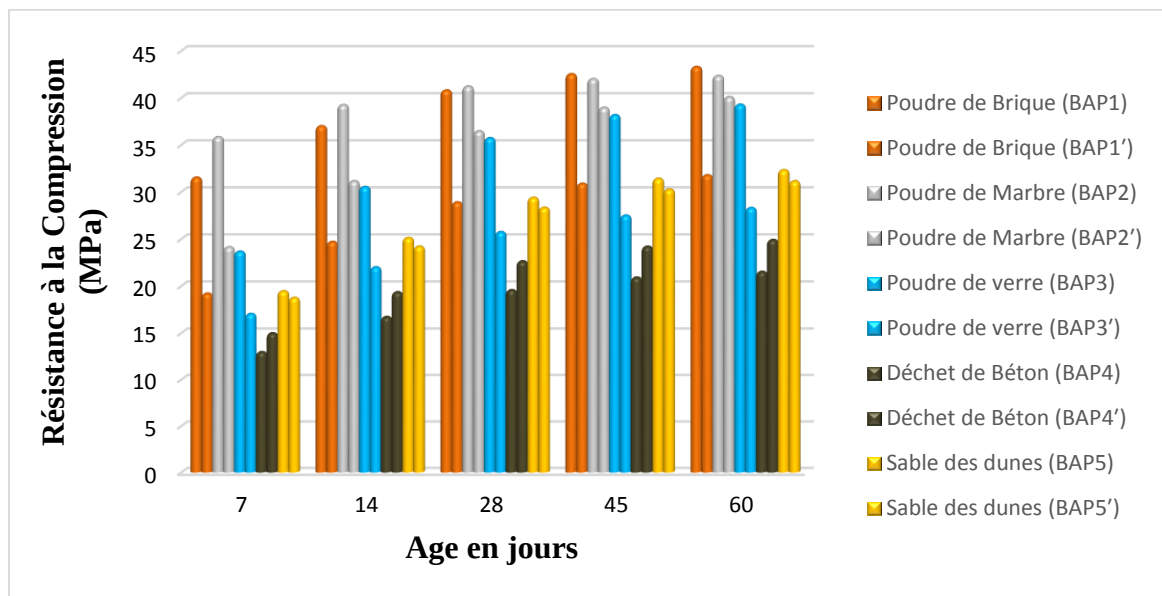


Figure IV.8: Colonne graphique de comparaison entre les valeurs des bétons dosage de 20% et 30%

Commentaire sur les résultats :

On remarque que la résistance de compression est diminuée à l'âge de 28 jours pour le dosage de 30% par rapport au dosage de 20% et cela peut s'expliquer que lorsque le pourcentage d'additifs augmente, par contre les résultats indique que la résistance à la compression s'augmente dans le cas de BAP4' avec l'augmentation le dosage de poudre béton et le meilleur résultat entre les deux proportions est la résistance de BAP2 avec poudre de marbre pourcentage de 20%.

D'autre part nous avons constaté que la résistance à la compression à l'âge de 28 jours pour le BAP2 avec poudre de marbre pourcentage de 20% avec une résistance de 41.21 Mpa est le meilleur résultat par rapport aux résultats des pourcentages de l'autre groupe de cette année, sachant que la résistance de BAP3 avec poudre de verre pourcentage de 15% est le meilleur pour l'autre groupe avec une résistance de 39,93 Mpa.

En revanche nous avons constaté que la résistance à la compression à l'âge de 28 jours pour le BAP2 avec poudre de marbre pourcentage de 20% est le meilleur résultat par rapport aux résultats des pourcentages de nos collègues de l'année passée, sachant que la résistance de BAP1 avec poudre de brique pourcentage de 15% est le meilleur pour ce groupe avec une résistance de 39,07 Mpa.

IV.4.2 Essai de traction par flexion

L'essai de traction par flexion est effectué sur des échantillons prismatique de dimensions (7x7x28) cm.

L'échantillon est placé dans une machine automatique sur deux appuis et est soumis à une charge continue jusqu'à sa rupture. On note alors la charge de rupture F . (Figure IV.9).



Figure IV.9: Échantillon sous l'essai de traction par flexion

L'objectif de cet essai est de suivre l'évolution de la résistance de traction par flexion et le comportement des différents échantillons pour BAP.

Résultats :

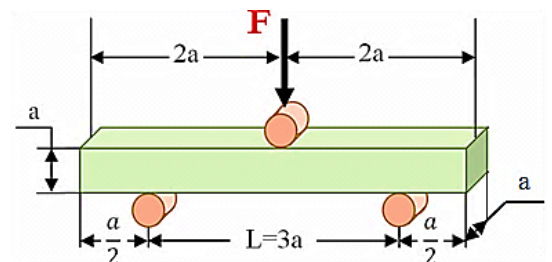
la résultat de la résistance de la traction par flexion(σ_f) calculer par la formule suivant:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2a^3}$$

Où : F : la charge de rupture.

L : la distance entre deux appuis.

a : dimension de la section.



La résistance de traction par flexion correspond à la contrainte moyenne d'écrasement de deux éprouvettes à chaque âge d'essai.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.8: Valeurs des résistances pour les essais de traction par flexion sur les bétons étudiés pourcentage de 20%

Béton	Résistance à la traction par flexion (bars)				
	7 ^{ème} jours	14 ^{ème} jours	28 ^{ème} jours	45 ^{ème} jours	60 ^{ème} jours
BAP1 avec Poudre de Brique	2.64	2.8	2.96	3.12	3.31
BAP2 avec Poudre de Marbre	2.34	2.82	3.54	3.67	4.00
BAP3 avec de Poudre verre	2.74	2.98	3.96	4.07	4.24
BAP4 avec Déchet de Béton	2.94	3.12	3.51	3.71	3.8
BAP5 avec Sable de dunes	2.36	3.34	3.63	3.93	4.07

Représentation des résultats destructifs enregistrés dans le tableau ci-dessus pour différents échantillons avec des courbes graphiques dans les figures IV.10

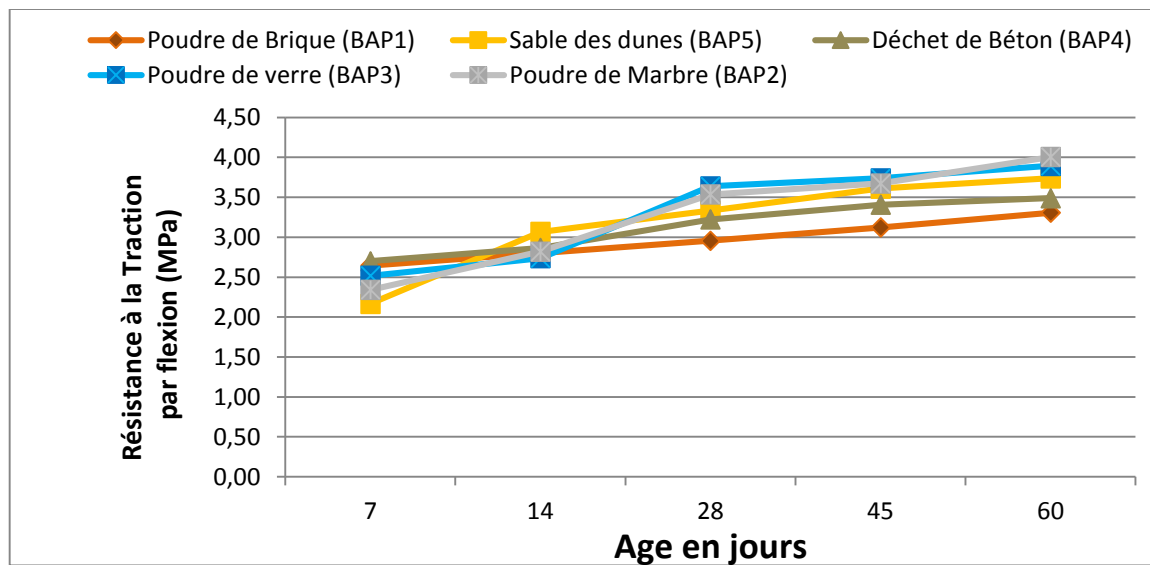


Figure IV.10: Courbes graphique montrant l'évolution de la résistance à la traction par flexion en (MPa) de tous les échantillons en fonction du temps dosage de 20%

Commentaire sur les résultats :

D'après les résultats des essais de traction et de flexion, on a observé ce qui suit :

1. En général, la résistance à la traction due à la flexion augmente avec l'âge de béton.
2. La résistance à la traction du BAP3 à l'âge de 28 jours était la meilleur, ensuite successivement par le BAP5, BAP2, BAP4 et le BAP1 et cela peut s'expliquer par la différence dans le type d'ajout, leurs composants chimique ou leurs doses.

Les résultats obtenus de pourcentage de 30% sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.9: Valeurs des résistances pour les essais de traction par flexion sur les bétons étudiés pourcentage de 30%

Béton	Résistance à la traction par flexion (bars)				
	7 ^{ème} jours	14 ^{ème} jours	28 ^{ème} jours	45 ^{ème} jours	60 ^{ème} jours
BAP1' avec Poudre de Brique	1.91	2.14	3.09	3.13	3.21
BAP2' avec Poudre de Marbre	2.56	2.83	2.98	2.16	3.33
BAP3' avec de Poudre verre	2.14	2.17	3.00	3.21	3.48
BAP4' avec Déchet de Béton	1.96	2.55	3.89	4.11	4.38
BAP5' avec Sable de dunes	2.30	2.70	3.38	3.61	3.79

Représentation des résultats destructifs enregistrés dans le tableau ci-dessus pour différents échantillons avec des courbes graphiques dans le Figure IV.11

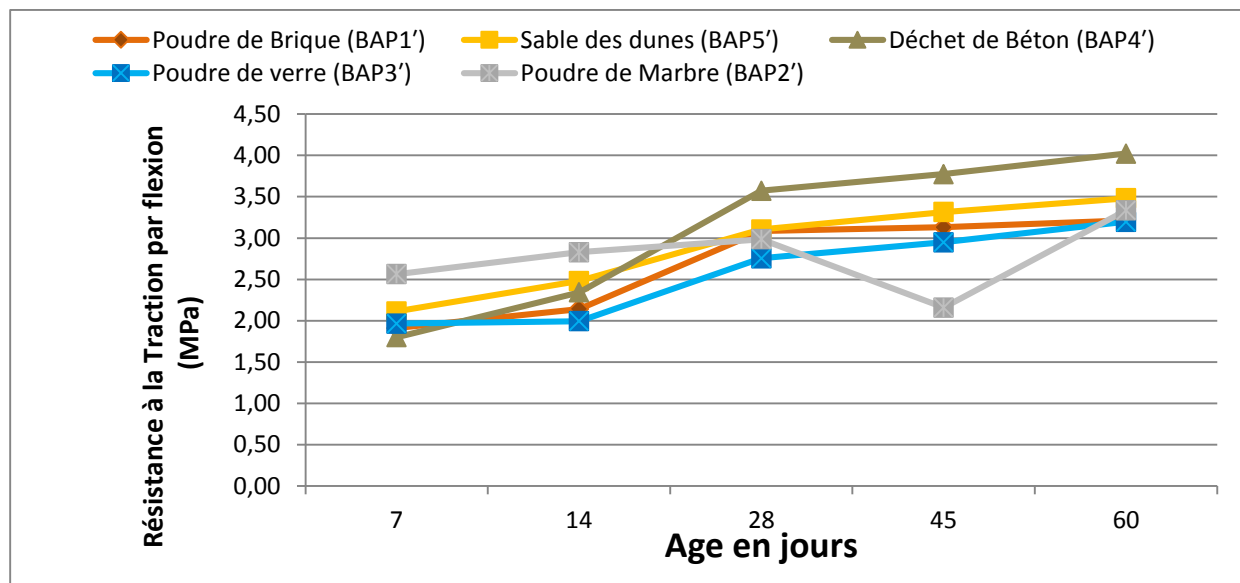


Figure IV.11: Courbes graphique montrant l'évolution de la résistance à la traction par flexion en (MPa) de tous les échantillons en fonction du temps dosage de 30%

Commentaire sur les résultats :

D'après les résultats des essais de traction et de flexion, on a observé ce qui suit :

1. En général, la résistance à la traction due à la flexion augmente avec l'âge de béton.
2. La résistance à la traction du BAP4' à l'âge de 28 jours était la meilleur, ensuite successivement par le BAP5', BAP1'', BAP3 et le BAP2' et cela pour le dosage de 20% et cela peut s'expliquer par la différence dans le type d'ajout, leurs composants chimique ou leurs doses.

➤ Comparaison entre les résultats de deux pourcentage :

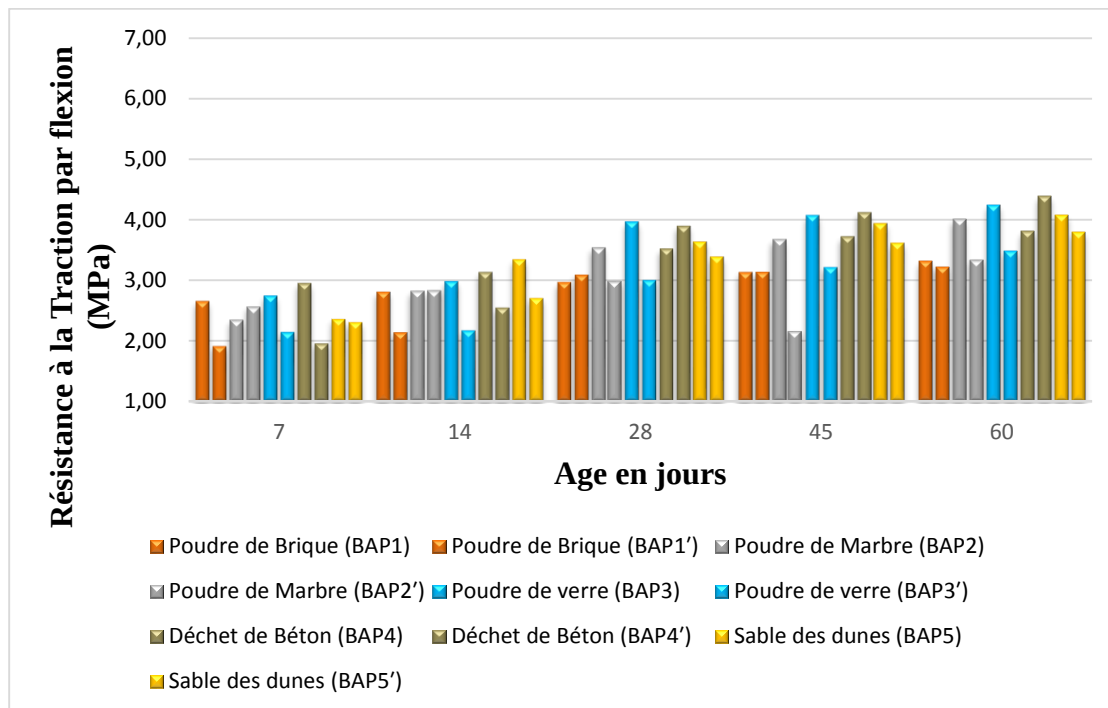


Figure IV.12: Colonne graphique de comparaison entre les valeurs des bétons dosage de 20% et 30%

Commentaire sur les résultats :

On remarque que la résistance à la traction est diminuée à l'âge de 28 jours pour le dosage de 30% par rapport au dosage de 20% et cela peut s'expliquer que lorsque le pourcentage d'additifs augmente, sauf le cas de BAP1 et BAP4 qui indique que la résistance s'augmente avec l'augmentation le dosage de poudre et le meilleur résultat entre les deux proportions est la résistance de BAP3 avec poudre de verre pourcentage de 20%.

D'autre part nous avons constaté que la résistance à la traction à l'âge de 28 jours pour le BAP3 avec poudre de verre pourcentage de 20% avec une résistance de 3.96 Mpa est le meilleur résultat par rapport aux résultats des pourcentages de l'autre groupe de cette année, sachant que la résistance de BAP4 avec poudre de béton pourcentage de 15% est le meilleur pour ce groupe à une résistance de 3,59 Mpa.

En revanche nous avons constaté que la résistance à la traction à l'âge de 28 jours pour le BAP1 avec poudre de brique pourcentage de 15% de nos collègues de l'année passée est le meilleur, sachant que leur résistance est de 4.32 Mpa par rapport notre résultat.

IV.4.3 Essai d'absorption d'eau par capillarité

L'absorption capillaire est le transfert d'eau dans un matériau poreux dû à des tensions de surface dans les capillaires et il consiste à mesurer le taux d'absorption de l'eau par succion capillaire des éprouvettes de bétons, non saturés, mise en contact avec l'eau sans pression hydraulique.

Cet essai consiste à suivre la cinétique d'imbibition capillaire à travers la quantité d'eau absorbée par unité de surface de l'échantillon en contact avec l'eau, en fonction de la racine carrée du temps.

Les essais d'absorption par capillarité ont été réalisés sur des éprouvettes cubique de dimension (10x10x10) cm.

Pour effectuer cet essai l'échantillons sont antérieurement séchés à une température de 70 °C jusqu'à obtention d'une masse constante, puis pesés afin de déterminer la masse sèche. Et pour éviter l'absorption de l'eau de l'atmosphère nous recouvrons l'échantillon d'une film plastique ou le graissons avec une matière graisseuse et lissés les derniers 3 mm pour permettre l'absorption de l'eau.

Les échantillons sont ensuite placés dans un bac permettant une mise en contact constante d'une face de l'échantillons avec 3 ± 1 mm d'eau. Des pesées des éprouvettes est assurée au cours du temps selon le tableau ci-dessous.



Figure IV.13: Echantillons pour l'essai de l'absorption d'eau par capillarité

Résultats :

Le coefficient d'absorption d'eau par capillarité est déterminé par l'équation suivante :

$$C_{w,s} = \frac{m_{so,s} - m_{mdry,s}}{A_s \sqrt{t_{so}}} \times 10^6$$

Avec :

$C_{w,s}$: coefficient d'absorption d'eau par capillarité, en $g/m^2.s^{1/2}$.

$m_{so,s}$: masse de l'éprouvette après immersion pendant un temps t , en g.

$m_{mdry,s}$: masse de l'éprouvette après séchage, en g.

A_s : surface brute de la face de l'éprouvette immergée dans l'eau, en mm^2

t_{so} : temps d'immersion, en seconde s.

Après la détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité à différents intervalles de temps (15 minutes, 30 minutes, 45 minutes, 1 heure, 2 heures, 4 heures, 8 heures, 24 heures) sur tous les échantillons de béton étudiés.

Les valeurs sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau IV.10: Valeurs des coefficients d'absorption d'eau par capillarité sur les bétons étudiés proportion de 20%

Bétons	Quantité d'absorption en (g) en fonction du temps								
	0 mn	15 mn	30 mn	45 mn	60 mn	120 mn	240 mn	480 mn	1440 mn
BAP1 avec Poudre de Brique	0	3,50	5,00	6,00	7,00	9,50	13,00	17,50	27,00
BAP2 avec Poudre de Marbre	0	9	14,00	16,00	18,00	21,50	27,00	34,00	46,00
BAP3 avec de Poudre verre	0	11	13,00	14,25	15,50	19,00	23,50	28,50	38,50
BAP4 avec Déchet de Béton	0	5,5	6,50	7,00	7,50	9,50	11,50	14,50	18,50
BAP5 avec Sable de dunes	0	7,5	8,50	10,00	11,50	15,00	20,50	27,50	38,00

Représentation des résultats enregistrés dans le tableau ci-dessus pour différents échantillons avec des courbes graphiques dans les Figures IV.14 et IV.15.

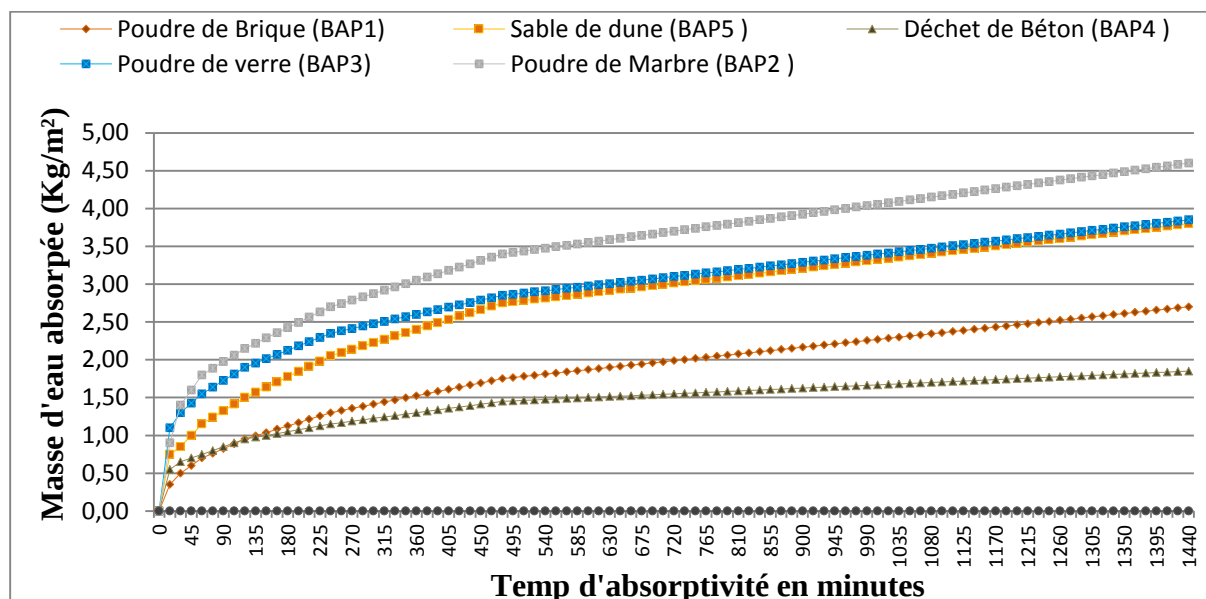


Figure IV.14: Courbes graphique montrant l'évolution d'absorption de l'eau par capillarité sur les bétons étudiés dosage de 20%

Avec les mêmes données, en fonction de la masse d'eau absorbée en Kg/m² et de la racine carrée du temps ($s^{1/2}$), cela donne la courbe graphique suivante:

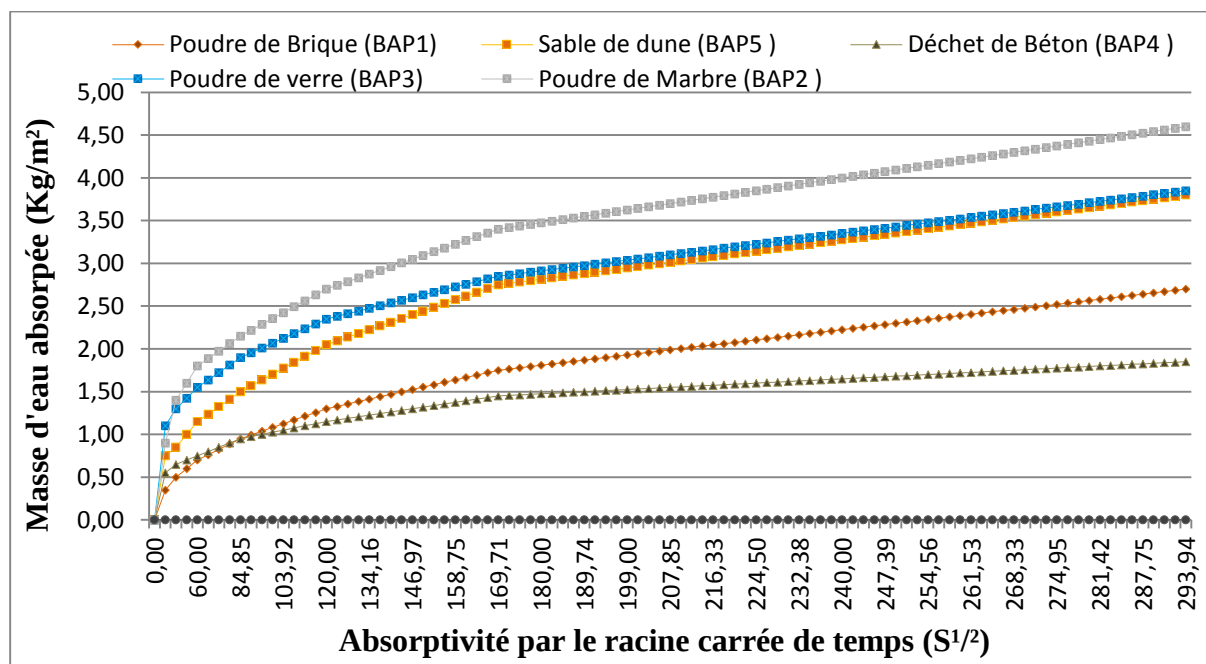


Figure IV.15 : Courbes graphique montrant l'évolution d'absorption de l'eau par capillarité fonction de la masse d'eau absorbée en Kg/m² et de la racine carrée du temps ($S^{1/2}$) sur les bétons étudiés dosage de 20%

Commentaire sur les résultats :

D'après les courbes, nous remarquons une augmentation rapide du taux d'absorption dans le premier 15 minutes pour tous les bétons, après il y a une augmentation relative du taux d'absorption jusqu'à la première heure, après cela le taux d'absorption augmente progressivement et rapidement, où le BAP4 avec déchet de béton est le moins absorbant, suivi par BAP1, ensuite BAP5, puis BAP3, et le moins absorbant d'entre eux est le BAP2 et cela à 24h.

Les valeurs sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau IV.11: Valeurs des coefficients d'absorption d'eau par capillarité sur les bétons étudiés proportion de 30%

Bétons	Quantité d'absorption en (g) en fonction du temps								
	0 mn	15 mn	30 mn	45 mn	60 mn	120 mn	240 mn	480 mn	1440 mn
BAP1' avec Poudre de Brique	0	11,00	12,00	14,75	17,50	23,50	30,00	35,50	48,00
BAP2' avec Poudre de marbre	0	13	15,50	18,00	20,50	27,00	32,50	37,00	46,00
BAP3' avec de Poudre verre	0	11,00	13,00	14,75	16,50	21,50	26,50	30,50	38,00
BAP4' avec Déchet de Béton	0	12	13,33	14,50	15,67	18,67	21,67	24,67	27,33
BAP5' avec Sable de dunes	0	16	18,50	20,75	23,00	28,00	33,50	38,00	44,00

Représentation des résultats enregistrés dans le tableau ci-dessus pour différents échantillons avec des courbes graphiques dans les Figures IV.16 et IV.17.

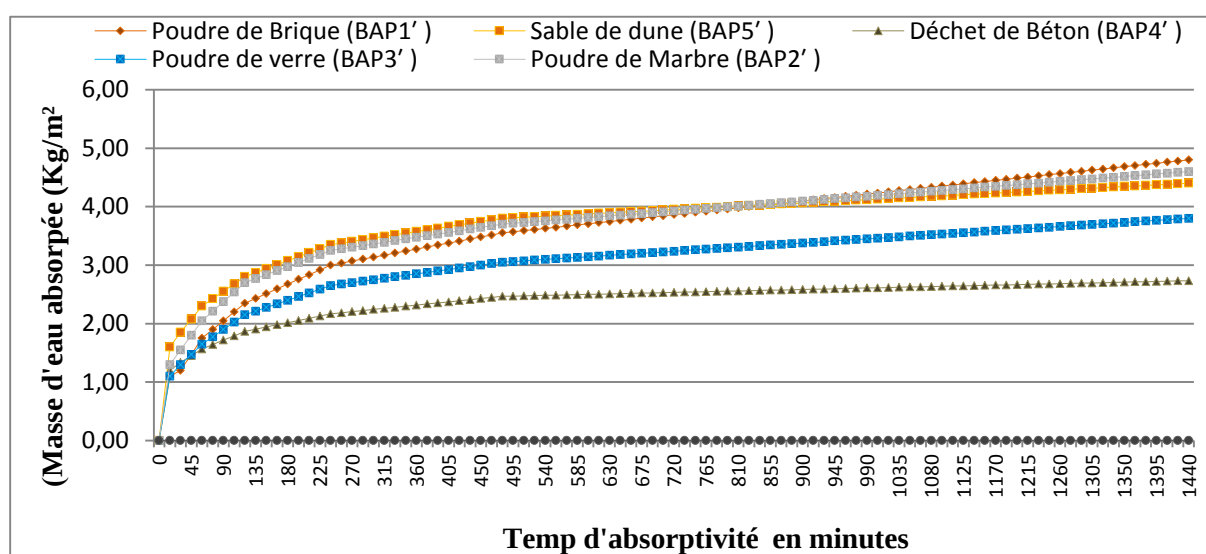


Figure IV.16: Courbes graphique montrant l'évolution d'absorption de l'eau par capillarité sur les bétons étudiés dosage de 30%

Avec les mêmes données, en fonction de la masse d'eau absorbée en Kg/m^2 et de la racine carrée du temps ($\text{s}^{1/2}$), cela donne la courbe graphique suivante:

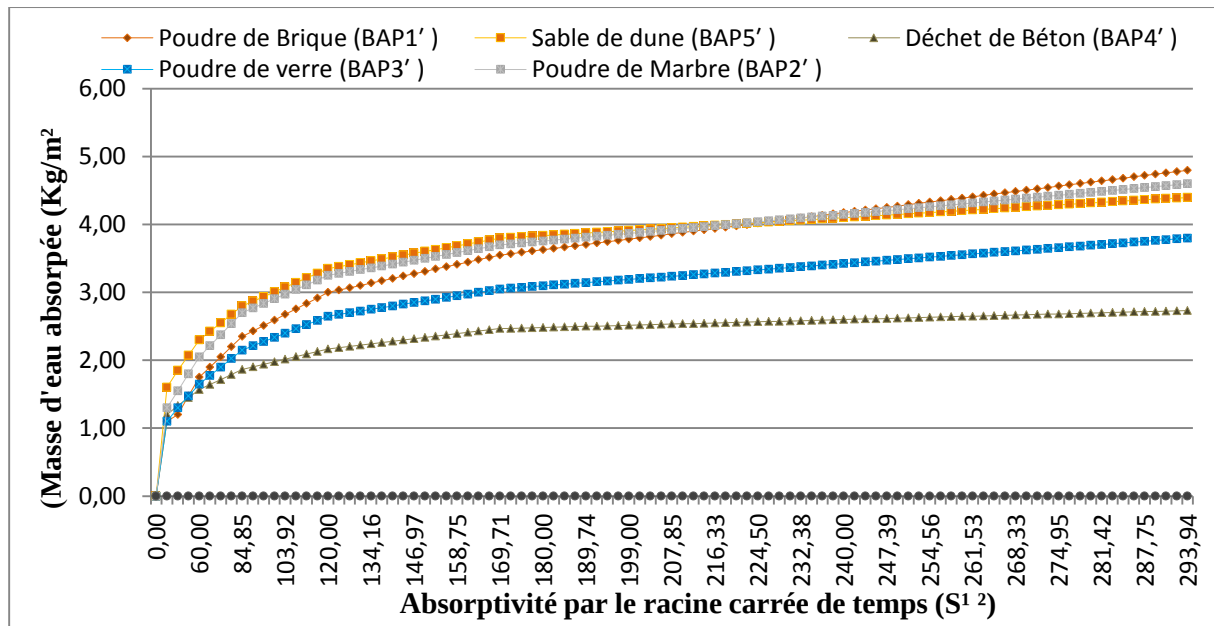


Figure IV.17 : Courbes graphique montrant l'évolution d'absorption de l'eau par capillarité fonction de la masse d'eau absorbée en Kg/m^2 et de la racine carrée du temps ($\text{s}^{1/2}$) sur les bétons étudiés dosage de 30%

D'après les courbes, nous constatons qu'il y a une augmentation rapide du taux d'absorption dans le premier 15 minutes pour tous les bétons, après il y a une augmentation relative du taux d'absorption, et cela jusqu'aux 45 premières minutes, ensuite le pourcentage d'absorption augmente progressivement et rapidement, où BAP4' était le moins absorbant d'eau, suivi par BAP3', puis BAP5', et BAP2', BAP1' et cela à 24h.

➤ Comparaison entre les résultats de deux pourcentage :

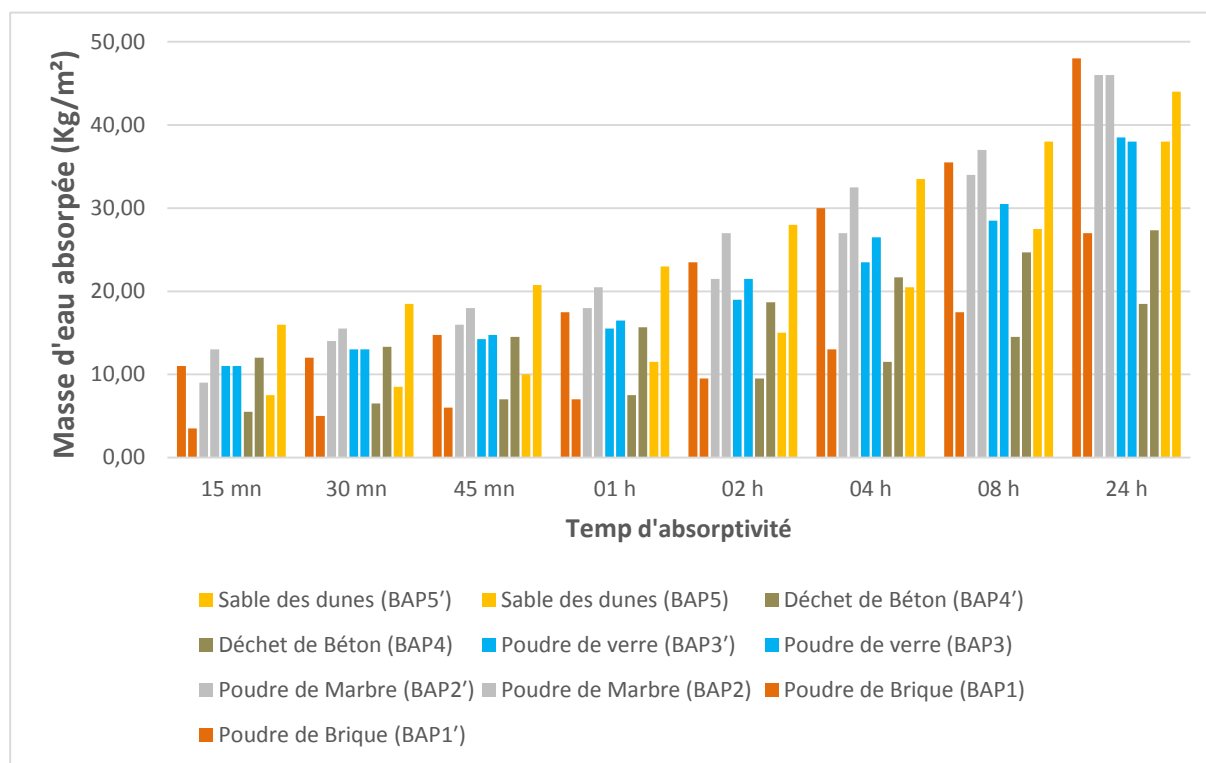


Figure IV.18: Colonne graphique de comparaison entre les valeurs des bétons dosage de 20% et 30%

Commentaire sur les résultats :

D'après les courbes, nous constatons qu'il y a une augmentation rapide du taux d'absorption dans le premier 15 minutes pour tous les bétons, mais les plus absorbant sont les bétons de dosage de 30% et cela peut s'expliquer à l'augmentation de pourcentage de l'additif, où le BAP4 avec déchet de béton est le moins absorbant et le plus absorbant est le BAP1' et cela à 24h.

D'autre part nous avons constaté que le BAP4 avec poudre de béton dosage de 20% est le moins absorbant avec une absorption de 18.5 g par contre le BAP3 avec poudre de verre pourcentage de 15% est le moins absorbant pour l'autre groupe de cette année avec une absorption de 32.5g et cela à 24h.

En revanche nous avons observé que le BAP4 avec poudre de béton dosage de 20% est le moins absorbant avec une absorption de 18.5 g par contre le BAP1 avec poudre de brique pourcentage de 15% est le moins absorbant pour nos collègues de l'année passée avec une absorption de 27.67g et cela à 24h.

IV.4.4 Essai de perméabilité du béton

La perméabilité détermine la résistance d'un échantillon au passage d'un liquide sous pression à travers les pores.



Figure IV.19: Etapes de l'essai de Perméabilité du béton

Le déroulement de l'essai comme ce qui suit

- Assurez-vous que l'appareil fonctionne correctement.
- Alimenter l'appareil en eau propre et en air comprimé.
- La mise en place et la fixation des éprouvettes cubiques de dimensions (15x15x15) cm dans l'appareil.
- Appliquer une pression avec l'eau constante de 5 ± 0.5 bar sur l'échantillon en ouvrant les vannes pendant 72 ± 2 heures.

Résultats :

La perméabilité est définie par une loi de DARCY

$$K = Q / A \cdot i$$

Où : Q : le volume d'eau par unité de temps (vitesse d'écoulement) en (m^3/s).

A : section traversée par l'eau (m^2).

i : gradient hydraulique à travers le spécimen.

$i = (\text{la pression à l'intérieur de l'éprouvette} - \text{la pression à l'extérieur}) / \text{épaisseur du béton.}$

Les résultats obtenus pour chaque type de béton sont une moyenne de deux échantillons.

Le tableau suivant contient les résultats de tous les types des bétons testés :

Tableau IV.12: valeurs du coefficient de perméabilité sur les bétons étudiés dosage de 20%

Types de béton	Valeurs de K en m/s
BAP1 avec Poudre de Brique	3,11460E-11
BAP2 avec Poudre de Marbre	4,67591E-12
BAP3 avec de Poudre verre	1,05336E-12
BAP4 avec Déchet de Béton	8,84761E-12
BAP5 avec Sable de dunes	4,43184E-13

Représentation des résultats enregistrés dans les tableaux ci-dessus pour différents échantillons avec des courbes graphiques dans la Figure IV.20

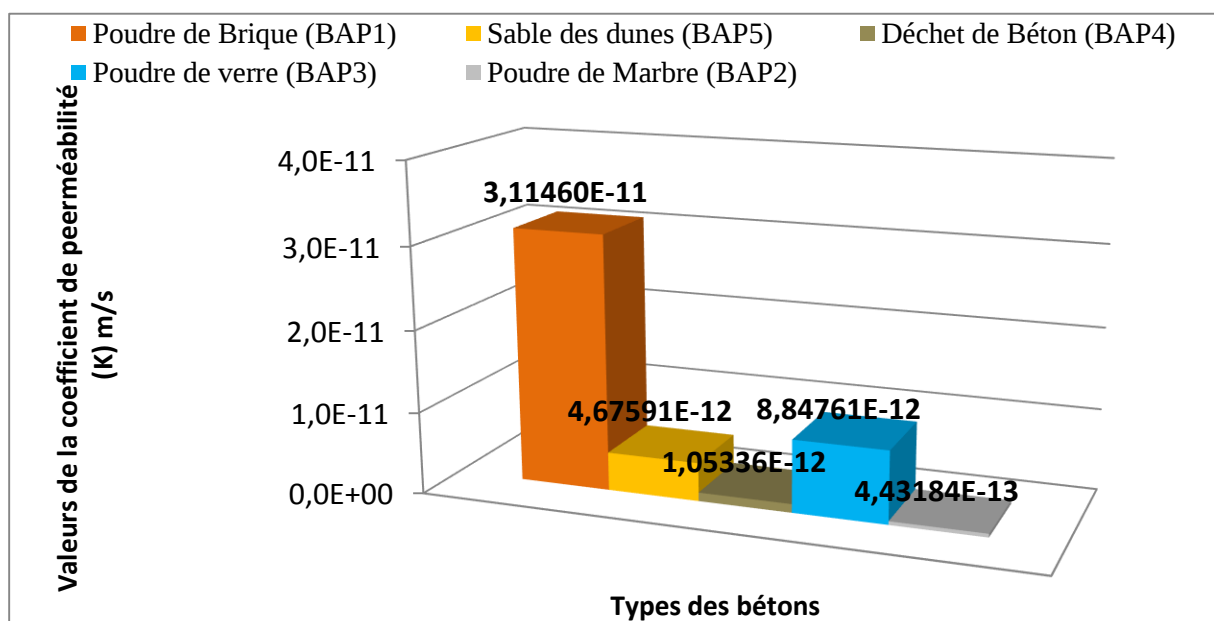


Figure IV.20: Colonnes graphiques montrant les valeurs du coefficient de perméabilité sur les bétons étudiés dosage de 20%

Pour les valeurs de la profondeur d'eau à l'intérieur des échantillons, elles sont indiquées dans le tableau suivant :

Tableau IV.13: les valeurs de la profondeur d'eau à l'intérieur des échantillons étudiés dosage de 20%

Types de béton	les valeurs en (cm)
BAP1 avec Poudre de Brique	5,75
BAP2 avec Poudre de Marbre	1,73
BAP3 avec Poudre de verre	4,35
BAP4 avec Déchet de Béton	2,05
BAP5 avec Sable de dunes	5,60

Les valeurs de la profondeur d'eau à l'intérieur des échantillons étudiés enregistrés dans le tableau ci-dessus sont représentées avec des Colonnes graphiques dans la Figure IV.21.

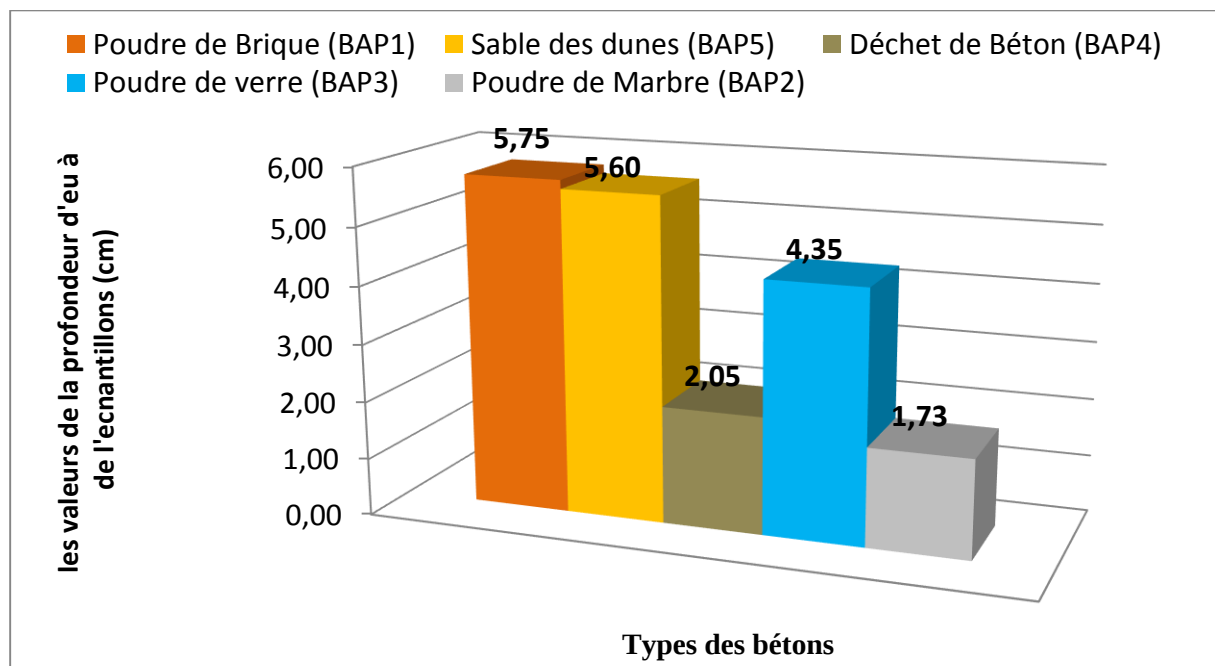


Figure IV.21: Colonnes graphiques montrant les valeurs de la profondeur d'eau à l'intérieur de l'échantillons étudiés dosage de 20%

Commentaire sur les résultats :

Nous constatons que selon le coefficient de perméabilité à l'eau sous pression à 72 heures et la profondeur de pénétration, le BAP2 était le meilleur contre l'absorption d'eau, suivi successivement par le BAP4, le BAP5, le BAP3 et le BAP1.

Le tableau suivant contient les résultats de tous les types des bétons testés :

Tableau IV.14: valeurs du coefficient de perméabilité sur les bétons étudiés dosage de 30%

Types de béton	Valeurs de K en m/s
BAP1' avec Poudre de Brique	8,44618E-11
BAP2' avec Poudre de Marbre	3,37205E-13
BAP3' avec de Poudre verre	1,31028E-11
BAP4' avec Déchet de Béton	1,47728E-11
BAP5' avec Sable de dunes	1,84125E-12

Représentation des résultats enregistrés dans les tableaux ci-dessus pour différents échantillons avec des courbes graphiques dans la Figure IV.22

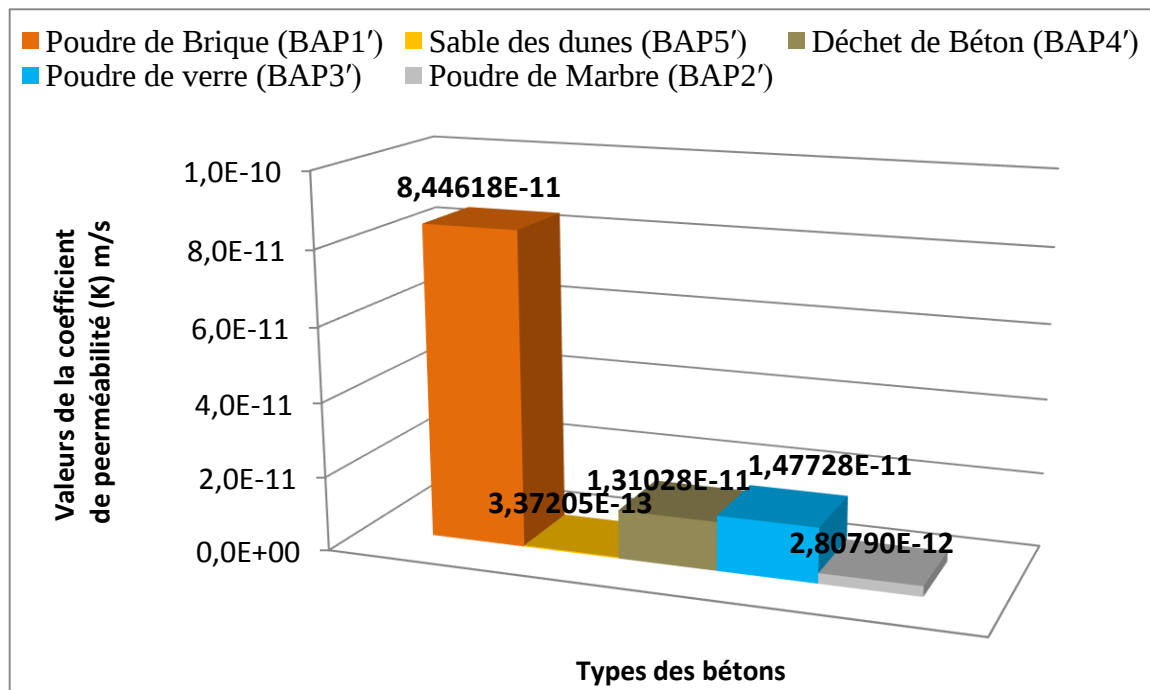


Figure IV.22: Colonnes graphiques montrant les valeurs du coefficient de perméabilité sur les bétons étudiés dosage de 30%

Pour les valeurs de la profondeur d'eau à l'intérieur des échantillons, elles sont indiquées dans le tableau suivant :

Tableau IV.15: les valeurs de la profondeur d'eau à l'intérieur des échantillons étudiés dosage de 30%

Types de béton	les valeurs en (cm)
BAP1' avec Poudre de Brique	13,15
BAP2' avec Poudre de Marbre	2,15
BAP3' avec de Poudre verre	5,75
BAP4' avec Déchet de Béton	5,10
BAP5' avec Sable de dunes	2,25

Représentation des résultats enregistrés dans les tableaux ci-dessus pour différents échantillons avec des courbes graphiques dans la Figure IV.23

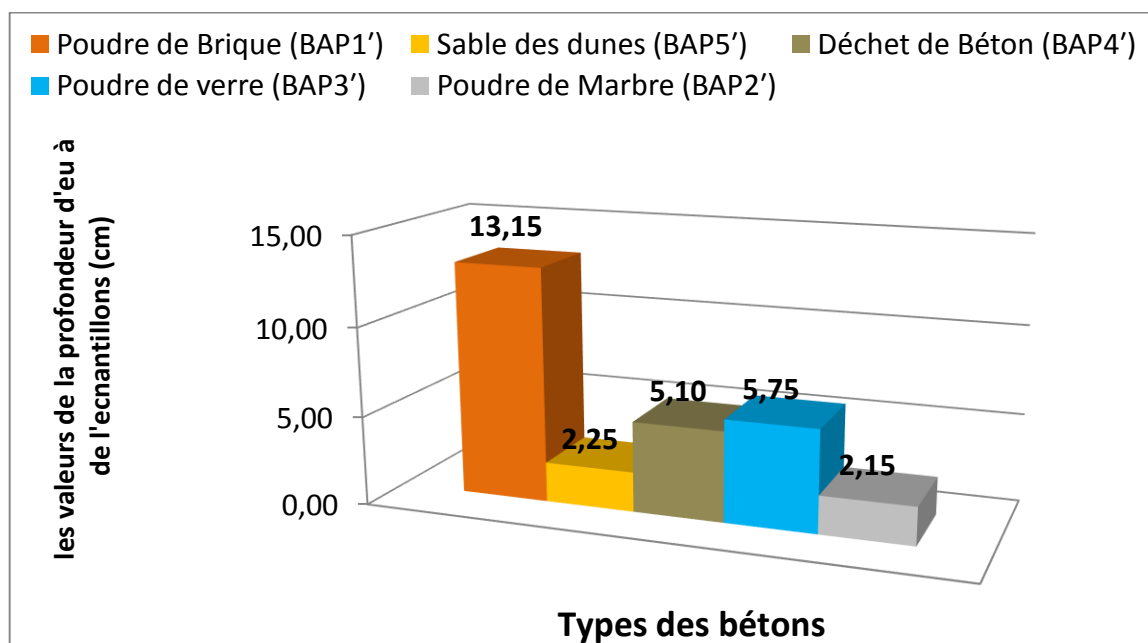


Figure IV.23: Colonnes graphiques montrant les valeurs de la profondeur d'eau à l'intérieur de l'échantillons étudiés dosage de 30%

Commentaire sur les résultats :

Nous constatons que selon le coefficient de perméabilité à l'eau sous pression à 72 heures et la profondeur de pénétration, le BAP2' était le meilleur contre l'absorption d'eau, suivi successivement par le BAP5', le BAP4', le BAP3' et le BAP1'.

Nous avons comparé tous les résultats pour différents bétons et on a représentés dans les colonnes graphiques suivantes :

➤ **Comparaison entre les résultats de deux pourcentage :**

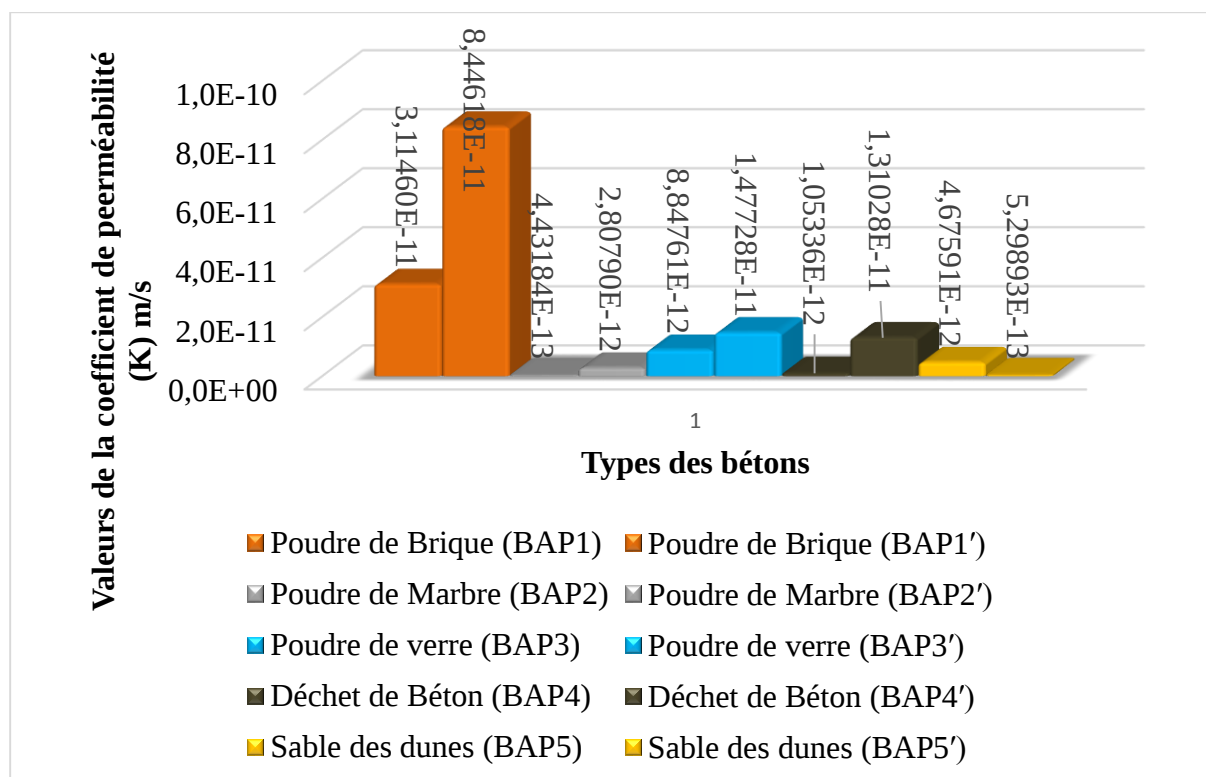


Figure IV.24: Colonne graphique de comparaison des valeurs du coefficient de perméabilité sur les bétons étudiés dosage de 20% et 30%

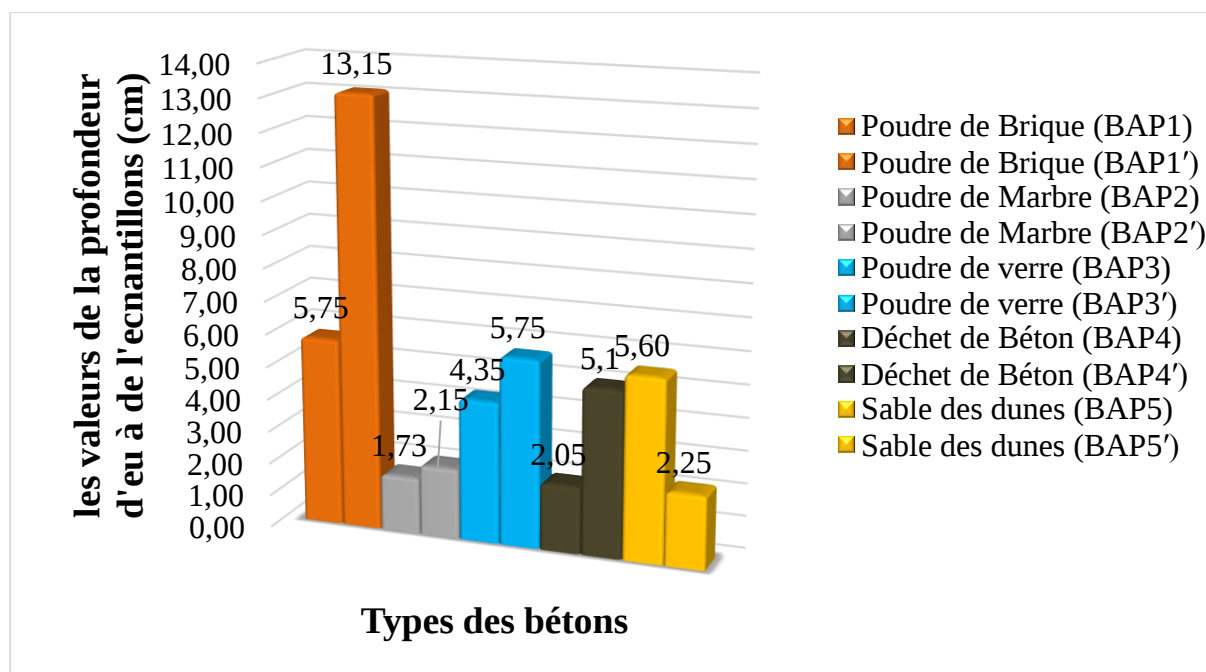


Figure IV.25: Colonne graphique de comparaison des valeurs de la profondeur d'eau à l'intérieur de l'échantillon étudiés entre les bétons dosage de 20% et 30%

Commentaire sur les résultats :

Nous constatons que selon le coefficient de perméabilité à l'eau sous pression à 72 heures et la profondeur de pénétration, le BAP2 est le meilleur contre l'absorption d'eau suivi successivement par le BAP4, le BAP2', le BAP5', le BAP3, le BAP4 et le BAP5 et BAP1 et BAP3'est le BAP1' qui est le mauvaise contre l'absorption d'eau, ce qui peut expliquer que plus le dosage des poudres est augmenté plus la pénétration d'eau est élevé sauf le cas de sable.

D'autre part nous avons constaté le BAP2 avec poudre de marbre de notre groupe (pourcentages de 20%, avec une pénétration de 1.73 cm) et l'autre groupe de cette année (dosage de 15%, avec une pénétration de 4.2 cm) est le meilleur contre l'absorption d'eau avec un avantage pour nos proportions.

En revanche nous nous avons remarqué le BAP2 avec poudre de marbre de notre groupe (pourcentages de 20%) et nos collègues de l'année passée (dosage de 40%, avec une pénétration de 2.47 cm) est le meilleur contre l'absorption d'eau avec un avantage pour nos proportions.

IV.4.5. Essai d'auscultation sonique (Essai Ultrasonique)

Cet essai mesure la vitesse des ondes ultrasonores traversant l'échantillon en fonction du temps et de la distance, afin d'évaluer la qualité du béton.

Pour réaliser cet essai, vous devez Poncer et égaliser la partie de la surface de l'élément à ausculter où le transducteur sera Fixé.

Employer un matériau intermédiaire entre les deux comme la vaseline, un savon, etc. et en prenant soin de vérifier que l'appareil est bien appliqué contre la surface à tester.

Les transducteurs sont appliqués sur les deux faces de l'élément à tester.

Lire la vitesse enregistrée sur l'appareil.



Figure IV.26 : Essai d'auscultation sonique

Résultats De Mesure Aux Ultrasons :

Formule de calcul :

$$V = d/t$$

Où :

V : la vitesse de son en mètre/second.**d** : la distance entre l'émetteur et récepteur en mètre.**t** : le temps propagation d'onde par seconde.

Les mesures effectuées sur les différents bétons à différents âges (7,14,28,45,60 jours) ont donné les résultats (Moyenne des mesures de deux échantillons) présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.16: Les valeurs des mesures aux ultrasons sur les bétons dosage de 20%

Béton	Les valeurs des mesures (m/s)				
	7 ^{ème} jour	14 ^{ème} jour	28 ^{ème} jour	45 ^{ème} jour	60 ^{ème} jour
BAP1 avec Poudre de Brique	3654,53	3728,81	3949,85	3991,07	4033,16
BAP2 avec Poudre de Marbre	3786,59	3700,65	4014,81	3981,90	3949,85
BAP3 avec de Poudre verre	3810,17	3685,13	3842,87	3831,12	3819,86
BAP4 avec Déchet de Béton	3754,28	3747,97	3856,29	3710,08	3575,01
BAP5 avec Sable de dunes	3757,50	3588,92	4021,99	3878,36	3744,75

Représentation des résultats enregistrés dans le tableau ci-dessus pour différents échantillons avec des courbes graphiques dans la Figure IV.27

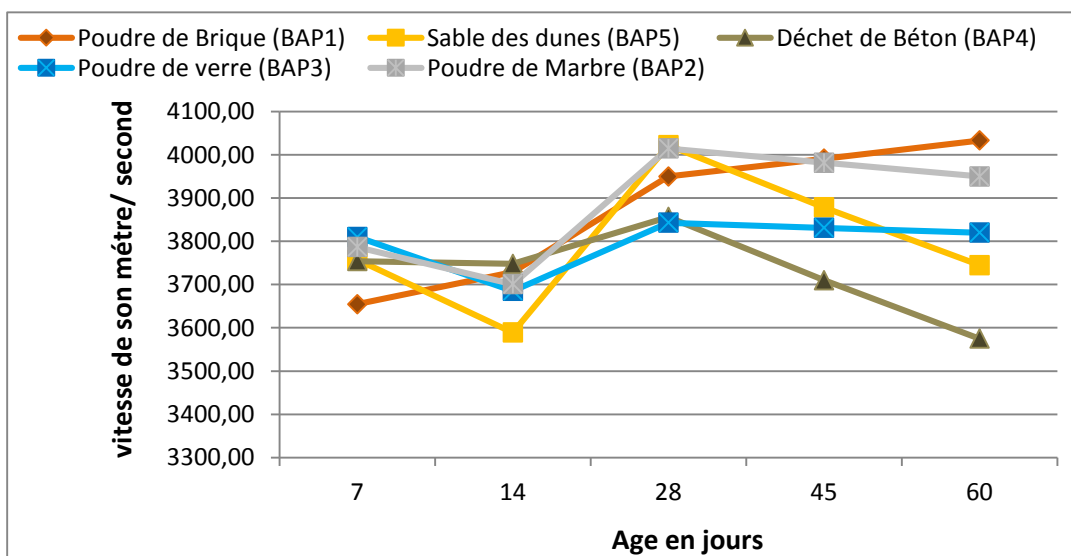


Figure IV.27: Courbes graphiques montrant l'évolution des valeurs des mesures ultrasoniques sur les bétons étudiés dosage de 20%

Commentaire sur les résultats :

Un excellent résultat de vitesse de son à l'âge de 28 jours a été enregistrée dans BAP5 (poudre de marbre) (supérieures à 4 000 m/s) et elle est également le plus élevée en résistance à la compression et après BAP2, ensuite successivement BAP1, BAP4 et BAP3 où on a enregistré une bonne vitesse de son (entre 3200 et 4 020 m/s) ce qui explique que la vitesse de fréquence est directement proportionnelle à la résistance à la compression dans la plupart des cas.

Tableau IV.17: Les valeurs des mesures aux ultrasons sur les bétons dosage de 30%

Béton	Les valeurs des mesures (m/s)				
	7 ^{ème} jour	14 ^{ème} jour	28 ^{ème} jour	45 ^{ème} jour	60 ^{ème} jour
BAP1' avec Poudre de Brique	3588,92	3748,96	3839,27	3811,04	3783,79
BAP2' avec Poudre de Marbre	3748,14	3914,90	3967,80	3909,47	3852,90
BAP3' avec de Poudre verre	3826,09	3822,79	3993,21	3883,64	3781,96
BAP4' avec Déchet de Béton	3687,42	3612,72	3880,84	3819,63	3760,68
BAP5' avec Sable de dunes	3685,13	3884,18	3846,26	3829,44	3812,82

Représentation des résultats enregistrés dans le tableau ci-dessus pour différents échantillons avec des courbes graphiques dans la Figure IV.28

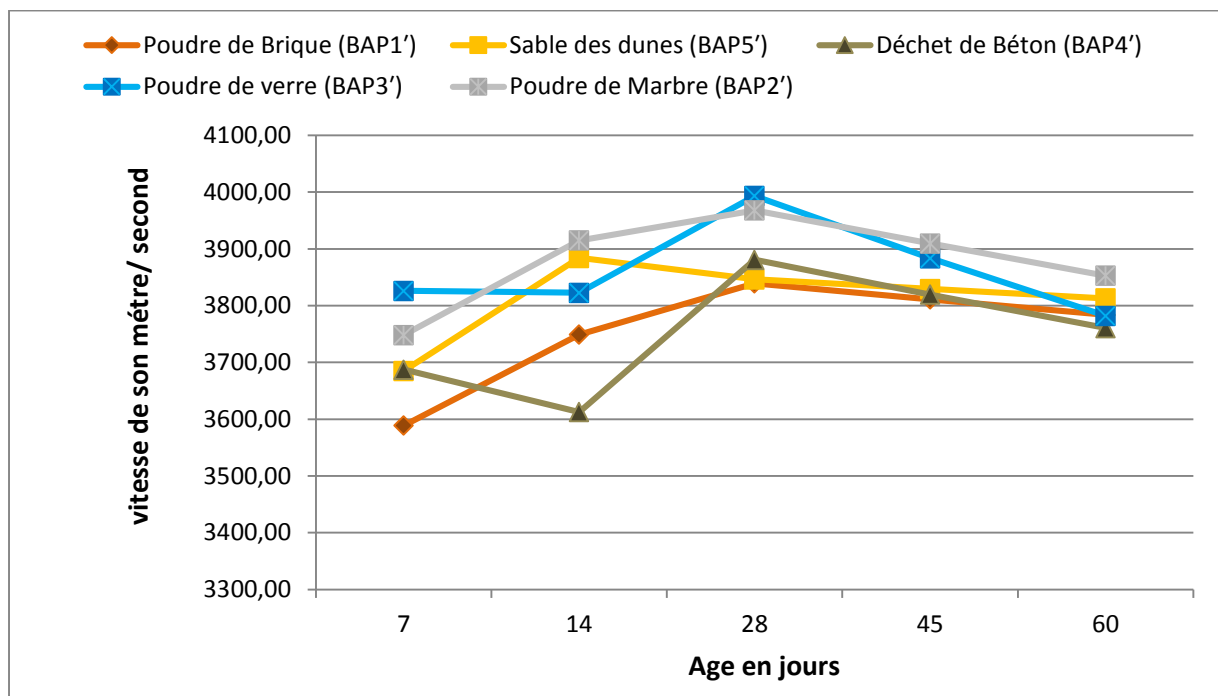


Figure IV.28: Courbes graphiques montrant l'évolution des valeurs des mesures ultrasoniques sur les bétons étudiés dosage de 30%

Commentaire sur les résultats :

Un bon résultat de vitesse de son à l'âge de 28 jours a été enregistrée dans BAP3' (poudre de marbre) et elle est également le plus élevée en résistance à la compression et après BAP2', ensuite successivement BAP4', BAP5' et BAP1' où on a enregistré une bonne vitesse de son (entre 3200 et 4 000 m/s) ce qui explique que la vitesse de fréquence est directement proportionnelle à la résistance à la compression dans la plupart des cas.

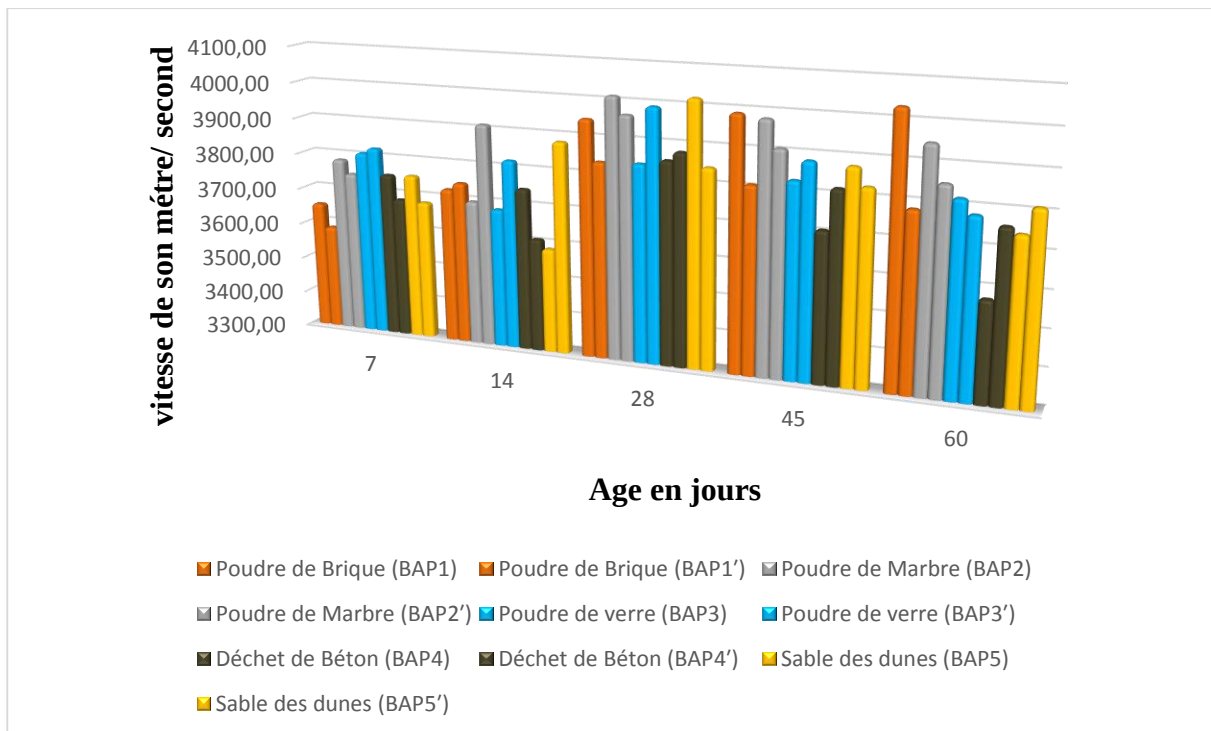
➤ **Comparaison entre les résultats de deux pourcentage :**

Figure IV.29: Courbes graphiques de comparaison des valeurs des mesures ultrasoniques sur les bétons étudiés dosage de 20% et 30%

Comparaison des résultats :

En général tous les résultats de différents béton sont enregistrés entre 3800 et 4 021 m/s et selon la norme c'est des bons résultats et très satisfait ce qui explique que la vitesse de fréquence est directement proportionnelle à la résistance à la compression dans la plupart des cas mais entre les deux pourcentages on a remarqué que le résultat de BAP5 est le meilleur parmi nos proportions suivies par BAP2, BAP3', BAP2', BAP1, BAP4', BAP4, BAP5', BAP3, BAP1'.

D'autre part nous avons constaté que la vitesse de son pour le BAP1 avec poudre de brique de l'autre groupe pourcentages de 40% à l'âge de 28 jours est le meilleur (4029.52 m/s) par rapport à nos résultats sachant que la vitesse de son de BAP5 avec poudre de sable est le meilleur avec une vitesse de 4021.99 m/s.

En revanche nous avons constaté que la vitesse de son pour le BAP1 avec poudre de brique de mes collègues de l'année passée pourcentages de 15% à l'âge de 28 jours est le meilleur (4339.60 m/s) par rapport à nos résultats sachant que la vitesse de son de BAP5 avec poudre de sable est le meilleur avec une vitesse de 4021.99 m/s.

IV.5 Récapitulatif et discussion

Afin de donner une image claire sur les propriétés du béton, le Tableau IV.18 à 28 jours présente un résumé de la comparaison entre les cinq types de béton, BAP1, BAP2, BAP3, BAP4, BAP5.

Tableau IV.18 : Récapitulatif des résultats des différents bétons

Propriétés		BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5	BAP1'	BAP2'	BAP3'	BAP4'	BAP5'
Ciment (kg/m ³)		400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
Eau (l/m ³)		200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Rapport E/C		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Ajouts (kg/m ³)	Poudre de brique	66.82	/	/	/	/	100.23				
	Poudre de marbre	/	62.17	/	/	/		93.26			
	Poudre de verre	/	/	59.08	/	/			88.62		
	Poudre de béton	/	/	/	68.11	/				102.16	
	Sable de dunes	/	/	/	/	61.14					91.71
Super plastifiant (kg/m ³)		4.39	2.63	4.19	2.19	2.67	4.43	2.67	4.27	2.39	2.71
S. 0/5(kg/m ³)		709.99	709.99	709.99	709.99	709.99	695.69	695.69	695.69	695.69	695.69
G. 3/8 (kg/m ³)		300.28	300.28	300.28	300.28	300.28	294.24	294.24	294.24	294.24	294.24
G. 8/16 (kg/m ³)		612.23	612.23	612.23	612.23	612.23	599.90	599.90	599.90	599.90	599.90
Étalement cône d'Abrams (cm)		76	60	74	71	76.5	/	/	/	/	/
La boîte en L (%)		0.84	0.85	0.82	0.89	0.84	/	/	/	/	/
Stabilité au tamis (%)		25.6	15.24	18.04	21.86	21.76	/	/	/	/	/
écoulement J-Ring (cm)		71	63	66	71	69	/	/	/	/	/
Rt/f28 (MPa)		2.96	3.54	3.96	3.51	3.63	3.09	2.98	3.00	3.89	3.38
Rc28 (MPa)		40.80	41.21	35.72	19.72	29.39	28.9	36.45	25.74	22.64	28.32
Vitesse de son à 28j (m/s)		3949,85	4014,81	3842,87	3856,29	4021,99	3839,27	3967,80	3993,21	3880,84	3846,26
Perméabilité (cm)		5,75	1,73	4,35	2,05	5,60	13,15	2,15	5,75	5,10	2,25
Absorptivité (kg.m ⁻² .s ^{1/2})	0 jusqu'à 1h	0,70	1,80	1,55	0,75	1,15	1,75	2,05	0,90	1,57	2,30
	1 jusqu'à 24h	2,70	4,60	3,85	1,85	3,80	4,80	4,60	3,05	2,73	4,40
Moule béton en (cm)	compression	Ø11H22									
	Vitesse de son										
	Traction	7×7×28									
	Retrait										
	Absorption d'eau	10×10×10									
	Perméabilité	15×15×15									

IV.6 Conclusion et Recommandations**IV.6.1 Conclusion**

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

Les objectifs de cette étude étaient donc d'éclaircir les principaux points suivants :

- ✓ L'influence d'addition des poudres (déchets de construction et sable de dunes) comme des additifs et évaluer les conséquences de ces fines non seulement dans les compositions des BAP mais aussi sur leurs propriétés mécaniques et physiques à l'état frais et durci.
- ✓ Comment valoriser ces déchets dans le domaine de construction.
- ✓ Rechercher une méthode qui permettrait d'élaborer un béton auto-plaçant dans le contexte Algérien.
- ✓ Les performances des BAP, ont été comparées en termes de résistance mécanique par rapport notre deux pourcentages (20% et 30%) et par rapport les dosages de l'autre groupe et avec les études des années passées.

Et pour atteindre cet objectif on a effectué des essais de mesure de la résistance à la compression, traction, essais ultrasonique, sur les différents béton à base d'ajout de poudre de brique, marbre, verre, déchet de béton et sable de dunes à des taux variables de 20% et 30% de la masse du ciment.

Les essais à l'état frais des bétons auto-plaçant qui avec ces additifs par l'étalement au cône d'Abrams, boîte en L, J-ring et essai de stabilité au tamis, ont montrés des bons résultats au ouvrabilité et ségrégation.

Après 28 jours, les résultats de l'essai de compression ont montré une bonne résistance pour toutes les bétons à l'exception des déchets de béton, et une bonne résistance à la traction par flexion sur tous les bétons étudiés.

En ce qui concerne les résultats des tests par ultrason ont révélé des vitesses d'onde sont enregistré entre 3800 et 4 000 m/s à 28 jours d'âge sur tous les bétons étudiés et selon la norme ces résultats indiquent que ces bétons ont des bonnes qualités et très satisfait.

Relativement à les tests d'absorption d'eau par capillarité après 24 heures ont indiqué des résultats acceptables à bons. Les pores capillaires (porosité) sont la porosité du matériau et le premier indicateur de sa durabilité, car la porosité est le siège des agressions extérieures., plus il est facile pour les clients de pirater.

À propos les résultats de perméabilité à l'eau par pression à 72 heures pour différents bétons auto-plaçant ont montré que plus le dosage des poudres est augmenté plus la pénétration d'eau est élevé. La perméabilité est un indicateur de durabilité.

Finalement, nous concluons ce qui suit :

- Il est clair qu'à partir des déchets de construction locaux, on obtient un bon béton en termes de performances fraîches et durcies.
- D'après les résultats obtenus, il est indiqué en général que les performances du béton auto-plaçant avec ajout de poudre de marbre sont les meilleures., suivie dans l'ordre par BAP avec l'ajout poudre de brique, et BAP avec l'ajout poudre de verre, BAP avec l'ajout poudre de sable de dunes et BAP avec l'ajout poudre de déchets de béton.

IV.6.2 Recommandations

Après avoir terminé cette étude en utilisant des additifs issus de matériaux de construction et de sable de dunes, nous suggérons quelques conseils et instructions, qui sont représentés dans les points suivants :

- ✓ Réaliser d'autres études sur différents types d'additifs disponibles localement, dans des proportions variées, pour obtenir de meilleurs résultats et relever les défis existants liés à l'évolution des comportements et des caractéristiques du BAP.
- ✓ Modification les rapports (E/C, G/S) et dosage du Super-plastifiant afin d'obtenir une résistance plus haute et une durabilité plus longue.
- ✓ Effectuer d'autres essais, telles que l'évaluation de la durabilité et de la résistance aux agents agressifs, sur une période prolongée, afin d'explorer et de développer plus ce type de béton et vers le mieux.

Enfin, nous souhaitons avoir réussi à révéler certaines des propriétés et du comportement du béton auto-plaçant en utilisant des déchets de construction et du sable de dunes, ce qui contribuera à réduire les déchets de construction dans les décharges publiques, à protéger l'environnement et à conserver les matières premières.

Références bibliographiques

- [1] **Labidi Abdelaziz, Soualah Bedadi, Younes Guediri, Azzeddine et Mamanou Abdelali**, "Etude expérimentale sur le béton auto-plaçant avec des ajouts (déchet de construction)", Thèse de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar – El-oued, 2024, (Page5 / Page8/ Page12 / Page13 / Page18 / Page21/ Page25/ Page26/ Page27/Page28/ Page32/ Page39/ Page41/ Page42/ Page43/ Page44/ Page45/ Page46/ Page47/ Page48/ Page49/ Page50/ Page51/ Page52/Page53).
- [2] **A. Chikh**, "Formulation et caractérisation d'un béton auto-plaçant ", Thèse d'Ingénieur d'Etat en Génie Civil, Ecole Nationale de Poly Technique Alger, 2005 / 2006, (Page8 /Page 44).
- [3] **BENAKLI SARAH**, " Caractérisation expérimentale des bétons auto-plaçant obtenus par ajout des déchets de construction", Thèse d'Ingénieur d'Etat en Génie Civil, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, (Page23 / Page24 / Page 33/ Page 53).
- [4] **HERMIME Hassiba**, " Caractérisation expérimentale et numérique du béton auto-plaçant « Utilisation des déchets de construction » ", Thèse de magister, Université MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2016, (page25/ page12 /page14/ page22).
- [5] **Chahine BELGHIT**, " Contribution à la Formulation d'un Béton auto-plaçant à Base de Matériaux Locaux Effet du Laitier Granulé Micronisé sur l'ouvrabilité", Thèse de magister, Université BADJI-MOKHTAR-ANNABA, 2009, (page 18).
- [6] **MESSIAD Boutheyna et BOURTAL Housseem Eddine**, " Étude Comparative de Durabilité Entre les Bétons Auto-plaçants et les Bétons ordinaires ", Thèse de Master, Université 08 Mai 1945 de Guelma, 2018, (page 15/ page 17/ page 65/ page 29/ page 79).
- [7] Partie I, Chapitre II : " béton auto-plaçant", (page28/ page29/ page28).
- [8] **Melle Naima REBBOUH**, " Formulation et caractérisation d'un béton auto-plaçant ", Thèse d'Ingénieur d'Etat en Génie Civil, École National Polytechnique El-Harrach, 2005-2006, (page 47/ page 53/ page 68).

- [9] **CHAID Rabah, HADDADOU Naïma, HAMZA Malika Sabria, MESBAH Habib Abdelhak**," Valorisation de la Poudre de Marbre Comme Additif dans la Formulation de Bétons Auto-plaçants", Unité de recherche Matériaux - Procédés et Environnement, UMBB, Algérie, Département d'architecture, Université d'Alger, Algérie, Laboratoire des Matériaux du Génie Civil et Génie Mécanique, IUT-Rennes, France 2021, (page 12).
- [10] **Messaoudi farih**," Influences des agents de Viscosité Sur les Paramètres Rhéologiques Intrinsèques des Mortiers des Bétons Auto-plaçants ", Thèse doctorat 3^{ème} cycle en Génie civil, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou,2016, (page7/ page 19).
- [11] <https://www.infociments.fr/betons/le-beton-autoplaçant>
- [12] **Maanser Abdelkrim**," Etude de l'effet des adjuvants sur la durabilité des bétons ", Thèse DOCTORAT 3ème Cycle en Génie Civil, Université du 8 Mai 1945 Guelma 2018, (page8/ page 9/ page 10).
- [13] **Dr. Flitti Abdelhamid**," Polycopié de travaux pratiques, Matériaux de construction 2", 3ème licence en Génie Civil, Université Hassiba Benbouali de Chlef 2018, (page69/ page 73/ page 84/ page 79).
- [14] **Dr NIGRI Ghania (MCB)**," Polycopié de cours Technologie du béton destiné aux étudiants en Master Génie Civil ", Université du 8 Mai 1945 Guelma 2020, (page86/ page 88/ page 81).
- [15] **Philippe Turcry, Ahmed Loukili**," Différentes approches pour la formulation des bétons auto-plaçants, Influence sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques ", R&DO, Laboratoire de Génie Civil de Nantes Saint Nazaire Ecole Centrale de Nantes, Revue Française de Génie Civil, Submitted on 18 Mar 2017, (page 7).
- [16] **Smain Benyamina** "Performance des Bétons Auto-plaçant à Base de Sable de Concassage", Thèse de Doctorat, Université de Blida 1,2019, (Page 38).
- [17] "Terre et Pierre Expertise et Innovation (CTMNC)", (Page 01).
- [18] **Drici Nadia**," l'Optimisation des Performances d'un BAP Modifié par un Plan d'Expériences", Thèse de Master, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi-BBA, 2019/2020, (page 30).

- [19] **CHIBANI Naouel**, "Formulation et Propriétés Des Bétons Auto-plaçants (BAP) à base de Granulats Recyclés : Cas des fines de marbre", Thèse de magister, Université Larbi Ben M'Hidi - Oum-El-Bouaghi, 2013, (page 21).
- [20] **BOUZIDA IBTISSEM**, "Formulation et Performance d'un Béton Auto-plaçant à Base des Granulats Recyclés Issus d'un Béton auto-plaçant ", Thèse de Master, Université SAAD DAHLAB DE BLIDA, 2015, (page 27/ page 28).
- [21] **CHERAIT.Y, KECHKAR.C, BENOUIS.A**, "Essais de Caractérisation Des Bétons Auto-plaçants à L'état Frais ", Note D'information Technique, Laboratoire Génie Civil et d'Hydraulique Université de Guelma, Mai 2008, (page 46/ page 28).
- [22] **LAISSAOUI Ahmed et TOUEL Amine**, "Contribution à l'étude de l'influence de la poudre de marbre sur le comportement physico-chimique et rhéologique des bétons auto-plaçant (BAP)", Thèse de Master, Université M'HAMED BOUGARA BOUMERDES, 2017-2018, (page 12).
- [23] Chapitre I : "Le béton auto-plaçant", (page28).
- [24] **Mohamed Lyes Kamel Khouadjia**, "Etude des Physico- mécanique et Rhéologiques des bétons à base des Sables de Carrières : Expérimentation et Modélisation", Thèse de Doctorat LMD en Génie Civil, Université Mohamed Khider-Biskra-, 19 Mai 2016, (page 47).
- [25] <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/5231/loi-de-darcy>
- [26] <https://www.infociments.fr/betons/fabrication-transport-et-mise-en-oeuvre-des-bap>.
- [27] **Zaidi Hadj et Saadoune Lotfi** "Caractérisation mécanique d'un béton auto plaçant à partir d'un essai d'indentation", Thèse de Master, Université Mohamed el Bachir el Ibrahim bordj Bou Arreridj, 2019 / 2020, (Page5).
- [28] "Ciments Ordinaires Et Composés - Fabrication, Propriétés, Normes Et Emplois", chapitre II, semestre I, master I, (Page 01).
- [29] **Idjahnine Mohamed Yahia A/Halim**, "Formulation &Caractérisations des bétons Auto-plaçant avec comme Ajout le Déchet de Brique Broyé", Thèse de Magister, Université Abderrahmane Mira –Bejaia-, 15/06/2009, (Page27).

- [30] <https://www.infociments.fr/betons/essais-de-caracterisation-specifiques-au-bap>
- [31] <https://www.controlab.fr/gamme/bati-a-4-colonnes/>
- [32] <https://www.concretedispatch.eu/blog/contrôles-qualité-béton-durci-résistance-béton/>
- [33] <https://www.controlab.fr/gamme/appareil-a-ultrasons-modele-portatif/>
- [34] <https://www.facebook.com/100057353812210/posts/sika-viscocrete-tempo-12-est-un-superplastifiant-polyvalent-con%C3%A7u-pour-produire-/1014119177176533/>
- [35] <https://www.infociments.fr/betons/classification-des-betons-dans-la-norme-beton-nf-en-206a2cn-2022>
- [36] **NF EN 12350-8** novembre 2010
Essai pour béton frais - Partie 8 : béton auto-plaçant - Essai d'étalement au cône d'Abrams.
- [37] **NF EN 12350-10** novembre 2010
Essai pour béton frais - Partie 10 : béton auto-plaçant - Essai à la boîte en L.
- [38] **NF EN 12350-12** novembre 2010
Essai pour béton frais - **Partie 12** : béton auto-plaçant - Essai d'écoulement à l'anneau.
- [39] **NF EN 12350-11** novembre 2010
Essai pour béton frais - **Partie 11** : béton auto-plaçant - Essai de stabilité au tamis.
- [40] **NF EN 12390-4** novembre 2010
Essais pour béton durci - **Partie 4** : résistance à la compression - Caractéristiques des machines d'essai.
- [41] **NF P18-407** juin 1970
Bétons de construction. Détermination des caractéristiques mécaniques des bétons. Essai de traction par flexion.
- [42] **NF P 18-427** décembre 1996
Béton - Détermination des variations dimensionnelles entre deux faces opposées d'éprouvettes de béton durci.

[43] NF EN 12504-4 juillet 2021

Essais pour béton dans les structures - **Partie 4** : détermination de la vitesse de propagation des ultrasons.

[44] NF EN 772-11 Août 2011

Méthodes d'essai des éléments de maçonnerie - **Partie 11** : détermination de l'absorption de l'eau par capillarité des éléments de maçonnerie en béton de granulats, en béton cellulaire autoclave, en pierre reconstituée et naturelle et du taux initial d'absorption d'eau des éléments de maçonnerie en terre cuite.

[45] NF EN 12390-8 avril 2012

Essais pour béton durci - **Partie 8** : profondeur de pénétration d'eau sous pression.

[46] NA 442 Date : 2005 N° édition : 3

Norme algérienne : Ciment composition, spécification et critères de conformité des ciments courants.

[47] NF EN 197-1 avril 2012

Ciment - **Partie 1** : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.

[48] NF P 18-553 septembre 1990

Granulats - Préparation d'un échantillon pour essai.

[49] NF EN 933-1 mai 2012

Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - **Partie 1** : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage.

[50] NF EN 933-2 juillet 2020

Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - **Partie 2** : détermination de la granularité - Tamis de contrôle, dimensions nominales des ouvertures.

[51] NF XP P 18-540

Module de finesse du sable

[52] NF P18-598 octobre 1991

Granulats - Équivalent de sable.

[53] **NF P 18-554** décembre 1990

Granulats - Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux.

[54] **NF P 18-555** décembre 1990

Granulats - Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables.

Annexe I



ماتين
MATINE

ALGÉRIE



Ciment portland au Calcaire

NA442 CEM II/B-L 42,5 N

Matine Ciment gris pour bétons de haute-performance destiné à la construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments

Matine
NA442 CEM II/B-L 42,5 N

Matine est certifié, conforme à la norme Algérienne (NA442 – 2013) et Européenne (EN 197-1)

AVANTAGES PRODUIT



- Une résistance initiale élevée pour vos ouvrages nécessitant un décoffrage rapide
- Favorise la maniabilité du béton et le maintien de sa rhéologie
- Une Classe Vraie qui offre une haute performance au béton.
- Meilleure durabilité du béton.

BUILDING TRUST



Sika® ViscoCrete® TEMPO-12

Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.

INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.

CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- longue rhéologie (>2h),
- robustesse à la ségrégation,
- qualité de parement.

DOMAINES D'APPLICATION

- Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 permet la fabrication de bétons plastiques à auto-plaçants transportés sur de longues distances et pompés.
- Dans les bétons auto-plaçants, Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.

AGRÈMENTS / NORMES

Marquage CE et NF selon la norme NF EN 934-2 tab 3.1 et 3.2.

PV CNERIB : DTEM/108/2017

DESCRIPTION DU PRODUIT

Conditionnement

- Fût de 230 kg
- Cubit de 1100 kg
- Vrac

Durée de Conservation

12 mois dans son emballage d'origine intact.

Conditions de Stockage

À l'abri du gel.

En cas de gel accidentel, le produit retrouve ses qualités d'origine une

Aspect / Couleur

fois dégelé lentement et réhomogénéisé.
Liquide brun clair à foncé

Densité

1,06 ± 0,01

Valeur pH

4,5 ± 1,0

Teneur Totale en Ions Chlorure

≤ 0,1 %

Équivalent Oxyde de Sodium

≤ 1 %

