



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA

RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

DOMAINE : Sciences et Technologie

FILIERE : Génie Civil

OPTION : Matériaux

Mémoire présenté pour l'obtention

Du diplôme de Master

Présenté Par :

SALLEMINE AMATELLAH DJAOUIDA

Thème :

**Analyse de l'effet combiné des granulats de verre et du
plastique recyclé en substitution du sable sur le comportement
du béton autoplaçant exposé à des températures élevées**

Devant le jury composé de :

Mr. BEDDAR Miloud

Professeur

Président

Mr. CHIKOUCHE Mohamed Aziz

MCA

Examineur

Mme. DJEBRI Noura

MCA

Encadreur

Année universitaire : 2025/2026

Remerciement

Avant tout, je remercie Dieu le Tout-Puissant de m'avoir donné la force, la patience et le courage pour mener à bien ce travail.

J'adresse mes plus sincères remerciements à mon encadrant **Mme. DJEBRI Noura** pour leurs précieux conseils, leur disponibilité, leur patience et leurs orientations tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Je remercie également l'ensemble des enseignants du département ainsi que le personnel administratif pour leur aide et leur coopération.

Mes vifs remerciements s'adressent aussi aux membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer ce travail.

J'exprime également ma profonde gratitude à mes parents, ma famille et mes amis pour leur soutien moral, leurs encouragements et leur confiance durant tout mon parcours universitaire.

Enfin, je remercie toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Merci à tous.

Dédicace

الحمد لله الذي وفقني لإتمام هذا العمل ألتواضع والصلاة والسلام على سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم.

أهدي ثمرة جهدي وتخرجي هذا

إلى أبي العزيز،

سندي وفخري في هذه الحياة، الذي كان دائماً مصدر القوة والدعم، جزاك الله عني كل خير

إلى أمي الغالية،

نبع الحنان والتضحية، التي رافقتني بدعواتها وصبرها في كل خطوة، حفظك الله وأدامك تاجاً فوق رأسي.

إلى أخواتي العزيزات،

رفيقات أيامي وسر سعادتي، شكراً لكنّ على محبتكن ودعمكن الدائم لي، الله يديمكن في حياتي

إلى زوجي العزيز،

شكراً لك على وقوفك بجانبتي، وعلى دعمك وتشجيعك لي طوال فترة الدراسة، كنت خير السند والرفيق.

إلى ابنتي الصغيرة،

ملاكي الجميل ونور حياتي، التي كانت مصدر قوتي وسعادتي، والتي منحنتني الأمل والطاقة لأواصل هذا الطريق، أهديك هذا النجاح بكل حب وفخر.

إلى عائلة زوجي الكريمة،

التي كانت بالنسبة لي عائلة ثانية، غمرتموني بالمحبة والاهتمام والدعم، فلكم مني كل الشكر والتقدير

إلى صديقاتي العزيزات،

، شكراً لكم على كل شيء تشجيعاتهم ، وساندوني بكلماتهم و الذين شاركوني لحظات التعب والفرح

وإلى كل من ساهم من قريب أو بعيد في إنجاز هذا العمل، أهديكم خالص الامتنان والتقدير

ملخص

إن استخدام الخرسانة ذاتية الرص (BAP) شهد تطوراً ملحوظاً في السنوات الأخيرة، وازداد الاهتمام بدراسة خصائصها الميكانيكية والريولوجية. في الوقت الحالي، تشكل النفايات الصناعية والمنزلية مصدراً محتملاً للمشاكل البيئية والاقتصادية. يعد دمج هذه المخلفات في تركيب الخرسانة موضوعاً يستحق الدراسة؛ حيث يهدف هذا العمل التجريبي إلى تثمين نوعين من النفايات غير القابلة للتحلل وهي نفايات الزجاج ونفايات البلاستيك، من خلال استخدامهما كبديل جزئي مشترك وهجين للرمال الطبيعي في الخرسانة ذاتية الرص. يهدف هذا التوجه إلى تقليل التأثير البيئي، وترشيد استهلاك الموارد الطبيعية، وتحسين السلوك الميكانيكي للخرسانة من حيث مقاومة الانحناء والضغط، بالإضافة إلى دراسة سلوك الخرسانة ومقاومتها الركامية عند تعرضها لدرجات حرارة عالية من منظور الخصائص الفيزيائية والميكانيكية المتبقية.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة ذاتية الرص، تثمين النفايات، نفايات الزجاج، نفايات البلاستيك، الاستبدال الهجين، الحالة الطرية، الحالة الصلبة، درجات الحرارة العالية.

Résumé

L'utilisation des Bétons Autoplaçants (BAP) s'est considérablement développée au cours des dernières années et une attention grandissante est portée à l'étude de leurs propriétés mécaniques et rhéologiques. Actuellement, les déchets industriels et ménagers constituent une source potentielle de problèmes environnementaux et économiques. L'incorporation de ces sous-produits dans la composition du BAP est un intérêt majeur qui mérite d'être étudié. L'objectif de ce travail expérimental est la valorisation simultanée de deux types de déchets non biodégradables : les déchets de verre et les déchets de plastique, en les utilisant comme substituts partiels combinés (hybrides) du sable naturel dans le béton autoplaçant. Cette démarche vise à réduire l'impact environnemental, à préserver les ressources naturelles et à évaluer le comportement mécanique du béton à la flexion et à la compression, ainsi qu'à étudier l'évolution de ses performances vis-à-vis des hautes températures du point de vue des caractéristiques physiques et mécaniques résiduelles.

Mots clés : Béton autoplaçant, Valorisation des déchets, Déchets de verre, Déchets de plastique, Substitution hybride, Etat frais, Etat durci, Haute température.

Abstract

The use of Self-Compacting Concrete (SCC) has significantly developed in recent years, and increasing attention is being paid to the study of its mechanical and rheological properties. Currently, industrial and domestic wastes represent a potential source of environmental and economic problems. Incorporating these waste materials into the composition of SCC is an area of great interest worthy of study. The objective of this experimental work is to valorise two types of non-biodegradable waste: glass waste and plastic waste, by using them as combined partial substitutes (hybrid substitution) for natural sand in self-compacting concrete. This approach aims to reduce environmental impact, preserve natural resources, and improve the mechanical behaviour of concrete in flexion and compression, as well as to study its performance and structural integrity under high temperatures from a physical and residual mechanical characteristics perspective.

Keywords: Self-Compacting Concrete, Waste Valorisation, Glass Waste, Plastic Waste, Hybrid Substitution, Fresh State, Hardened State, High Temperature.

Table des matières

Remerciement

Dédicace

Table des matières

Listes des figurées

Listes des Tableaux

Listes des abréviations

Introduction générale..... 1

Chapitre I

Généralités sur le béton autoplaçant

I.1. Introduction.....4

I.2. Définition de béton auto plaçant.....4

I.3. Les avantages des BAP.....5

I.4. Les constituants des bétons autoplaçants.....5

I.4.1. Le Ciment.....5

I.4.2. Les Granulats (Sable et Gravillons).....6

I.4.3. L'Eau de gâchage.....6

I.4.4. Les Additions Minérales.....7

I.4.5. Les Fillers Calcaires (Poudre de Marbre) 7

I.4.6. Le super plastifiant.....8

I.4.6.1. Influence de la qualité de superplastifiant.....9

I.5. Essais de caractérisation à l'état frais.....10

I.5.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams (Slump-flow) 10

I.5.2. Essai de la Boîte en L (L-Box)	11
I.5.3. Essai de stabilité au tamis (Sieve stability test)	12
I.6. Caractéristiques des (BAP) à l'état durci.....	12
I.6.1. La résistance mécanique.....	12
I.6.2. Le module d'élasticité (Module de Young)	13
I.7. Méthode de formulation des BAP.....	14
I.7.1. Méthode japonaise.....	14
I.7.2. L'approche suédoise.....	14
I.7.3. Méthode Française (LCPC)	15
I.8. Conclusion.....	16

Chapitre II

Valorisation des déchets

II.1. Introduction.....	18
II.2. Recyclage des déchets.....	18
II.2.1. Définition d'un déchet.....	18
II.2.2. Définition du recyclage.....	19
I.3. Origine de la production des déchets.....	19
II.4. Les différents types de déchets.....	20
II.4.1. Les déchets municipaux (déchets ménagers)	20
II.4.2. Les déchets industriels.....	20
II.4.3. Les déchets agricoles.....	20
II.5. Les méthodes de valorisation des déchets.....	20
II.5.1. La valorisation énergétique.....	20

II.5.2. La valorisation biologique.....	21
II.5.3. La valorisation matière.....	21
II.6. Technique de recyclage.....	21
II.6.1. Procédés du recyclage.....	21
II.6.2. L'intérêt de la valorisation.....	21
II.6.3. Gestion des déchets.....	22
II.6.3.1. Collecte de déchets.....	22
II.6.3.2. Transformations.....	22
II.6.3.3. Commercialisation et consommation.....	22
II.7. Principes de gestion des déchets.....	22
II.8. Technique de gestion des déchets.....	23
II.8.1. Décharge.....	23
II.8.2. Incinération.....	23
II.8.3. Compost et fermentation.....	24
II.8.4. Traitement biologique et mécanique.....	24
II.8.5. Pyrolyse et gazéification.....	24
II.9. Impacts du recyclage sur l'environnement.....	25
II.10. Déchets utilisés comme granulats du béton.....	25
II.10.1. Déchets de faïence.....	25
II.10.2. Déchets de la démolition.....	26
II.10.3. Déchets de Pneus.....	26
II.10.4. Déchets de brique.....	27
II.10.5. Déchets de verre.....	28

II.10.6. Les Déchets de chantier.....	28
II.10.7. Les Déchets de plastiques.....	29
II.10.8. Les Déchets de bois.....	30
II.11. Conclusion.....	31

Chapitre III

Béton autoplaçant exposé à la haute température

III.1. Introduction.....	33
III.2. Évolutions des propriétés du béton soumis à des températures élevées.....	33
III.2.1. Évolution de la matrice cimentaire.....	33
III.2.2. Évolution des granulats.....	34
III.3. Évolution des propriétés physiques du béton.....	34
III.3.1. Dégradation de l'interface pâte-granulats.....	34
III.3.2. Les modifications physico-chimiques dans le béton à haute température.....	35
III.3.3. Évolution de la porosité.....	36
III.3.4. Évolution de la masse volumique.....	36
III.3.5. Perte de masse.....	37
III.3.6. Évolution de la perméabilité.....	37
III.4. Évolution des propriétés mécaniques avec la température.....	38
III.4.1. Résistance en compression à haute température.....	38
III.4.2. Résistance en traction à haute température.....	39
III.4.3. Module d'élasticité.....	40
III .5. L'éclatement du béton à haute température.....	41
III.6. Conclusion.....	41

Chapitre IV

Caractéristiques des matériaux utilisés et composition du béton

IV.1. Introduction.....	43
IV.2. Caractéristiques des matériaux utilisés et composition du BAP.....	43
IV.2.1. Le sable.....	43
IV.2.1.1. Analyse granulométrique [NF EN 933-1]	43
IV.2.1.2. Caractéristiques physiques du sable.....	45
IV.2.1.2.1. La masse volumique absolue [NF EN 1097-7]	45
IV.2.1.2.2. La masse volumique apparente [NF EN 1097-6]	46
IV.2.1.2.3. Equivalent de sable [NF EN 933-8]	47
IV.2.2. Le gravier.....	50
IV.2.2.1. Analyse granulométrique.....	50
IV.2.2.2. Caractéristiques physiques du gravier.....	51
IV.2.2.2.1. La masse volumique apparente [NF P 18-554]	51
IV.2.2.2.2. La masse volumique absolue du gravier.....	52
IV.2.3. Le ciment.....	53
IV.2.4. Les adjuvants.....	55
IV.2.5. Déchets de verre.....	55
IV.2.5.1. Analyse granulométrique du verre.....	55
IV.2.5.2. Caractéristiques physiques du verre.....	56
IV.2.5.2.1. La masse volumique absolue.....	56
IV.2.5.2.2. La masse volumique apparente.....	56

IV.2.6. Caractérisation physique des granulats de plastique.....	57
IV.2.6.1. Analyse granulométrique du plastique.....	57
IV.2.6.2. Masse volumique absolue.....	58
IV.2.6.3. Masse volumique apparente.....	58
IV.2.7. Le filler (marbre)	58
IV.2.8. L'eau de gâchage.....	59
IV.3. Formulation du béton autoplaçant.....	60
IV.3.1. Préparation de la gâchée.....	60
IV.3.2. Conservation des éprouvettes.....	60
IV.3.3. Formulation de béton autoplaçant.....	60
IV.3.3.1. Les constituants présents dans le mélange.....	61
IV.3.3.2. Les déchets de verre et de plastique.....	62
IV.3.3.3. Les compositions des différents bétons.....	62
IV.4. Conclusion.....	63

Chapitre V

Techniques expérimentales des BAP

V.1. Introduction.....	65
V.2. Essais de caractérisation du béton autoplaçant à l'état frais.....	65
V.2.1. Détermination de la consistance au cône d'Abrams — NF EN 12 350-8.....	65
V.2.1.1. Matériel utilisé.....	65
V.2.1.2. Mode opératoire.....	65
V.2.2. Détermination du risque de blocage à l'aide de la boîte L — NF EN 12 350-10.....	66
V.2.2.1. Objet de la boîte en L.....	66

V.2.2.2. Mode opératoire.....	67
V.2.3. Détermination de la résistance à la ségrégation par l'évaluation de la stabilité au tamis — NF EN 12 350-11.....	67
V.2.3.1. Matériel utilisé.....	67
V.2.3.2. Mode opératoire.....	67
V.2.4. La masse volumique du béton autoplaçant — NF EN 12 350-6.....	68
V.3. Essais de caractérisation du béton autoplaçant à l'état durci.....	68
V.3.1. Essai de compression — NF EN 12390-3.....	68
a. But de l'essai.....	68
b. Principe de l'essai.....	68
c. conduite de l'essai.....	68
V.3.2. Essai de flexion — NF EN 12390-5.....	69
a. But de l'essai.....	69
b. Conduite de l'essai.....	69
V.3.3. Mesure de la porosité à l'eau (P_eau) — NF P 18 459.....	70
V.4. Conclusion.....	70

Chapitre VI

Résultats et Discussions

VI.1. Introduction.....	72
VI.2. Résultats des essais à l'état frais.....	72
VI.2.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams.....	73
VI.2.2. Essai de stabilité au tamis.....	74
VI.2.3. Essai de la boîte en L.....	75

VI.2.4. La masse volumique.....	76
VI.3. Résultats des essais à l'état durci.....	76
VI.3.1. Résistance à la compression.....	77
VI.3.1.1. l'effet des déchets.....	77
VI.3.1.2. À haute température.....	78
VI.3.2. Résistance à la traction par flexion.....	79
VI.3.2.1. l'effet des déchets.....	79
VI.3.2.2. À haute température.....	80
VI.3.3. La porosité.....	81
VI.4 La perte de masse.....	82
Conclusion générale.....	84
Références Bibliographiques.....	87
Annexe.....	92

Liste des Tableaux

Tableau III. 1. Les principales réactions physico-chimiques dans le béton à haute température [1].....	35
Tableau IV. 1 Analyse granulométrique du sable	45
Tableau IV. 2 la masse volumique absolue du sable :.....	46
Tableau IV. 3 La masse volumique apparente à l'état lâche VR=1000 ml.....	46
Tableau IV. 4. Equivalent de sable visuel	48
Tableau IV. 5. Equivalent de sable Piston.....	49
Tableau IV. 6 La classification de la nature sable en fonction d'équivalent de sable (E.S). [3]	49
Tableau IV. 7 Analyse granulométrique du gravier 8/16	50
Tableau IV. 8 Analyse granulométrique du gravier 3/8	51
Tableau IV. 9 la masse volumique apparente du gravier :	52
Tableau IV. 10 la masse volumique absolue du gravier :.....	53
Tableau IV. 11 caractéristique technique.....	54
Tableau IV. 12 Analyse granulométrique du verre :	55
Tableau IV. 13 la masse volumique absolue du verre :.....	56
Tableau IV. 14 La masse volumique apparente du verre à l'état lâche VR=1000ml.....	56
Tableau IV. 15 Analyse granulométrique du Plastique	57
Tableau IV. 16 la masse volumique absolue du plastique :.....	58
Tableau IV. 17 La masse volumique apparente du Plastique à l'état lâche VR=1000ml....	58
Tableau IV. 18 Caractéristiques physiques du marbre.....	59
Tableau IV. 19 Caractéristiques chimiques du marbre.....	59

Tableau IV. 20 Caractéristiques chimiques de l'eau de gâchage	59
Tableau IV. 21 La composition des matériaux pour 1m ³ de béton.....	62
Tableau I V. 22 Désignation des mélanges – substitution simple.....	62
Tableau IV. 23 Désignation des mélanges – substitution combinée.....	63
Tableau V. 1 Classement de la formulation selon le pourcentage de laitence.....	68
Tableau VI. 1 résultats des essais à l'état frais	72

Liste des figures

Fig.I.1. Comparaison de la structure d'un BAP d'un BO.....	4
Fig.I.2. Représentation schématique des molécules de base super plastifiants les plus connus.....	8
Fig.I.3. Influence de la qualité du super plastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton.....	9
Fig.I.4. Pâte de ciment non adjuvantée.....	10
Fig.I.5. Pâte de ciment additionnée d'un superplastifiant.....	10
Fig.I.6. Représentation schématiques de l'essai d'étalement.....	11
Fig.I.7. Essais boîte en L.....	11
Fig.I.8. Représentation de l'essai de stabilité au tamis.....	12
Fig.I.9. Résistance en compression de différents mélanges.....	13
Fig.II.1. Stratégie de traitement des déchets.....	19
Fig.II.2. Déchets de faïence.....	25
Fig.II.3. Déchets de démolition.....	26
Fig.II.4. Déchets de Pneus.....	27
Fig.II.5. Déchets de Brique.....	27
Fig.II.6. Déchets de verre.....	28
Fig.II.7. Les déchets de chantier.....	29
Fig.II.8. Différent type de déchet plastique.....	30
Fig.II.9. Différent type de déchet de bois.....	30
Fig.III.1. Porosité totale à l'eau en fonction de la température de conditionnement.....	36
Fig.III.2. Variations de la masse volumique en fonction de la température.....	37

Fig.III.3. Évolution de la perméabilité des bétons BO et BHP en fonction de la Température.....	38
Fig.III.4. Évolution de la résistance résiduelle relative à la compression des BO et BHP.....	39
Fig.III.5. Résistance à la traction par flexion résiduelle.....	40
Fig.III.6. Évolution du module d'élasticité dynamique résiduel.....	40
Fig.IV.1. Matériels utilisés pour l'analyse granulométrique (vibro-électrique et tamis).....	44
Fig.IV.2. Courbe granulométrique du sable.....	45
Fig.IV.3. Essai d'équivalent de sable.....	47
Fig.IV.4. Essai d'équivalent de sable (piston)	48
Fig.IV.5. Courbe granulométrique de Gravier (8/16)	50
Fig.IV.6. Courbe granulométrique de Gravier (3/8)	51
Fig.IV.7. Ciment (ciment Biskria)	54
Fig.IV.8. Courbe granulométrique du verre.....	56
Fig.IV.9. Courbe granulométrique du plastique.....	57
Fig.V.1. Essai d'étalement.....	66
Fig.V.2. Essai de la boîte L.....	66
Fig.V.3. Essai de la stabilité au tamis.....	67
Fig.V.4. Essai de compression.....	69
Fig.V.5. Essai de Flexion.....	69
Fig.V.6. Essai de porosité à l'eau.....	70
Fig.VI.1. L'étalement en fonction du type de béton.....	73
Fig.VI.2. L'indice de ségrégation en fonction du type de béton.....	74
Fig.VI.3. Le taux de remplissage en fonction du type de béton.....	75

Fig.VI.4. La masse volumique en fonction des types de béton.....	76
Fig.VI.5. La résistance à la compression en fonction du type de béton.....	77
Fig.VI.6. La résistance à la compression en fonction de l'âge de béton.....	78
Fig.VI.7. La résistance à la traction par flexion en fonction du type de béton.....	79
Fig.VI.8. La résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge des bétons.....	80
Fig. VI. 9 la porosité des différentes types de béton.....	81
Fig. VI. 10 La perte de masse des différentes types de béton.....	82

Liste des abréviations

BAP : Béton autoplaçants

BO : Béton ordinaire

BHP : bétons haute performance

CEM I : le ciment Portland(CPA)

S : Surface de l'éprouvette en (cm²)

ρ_{abs} : Masse volumique absolue

ρ_{app} : La masse volumique apparente (Kg/m³)

S : Surface de l'éprouvette en (cm²)

F : force au moment de la rupture

C : Ciment

S : Sables

G 3/8 : gravier 3/8

G 8/16 : gravier 8/16

V_r : Volume de récipient (cm³)

M₁ : Poids de récipient

M₂ : Poids de l'ensemble (granulat + récipient)

V₁ : volume d'eau

V₂ : le nouveau volume d'eau

ESV : Equivalent de sable visuel en (%)

ESP : Equivalent de sable piston en (%)

h₁ : Hauteur (sable + floculat)

h₂ : Hauteur du sable en (cm)

h'2: la hauteur du sable

E/C : Rapport Eau sur Ciment

G/S : Rapport sable sur gravier

NF : Norme française

EN : Norme européenne

K : Clinker

Introduction Générale

Introduction Générale

Introduction Générale

L'industrie de la construction est aujourd'hui confrontée à des défis environnementaux majeurs, notamment l'épuisement des ressources naturelles et la gestion des déchets industriels. Le béton, étant le matériau le plus utilisé au monde, nécessite des quantités massives de sable naturel. Dans cette perspective de développement durable, la valorisation des déchets tels que le verre et le plastique représente une solution innovante pour produire des matériaux de construction plus écologiques.

Parallèlement, l'évolution technologique a permis l'émergence du Béton Autoplaçant (BAP). Selon la définition admise :

"Le béton autoplaçant (BAP) est un béton très fluide, homogène et stable, capable de se mettre en place dans les coffrages les plus complexes sous le seul effet de la pesanteur [1]."

L'originalité de ce travail de recherche réside dans l'étude de l'effet combiné de deux types de déchets non biodégradables : le verre et le plastique, en tant que substituts partiels du sable. Il est établi que :

"L'incorporation de déchets de verre sous forme de granulats fins dans le béton est une solution intéressante pour réduire l'impact environnemental [2]."

Cependant, l'ajout de particules plastiques apporte une dimension supplémentaire à l'étude, notamment en ce qui concerne la légèreté et le comportement thermique.

Problématique de la recherche

L'enjeu principal de cette étude est d'évaluer l'influence de ces nouveaux composants sur les performances rhéologiques et mécaniques du BAP, ainsi que leur résistance face aux incendies. La problématique s'articule autour d'un programme expérimental rigoureux visant à tester différentes variantes de substitution :

- Substitution simple par le Plastique : Analyse de l'effet du plastique seul avec des taux de 10% et 15%.
- Substitution simple par le Verre : Analyse de l'effet du verre seul avec des taux de 10% et 15%.
- Substitution hybride (Mélanges combinés) : Étude de l'interaction entre les deux matériaux à travers trois combinaisons spécifiques :

Introduction Générale

- 10% Verre + 5% Plastique
- 10% Plastique + 5% Verre
- 10% Plastique + 10% Verre

De plus, une attention particulière est portée au comportement de ces mélanges face à l'action de la chaleur. Nous chercherons à comprendre comment ces bétons réagissent lorsqu'ils sont exposés à des températures élevées de 200°C, 400°C et 600°C. L'objectif est de vérifier si la fusion des particules de plastique peut créer une porosité bénéfique pour libérer la pression de vapeur d'eau et éviter l'éclatement du béton (Spalling).

Objectifs de l'étude

L'objectif global de ce mémoire est de :

- Vérifier le maintien des propriétés d'autoplaçance (fluidité et stabilité) pour chaque mélange.
- Évaluer l'évolution des résistances mécaniques (compression et traction) en fonction des taux de substitution.
- Analyser le comportement du béton après exposition aux cycles thermiques.

Structure du mémoire

Pour répondre à ces objectifs, le présent manuscrit est structuré en cinq chapitres :

Chapitre I : Généralités sur le béton autoplaçant.

Chapitre II : Valorisation des déchets

Chapitre III : Béton autoplaçant exposé à la haute température

Chapitre IV : Caractéristiques des matériaux utilisés et composition du béton

Chapitre V : Présentation, analyse et discussion des résultats obtenus.

Chapitre I

Généralité sur le béton autoplaçant

I.1. Introduction :

Le béton autoplaçant (BAP), également appelé Self Compacting Concrete (SCC), constitue une avancée importante dans le domaine du génie civil. Développé initialement au Japon à la fin des années 1980, ce matériau a été conçu afin d'améliorer la qualité de mise en œuvre du béton tout en supprimant le besoin de vibration. [1]

Contrairement aux bétons ordinaires, le BAP se distingue par sa grande fluidité, lui permettant de s'écouler sous son propre poids et de remplir efficacement les coffrages, même en présence d'armatures denses ou de formes complexes. Cette caractéristique assure une meilleure homogénéité ainsi qu'une qualité de surface améliorée. [2]

L'utilisation du béton autoplaçant s'est largement développée grâce à ses nombreux avantages techniques et économiques, tels que la réduction du temps de mise en œuvre, la diminution de la main-d'œuvre et l'amélioration des conditions de travail.

I.2. Définition de béton auto plaçant :

Ces bétons sont des bétons spéciaux, très fluides, qui se mettent en place et se serrent sous le seul effet de la gravité, donc sans apport de vibration interne ou externe, même dans des coffrages très ferrailés. Ces bétons ne sont évidemment qualifiés d'auto-plaçant que si le matériau durci final présente des propriétés homogènes (pas de ségrégation) et présentent de très bonne performance à court et puis à long terme. [4]

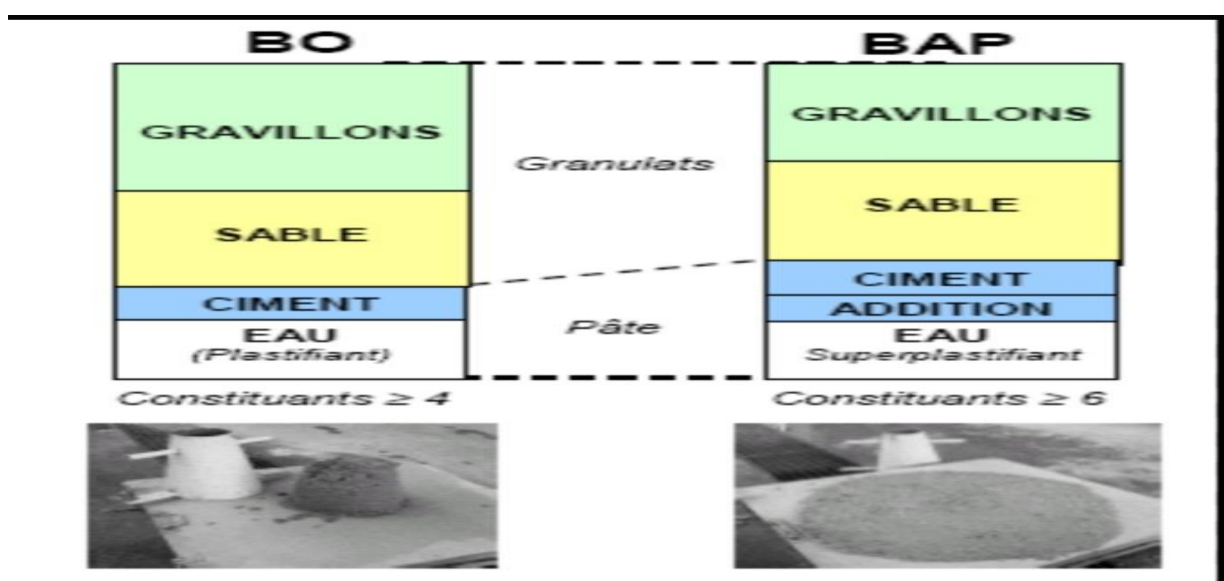


Fig I.1. Comparaison de la structure d'un BAP d'un BO [3]

I.3. Les avantages des BAP :

L'adoption de la technologie des bétons autoplaçants offre une multitude de bénéfices, tant sur le plan constructif que sur le plan environnemental. Parmi les atouts majeurs, on cite l'amélioration des conditions de travail sur les chantiers grâce à la suppression de l'étape de vibration, ce qui réduit considérablement les nuisances sonores et la pénibilité pour les ouvriers. En outre, la fluidité exceptionnelle de ce matériau permet d'obtenir des surfaces d'une grande qualité esthétique et de garantir un remplissage parfait des coffrages, même pour les éléments de structure les plus complexes.

Sur le plan économique, l'usage du BAP se traduit par une réduction significative du temps de bétonnage et une optimisation de la main-d'œuvre nécessaire.

I.4. Les constituants des bétons autoplaçants :

La formulation des BAP repose sur une sélection rigoureuse de matériaux similaires à ceux du béton classique, mais avec des dosages et des caractéristiques spécifiques pour garantir la fluidité. L'innovation majeure dans notre étude réside dans l'incorporation de granulats alternatifs. En plus des liants habituels, l'introduction combinée de débris de verre et de particules de plastique recyclé permet d'ajuster le squelette granulaire tout en répondant aux enjeux environnementaux. Ces composants travaillent en synergie pour assurer un étalement optimal sans ségrégation, même en présence d'un ferrailage serré. [5]

I.4.1. Le Ciment :

Le ciment est le liant hydraulique essentiel qui assure la cohésion de la matrice granulaire et le développement des résistances mécaniques. Dans la formulation des BAP, il joue un rôle moteur dans la fluidité de la pâte. Sa composition doit être rigoureusement contrôlée pour garantir la durabilité du matériau, surtout lors de l'incorporation de substituts comme le verre et le plastique :

- Composants minéralogiques : Il est constitué de phases cristallines (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF) qui réagissent avec l'eau pour former des hydrates, assurant l'adhérence avec les granulats de verre et de plastique.
- Régulateur de prise (Gypse) : Le sulfate de calcium est ajouté pour maîtriser le temps de début de prise, permettant au béton de conserver son auto-plaçabilité durant la mise en œuvre.

- Finesse de mouture : La surface spécifique du ciment influence la demande en eau et la viscosité de la pâte ; une finesse élevée favorise un meilleur enrobage des particules fines de poudre de marbre.
- Chaleur d'hydratation : Ce paramètre est crucial pour éviter la fissuration thermique, particulièrement dans les structures massives ou lors d'une exposition à des températures élevées.[4]

I.4.2. Les Granulats (Sable et Gravillons) :

Le squelette granulaire de notre BAP est conçu à partir d'un mélange hybride visant à optimiser à la fois les performances techniques et l'aspect écologique. Contrairement au béton conventionnel, nous avons procédé à une substitution partielle du sable naturel par des déchets recyclés. Cette démarche permet d'étudier l'influence de ces matériaux sur la compacité et la fluidité du mélange. Les spécificités de ce mélange granulaire sont les suivantes :

- Substitution partielle du sable : Une fraction définie du sable siliceux est remplacée par des pourcentages précis de débris de verre et de particules de plastique.
- Complémentarité granulaire : Le sable naturel assure la base de la matrice, tandis que le verre et le plastique apportent des caractéristiques de surface différentes (texture lisse pour le plastique, anguleuse pour le verre).
- Maîtrise de l'absorption : Comme le verre et le plastique n'absorbent pratiquement pas d'eau, cette substitution partielle modifie la quantité d'eau libre, ce qui nécessite un ajustement rigoureux pour éviter la ségrégation [1].
- Squelette solide : L'interaction entre ces trois types de granulats fins (sable/verre/plastique) définit la capacité de remplissage et la stabilité du béton à l'état frais..[6]

I.4.3 L'Eau de gâchage :

La qualité de l'eau est un paramètre déterminant pour la réussite d'un béton autoplaçant, car elle influence directement l'hydratation et la rhéologie. Dans notre étude, l'interaction entre l'eau et les granulats non absorbants (verre et plastique) nécessite une vigilance particulière. Conformément aux prescriptions techniques [8], l'eau de gâchage doit répondre aux critères de pureté suivants :

- ❖ Matières en suspension : La teneur doit être limitée à 2 g/l pour les bétons à haute résistance et ne pas dépasser 5 g/l pour les bétons courants.

- ❖ Sels dissous : La concentration totale doit rester inférieure à 15 g/l pour les bétons à haute performance (BHP) et à 30 g/l pour les bétons classiques.
- ❖ Impuretés chimiques : L'absence de sucres, de matières organiques et de concentrations élevées en chlorures ou sulfates est impérative pour éviter tout retard de prise ou risque de corrosion.

L'utilisation d'une eau propre, combinée aux débris de verre et de plastique, permet de garantir une fluidité optimale et une stabilité durable du mélange, tout en maintenant l'efficacité des superplastifiants.[6]

I.4.4 Les Additions Minérales :

L'usage des additions minérales dans les mortiers et les bétons est une pratique qui remonte à l'Antiquité. Ces matériaux se distinguent par leur grande finesse et leur capacité à réagir chimiquement ou physiquement au sein de la matrice cimentaire. Dans la formulation des BAP, ces constituants sont essentiels pour garantir une viscosité adéquate. Selon les classifications techniques, on peut incorporer les différents types d'additions suivants [4] :

- Les fillers calcaires
- Les pouzzolanes naturelles
- Le laitier de haut fourneau
- La fumée de silice .
- Les cendres volantes

Dans notre travail, nous nous focalisons sur l'utilisation des fillers (poudre de marbre), car ils offrent un excellent compromis entre la maniabilité nécessaire à l'auto-plaçabilité et la stabilité du mélange face aux granulats recyclés.

I.4.5 Les Fillers Calcaires (Poudre de Marbre) :

Les fillers calcaires, et plus précisément la poudre de marbre dans le cadre de notre travail, sont des matériaux d'une finesse extrême (diamètre inférieur à 80 μm) utilisés pour optimiser le squelette granulaire du BAP. Contrairement aux granulats de verre et de plastique qui assurent le volume, la poudre de marbre agit comme un liant physique complémentaire. Son rôle se résume en trois points essentiels :

- Effet de remplissage : Elle comble les micro-vides entre les grains de sable et les particules de verre/plastique, ce qui augmente la compacité de la matrice.

- Amélioration de la fluidité : Elle réduit les frottements internes entre les constituants solides, favorisant ainsi un étalement homogène sans besoin d'eau supplémentaire.
- Stabilité rhéologique : Elle renforce la viscosité de la pâte, empêchant les déchets légers (plastique) de remonter à la surface ou les débris denses (verre) de décanter [4].

I.4.6 Le super plastifiant :

À l'état frais, les bétons autoplaçants (BAP) se distinguent par une fluidité exceptionnelle qui ne peut être atteinte que par l'incorporation d'adjuvants spécifiques appelés superplastifiants. Leur dosage est variable et dépend de la formulation ciblée, se situant généralement dans une plage allant de 3 l/m³ à 20 l/m³ [1]. L'efficacité de cet adjuvant est cruciale pour garantir une grande maniabilité, surtout dans notre cas où nous utilisons des granulats de récupération (verre et plastique).[1]

• Mécanisme d'action (Dispersion des grains) :

Lorsque le superplastifiant est introduit dans le mélange, ses molécules s'adsorbent à la surface des grains de ciment. Ces grains, qui ont naturellement tendance à s'agglomérer en amas (floculation) à cause de leurs charges opposées, subissent alors une force de répulsion électrostatique. Cette dispersion est essentielle pour fluidifier la matrice cimentaire.

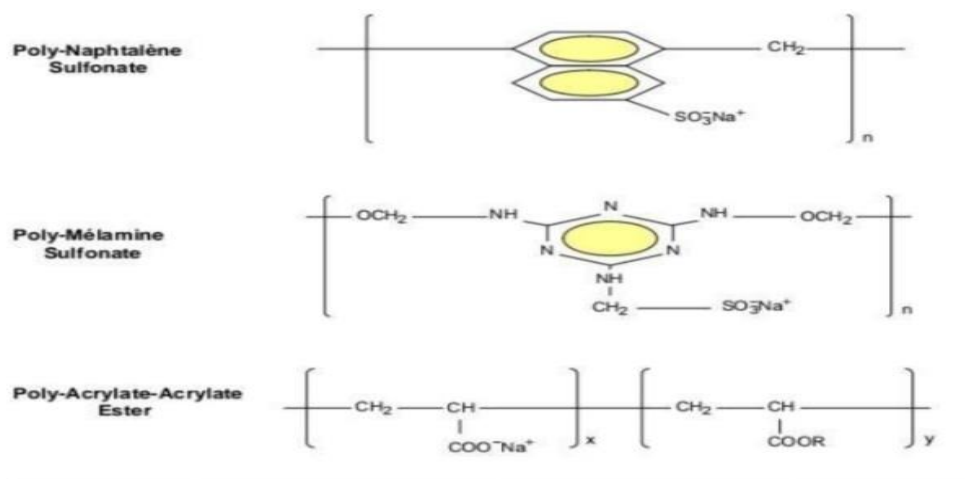


Fig .I.2 représentation schématique des molécules de bases super plastifiantes les plus connus [2]

- **Libération de l'eau captive :**

Le phénomène de floculation piège une partie de l'eau de gâchage, la rendant inutile pour la fluidité. En brisant ces amas, le superplastifiant libère cette "eau captive". Une fois libre, cette eau contribue à la lubrification des autres constituants (sable, poudre de marbre, débris de plastique et de verre), ce qui augmente considérablement l'étalement du béton sans ajout d'eau supplémentaire [9].

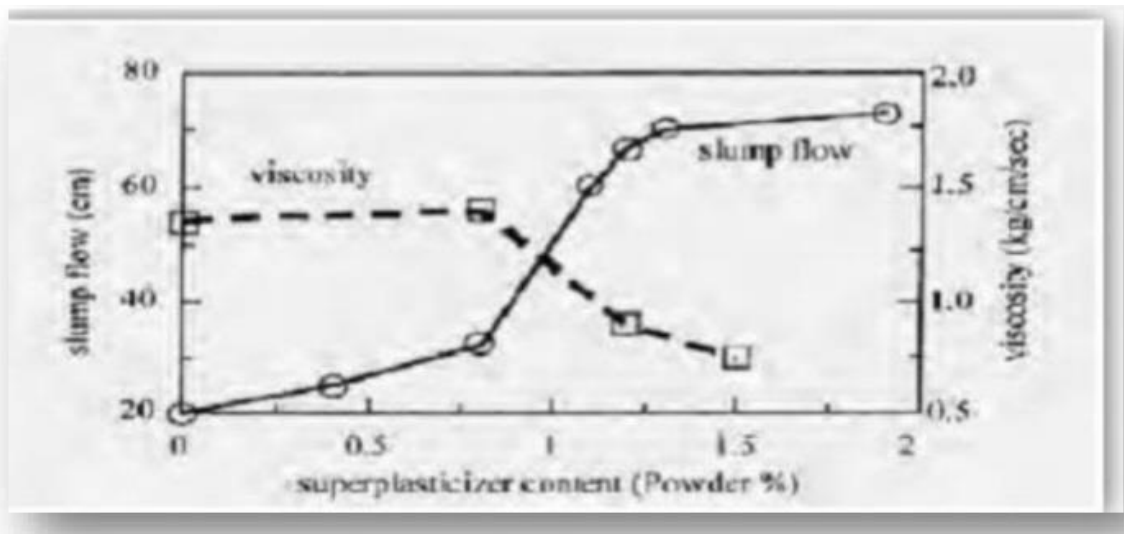


Fig.I. 3 Influence de la qualité du super plastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton [4]

I.4.6.1 Influence de la qualité de superplastifiant :

L'effet sur l'étalement :

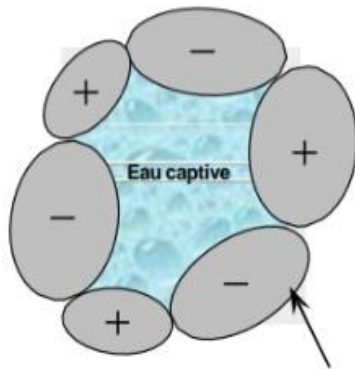
La qualité du superplastifiant joue un rôle déterminant dans la réussite d'un BAP. Comme illustré dans les courbes de dosage (Fig.I.3), un adjuvant de haute performance permet d'atteindre un diamètre d'étalement (Slump-flow) maximal avec un dosage minimal. Cela garantit une fluidité stable sans provoquer de ressuage [5].

L'effet sur la viscosité :

Une bonne qualité de superplastifiant assure une réduction significative de la viscosité apparente. Cela permet à la pâte cimentaire d'enrober parfaitement les granulats non absorbants, comme les débris de verre et de plastique, facilitant ainsi leur mouvement au sein du mélange sans risque de blocage ou de frottements excessifs [7].

Optimisation du dosage :

Il est essentiel de déterminer le dosage "optimal" ; un sous-dosage entraîne une perte d'auto-plaçabilité tandis qu'un surdosage peut compromettre la cohésion du béton. La synergie entre la qualité du superplastifiant et la finesse de la poudre de marbre est la clé pour maintenir l'homogénéité du BAP [6].



Grains de ciment

Fig.I. 4 Pâte de ciment non adjuvantée[7]

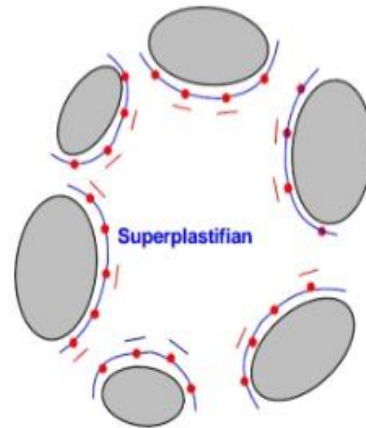


Fig.I. 5 Pâte de ciment additionnée d'un superplastifiant[7]

I.5 Essais de caractérisation à d'état frais

I .5.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams (Slump-flow) :

Cet essai est le plus utilisé pour évaluer la fluidité et la capacité de remplissage du BAP en milieu libre. Contrairement au béton vibré, on ne mesure pas l'affaissement vertical, mais le diamètre moyen du disque formé par le béton après le retrait du cône.

- Procédure : Le cône est rempli sans compactage, puis soulevé verticalement. On mesure le temps T_{50} (temps pour atteindre un diamètre de 50 cm) et l'étalement final.
- Objectif : Vérifier que le mélange peut s'écouler sous son propre poids. Pour un BAP réussi, le diamètre doit être compris entre 600 mm et 800 mm.
- Influence des granulats : La substitution par le plastique (forme irrégulière) et le verre (texture lisse) influence directement la vitesse d'étalement T_{50} [10].

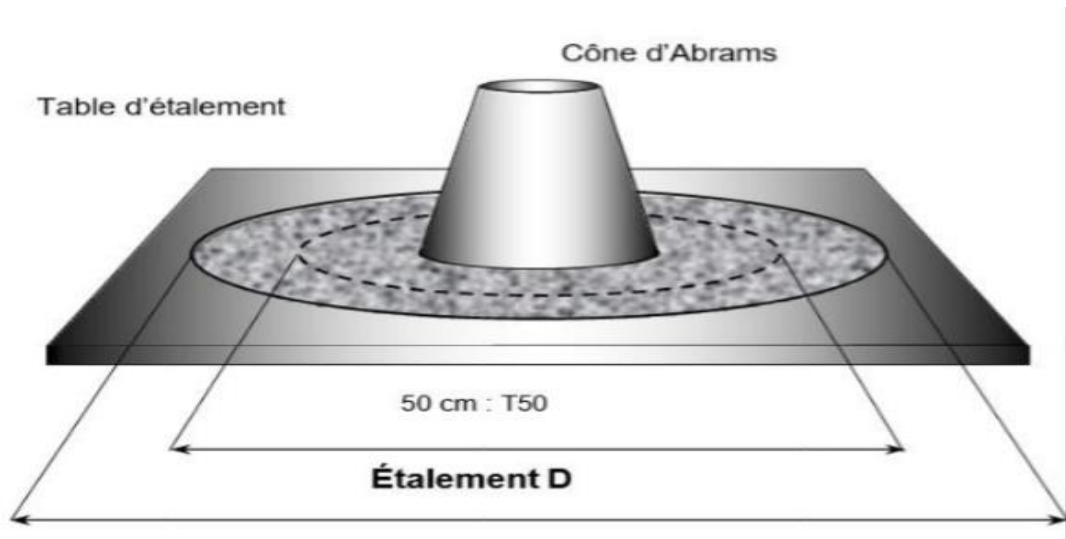


Fig.I. 6 Représentation schématiques de l'essai d'étalement [6]

I.5.2 Essai de la Boîte en L (L-Box) :

L'essai à la boîte en L permet de quantifier la capacité de passage du béton à travers des armatures sans ségrégation ni blocage.

- Procédure : On remplit la partie verticale de la boîte, puis on ouvre la trappe pour laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers une grille de barres d'acier.

Critère de réussite : On mesure les hauteurs à l'extrémité (H2) et au début (H1). Le rapport $H2/H1$ (taux de remplissage) doit être supérieur à 0.8.

- Observation : Si le verre ou le plastique sont mal répartis, ils peuvent s'accumuler derrière les barres, provoquant un blocage (effet de voûte) [11].

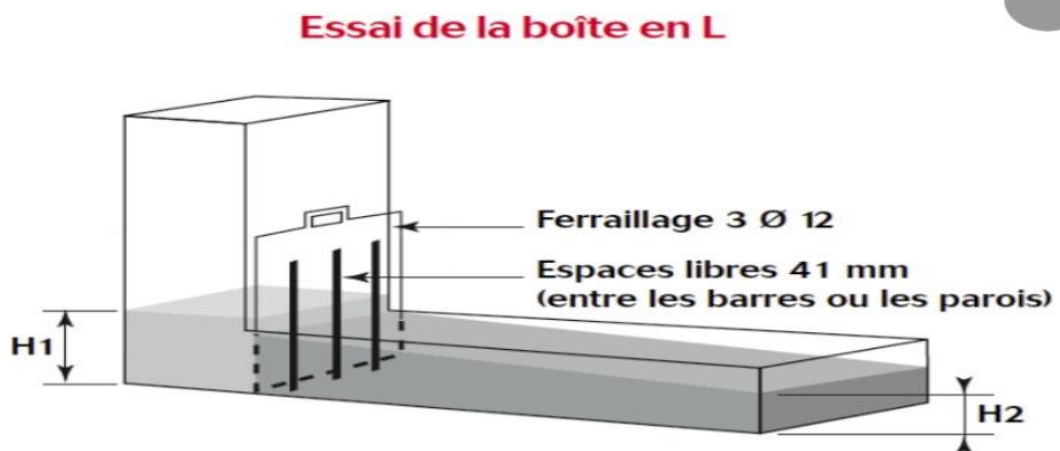


Fig .I.7 essais boîte en L

I.5.3 Essai de stabilité au tamis (Sieve stability test) :

Cet essai permet d'évaluer la résistance à la ségrégation du BAP «ce qui est crucial dans ton cas à cause de la différence de densité entre le plastique (léger) et le verre (dense).

- Procédure : On verse un échantillon de béton sur un tamis de 5 mm de maille. Après 2 minutes de repos «on pèse la quantité de laitance qui est passée à travers le tamis.
- Interprétation : Le pourcentage de mortier passant ne doit pas dépasser 15% à 20%. Un pourcentage élevé indique un risque de ressuage ou de séparation des constituants [12]

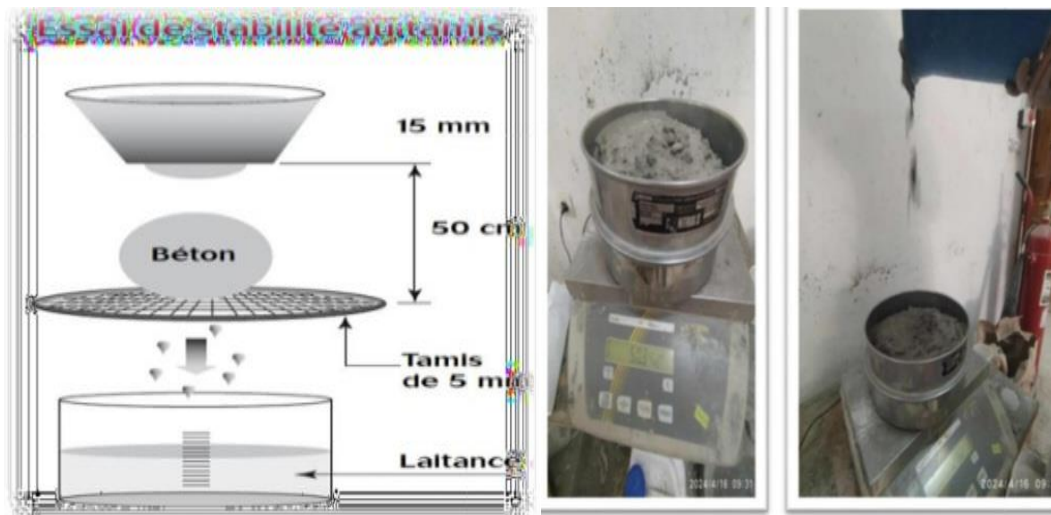


Fig .I.8 représentation de l'essai de stabilité au tamis

I.6 Caractéristique des (BAP) à l'état durci :

Les propriétés mécaniques du béton durci sont essentielles pour définir la performance structurelle du matériau. Elles dépendent fortement de la qualité de la liaison entre la matrice cimentaire et les granulats recyclés (verre et plastique).

I.6.1 La résistance mécanique :

C'est le paramètre fondamental pour le dimensionnement des ouvrages. Elle est déterminée par :

- **Résistance à la compression** : Mesurée par l'écrasement d'éprouvettes normalisées. L'introduction de la poudre de marbre permet de compenser la perte de compacité induite par les déchets, assurant ainsi une résistance adéquate [13].

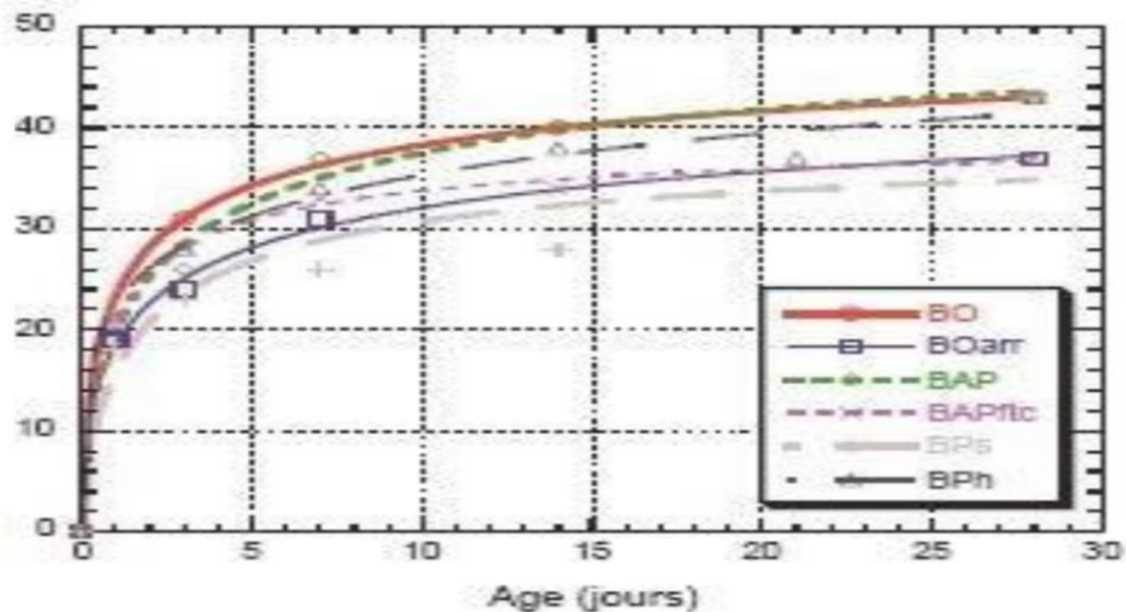


Fig. I.9 Résistance en compression de différents mélanges [1]

- **Résistance à la traction** : Évaluée généralement par l'essai de flexion. Elle est sensible à la forme et à l'état de surface des débris de verre et de plastique qui influencent l'adhérence avec la pâte [10].

I.6.2 Le module d'élasticité (Module de Young) :

Il exprime la rigidité du béton et sa capacité à se déformer sous charge.

Influence des granulats : L'incorporation de granulats plastiques, ayant un module d'élasticité nettement inférieur à celui du sable naturel, peut entraîner une baisse de la rigidité globale du béton.

Rôle des fillers : À l'inverse, la densité apportée par la poudre de marbre aide à stabiliser ce module en rendant la structure interne plus homogène [11].

I.7 Méthode de formulation des BAP :

I.7.1 Méthode japonaise :

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

Le surcoût engendré sur le matériau est compensé, au japon, par les économies sur la main-d'œuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants :

a) Dosage des gravillons :

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

b) Dosage du sable :

Le volume du sable est de 40% du volume de mortier en béton. En réduisant la friction granulaire, la liquidité en béton est garantie.

c) Dosage du liant :

La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins, la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes. Les rapports massiques eau sur ciment et filler sur ciment peuvent également être choisis sur des critères de résistance [14].

d) Dosage d'eau et du super plastifiant :

Les dosages en eau et en super plastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40%. Nous réalisons des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir [14].

I.7.2 L'approche suédoise :

La méthode suédoise est proposée par Peterson et al en 1996. Elle est basée sur l'étude effectuée par Tang et al en 1995. En fait, ils ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégrée dans le processus de formulation. Le rapport (G/S) final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées.

Les fines, l'eau et le super plastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée. Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire mais le critère de blocage n'est pas général pour tout type de granulat [14].

I.7.3 Méthode Française (LCPC) :

Méthode française proposée par De Larrard et al en 1994, au LCPC. Un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide (RENE LCPC). Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après :

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

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

- La proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple).
- Le dosage, à saturation, du super plastifiant est déterminé. Selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente.
- Le besoin en eau de ce mélange (en présence du super plastifiant) est déterminé.

Les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (Effet de paroi).

- La viscosité est fixée de manière arbitraire à 5.10^4 . La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion (liant/filler) est maintenue constante. Les proportions (granulats/phase liante) sont optimisées.
- Une formulation de béton auto plaçant est donc proposée, basée sur les prévisions du modèle.
- La teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée. Le dosage en super plastifiant est ajusté également afin d'obtenir la valeur d'étalement et le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent les propriétés requises pour le béton auto plaçant sont atteintes [15].

I.8 Conclusion :

À la lumière de cette étude bibliographique, il apparaît clairement que les bétons autoplaçants (BAP) représentent une évolution majeure dans la technologie du béton. Leur formulation spécifique, reposant sur un dosage élevé en fines et l'usage de superplastifiants, leur confère des propriétés exceptionnelles.

En résumé, pour qu'un béton soit qualifié de BAP, il doit impérativement satisfaire trois critères fondamentaux à l'état frais :

- ✓ Une grande fluidité alliée à une viscosité maîtrisée pour éviter toute ségrégation.
- ✓ Une excellente aptitude au remplissage des coffrages sous l'effet de son propre poids.
- ✓ Une capacité de passage fluide à travers des ferraillements denses sans risque de blocage.

La compréhension de ces mécanismes et des méthodes de formulation (Japonaise, Suédoise LCPC) est une étape préalable indispensable avant d'aborder notre étude expérimentale. Celle-ci portera sur la valorisation des déchets de verre et de plastique comme substituts granulaires, tout en utilisant la poudre de marbre pour optimiser les performances de ces mélanges complexes.

Chapitre II

Valorisation des déchets

II.1 Introduction :

Du fait de l'augmentation des activités du Bâtiment et des Travaux Publics depuis quelques décennies, on constate un afflux croissant du volume des déchets issus des chantiers. L'industrie en Algérie a une part de responsabilité majeure dans la pollution globale du pays, notamment l'industrie pétrochimique, chimique, métallurgique et de traitement des minerais. La valorisation des déchets dans le génie civil est un secteur important dans la mesure où les produits que l'on souhaite obtenir ne sont pas soumis à des critères de qualité trop rigoureux. Le recyclage des déchets touche deux impacts très importants à savoir l'impact environnemental et l'impact économique [1].

Avant de valoriser un déchet, il faut connaître son origine, l'analyser, caractériser son état actuel et son comportement dans le temps et évaluer son traitement. Il s'agit donc de « mesurer pour connaître et connaître pour agir ». L'approche globale du déchet permettra d'en définir son devenir, à savoir quel type de valorisation choisir. [1] « Toute personne qui produit ou détient des déchets, dans des Conditions de nature à produire des effets nocifs sur le sol, la flore et la faune, à dégrader les sites ou les paysages, à polluer l'air ou les eaux, à engendrer des bruits et des odeurs et, d'une façon générale, à porter atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement, est tenue d'en assurer ou d'en faire assurer l'élimination conformément aux dispositions du Code de l'Environnement, dans des conditions propres à éviter les dits effets. » [2].

II.2 Recyclage des déchets :

II.2.1 Définition d'un déchet :

Selon l'article L541-1-1 du Code de l'Environnement, un déchet est défini comme « toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se débarrasser ». En fonction de leurs types et de leurs origines, les déchets ont un niveau de dangerosité variable qui, dans certains cas, peut être préjudiciable à l'homme et à l'environnement [1].

Les déchets peuvent être classés en trois catégories :

- ✓ Les déchets dangereux (comburant, inflammable, explosif, corrosif, cancérigène...) (décret n° 2002-540 du 18 avril 2002) [1].

- ✓ Les déchets non dangereux, qui ne figurent pas dans le décret n° 2002-540 du 18 avril 2002 [1].
- ✓ Les déchets inertes, qui ne sont pas dangereux et ne contiennent pas de constituants évolutifs. Ils ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique ou chimique [1].

II.2.2 Définition du recyclage :

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois R :

- **Réduire** : qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets.
- **Réutiliser** : qui regroupe les procédés permettant de donner à un produit usagé un nouvel usage.
- **Recycler** : (Le troisième R) pour transformer le déchet en matière première[1].

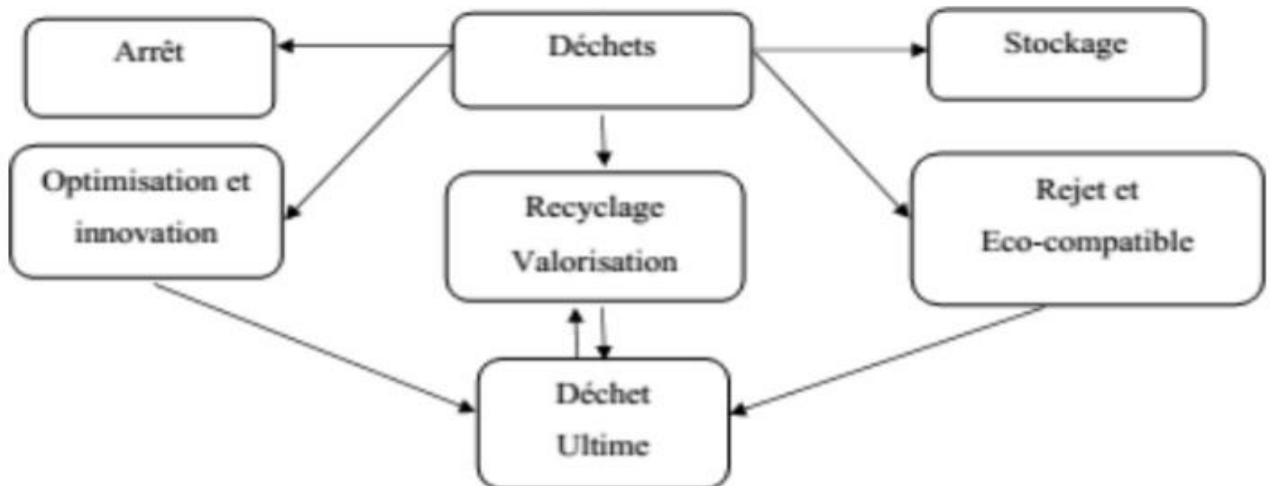


Fig.II.. 1. Stratégie de traitement des déchets [3].

II.3. Origine de la production des déchets :

La production des déchets est inéluctable pour les raisons suivantes :

- Biologiques : tout cycle de vie produit des métabolites.

- Chimiques : toute réaction chimique est régie par le principe de la conservation de la matière.
- Technologiques : tout procédé industriel conduit à la production de déchet.
- Économiques : les produits ont une durée de vie limitée.
- Écologiques : les activités de la dépollution génèrent inévitablement d'autres déchets. [1].

II.4. Les différents types de déchets :

On peut classer les déchets selon trois catégories :

II.4.1. Les déchets municipaux (déchets ménagers) :

Ils proviennent essentiellement des ménages et des activités économiques (commerces, artisans, bureaux). Ils comprennent les ordures ménagères (matières organiques, papiers, verres, plastiques, métaux, etc.) collectées par les municipalités.

II.4.2. Les déchets industriels :

Ce sont des déchets générés par les activités industrielles et de services. Ils sont classés selon leur dangerosité en :

- Déchets industriels spéciaux (DIS) : contenant des substances toxiques.
- Déchets industriels banals (DIB) : tels que le bois, les métaux et certains plastiques.

II.4.3. Les déchets agricoles :

Ce sont des déchets issus des exploitations agricoles ou de l'industrie agroalimentaire. Bien que biodégradables pour la plupart, leur gestion peut poser des problèmes environnementaux s'ils sont produits en quantités massives.

II.5 Les méthodes de valorisation des déchets :

On distingue principalement trois types de valorisation qui permettent de redonner une utilité aux déchets :

II.5.1. La valorisation énergétique :

Elle consiste à utiliser le pouvoir calorifique des déchets pour produire de l'énergie thermique (vapeur) ou électrique par incinération. Cette méthode est particulièrement adaptée aux déchets qui ne peuvent pas être recyclés mécaniquement.

II.5.2. La valorisation biologique :

Elle concerne les déchets organiques biodégradables. On distingue :

- Le compostage : décomposition aérobie pour produire un amendement organique (compost).
- La méthanisation : décomposition anaérobie produisant du biogaz.

II.5.3. La valorisation matière :

C'est celle qui nous intéresse directement dans le domaine du Génie Civil. Elle consiste à réutiliser le déchet comme matière première dans la fabrication de nouveaux matériaux. Cela inclut l'usage de granulats recyclés, comme les débris de verre et les particules de plastique, incorporés dans la confection des bétons. Cette approche permet de limiter l'épuisement des ressources naturelles (sable et gravier) [4].

II.6 Technique de recyclage :

II.6.1 Procédés du recyclage :

On distingue principalement trois familles de procédés de valorisation : chimique, mécanique et organique. La voie « chimique » repose sur des réactions moléculaires afin de traiter les matières, notamment pour la séparation de certains constituants. Le recyclage « mécanique » désigne la transformation physique des déchets par des procédés industriels, tels que le broyage. [3] La valorisation « organique » permet, via le compostage ou la fermentation, de produire des amendements ou du carburant vert à l'instar du biogaz. [3]

II.6.2 L'intérêt de la valorisation :

POURQUOI VALORISER ? L'impératif de valoriser les déchets ainsi que les sous-produits industriels découle de la crise énergétique actuelle, de l'épuisement des réserves mondiales en matières premières et du durcissement des cadres législatifs relatifs à la préservation des écosystèmes naturels. [3] Les motivations majeures peuvent être énumérées comme suit :

- Optimisation de la capacité productive.
- Accroissement continu des charges liées au stockage et au traitement.
- Renforcement progressif des contraintes réglementaires.

- Amélioration des stratégies de gestion de la recherche.

II.6.3 Gestion des déchets :

La gestion des déchets définit l'ensemble des opérations de collecte, de transport, de traitement (rebut), de réutilisation ou d'élimination finale, visant à atténuer les impacts environnementaux et sanitaires, tout en préservant l'esthétique des milieux. Cette gestion s'applique à toutes les formes de déchets (solides, liquides ou gazeux), chacun étant traité selon une filière technologique dédiée. [3]

II.6.3.1 Collecte de déchets :

Le cycle de valorisation débute impérativement par la phase de collecte. Les fractions non recyclables sont dirigées vers l'incinération ou l'enfouissement technique. En revanche, les flux destinés au recyclage sont exclus de ces processus pour être réintégrés dans un cycle de transformation. L'organisation de la collecte est donc structurée en fonction de cette finalité.

La collecte sélective, qualifiée de séparative et parfois dénommée tri sélectif, constitue la méthode prédominante. Son principe repose sur l'implication du producteur initial dans l'opération de tri.

Après ramassage, les produits sont acheminés vers des centres de tri spécialisés où diverses étapes permettent de classer les matériaux afin de maximiser l'efficacité des processus industriels. L'intervention manuelle demeure une étape clé de ces protocoles de tri. [3]

II.6.3.2 Transformations :

Une fois la phase de tri achevée, les matériaux sont pris en charge par les unités industrielles spécialisées. Ils sont alors introduits dans des circuits de transformation spécifiques à leur nature, leur permettant de réintégrer le cycle de production en tant que matières secondaires...

II.6.3.3 Commercialisation et consommation :

Au terme de la transformation, les produits finis issus du recyclage sont réutilisés dans la conception de nouveaux biens destinés à être distribués aux usagers finaux et consommés. À l'issue de leur cycle de vie, ces produits redeviendront des déchets valorisables. [3]

II.7 Principes de gestion des déchets :

Plusieurs fondements régissent la gestion des résidus, dont l'application opérationnelle fluctue selon les politiques nationales ou les contextes régionaux.

La hiérarchie des stratégies (règle des trois R) :

- Réduire.
- Réutiliser.
- Recycler. [1]

II.8 Technique de gestion des déchets :

II.8.1 Décharge :

L'entreposage des résidus en décharge constitue l'approche conventionnelle de stockage des déchets, demeurant la solution la plus exploitée à l'échelle mondiale. Historiquement, ces sites étaient souvent implantés au sein de carrières, de mines ou d'anciennes zones d'extraction. L'exploitation d'une décharge contrôlée limitant les nuisances écologiques peut représenter une alternative économiquement viable ; cependant, des méthodes plus efficaces s'avéreront impératives face à la raréfaction progressive des espaces fonciers disponibles. [5]

II.8.2 Incinération :

Le procédé d'incinération consiste en la neutralisation thermique d'un matériau par combustion. Cette technique est fréquemment désignée par les termes « Valorisation énergétique » ou « Waste-to-Energy » ; ces dénominations peuvent prêter à confusion car d'autres vecteurs de récupération d'énergie existent sans combustion directe (à l'exemple de la fermentation, la pyrolyse ou la gazéification). [3] Elle est reconnue comme une solution pragmatique pour l'élimination des déchets infectieux, tels que les résidus médicaux et biologiques. De nombreuses institutions privilégient actuellement le traitement thermique à haute température pour stabiliser les déchets (incluant également les procédés de gazéification et de pyrolyse). Cette méthodologie permet la récupération des métaux et de l'énergie des déchets ménagers, ainsi qu'un confinement optimisé des résidus solides (mâchefers) et une réduction significative des volumes de déchets initiaux. L'incinération demeure une pratique industrielle consolidée, tant en Europe que dans les pays émergents, bien qu'elle suscite des débats en raison de diverses considérations environnementales. [3]

II.8.3 Compost et fermentation :

Les résidus organiques (végétaux, alimentaires, papiers) font l'objet d'un recyclage croissant via le compostage ou la méthanisation. Ces matières sont traitées dans des composteurs ou digesteurs afin de stabiliser biologiquement la décomposition et d'éliminer les agents pathogènes. Le produit final est valorisé comme amendement organique (paillis ou terreau) pour l'agriculture. Il existe diverses méthodes, allant du simple tas de compostage aux systèmes industriels automatisés. Ces procédés se divisent en modes aérobie (compostage) ou anaérobie (digesteurs), bien que des solutions hybrides soient également exploitées. [3]

II.8.4 Traitement biologique et mécanique :

Le traitement mécano-biologique (TMB) associe un tri mécanique à une stabilisation biologique des déchets municipaux. La phase « mécanique » permet d'extraire les matériaux recyclables (métaux, plastiques, verre) ou de produire un combustible solide de récupération (CSR) à haut pouvoir calorifique pour l'industrie. La phase « biologique » concerne soit la fermentation anaérobie pour la production de biogaz et de digestat, soit le compostage aérobie. [3]

Dans le cas du compostage, les micro-organismes dégradent la matière en présence d'oxygène, produisant du CO₂ et du compost sans génération d'énergie directe. Le TMB s'impose aujourd'hui comme une solution performante dans les pays en transition écologique, à l'instar du Royaume-Uni ou de l'Australie, où des leaders industriels comme WSN Environnemental développent ces infrastructures. [3]

II.8.5 Pyrolyse et gazéification :

La pyrolyse et la gazéification représentent des technologies de traitement thermique opérant à haute température sous atmosphère appauvrie en oxygène. Ces procédés, réalisés en réacteurs pressurisés, offrent une efficacité énergétique supérieure à l'incinération directe. La pyrolyse décompose les déchets solides en sous-produits liquides (huile pyrolytique), gazeux ou solides (charbon actif après retraitement). Quant à la gazéification, elle transforme la biomasse organique en un gaz de synthèse (syngas), composé de monoxyde de carbone et d'hydrogène, utilisé pour la production combinée d'électricité et de chaleur. [3]

II.9. Impacts du recyclage sur l'environnement :

Le recyclage génère des bénéfices multidimensionnels : préservation des ressources naturelles, création d'emplois et réduction drastique des rejets. [5] Il permet une économie substantielle de matières premières :

- L'acier recyclé substitue avantageusement le minerai de fer brut.
- Une tonne de plastique recyclé économise environ 700 kg de pétrole.
- Le recyclage d'un kg d'aluminium préserve 8 kg de bauxite et 14 kWh d'énergie.
- L'aluminium est indéfiniment recyclable avec un rendement de 100%.
- Chaque tonne de carton récupéré épargne 2,5 tonnes de bois.
- Le papier recyclé réduit la consommation d'eau et d'énergie (2,5 kWh par feuille). [5]

II.10 Déchets utilisés comme granulats du béton :

II.10.1 Déchets de faïence :

La faïence se définit comme un produit céramique à pâte poreuse et perméable, dont l'étanchéité est assurée par un revêtement vitrifié. [6] En tant que matériaux inertes, ces résidus ne présentent aucune réactivité physico-chimique ou biologique significative. Ils sont stables, incombustibles et non biodégradables, ce qui exclut tout risque de détérioration des matériaux en contact ou de pollution environnementale directe. [6]

Généralement issus des chantiers de construction, de démolition ou des rebuts industriels, ces déchets sont admissibles dans les centres de stockage technique.



Fig.II. 2 déchets de faïence [6]

II.10.2 Déchets de la démolition :

Le recyclage du béton s'effectue par concassage de structures anciennes afin de produire des agrégats secondaires. Ces derniers sont exploitables dans diverses applications, telles que les couches de fondation ou comme substituts partiels dans la formulation de bétons neufs. [6]

Bien que plus poreux, les granulats de béton recyclé présentent une morphologie angulaire favorisant une adhérence correcte. Les propriétés finales du composite, notamment sa maniabilité et sa durabilité face au gel-dégel, dépendent étroitement de la qualité du béton d'origine et du rapport Eau/Liant. [6]



Fig. II.3 déchets de démolition [6]

II.10.3 Déchets de Pneus :

L'usage de granulats en caoutchouc, issus du broyage de pneumatiques usagés, améliore la ductilité du mortier et retarde l'apparition des macro-fissures. Ce composite présente une excellente résilience face à la fissuration de retrait, malgré des variations dimensionnelles plus marquées. [7] Dans le cadre de notre étude, l'intégration de tels polymères s'inscrit dans une démarche similaire visant à substituer une fraction du sable naturel par des granulats plastiques recyclés pour optimiser les performances des bétons autoplaçants (BAP).



Fig. II. 4 Déchets de Pneus. [7]

II.10.4 Déchets de brique :

Les rebuts de fabrication des briques (cuisson défectueuse ou casse) peuvent être valorisés comme granulats après concassage. Bien que leur porosité puisse accroître la perméabilité du béton, l'utilisation d'argile cuite permet d'atteindre des résistances mécaniques parfois supérieures à celles des graviers naturels. [8] Toutefois, une attention particulière doit être portée à la présence de sels solubles pour éviter tout risque de corrosion des armatures.



Fig.II. 5 déchets de Brique. [6]

II.10.5 Déchets de verre :

Le verre est une substance amorphe, homogène issue du refroidissement de matières fondues. Ses propriétés physico-chimiques en font l'un des matériaux les plus polyvalents, bien que sa non-biodégradabilité pose des défis environnementaux majeurs. [9]

Dans l'industrie du bâtiment, le recyclage du verre constitue une voie stratégique. En raison de sa haute teneur en silice, son incorporation dans le béton peut déclencher deux types de réactions : la réaction alcali-silice (potentiellement expansive) et la réaction pouzzolanique (bénéfique pour la compacité). [9]

Dans le cadre de notre projet sur les Bétons Autoplaçants (BAP), nous privilégions l'utilisation du verre sous forme de poudres fines pour substituer une fraction du sable. Cette approche permet non seulement d'améliorer la durabilité de la matrice cimentaire, mais aussi de valoriser des tonnes de verre qui, autrement, seraient destinées à l'enfouissement.

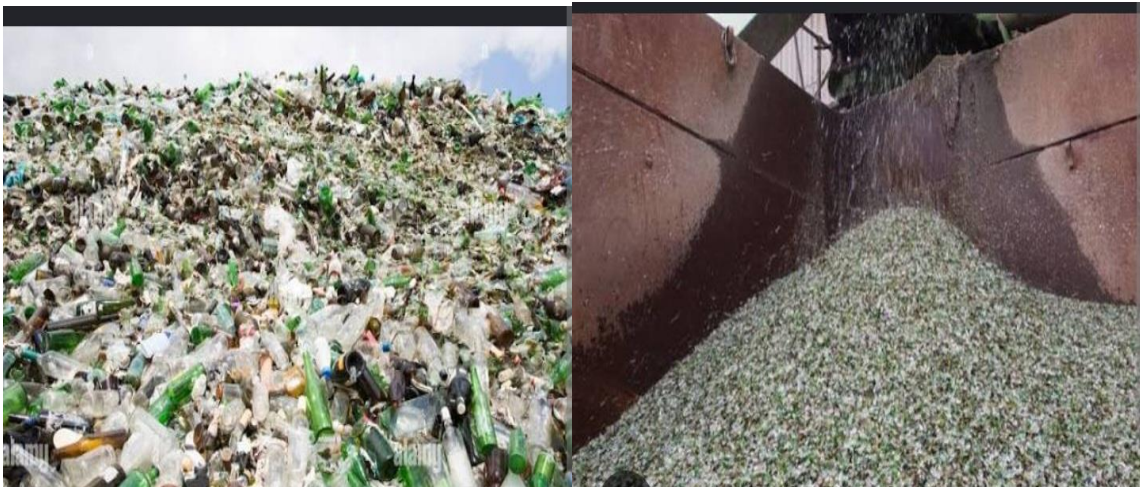


Fig. II. 6 déchets de verre [9]

II.10.6 Les Déchets de chantier :

Les résidus de construction et de démolition (RCD) proviennent essentiellement des travaux publics et du bâtiment. Ces déchets sont classés comme inertes : ils ne subissent aucune décomposition biologique, ne sont pas inflammables et ne produisent aucune réaction chimique nocive. [10] Ainsi, ils ne dégradent pas les matériaux environnants et ne présentent pas de risque direct pour la santé humaine.

Les matériaux admissibles dans cette catégorie incluent les débris de béton, les pierres, les tuiles, les céramiques ainsi que les enrobés bitumineux (sans goudron). [10] Bien que l'amiante soit techniquement inerte, son usage reste strictement proscrit pour des impératifs de sécurité sanitaire. [11]



Fig.II. 7 Les déchets de chantier [6]

II.10.7 Les Déchets de plastiques :

Le terme « déchet plastique » englobe les résidus issus des cycles de production, de transformation ou de consommation. Dans le domaine du génie civil, et particulièrement pour les Bétons Autoplaçants (BAP), ces polymères représentent une alternative prometteuse pour la substitution partielle des granulats naturels. On distingue principalement :

- Déchets industriels : Provenant essentiellement des complexes pétrochimiques lors de la synthèse des résines.
- Déchets de production : Résidus homogènes issus des purges ou des lots non conformes (PE, PS, PVC), présentant un faible degré de contamination.
- Déchets de transformation : Rebutés issus des procédés de plasturgie tels que l'extrusion ou l'injection (carottes de moulage, chutes de découpe). [12]

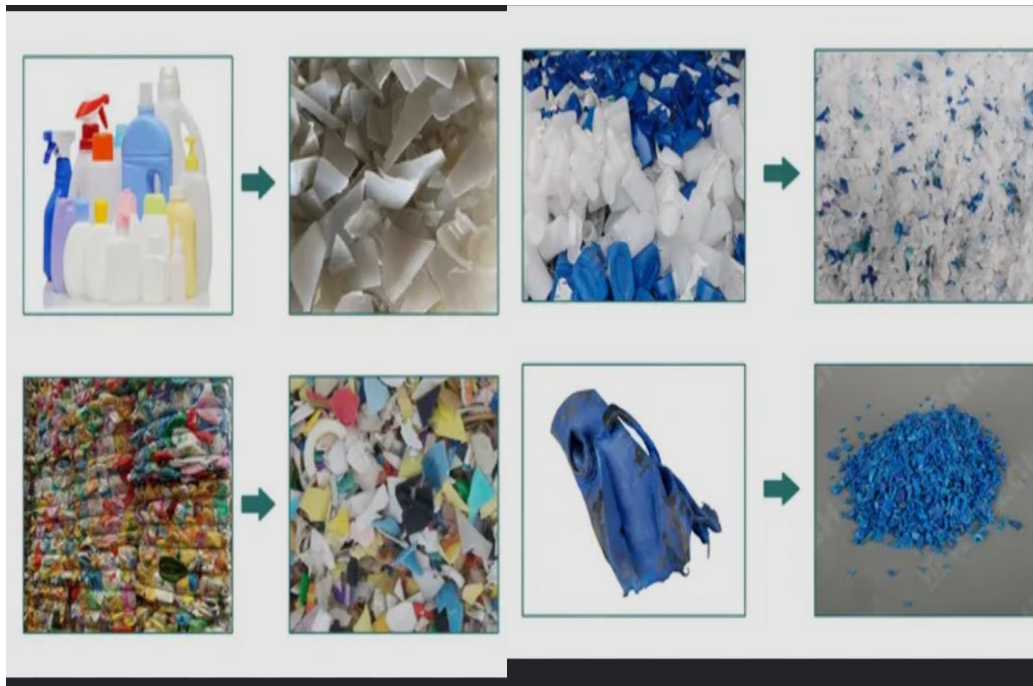


Fig.II. 8 différents types de déchet plastique [12]

II.10.8 Les Déchets de bois :

Le bois manufacturé génère des volumes importants de déchets en fin de vie. Leur recyclage est souvent complexe en raison des traitements chimiques subis (peintures, vernis). [10] Bien que leur valorisation énergétique soit préconisée, une grande partie finit encore en décharge. Dans le secteur de la construction, ils sont parfois réutilisés sous forme de panneaux de particules ou de granulats légers pour des bétons spécifiques.



Fig. II. 9 différent type de déchet de bois [6]

II.11 Conclusion :

Les déchets constituent un défi majeur pour l'équilibre environnemental et sanitaire. Face à l'urbanisation croissante, le développement de solutions de gestion circulaires est devenu impératif. La valorisation des matériaux résiduels dépend de leur viabilité économique et de leurs propriétés techniques. Si certains déchets restent complexes à traiter, d'autres ouvrent des perspectives innovantes.

Dans l'industrie du bâtiment, l'incorporation de sous-produits comme le verre et le plastique en substitution au sable s'inscrit dans cette dynamique. Cette approche permet non seulement de réduire l'empreinte carbone du béton, mais aussi d'optimiser les performances des Bétons Autoplaçants (BAP), offrant ainsi une voie durable pour la gestion des déchets inorganiques sur les chantiers.

Chapitre III

Béton autoplaçant exposé à la haute température

III.1. Introduction :

Cette section est dédiée à l'examen des travaux bibliographiques traitant de l'impact des températures élevées sur les caractéristiques physiques et mécaniques du béton autoplaçant. [1]

Les incendies majeurs survenant ces vingt dernières années ont démontré la difficulté d'appréhender le feu. L'incendie en tunnel est le phénomène le plus redouté, les constructions de tunnels sont complexes et nécessitent des coûts d'investissement parfois très importants. Ces dernières années, le risque lié à l'incendie dans les tunnels a augmenté, du fait du trafic routier, qui s'est densifié, notamment par rapport au nombre de poids lourds transportant des produits inflammables. [9]

III.2. Evolutions des propriétés du béton soumis à des températures élevées :**III.2.1 Evolution de la matrice cimentaire :**

Lorsqu'un béton est exposé à un accroissement thermique, diverses transformations d'ordre physique et chimique se manifestent. Ces phénomènes impactent directement la pâte de ciment ainsi que les agrégats. [1] Les modifications structurelles majeures de la matrice cimentaire durant la montée en température sont les suivantes :

20-120°C : évaporation de l'eau libre et adsorbée, dissociation de l'ettringite à partir de 60 - 70°C [1]. Premiers indices de décomposition des C-S-H avant 100°C.

130-170°C : double réaction de nature endothermique consécutive à la décomposition du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. [1]

450-550°C : déshydratation de la portlandite (processus de déshydroxylation par perte d'eau). [1]

600-750°C : dégradation des C-S-H et apparition de la phase $\beta\text{-C}_2\text{S}$. [1] Dissociation du carbonate de calcium au-delà du seuil de 600°C.

1200°C : phase initiale de fusion du béton.

III.2.2 Evolution des granulats :

Sous l'effet de fortes chaleurs, les granulats se désintègrent et subissent des altérations physico-chimiques et minéralogiques majeures qui impactent la microstructure du matériau. Selon les travaux de Nguyen, les granulats en contact avec le liant cimentaire peuvent être réactifs ou inertes. Les agrégats siliceux, par exemple, sont considérés comme neutres. Ils ne développent aucune interaction chimique notable avec la matrice cimentaire. Les granulats Calcaires, à l'inverse, manifestent des liaisons robustes avec la pâte de ciment et sont qualifiés de composants réactifs. [2] Les granulats de quartzite (siliceux) affichent des propriétés de stabilité relatives face à l'action du feu. Néanmoins, à partir de 573°C, la transition du quartz α en quartz β s'accompagne d'une dilatation volumique importante de 1 % à 5 %. [3] Cette modification de la structure cristalline au sein des granulats peut engendrer une instabilité thermique lors du chauffage. Les recherches de Mindeguia [4] et de Xing [5] ont mis en évidence un éclatement du silex entre 110°C et 450°C. Cette dégradation précoce pourrait résulter de la présence d'eau piégée dans la microporosité ou d'eau issue de la déshydroxylation des groupements silanols. Les granulats calcaires conservent un comportement thermique stable jusqu'à une température de 600°C. Au-delà, la décarbonatation de la calcite intervient selon : $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$. Lors du refroidissement, le CaO peut réagir avec l'humidité ambiante pour former de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Cette nouvelle formation, d'un volume supérieur à celui du granulat initial, provoque l'apparition de nouvelles microfissures au sein de la structure bétonnée. [5]

III.3. Evolution des propriétés physiques du béton :**III.3.1 Dégradation de l'interface pâte-granulats :**

Dans la structure du béton, l'interface liant/granulats constitue la zone la plus poreuse et fragile. À haute température, cette zone s'altère progressivement. Cela est dû à l'évacuation de l'eau adsorbée entourant les granulats, favorisant le développement de fissures, ainsi qu'à la dilatation différentielle s'opérant entre la pâte de ciment et les agrégats. La pâte de ciment se dilate jusqu'à atteindre 150°C. Cette expansion thermique est plus importante que celle des granulats, provoquant des fissures d'interface par décohesion (fissures tangentielles). Au-delà de 150°C, la matrice cimentaire subit un retrait tandis que les granulats continuent leur expansion. Ce contraste génère des fissures radiales. [6]

II.3.2 Les modifications physico-chimiques dans le béton à haute température :

Les principales réactions physico-chimiques intervenant durant l'échauffement du béton sont récapitulées dans le (Tableau 1.1)

Tableau III. 1. Les principales réactions physico-chimiques dans le béton à haute température. [1]

Entre 30 et 105 °C	L'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'échappent du béton. Elle est complètement éliminée à 105°C
Entre 130 et 170 °C:	Une double réaction endothermique peut avoir lieu correspondant à la décomposition du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Autour de 180 °C et jusqu'à environ 300 °C :	On a la première étape de la déshydratation. La chaleur brise le gel de ciment et arrache des molécules d'eau aux silicates hydratés. L'eau liée chimiquement commence à s'échapper du béton
A environ 250 et 370 °C	On peut avoir de petits pics endothermiques indiquant des effets de décomposition et d'oxydation d'éléments métalliques (ferriques).
Entre 450 et 550°C :	Il y a décomposition de la portlandite en chaux libre : $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
Autour de 570 °C:	Il y a transformation de structures du quartz α en quartz β , accompagnée d'un gonflement pour les granulats quartziques et basaltiques.
Entre 600 et 700 °C :	Il y a décomposition des phases de C-S-H et formation de β -C ₂ S. C'est la seconde étape de la déshydratation des silicates de calcium hydratés qui produit une nouvelle forme de silicates bi- calciques.
Entre 700 et 900 °C :	Il y a décomposition du carbonate de calcium. Le calcaire se décompose autour de 800°C en $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$, réaction fortement endothermique qui libère du gaz carbonique
A dessus de 1300-1400 °C :	Début de la fusion des agrégats et de la pâte de ciment.

III.3.3 Evolution de la porosité :

Le béton est un système biphasique poreux, constitué d'une matrice solide et d'un réseau de vides. La porosité totale s'évalue par saturation, tandis que la porosité capillaire s'étudie par porosimétrie. Les études montrent que la porosité croît avec la température à cause de l'augmentation du volume des pores et de la microfissuration induite par la dilatation différentielle pâte-granulats. La figure III.1 illustre ces variations pour un béton ordinaire et un BHP. . [8]

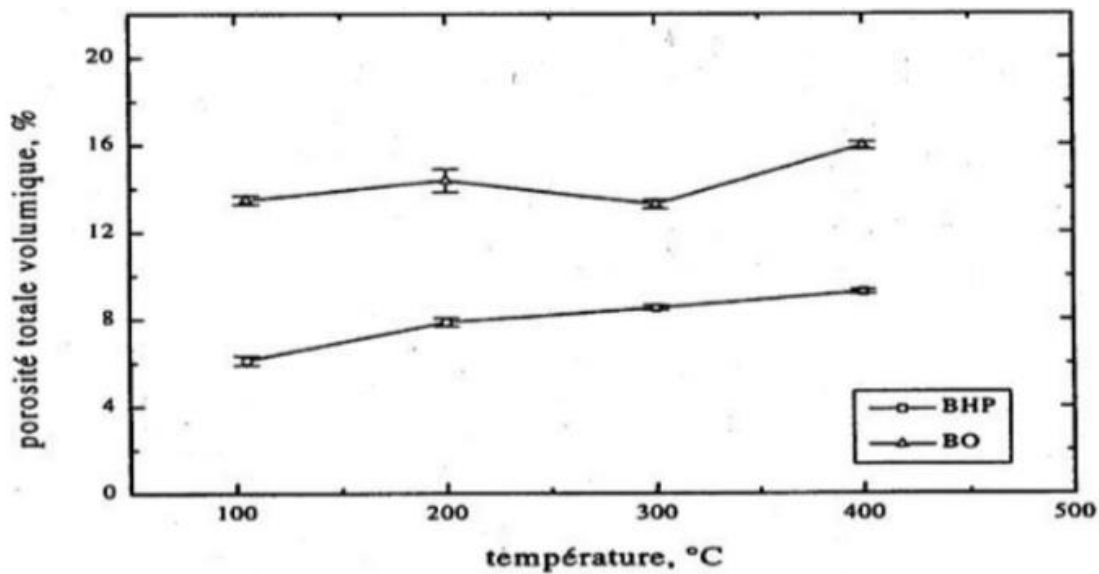


Fig III. 1. Porosité totale à l'eau en fonction de la température. [8]

III.3.4 Evolution de la masse volumique :

À haute température, ce paramètre est étroitement lié à la nature minéralogique des granulats. La figure III.2 présente l'évolution de la densité pour différents types de bétons. On note une diminution quasi-linéaire jusqu'à 800°C, particulièrement marquée pour le béton calcaire. Cette baisse résulte de l'hydratation complémentaire des anhydres et de la décarbonatation. Dans notre étude, l'usage de granulats de verre et de plastique en

substitution du sable dans le BAP influencera significativement cette évolution pondérale. [7].

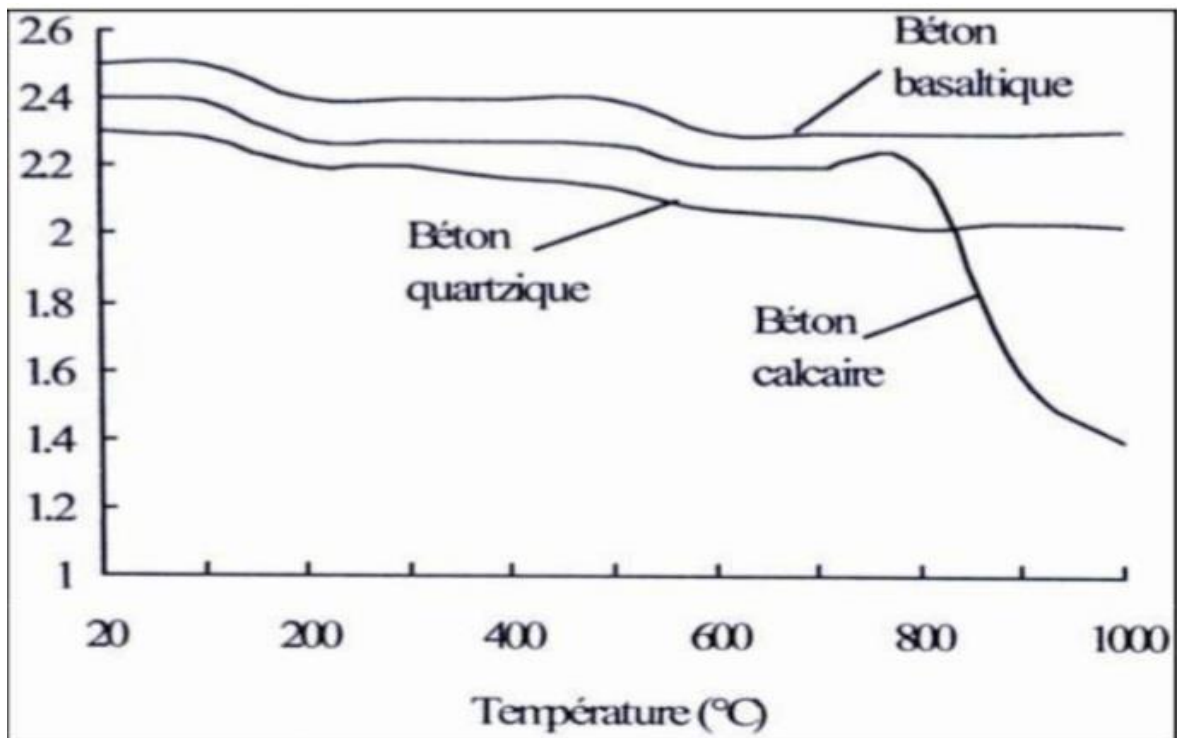


Fig III. 2. Variations de la masse volumique en fonction de la température. [7]

III.3.5 Perte de masse :

Le chauffage provoque une diminution du poids du béton due essentiellement à l'évaporation de l'eau et à la déshydratation progressive du gel C-S-H. Ce processus s'amorce dès 100°C. [6].

III.3.6 Evolution de la perméabilité :

La perméabilité définit la capacité du milieu poreux à laisser transiter un fluide sous pression. Bien que dépendante de la porosité et de la connectivité du réseau, elle varie selon la nature des constituants. Elle est corrélée au rapport E/C et à la quantité de granulats créant l'auréole de transition. On observe un accroissement significatif de la perméabilité au-delà du seuil de 100°C. . [6]

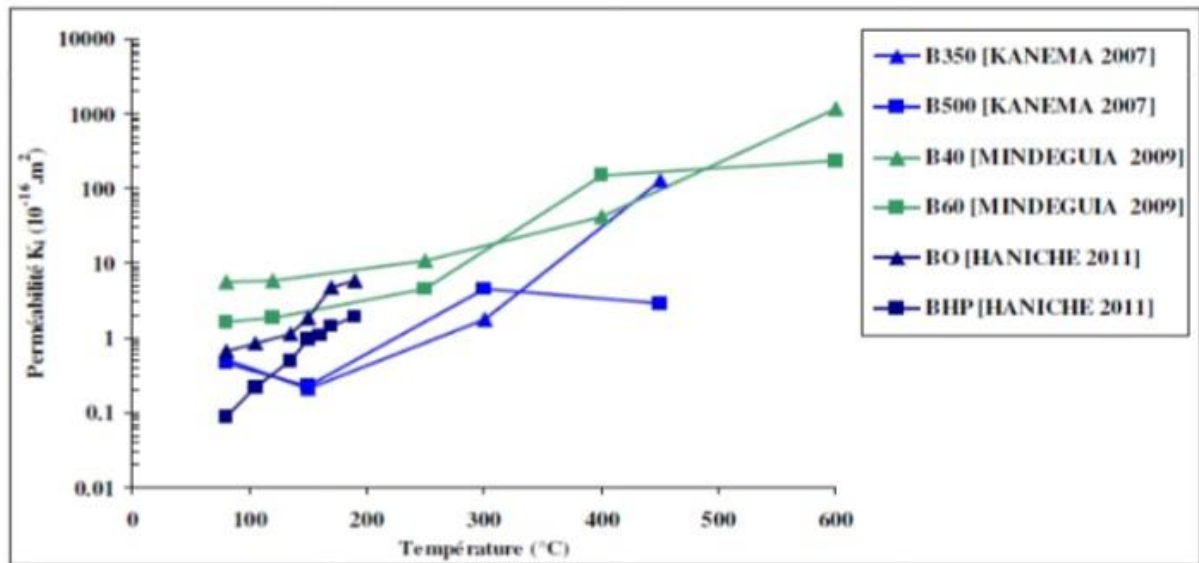


Fig III. 3. Évolution de la perméabilité des bétons BO et BHP. [1]

III.4. Evolution des propriétés mécaniques avec la température :

III.4.1 Résistance en compression à haute température :

La figure II.4 montre l'évolution des résistances résiduelles pour les BAP et BHP. Globalement, la littérature confirme que la résistance à la compression chute avec l'élévation thermique.

Le premier domaine : de l'ambiante jusqu'à 300°C – 400°C Cette phase est marquée par des variations modérées de la résistance (stabilité, légère baisse ou gain) :

Chute initiale (100°C – 150°C) : On observe une diminution mineure de la résistance due à l'évaporation de l'eau. En se dilatant sous l'effet de la chaleur, l'eau provoque un écartement des feuillets du gel de ciment, ce qui réduit les forces de cohésion interne.

Gain de résistance : Vers 300°C – 400°C, une amélioration de la résistance peut survenir grâce à l'augmentation des énergies de surface et au renforcement des liaisons entre les hydrates.

Particularité des BHP : Pour les bétons à hautes performances, ce gain peut être différé en raison de leur faible perméabilité qui entrave le départ de l'eau.

2. Le second domaine : de 400°C à 800°C

À partir de 400°C, le comportement du matériau change radicalement : On observe une chute irréversible et continue de la résistance à la compression. Ce phénomène est la conséquence directe des profondes transformations physico-chimiques qui dégradent la structure interne du béton. . [7]

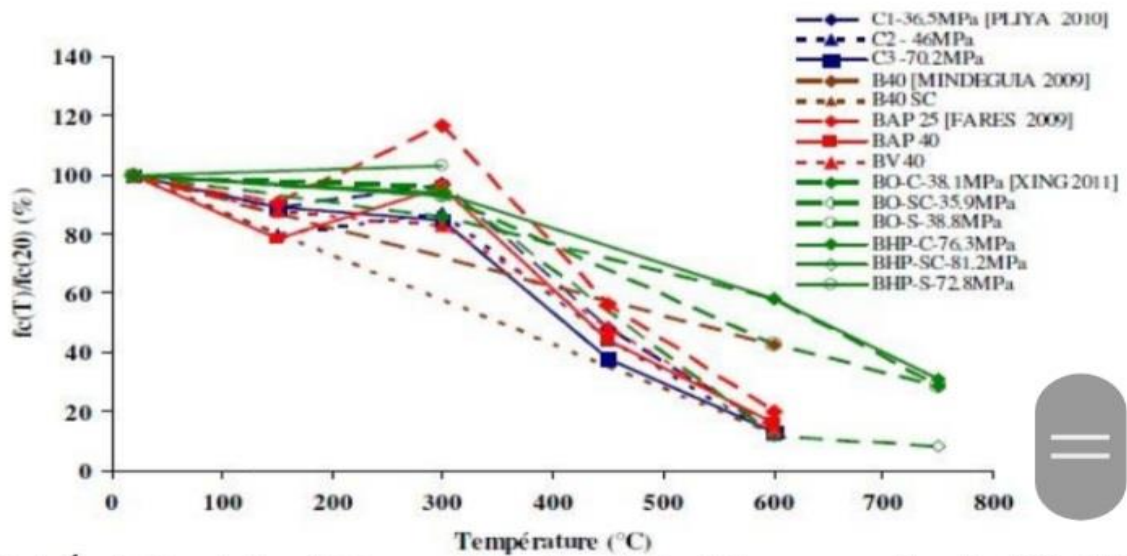


Fig III. 4. Évolution de la résistance résiduelle relative à la compression des BO et BHP [7]

III.4.2 Résistance en traction par flexion :

La figure III. 5 illustre l'évolution de la résistance à la traction par flexion des bétons autoplaçants après exposition thermique. Les résultats expérimentaux indiquent une diminution progressive de la résistance dès que la température augmente. Cette perte de performance est attribuée à l'altération de la liaison pâte-granulats et à la formation de fissures internes dues au retrait de la matrice cimentaire. Dans le cadre de notre recherche, l'effet combiné des granulats de verre et de plastique sur cette propriété sera analysé spécifiquement.

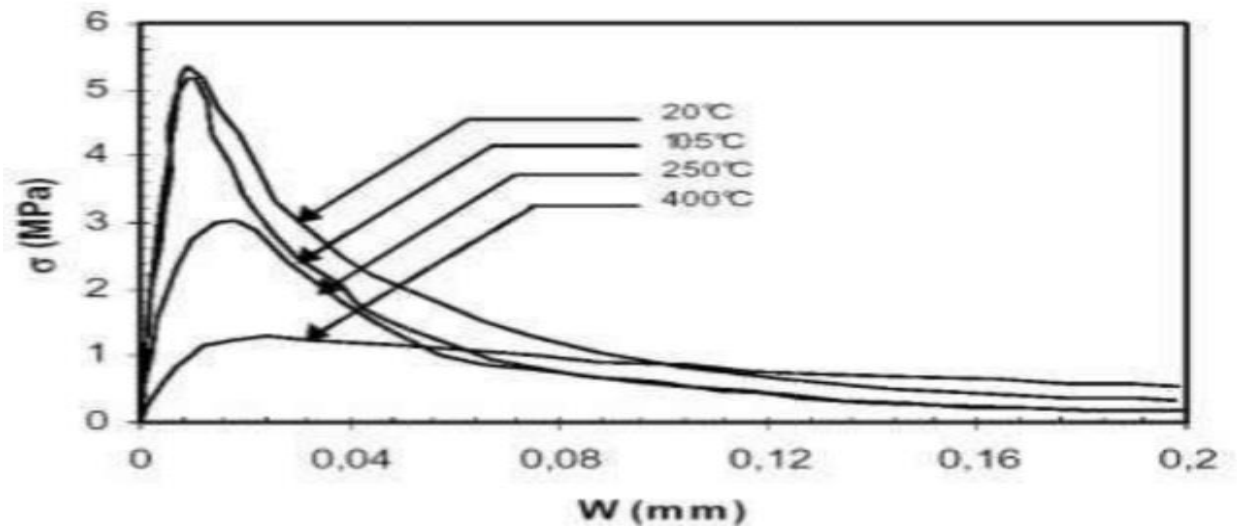


Fig III. 5. Résistance à la traction par flexion résiduelle

III.4.3 Module d'élasticité :

Le module d'élasticité dynamique est un indicateur clé de l'intégrité structurale du béton. La figure III. 6 montre une chute sévère du module d'élasticité avec l'élévation de la température. Cette dégradation est plus rapide que celle de la résistance en compression. Elle s'explique par la déshydratation des hydrates (C-S-H) et la porosité croissante qui réduit la rigidité globale du matériau. . [7]

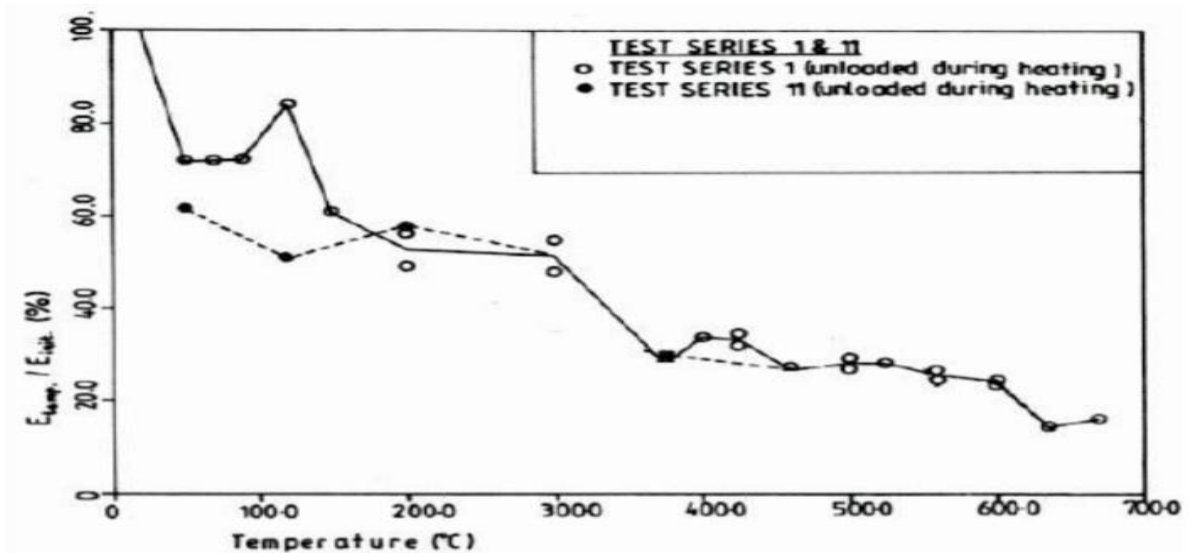


Fig III. 6. Evolution du module d'élasticité dynamique résiduel. [7]

III.5. L'éclatement du béton à haute température (Spalling) :

L'instabilité thermique, ou éclatement, est un phénomène brutal qui survient lors d'une exposition rapide au feu. Ce processus se manifeste par l'expulsion de fragments de béton, réduisant ainsi la section porteuse de la structure. Deux causes principales sont identifiées :

La pression de pore : accumulation de vapeur d'eau dans les pores. Les contraintes thermiques : gradients de température entre la surface et le cœur. Les bétons autoplaçants, en raison de leur structure très compacte, sont particulièrement sensibles à ce risque d'éclatement.

III.6 .Conclusion :

L'analyse de la littérature concernant le comportement thermique des bétons autoplaçants révèle une sensibilité accrue de ces matériaux face aux températures élevées. Cette vulnérabilité se traduit par une dégradation progressive des propriétés physiques et mécaniques ainsi que par un risque majeur d'instabilité thermique (éclatement). L'incorporation de granulats de verre et de plastique en substitution du sable constitue une variable déterminante que nous explorerons dans notre partie expérimentale. Il s'agira d'évaluer comment ces matériaux recyclés influencent la porosité et la résistance du BAP afin d'optimiser sa caractéristique en cas d'incendie.

Chapitre IV

Caractéristique des matériaux utilisés et composition du béton

CH IV : Caractéristique des matériaux utilisés et composition du béton

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous avons exposé les différents éléments entrant dans la formulation du béton autoplaçant ainsi que leurs propriétés, notamment : les granulats, le ciment, les ajouts minéraux, les adjuvants et l'eau.

IV.2. Caractéristiques des matériaux utilisés et composition du BAP :

Les essais réalisés sur les matériaux destinés à la fabrication du béton ont été effectués au laboratoire de génie civil de l'université de M'sila. Les matériaux employés sont :

- Le sable d'origine siliceuse provenant de DJAMAA WILAYA d'OUED SOUF
- Deux classes de gravier concassé (3/8, 8/16) d'origine calcaire de MAAZA M'sila
- Ciment CPA 42.5R issu de la cimenterie Djar Belahrach Biskra
- Déchets de verre (transparent)
- Déchets de plastique
- L'adjuvant : NOVSUPERLOW, superplastifiant à haut pouvoir réducteur d'eau fourni par SARL CHEMICAL INNOVATION - Ouled Bellil - Bouira (FICHE TECHNIQUE)
- L'ajout : filler (farine de marbre de fraction 0,08 mm)
- L'eau de gâchage et de conservation : eau potable du laboratoire

IV.2.1 Le sable

IV.2.1.1 Analyse granulométrique : [NF EN 933-1]

L'analyse granulométrique par tamisage consiste en un ensemble d'opérations permettant de séparer les éléments d'un échantillon selon leur taille, à l'aide de tamis à mailles carrées. Cette technique permet d'obtenir une représentation précise de la distribution massique des particules en fonction de leurs dimensions, contribuant ainsi à l'évaluation des caractéristiques et au classement du granulat.

Mode opératoire :

- Prélever une masse de 2 kg de matériau (sable sec).
- Peser chaque tamis vide afin de déterminer sa masse propre.
- Disposer une colonne de tamis propres et secs dont les ouvertures, de haut en bas, sont (en mm) : [5-2.5-1.25-0.63-0.315-0.16-0.08-fond].
- Introduire le sable dans la colonne de tamis puis soumettre celle-ci à une vibration à l'aide d'une tamiseuse électrique pendant 5 minutes.

CH IV : Caractéristique des matériaux utilisés et composition du béton

- Peser chaque tamis après tamisage.
- Le tamisage est considéré terminé lorsque la variation du refus est inférieure à 1 % entre deux cycles de vibration.

À la fin du tamisage, peser les refus (matière retenue) sur chaque tamis à 1 g près, soit M_i : masse du tamis (i) + sable.

- Déterminer la différence entre M_i et m_i (le tamis de plus grande ouverture correspond au refus partiel R_1 du tamis 1).
- Refaire la même opération avec le tamis directement inférieur.
- Ajouter le refus obtenu sur le deuxième tamis à R_1 , ce qui donne R_2 ($R_2 = R_1 + \text{refus partiel du tamis 2}$).
- Poursuivre de la même manière avec les autres tamis afin d'obtenir les refus cumulés $R_3, R_4 \dots R_n$, le tamisat étant déterminé par la relation correspondante.



Fig. IV. 1 un vibro- électrique . Tamis

CH IV : Caractéristique des matériaux utilisés et composition du béton

Tableau IV. 1 Analyse granulométrique du sable

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés		Tamisat (%)
		(g)	(%)	
5	0	0	0	100
2.5	6	6	0.4	99.96
1.25	56	62	4.13	95.87
0.63	918	980	65.33	34.67
0.315	399	1379	91.93	8.07
0.16	96	1475	98.33	1.67
Fond	18	1493	99.53	0.47

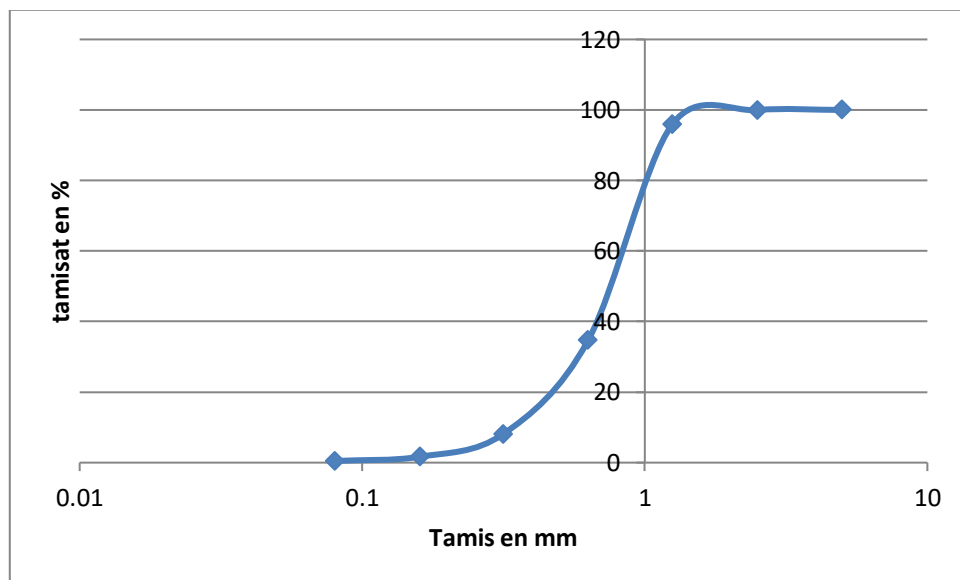


Fig IV. 2 Courbe granulométrique du sable

IV.2.1.2 Caractéristiques physiques du sable :

IV.2.1.2.1 La masse volumique absolue : [NF EN 1097-7]

Elle correspond à la masse de la matière par unité de volume de la matière solide pure (volume de la matière seule, sans tenir compte des pores internes des grains), après séchage à l'étuve à 105°C. Elle est exprimée en unités telles que (g/cm³, kg/m³, T/m³).

CH IV : Caractéristique des matériaux utilisés et composition du béton

Mode opératoire :

- Peser un échantillon sec : $M_1 = 300$ g de granulats. Remplir une éprouvette graduée avec un volume d'eau $V_1 = 300$ ml.
- Introduire les granulats dans l'éprouvette en éliminant les bulles d'air.
- Lire le nouveau volume V_2 .
- Calculer la masse volumique absolue : $\rho_{abs} = M / (V_2 - V_1)$.
- Refaire l'essai trois fois.

Tableau IV. 2 la masse volumique absolue du sable :

Designation	M (g)	V1(cm3)	V 2(cm3)	Pabs(g/cm 3)	Moyenne
Essais 1	300	300	423	2.43	2.51 (g/cm3)
Essais 2	300	300	415	2.60	
Essais 3	300	300	419	2.52	

IV.2.1.2.2 La masse volumique apparente : [NF EN 1097-6]

a) La masse volumique à l'état lâche :

Elle correspond à la masse des granulats occupant un volume donné sans compactage, c'est-à-dire dans un état naturel sans vibration ni serrage. Elle est exprimée généralement en (kg/m^3).

Mode opératoire :

- Peser un récipient vide de volume connu 1L (V).
- Remplir le récipient avec le sable sec sans tassement.
- Nivelier la surface sans compacter le matériau.
- Peser l'ensemble (récipient + sable) et noter la masse M .
- Calculer la masse volumique apparente à l'état lâche : $\rho = M_2 - M_1 / V$.

Tableau IV. 3 La masse volumique apparente à l'état lâche $V_R=1000$ m

Designation	M 1(g)	M 2 (g)	P app (g/cm^3)	Moyenne
Essais 1	0.126	1.517	1.545	1.541 (g/ cm^3)
Essais 2	0.126	1.513	1.541	
Essais 3	0.126	1.511	1.538	

IV.2.1.2.3 Équivalent de sable (ES) — [NF EN 933-8]

L'équivalent de sable constitue un indicateur quantitatif permettant de caractériser le degré de propreté d'un sable. Il reflète la teneur en éléments fins d'origine essentiellement argileuse, végétale ou organique, présents à la surface des grains. Ce terme désigne également l'essai normalisé mis en œuvre pour déterminer cet indicateur.

Mode opératoire

L'essai est réalisé selon la séquence procédurale suivante :

Phase de préparation :

Un échantillon de sable tamisé d'une masse supérieure à 500 g est prélevé, dont une prise d'essai de 120 g est extraite. L'éprouvette graduée est remplie de solution lavante jusqu'au premier repère, puis la prise d'essai y est introduite à l'aide d'un entonnoir. Des chocs latéraux répétés à l'aide de la paume de la main sont appliqués afin d'éliminer les bulles d'air. Le mélange est ensuite laissé au repos pendant 10 minutes.

Phase d'agitation et de lavage :

L'éprouvette est hermétiquement fermée à l'aide d'un bouchon en caoutchouc, puis soumise à 90 cycles d'agitation horizontale d'une amplitude de 20 cm en 30 secondes, réalisés manuellement ou à l'aide d'un agitateur mécanique. Le bouchon est ensuite retiré et rincé avec la solution lavante par le dessus, puis les parois internes de l'éprouvette sont nettoyées de la même manière.

Phase de décantation :

Le tube laveur est introduit dans l'éprouvette et animé d'un mouvement rotatif lent, accompagné de légères percussions, dans le but de décoller les particules de sable et de mettre en évidence les éléments fins argileux. Cette opération est poursuivie jusqu'à ce que le niveau de la solution lavante atteigne le deuxième repère. L'ensemble est alors laissé en décantation pendant 20 minutes afin de permettre la sédimentation complète des particules

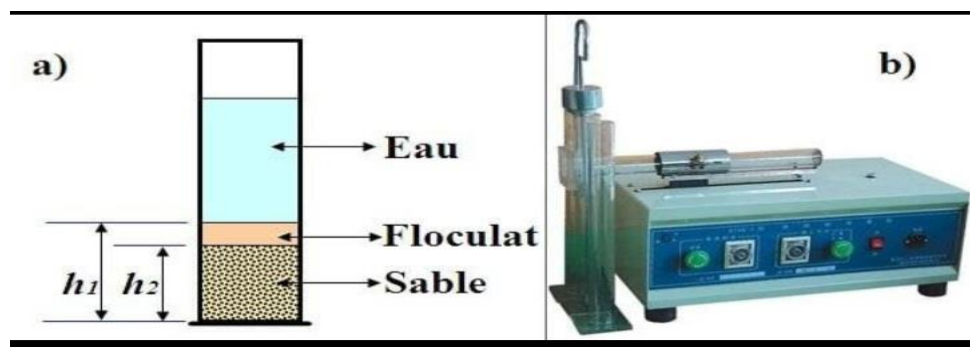


Fig IV. 3. Essai d'équivalent de sable

CH IV : Caractéristique des matériaux utilisés et composition du béton

a. Équivalent de sable visuel (E.S.V)

L'équivalent de sable visuel est déterminé par lecture directe des hauteurs à l'aide d'une règle graduée. Après la période de décantation de 20 minutes, deux mesures sont relevées :

- h1 : hauteur totale depuis le fond de l'éprouvette jusqu'au niveau supérieur du floculant
- h2 : hauteur de la partie sédimentée seule ($h_2 < h_1$)

La valeur de l'E.S.V est calculée par la relation :

$$\text{E.S.V} = (h_2 / h_1) * 100$$

Les résultats des trois essais sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.4 Résultats équivalent de sable visuel

Désignation	h1 (cm)	h2 (cm)	E.S.V(%)
Essai 1	10	8.8	88 %
Essai 2	10	9	90%
Essai 3	10	8.5	85%
Moyenne	—	—	87.6%

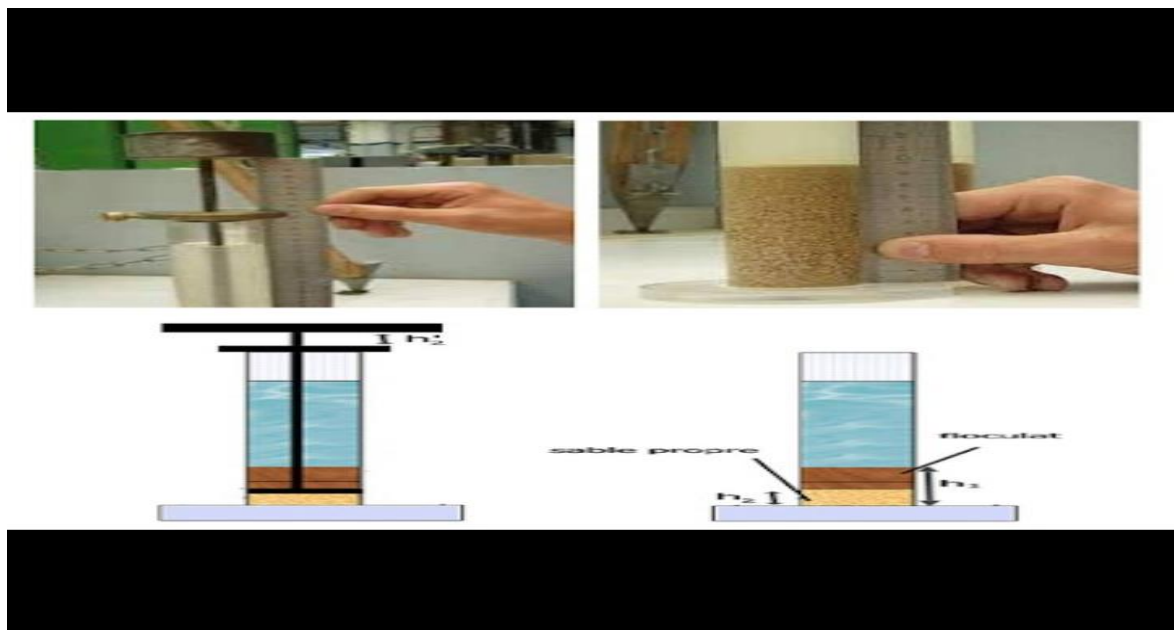


Fig .IV.4 Essai d'équivalent de sable

CH IV : Caractéristique des matériaux utilisés et composition du béton

b. Équivalent de sable au piston (E.S.P)

Contrairement à la méthode visuelle, cette méthode fait appel à un piston normalisé introduit délicatement dans l'éprouvette jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. Le manchon est alors bloqué et la hauteur h_2 est lue à l'aide de la règle insérée dans l'encoche du piston. Cette méthode offre une précision de mesure supérieure à la méthode visuelle.

La valeur de l'E.S.P est donnée par :

$$E.S.P = (h_2 / h_1) * 100$$

Les résultats obtenus sont les suivants :

Tableau IV.5 résultats équivalent de sable piston

Désignation	h_1 (cm)	h_2 (cm)	E.S.P (%)
Essai 1	10	8.4	84%
Essai 2	10	8	80%
Essai 3	10	7.6	76%
Moyenne	—	—	80%

Interprétation générale

La comparaison des deux méthodes montre des valeurs cohérentes, avec $(E.S.V)_{\text{moy}} = 80.21\%$ et $(E.S.P)_{\text{moy}} = 78.09\%$. L'écart observé entre les deux méthodes reste faible, ce qui confirme la fiabilité des mesures effectuées. Ces résultats classent le sable étudié dans la catégorie des sables propres, convenant parfaitement à la confection de bétons de haute qualité.

Tableau IV. 6 La classification de la nature sable en fonction d'équivalent de sable (E.S).[3]

E.S.V	E.S.P	Nature et qualité du sable
$E.S < 65$	$E.S < 60$	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité
$65 < E.S < 75$	$65 < E.S < 70$	Sable légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait
$75 < E.S < 85$	$70 < E.S < 80$	Sables propre à faible pourcentage de farine argileux

CH IV : Caractéristique des matériaux utilisés et composition du béton

		convient parfaitement pour des bétons de haute qualité
E.S> 85	E.S>80	Sable très propre : l'absence totale de fine argileuse risque d'entraîner d'un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par augmentation du dosage en eau

IV.2.2. Le gravier :

IV.2.2.1 Analyse granulométrique :

Les fractions de gravier utilisées sont le 3/8 et le 8/16

Tableau IV. 7 Analyse granulométrique du gravier 8/16

Tamis	Refus partiels(g)	Refus cumulés		Tamisât(%)
		(g)	(%)	
20	12	12	0.8	99.2
16	104	116	7.7	92.2
12.5	542	658	43.8	56.2
10	586	1244	82.9	17.2
8	223	1467	97.8	2.2
6.3	27	1494	99.6	0.4
Fond	2	1500	100	0

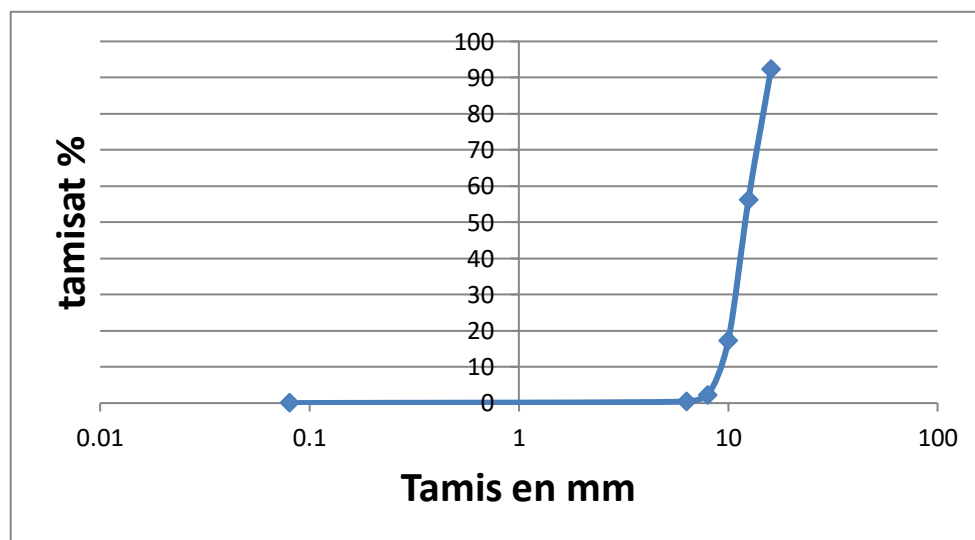


Fig IV. 5 Courbe granulométrique de Gravier (8/16)

CH IV : Caractéristique des matériaux utilisés et composition du béton

Tableau IV. 8 Analyse granulométrique du gravier 3/8

Tamis	Refus partiels(g)	Refus cumulés		Tamisât(%)
		(g)	(%)	
10	10	10	0.67	99.3
8	90	100	6.67	93.33
6.3	390	490	32.67	67.33
5	327	817	54.47	45.53
4	474	1291	86.07	13.93
3.15	152	1443	96.2	3.8
2.5	38	1481	98.73	1.27
Fond	19	1500	100	0

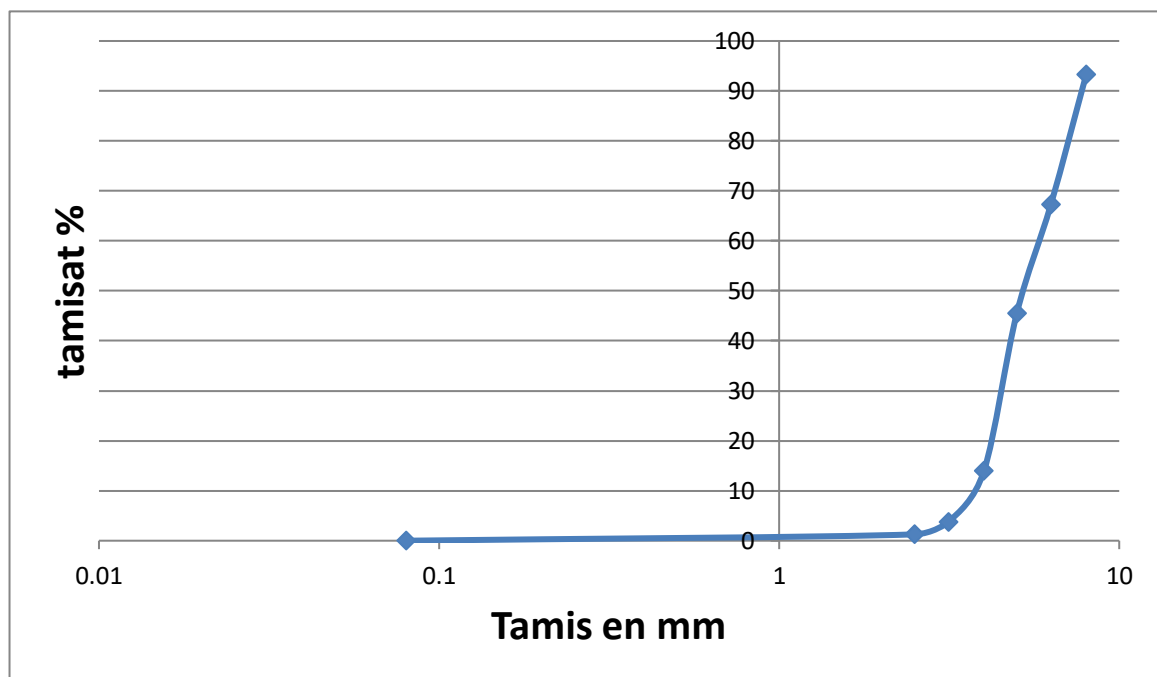


Fig IV. 6 Courbe granulométrique de Gravier (3/8)

IV.2.2.2 Caractéristiques physiques du gravier

2.2.2.1 La masse volumique apparente — [NF P 18-554]

La masse volumique apparente du gravier est déterminée en remplissant un récipient de volume intérieur connu avec des granulats, puis en pesant la quantité correspondante. Elle est calculée selon la relation suivante :

$$\rho_{app} = (M_2 - M_1) / V$$

CH IV : Caractéristique des matériaux utilisés et composition du béton

Où :

- V_r : volume du récipient
- M_2 : poids de l'ensemble (granulat + récipient)
- M_1 : poids du récipient vide

Mode opératoire :

- Peser le récipient vide $\rightarrow M_1$
- Verser les granulats dans le récipient par couches horizontales successives sous tassement régulier
- Araser la couche supérieure à l'aide d'une réglette pour obtenir une surface plane
- Peser l'ensemble (récipient + granulats) $\rightarrow M_2$
- Calculer la masse volumique apparente selon la formule : $\rho_{app} = (M_2 - M_1) / V$

Tableau IV.9 Masse volumique apparente du gravier

Designation	Gravier	M1 (g)	M2(g)	P app (g /cm3)	Moyenne
Essai 1	3 /8	115	1.309	1.32	1.30
Essai 2		115	1.288	1.30	
Essai 3		115	1.276	1.29	
Essai 1	8/16	115	1.190	1.32	1.32
Essai 2		115	1.196	1.33	
Essai 3		115	1.189	1.32	

IV.2.2.2 La masse volumique absolue du gravier

La masse volumique absolue représente la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine, les pores intérieurs des grains étant exclus. Elle est mesurée après passage à l'étuve à 105°C et exprimée en (g/cm³, kg/m³, T/m³). Elle est calculée par la relation :

$$\rho_{abs} = M / (V_2 - V_1)$$

CH IV : Caractéristique des matériaux utilisés et composition du béton

Mode opératoire :

- Sécher les échantillons de granulats à l'étuve à 105°C
- Peser trois échantillons secs de 200 g chacun → M
- Remplir l'éprouvette graduée avec un volume d'eau initial → $V_1 = 200$ ml
- Introduire les granulats dans l'éprouvette en chassant soigneusement les bulles d'air
- Lire le nouveau volume après introduction des granulats → V_2
- Calculer la masse volumique absolue selon : $\rho_{abs} = M / (V_2 - V_1)$
- Répéter l'opération 3 fois pour assurer la reproductibilité des résultats

Tableau IV.10 Masse volumique absolue du gravier

Designation	gravier	M (g)	V1(cm3)	V2(cm3)	P abs (g /cm3)	moyenne
Essai 1	3 /8	200	200	280	2.5	2.55
Essai 2				275	2.66	
Essai 3				280	2.5	
Essai 1	8/16	200	200	285	2.35	2.50
Essai 2				270	2.85	
Essai 3				286	2.32	

IV.2.3 Le ciment

Le ciment utilisé dans le cadre de cette étude est le ciment Portland composé (CPA — CEM I 42.5R), produit par la cimenterie Biskria. Ce type de ciment est particulièrement adapté à la confection de bétons à hautes performances, en raison de sa résistance mécanique élevée à court terme. Il est recommandé dans les situations où les délais de décoffrage sont réduits, ainsi que pour les opérations de bétonnage par temps froid (FICHE TECHNIQUE).



Fig IV. 7 ciment (ciment Biskria)

Tableau IV.11 Caractéristiques techniques du ciment Biskria (CEM I 42.5R)

Analyses chimiques (%)	Valeur
Perte au feu	2.6 – 3.7
Teneur en sulfates (SO ₃)	2.2 – 2.8
Teneur en Oxyde de Magnésium (MgO)	1.7 – 2.8
Teneur en Chlorures (Cl)	0.03 – 0.07
Composition Potentielle du Clinker — Selon Bogue (%)	Valeur
C ₃ S	56 – 66
C ₃ A	5.1 – 7.2
Propriétés physiques	Valeur
Consistance normale (%)	25.8– 26.4
Expansion à chaud (mm)	0.25 – 1.0
Temps de prise (min)	Valeur
Débit de prise	150– 190
Fin de prise	220– 250
Résistance à la compression	Valeur
2jours (MPa)	20 – 29
28jours (MPa)	42.5 – 52.5

IV.2.4 Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés au cours du malaxage du béton, à un dosage inférieur à 5% de la masse du ciment, dans le but de modifier ou d'améliorer les propriétés du mélange à l'état frais et/ou à l'état durci, conformément à la norme 934-2.

L'adjuvant retenu dans cette étude est le NOVA SUPERFLOW, un superplastifiant à haut pouvoir réducteur d'eau (Fiche Technique [1]).

IV.2.5 Les déchets de verre

Les déchets de verre désignent l'ensemble des produits verriers devenus inutilisables ou indésirables sous leur forme initiale, et destinés à être éliminés ou valorisés par recyclage. Ces déchets peuvent provenir de diverses sources, notamment les emballages en verre et les bouteilles. Le matériau utilisé dans cette étude présente un diamètre d'environ 5 mm et une couleur transparente.

IV.2.5.1 Analyse granulométrique du verre

L'analyse granulométrique par tamisage est une méthode permettant de séparer les composants d'un échantillon selon leur taille, au moyen de tamis à mailles carrées.

Tableau IV.12 Analyse granulométrique du verre

Tamis	Refus partiels(g)	Refus cumulés		Tamisât(%)
		(g)	(%)	
5	83	83	5.53	94.47
2.5	906	989	65.93	34.07
1.25	178	1167	77.8	22.2
0.63	154	1321	88.06	11.94
0.315	80	1401	93.40	6.6
0.16	55	1456	97.06	2.94
0.08	28	1484	98.93	1.07
Fond	13	1497	99.8	0

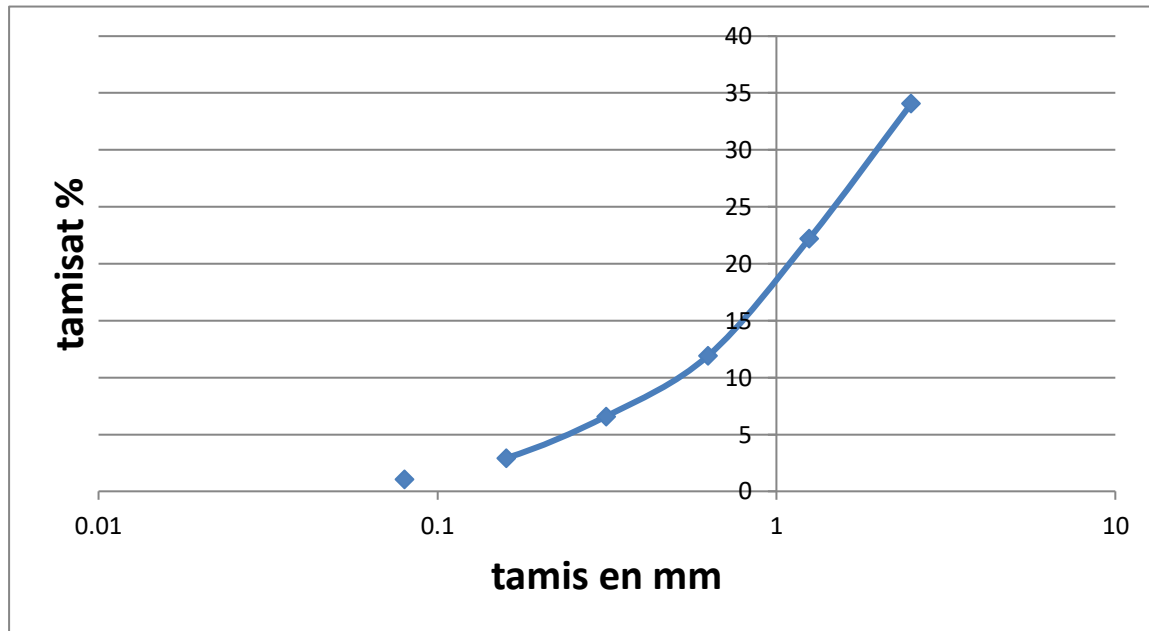


Fig IV. 8 Courbe granulométrique du verre

IV.2.5.2 Caractéristiques physiques du verre

IV.2.5.2.1 La masse volumique absolue

Elle est calculée par la relation :

$$\rho_{\text{abs}} = M / (V_2 - V_1)$$

Tableau IV.13 Masse volumique absolue du verre

Designation	M (g)	V1 (cm ³)	V2 (cm ³)	P abs(g /cm ³)	moyenne
Essais 1	200	200	236	2.47	2.43
Essais 2	200	200	236	2.47	
Essais 3	200	200	240	2.36	

IV.2.5.2.2 La masse volumique apparente du verre

a) La masse volumique à l'état lâche

La masse volumique apparente est calculée selon la relation :

$$\rho_{\text{app}} = (M_2 - M_1) / V_r$$

Tableau IV.14 Masse volumique apparente du verre à l'état lâche

Designation	M 1 (g)	M2 (g)	P app(g /cm ³)	Moyenne
Essais 1	115	1.273	1.28	1.29
Essais 2	115	1.296	1.31	
Essais 3	115	1.288	1.30	

IV.2.6. Caractérisation physique des granulats de plastique

L'utilisation des déchets plastiques comme substitut partiel du sable nécessite une caractérisation physique rigoureuse. Nous avons procédé à la détermination des masses volumiques (absolue et apparente) conformément aux normes en vigueur.

IV.2.6.1 analyse granulométrique du plastique :

L'analyse granulométrique a été réalisée afin de déterminer la répartition des dimensions des grains du plastique utilisé dans cette étude. Cet essai consiste à faire passer l'échantillon à travers une série de tamis de différentes ouvertures afin de calculer les refus cumulés et les tamisats. Les résultats obtenus permettent de tracer la courbe granulométrique et d'évaluer la distribution granulaire du matériau.

Tableau IV.15 Analyse granulométrique du Plastique

Tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulé (g)		Tamisat (%)
		(g)	(%)	
5	166	166	33.2	66.8
2.5	269	435	87	13
1.25	42	477	95.4	4.6
0.63	15	492	98.4	1.6
0.315	4	496	99.2	0.8
0.16	3	499	99.8	0.2
Fond	1	500	100	0

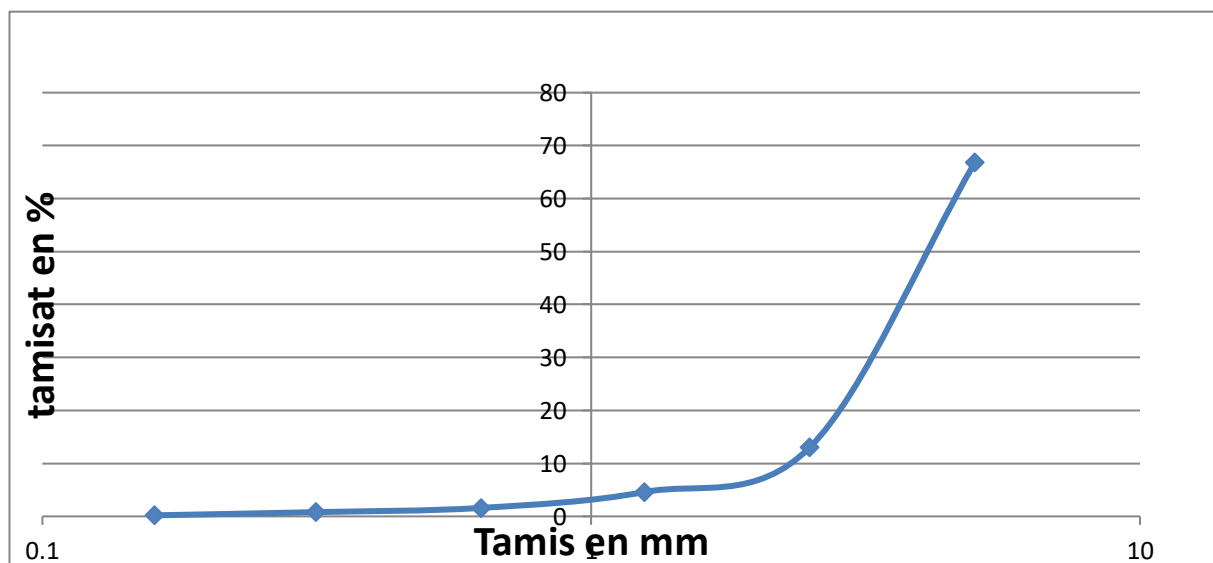


Fig IV. 8 Courbe granulométrique du plastique

IV.2.6.2 Masse volumique absolue

CH IV : Caractéristique des matériaux utilisés et composition du béton

La masse volumique absolue du plastique recyclé a été déterminée par la méthode de l'éprouvette graduée. Cette propriété est essentielle pour le calcul de la composition du béton et l'analyse de sa structure interne. Après trois essais, nous avons obtenu une valeur moyenne de 353 kg/m^3 . Cette valeur, nettement inférieure à celle d'un sable naturel (environ 2600 kg/m^3), confirme la légèreté de ce matériau.

Tableau IV.16 Masse volumique absolue du plastique

designation	M (g)	V1 (cm 3)	V2 (cm3)	P abs(g /cm3)	Moyenne
Essais 1	100	200	505	0.328	0.353
Essais 2	100	200	490	0.345	
Essais 3	100	200	460	0.385	

IV.2.6.3 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente permet de quantifier la masse du matériau occupant une unité de volume, incluant les vides entre les grains. Les mesures effectuées sur un échantillon sec de plastique ont donné une valeur moyenne de 309 kg/m^3 . Le rapport entre la masse volumique apparente et absolue indique un indice de vide important, ce qui pourrait influencer la maniabilité et la porosité du béton autoplaçant (BAP) à l'état frais et durci. $V = 1000 \text{ ml}$

Tableau IV.17 Masse volumique apparent du plastique

designation	M 1 (g)	M2 (g)	P app(g /cm3)	moyenne
Essais 1	218	517	0.299	0.309
Essais 2	218	531	0.313	
Essais 3	218	534	0.316	

IV.2.7 Le filler (marbre)

Le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire, constituée principalement de cristaux de calcite. Il est utilisé sous forme de fines dans la composition du béton afin d'améliorer la compacité et les propriétés rhéologiques du mélange.

CH IV : Caractéristique des matériaux utilisés et composition du béton

Tableau IV.18 Caractéristiques physiques du marbre

Propriétés physiques	Fine Marbre
Masse volumique apparente (g/cm ³)	0.83
Densité	2.67
Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)	448

Tableau IV.19 Caractéristiques chimiques du marbre

Analyse chimique	Fine marbre
SiO ₂	1.47
CaO	55.3
MgO	0.01
Fe ₂ O ₃	0.14
Al ₂ O ₃	0.35
Na ₂ O ₃	0.12
K ₂ O	0.04
SO ₃	0.01
Perte au feu	42.56

IV.2.8. L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisé est une eau potable du laboratoire de génie civil.

Tableau IV. 20 Caractéristiques chimiques de l'eau de gâchage

La mesure	Teneur en eau
Degré de température	24.7
PH	7.78
Conductibilité	1799
Chlore Cl ⁻	234.3
Sulfate SO ₄ ²⁻	351.6
Magnésium Mg ²⁺	110.8
Calcium Ca ²⁺	267.2
Sédiment sec	1412
Eligibilité d'oxydation en eau	1024

IV.3 Formulation du béton auto-plaçant (BAP)

IV.3.1. Préparation de la gâchée

La préparation du béton auto-plaçant requiert une rigueur et une précision supérieures à celles exigées pour un béton ordinaire. Afin de réaliser les différents essais sur béton frais dans de bonnes conditions, une méthodologie stricte doit être respectée [2].

Le premier paramètre à prendre en compte est la capacité du malaxeur utilisé. Une fois les proportions de chaque constituant déterminées, le mode opératoire suivant est appliqué :

1. Vérifier l'état et le nombre des moules prismatiques et cubiques nécessaires aux essais, et les enduire d'huile de décoffrage [2]
2. Rassembler l'ensemble du matériel nécessaire à la réalisation des essais
3. S'assurer que les matériaux ne sont pas humides ; dans le cas contraire, les sécher préalablement à l'étuve
4. Préparer la quantité d'eau requise pour la gâchée, en y incorporant le superplastifiant dans un quart de l'eau de gâchage
5. Peser les matériaux secs (gravier, sable, ciment, marbre) et les introduire dans le malaxeur
6. Mettre le malaxeur en marche afin d'homogénéiser le mélange sec
7. Ajouter progressivement le premier quart de l'eau de gâchage (contenant l'adjuvant) tout en maintenant le malaxeur en fonctionnement
8. Incorporer ensuite les trois quarts restants de l'eau de gâchage graduellement [2]
9. Effectuer immédiatement les essais après arrêt du malaxage ; chaque essai est réalisé au moins deux fois afin de valider les valeurs obtenues
10. Pour un BAP avec déchets de verre et ou de plastique : substituer une partie du sable par les déchets en volume, selon les taux suivants : 10% et 15% de verre, 10% et 15% de plastique, ainsi que les combinaisons 10%V+10%P, 5%V+10%P et 10%V+5%P
11. Remplir les éprouvettes en deux à trois couches, sans vibration [2]

IV.3.2. Conservation des éprouvettes

Après la gâchée, qu'il s'agisse d'un béton ordinaire ou d'un BAP, les moules sont conservés dans une pièce à température ambiante et démoulés après 24 heures d'hydratation du ciment [2].

IV.3.3. Formulation du béton auto-plaçant

La formulation retenue dans cette étude ne s'appuie pas sur une méthode de formulation classique. Les proportions des constituants ont été déterminées en respectant les conditions

CH IV : Caractéristique des matériaux utilisés et composition du béton

nécessaires à garantir l'autoplaçabilité, en se basant sur des compositions issues de la littérature spécialisée [2].

Les paramètres de base adoptés pour la composition d'1 m³ de béton sont les suivants :

- Rapport G/S = 1
- Rapport E/C = 0.5
- Dosage en ciment élevé : C = 420 kg/m³
- Pourcentage en ajouts déterminé comme suit :
 - Filler : F = 10% × C
 - Superplastifiant : SP = 1.5% × C [2]

IV.3.3.1 Les constituants présents dans le mélange

La relation volumique de base est :

$$G + S + C + E + F + SP = 1000 \text{ litres}$$

Eau (E) :

$$E/C = 0.5 \rightarrow E = 420 \times 0.5 = 210 \text{ kg/m}^3 = 210 \text{ l/m}^3$$

Filler (F) :

$$F = 10\% \times 420 = 42 \text{ kg/m}^3$$

La densité absolue du marbre étant égale à 2.67 :

$$42 / 2.67 = 15.73 \text{ l/m}^3$$

Superplastifiant (SP) :

$$SP = 1.5\% \times 420 = 6.3 \text{ kg/m}^3$$

La densité absolue du SP étant égale à 1.05 :

$$6.3 / 1.05 = 6 \text{ l/m}^3$$

Ciment (C) :

La densité absolue du ciment étant égale à 3.1 :

$$420 / 3.1 = 135.48 \text{ l/m}^3$$

Volume de la pâte

$$C + E + F + SP = 135.48 + 210 + 15.73 + 6 = 367.21 \text{ litres}$$

Volume des granulats

$$G + S = 1000 - 367.21 = 632.79 \text{ litres}$$

Avec G/S = 1 :

$$G = S = 316.395 \text{ l/m}^3$$

Répartition du gravier en deux fractions égales (50% G 3/8 et 50% G 8/16) :

- Gravier (3/8) = 50% × 316.395 = 158.19 l/m³

CH IV : Caractéristique des matériaux utilisés et composition du béton

- Gravier (8/16) = $50\% \times 316.395 = 158.19 \text{ l/m}^3$

En termes de masse :

- Gravier (3/8) = $158.19 \times 2.55 = 403.4 \text{ kg/m}^3$
- Gravier (8/16) = $158.19 \times 2.50 = 348.02 \text{ kg/m}^3$
- Sable = $316.4 \times 2.51 = 794.164 \text{ kg/m}^3$

Tableau IV.21 Composition des matériaux pour 1 m³ de béton

Composant	Volume (l/m ³)	Masse volumique (kg/m ³)
Gravier 3/8	158.19	403.40
Gravier 8/16	158.19	348.02
Sable	316.4	794.164
Ciment	135.48	420
Eau	210	210
Superplastifiant	6	6.3
Filler (marbre)	15.73	42

IV.3.3.2 Les déchets de verre et de plastique

Les déchets de verre proviennent de bouteilles en verre ou de déchets industriels, avec une densité de 2.43 g/cm³. Les déchets de plastique sont également incorporés. La substitution est réalisée en volume par rapport au sable.

IV.3.3.3 Les compositions des différents bétons

Les mélanges étudiés dans le cadre de cette étude sont au nombre de 8, répartis comme suit
Substitution simple :

Tableau IV.22. Désignation des mélanges — substitution simple

Désignation	Description
BAP T	BAP témoin — 0% de substitution
BAP 1	BAP + 10% déchets de verre
BAP 2	BAP + 15% déchets de verre
BAP 3	BAP + 10% déchets de plastique
BAP 4	BAP + 15% déchets de plastique

CH IV : Caractéristique des matériaux utilisés et composition du béton

Substitution combinée (verre + plastique) :

Tableau IV.23. Désignation des mélanges — substitution combinée

Désignation	Description
BAP 5	BAP + 10% verre + 10% plastique
BAP 6	BAP + 5% verre + 10% plastique
BAP 7	BAP + 10% verre + 5% plastique

IV.4. Conclusion

Les essais physiques, ainsi que les analyses chimiques et minéralogiques réalisés dans différents laboratoires, offrent une vue d'ensemble des principales caractéristiques des matériaux utilisés dans la formulation des bétons. Ces bétons seront étudiés dans le chapitre suivant du point de vue rhéologique et mécanique.

La connaissance de ces caractéristiques contribue de manière significative à l'interprétation et à la discussion des résultats expérimentaux.

Chapitre V

Techniques expérimentales
des BAP

V.1. Introduction

Ce chapitre présente l'ensemble des essais réalisés sur le béton auto-plaçant dans le cadre de cette étude, menée au laboratoire de génie civil de l'Université de M'Sila. Ces essais visent à déterminer les propriétés du béton auto-plaçant aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

V.2. Essais de caractérisation du béton auto-plaçant à l'état frais

De nombreux travaux de recherche ont été consacrés à l'étude du comportement des bétons autoplaçants à l'état frais et à l'état durci. Les tests les plus couramment employés pour caractériser les BAP à l'état frais sont les suivants :

- La détermination de la consistance au cône d'Abrams
- La détermination du risque de blocage à l'aide de la boîte en L
- La détermination de la résistance à la ségrégation par l'évaluation de la stabilité au tamis

V.2.1 Détermination de la consistance au cône d'Abrams — NF EN 12 350-8

L'essai d'étalement constitue l'essai le plus simple à mettre en œuvre pour évaluer la consistance du béton. Il est réalisé selon le même principe que l'essai d'affaissement au cône d'Abrams, et permet également de détecter l'éventuelle apparition d'une ségrégation horizontale. Cet essai, réalisable directement sur chantier, ne nécessite que des échantillons de faible volume. La valeur d'étalement visée pour un BAP est généralement comprise entre 60 et 75 cm.

V.2.1.1 Matériel utilisé

- Une plaque carrée de 120 cm de côté
- Un cône d'Abrams
- Une règle graduée en centimètres

V.2.1.2 Mode opératoire

1. Placer la plaque sur un support stable et parfaitement horizontal
2. Humecter la surface de la plaque afin d'éviter l'adhérence du béton, puis essuyer l'excès d'eau avec un chiffon
3. Positionner le cône d'Abrams au centre de la plaque et le remplir de béton de manière continue jusqu'au sommet
4. Araser la surface si nécessaire à l'aide d'une truelle, puis nettoyer le pourtour de la plaque avec un chiffon humide
5. Soulever le cône verticalement à l'aide des poignées

6. Mesurer le diamètre d'étalement final sur deux côtés perpendiculaires et noter les deux valeurs
7. Si les deux valeurs diffèrent de plus de 5 cm, l'essai est invalidé et doit être renouvelé
8. Le résultat final est la moyenne des deux mesures : Étalement = $(D1 + D2) / 2$



Fig V. 1 Essai d'étalement

V.2.2 Détermination du risque de blocage à l'aide de la boîte en L -NF EN 12 350-10

Cet essai est réalisé à l'aide d'une boîte en L afin d'évaluer la mobilité du béton en milieu confiné et de s'assurer que sa mise en place ne sera pas compromise par des phénomènes de blocage inadmissibles, tels que le blocage par les armatures. Le critère d'acceptabilité pour un BAP est un rapport $H2/H1 \geq 0.8$.

V.2.2.1 Objet de la boîte en L

La boîte en L permet de tester la capacité du béton à s'écouler en milieu confiné tout en vérifiant l'absence de risque de blocage lors de la mise en place.



Fig V. 2 Essai de la boîte L

V.2.2.2 Mode opératoire

1. Remplir la partie verticale de la boîte en L avec le béton frais
2. Attendre une minute avant de soulever la trappe, permettant ainsi au béton de s'écouler librement à travers la grille
3. Mesurer la hauteur du béton dans la partie verticale (H1) et la hauteur à l'extrémité de la partie horizontale (H2) après stabilisation de l'écoulement
4. Calculer le rapport H2/H1 et vérifier qu'il est supérieur ou égal à 0.8

V.2.3 Détermination de la résistance à la ségrégation par l'évaluation de la stabilité au tamis — NF EN 12 350-11

V.2.3.1 Matériel utilisé

- Un seau de 10 litres équipé d'un couvercle
- Un tamis de 5 mm ainsi qu'un fond
- Une balance de précision (pesée minimale de 20 grammes)

V.2.3.2 Mode opératoire

Cet essai permet de qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation. Après malaxage, le béton est versé dans le seau. Le temps d'attente entre l'arrêt du malaxage et le prélèvement doit être inférieur à 30 secondes. Un échantillon de béton de 5 kg est déposé sur un tamis à mailles de 5 mm. Le seau est ensuite recouvert pour protéger le béton de la dessiccation. Après 5 minutes, la quantité de laitance ayant traversé le tamis est pesée. L'indice de stabilité est calculé par la relation suivante :

$$II = (\text{Plaitence} / \text{Pechantillon}) * 100$$



Fig V. 3 Essai de la stabilité au tamis

Le classement des bétons est effectué selon le tableau suivant :

Tableau V.1 Classement de la formulation selon le pourcentage de laitance

% de laitance (II)	Classement
$0 \leq II \leq 15$	Stabilité satisfaisante
$15 < II \leq 30$	Stabilité critique
$II > 30$	Stabilité très mauvaise (béton inutilisable)

V.2.4 La masse volumique du béton auto-plaçant — NF EN 12 350-6

Après avoir été essuyées ou nettoyées, les éprouvettes sont pesées avec une précision inférieure à 1/1000. La masse volumique est ensuite calculée en divisant la masse par le volume de l'éprouvette, selon la relation :

$$\rho = M / V \text{ (exprimée en kg/dm}^3\text{)}$$

V.3. Essais de caractérisation du béton auto-plaçant à l'état durci

V.3.1 Essai de compression — NF EN 12390-3

a. But de l'essai

Cet essai a pour objectif de déterminer la résistance à la compression du béton. Il est réalisé sur des éprouvettes cubiques de dimensions normalisées 10×10×10 cm³.

b. Principe de l'essai

1. Après malaxage, remplir un moule cubique normalisé en 3 couches sans vibration
2. Procéder au démoulage après 48 heures
3. Immerger les éprouvettes dans un bac d'eau à une température moyenne de 20°C
4. Déterminer la résistance à 28 jours

c. Conduite de l'essai

À l'issue de la période de cure, l'éprouvette est retirée du bac d'eau et laissée à sécher pendant 24 heures. Elle est ensuite placée entre les mâchoires de la presse d'essai, et la force ayant provoqué la rupture est enregistrée en une seule lecture, notée F. La résistance à la compression est calculée par :

$$R_c = F / S$$

Où S = 100 cm² est la section de l'éprouvette et F la force de rupture.



Fig .V.4 Essai de compression

V.3.2 Essai de flexion — NF EN 12390-5

a. But de l'essai

Cet essai a pour objectif de déterminer la résistance à la traction du béton par flexion. Il consiste à soumettre un prisme de dimensions $(7 \times 7 \times 28)$ cm³ à un écrasement par flexion trois points, placé horizontalement entre deux plateaux d'une presse.

b. Conduite de l'essai

Lors d'un essai de flexion trois points, la poutre en béton est soumise en sa partie supérieure à des contraintes de compression, et en sa partie inférieure à des contraintes de traction. Le béton résistant beaucoup moins à la traction qu'à la compression, la rupture se produit en zone tendue. La contrainte de traction par flexion est notée σ_{tf} . Compte tenu du comportement non élastique du béton au voisinage de la rupture, un terme correctif de 0.6 est appliqué, soit :

$$\sigma_{tf} = 3FL / (2a^2) \quad \sigma_t = 0.6 \times \sigma_{tf}$$



Fig .V.4 Essai de Flexion

V.3.3 Mesure de la porosité à l'eau (Peau) — NF P 18 459

La porosité accessible à l'eau est déterminée à partir de trois mesures de masse effectuées sur chaque éprouvette, selon le protocole suivant :

Définition des grandeurs mesurées :

- M_{eau} : masse de l'éprouvette pesée en immersion hydrostatique (sous l'eau)
- M_{sat} : masse de l'éprouvette saturée d'eau, pesée dans l'air
- M_{sec} : masse de l'éprouvette sèche, pesée dans l'air après séchage à $T^\circ = 105^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante (deux pesées consécutives espacées de 24h ne s'écartant pas de plus de 0.05%)

La porosité accessible à l'eau est calculée par la relation suivante :

$$Peau = (M_{\text{sat}} - M_{\text{sec}}) / (M_{\text{sat}} - M_{\text{eau}}) * 100$$



Fig V.6 : Essai de porosité à l'eau.

V.4. Conclusion

Ce chapitre a présenté l'ensemble des techniques expérimentales mises en œuvre pour caractériser le béton auto-plaçant dans les deux phases de son comportement. Les essais à l'état frais comprennent l'étalement au cône d'Abrams, l'essai à la boîte en L, la stabilité au tamis et la masse volumique. Les essais à l'état durci portent sur la résistance à la compression, la résistance à la traction par flexion, ainsi que d'autres essais complémentaires. L'ensemble de ces résultats sera analysé et discuté dans le chapitre suivant.

Chapitre VI

Résultats et Discussions

1. Introduction :

Cette étude vise à évaluer l'effet de la substitution partielle du sable par des matériaux recyclés, notamment le verre broyé et le plastique fragmenté, dans la composition du béton autoplaçant (BAP). Cette évaluation est conduite à travers une comparaison systématique des propriétés de ce type de béton avec celles du béton autoplaçant de référence, dépourvu de ces ajouts, afin de vérifier si la substitution partielle de ces matériaux recyclés est en mesure de maintenir le même niveau de qualité, ou d'atteindre des performances mécaniques et rhéologiques supérieures par rapport au béton autoplaçant conventionnel.

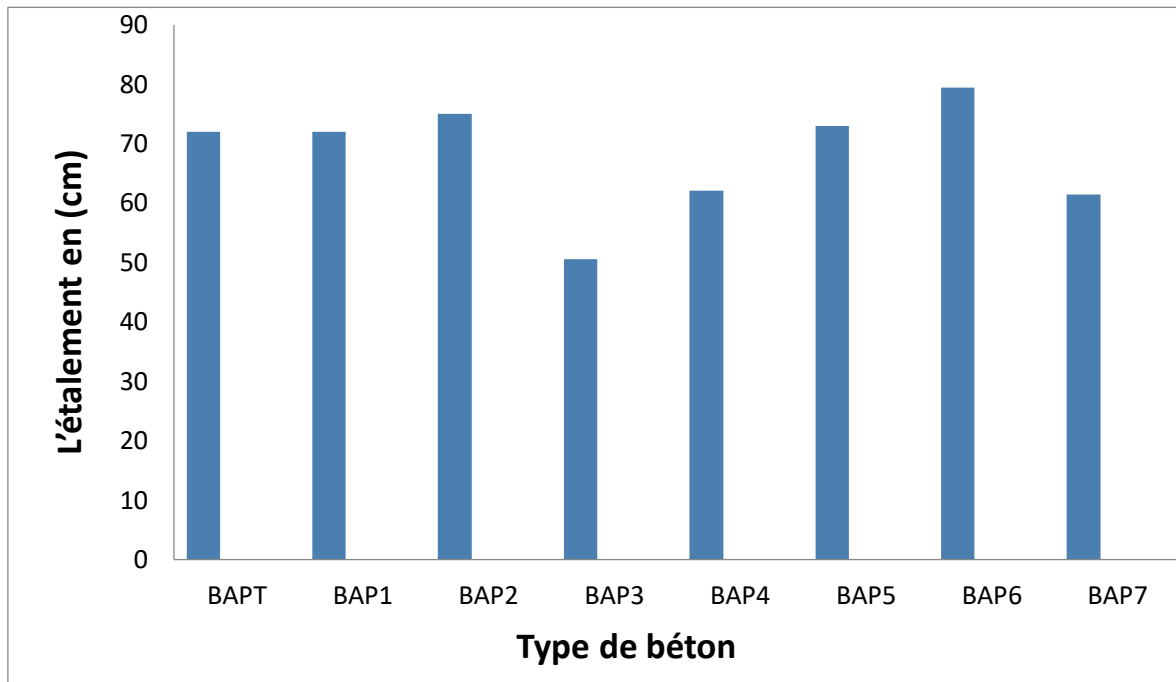
2. Résultats des essais à l'état frais :

Dans cette partie de l'étude, les méthodologies recommandées par l'Association Française de Génie Civil (AFGC) ont été adoptées afin de réaliser une série d'essais normalisés sur les mélanges préparés, comprenant des formulations incorporant des proportions partielles de verre broyé et de particules de plastique recyclé en substitution partielle du sable, dans le but d'analyser avec précision les propriétés du béton à l'état frais et de déterminer leur conformité aux exigences rhéologiques du béton autoplaçant.

Tableau VI. 1 Résultats des essais à l'état frais

Type de béton	L'étalement (cm)	Stabilité au tamis (%)	La boîte en L (H2/H1)(cm)	La masse volumique (kg /m3)
BAPT	73	8.4	0.89	2406
BAP1	72	6.88	0.87	2320
BAP2	75	11 .3	0.9	2313
BAP3	50.6	6.48	0.46	2294
BAP4	62 .05	7.31	0.63	2199
BAP5	73	10.32	0.83	2242
BAP6	79.5	13.8	0.66	2240
BAP7	61.5	11.74	0.83	2332

2.1 Essais d'étalement au cône d'Abram's :

**Fig. VI.1** L'étalement en fonction du type de béton**Remarque :**

La figure VI.1 présente les valeurs d'étalement selon le type de béton. On remarque que la formulation BAP1 (0%) a enregistré un étalement de 73 cm, ce qui représente la valeur de référence du béton témoin sans substitution. La formulation BAP2 (10%) montre une légère diminution, avec une valeur d'étalement de 72 cm, ce qui peut être attribué à l'absorption partielle des particules de verre ajoutées.

En revanche, les formulations BAP3 et BAP4 présentent une augmentation progressive, atteignant toutes les deux une valeur de 75 cm, soit la valeur maximale enregistrée parmi les quatre formulations.

Ces résultats indiquent que l'augmentation du taux de substitution du sable par les granulats du verre et plastique améliore la fluidité du béton à l'état frais à partir d'un taux de 10 %, tout en restant dans les limites normatives des bétons autoplacants (SF1 : 55–65 cm / SF2 : 66–75 cm). Cela confirme également l'intérêt de l'utilisation des déchets de verre et plastique comme matériau de substitution écologique et performant.

2.2 Essais de stabilité au tamis :

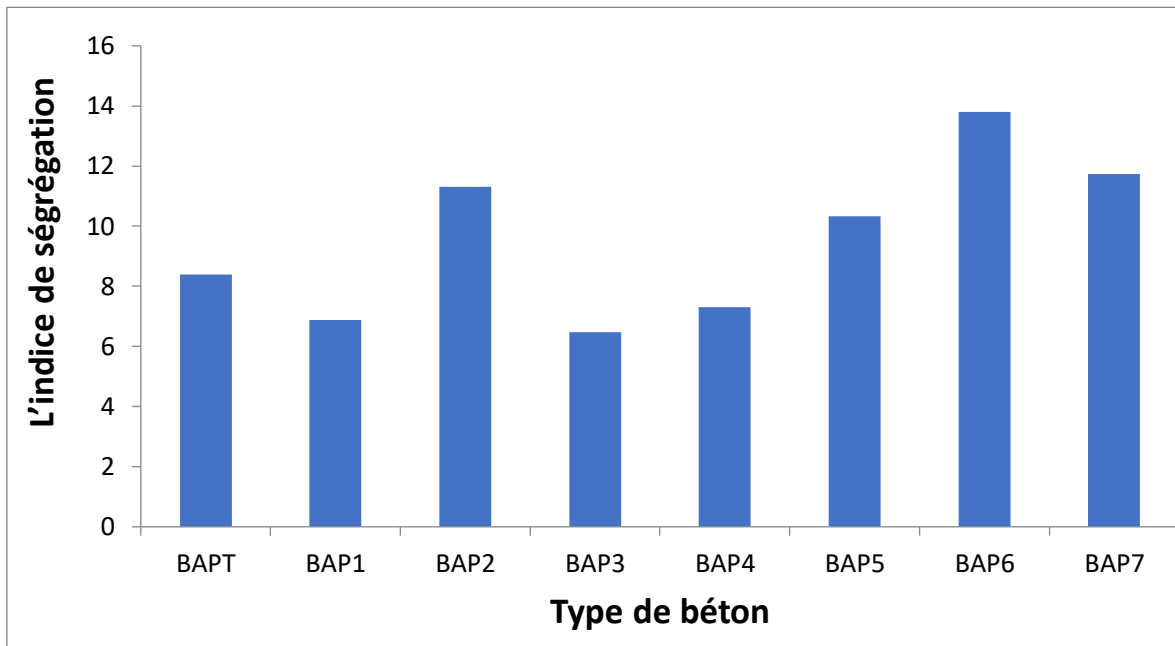


Fig. VI.2 L'indice de ségrégation en fonction de type de béton

Remarque :

La figure VI.2 présente les valeurs de l'indice de ségrégation en fonction du type de béton. On constate que toutes les formulations ont enregistré des valeurs comprises entre 6,48% et 13,8%, ce qui reste dans les limites normatives acceptables pour les bétons autoplaçants ($\leq 15\%$).

La formulation témoin BAPT affiche une valeur de ségrégation de 8,14%, tandis que BAP1 présente une légère diminution avec 6,88%, témoignant d'une bonne stabilité. La formulation BAP2 enregistre une valeur de 11,3%, alors que BAP3 atteint la valeur la plus faible avec 6,48%, ce qui reflète une excellente résistance à la ségrégation.

En revanche, la formulation BAP6 enregistre la valeur la plus élevée avec 13,8%, bien qu'elle reste dans la limite admissible. Les formulations BAP5 et BAP7 présentent des valeurs intermédiaires de 10,32% et 11,74% respectivement.

Ces résultats indiquent que l'ensemble des formulations étudiées présente une résistance acceptable à la ségrégation, confirmant ainsi leur stabilité à l'état frais et leur aptitude à être utilisées comme bétons autoplaçants.

2.3 Essais de la boîte en L :

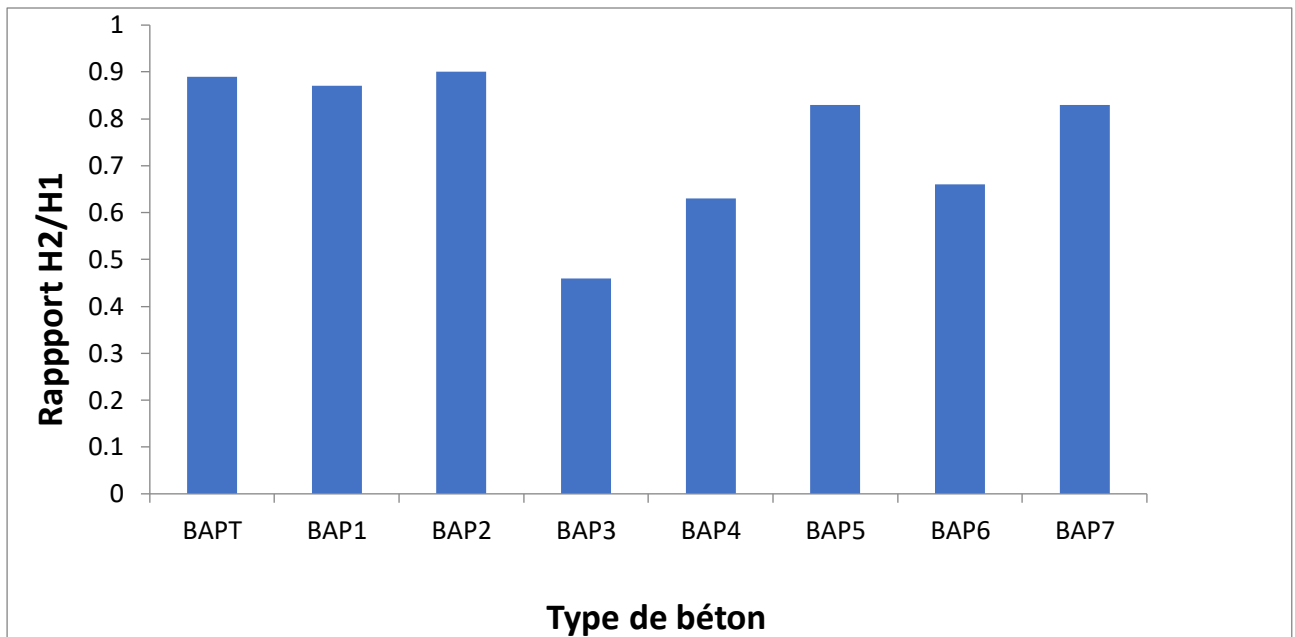


Fig. VI.3 Le taux de remplissage en fonction de type de béton

Remarque :

La figure VI.3 présente les valeurs du rapport H2/H1 en fonction du type de béton. On constate que les formulations BAPT, BAP1 et BAP2 satisfont la condition normative ($H2/H1 \geq 0,80$), avec des valeurs respectives de 0,89, 0,83 et 0,87, indiquant une bonne capacité de passage.

En revanche, les formulations BAP3, BAP4, BAP6 et BAP7 présentent des valeurs inférieures au seuil requis, ce qui reflète une capacité de remplissage insuffisante. Quant à BAP5, sa valeur de 0,76 reste légèrement en dessous de la limite normative.

Ces résultats confirment que l'augmentation excessive du taux de substitution influence négativement la fluidité et la capacité de passage du béton à travers les armatures.

2.4 Essais de la masse volumique :

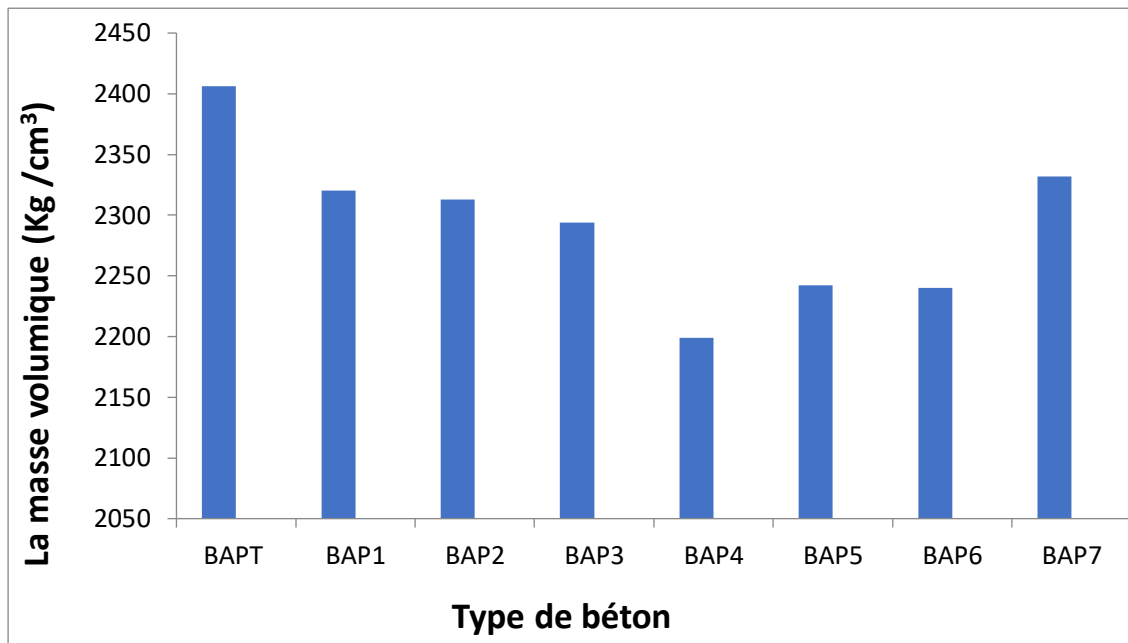


Fig. VI. 4 La masse volumique en fonction de type de béton

Remarque :

La figure VI.4 présente les valeurs de la masse volumique en fonction du type de béton. On constate que la formulation témoin BAPT enregistre la valeur la plus élevée avec 2406 kg/m³, ce qui est attendu pour un béton sans substitution.

On remarque une tendance générale à la diminution de la masse volumique avec l'augmentation du taux de substitution, notamment pour BAP3 et BAP4 qui affichent les valeurs les plus faibles, en raison de la densité plus faible du matériau de substitution par rapport au ciment.

Cependant, BAP7 enregistre une remontée notable de la masse volumique, se rapprochant des valeurs des premières formulations, ce qui peut s'expliquer par la combinaison des proportions utilisées dans cette formulation.

Dans l'ensemble, toutes les valeurs restent dans la plage normale des bétons autoplaçants (2200 – 2500 kg/m³), confirmant la bonne compacité de l'ensemble des mélanges étudiés.

3. Résultats des essais à l'état durci :

Les moules utilisés pour la confection des éprouvettes sont de forme : Cubique (10x10x10cm), Prismatique (7x7x28 cm) Après le démoulage les éprouvettes doit être conservées sous l'eau à une température de 20°C.

Les essais de compression et de traction par flexion après 30 j à long terme Les essais de résistance à la traction par flexion et à la compression ont été divisés en deux parties : la première concerne les éprouvettes conservées à 20°C (température ambiante), et la seconde porte sur les éprouvettes exposées à haute température, afin d'évaluer le comportement mécanique du béton sous l'effet thermique.

3.1 Résistance à la compression

3.1.1- l'effet des déchets :

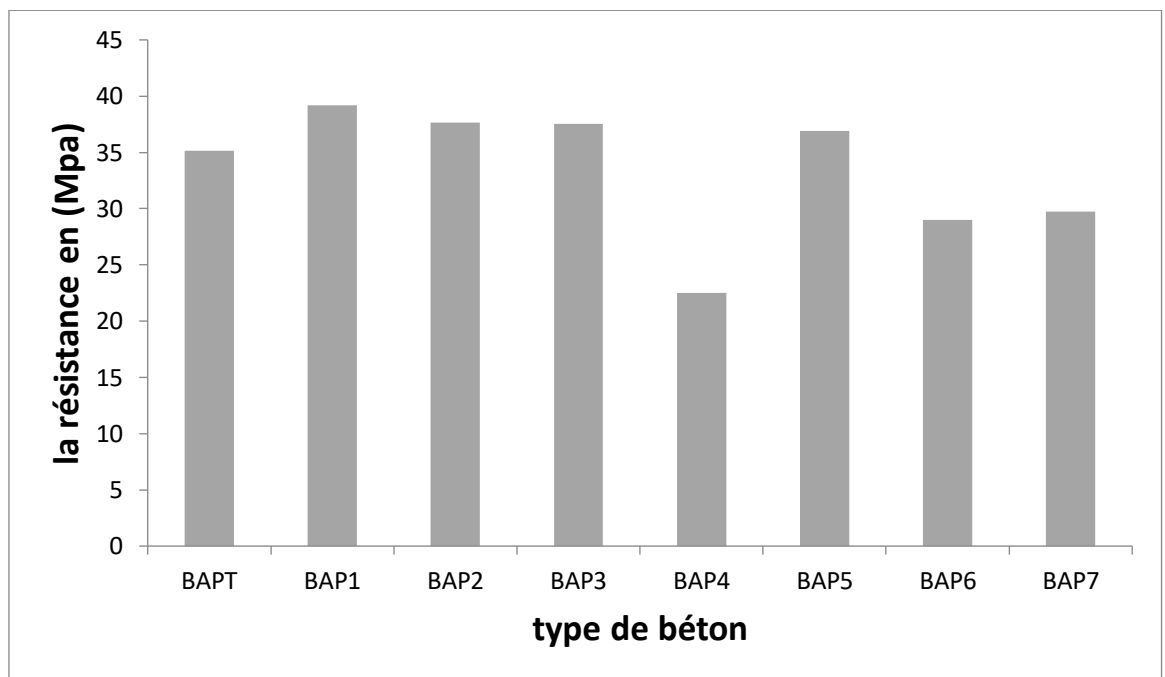


Fig. VI 5 La résistance à la compression en fonction de type de béton

Remarque :

La figure VI.5 présente les valeurs de la résistance à la compression à 20°C en fonction du type de béton. On constate que la formulation témoin BAPT enregistre une valeur de 35 MPa, tandis que BAP1 affiche la valeur la plus élevée avec environ 39 MPa, ce qui indique un effet positif du taux de substitution utilisé.

Les formulations BAP2 et BAP3 présentent des valeurs proches de 37 MPa, légèrement supérieures au témoin. En revanche, BAP4 enregistre une chute notable avec une valeur

d'environ 22 MPa, ce qui peut être attribué à l'augmentation excessive du taux de substitution affectant la cohésion de la matrice cimentaire.

Les formulations BAP5, BAP6 et BAP7 affichent des valeurs comprises entre 28 et 35 MPa. Ces résultats montrent qu'il existe un taux de substitution optimal au-delà duquel la résistance à la compression commence à diminuer.

3.1.2- À la haute température :

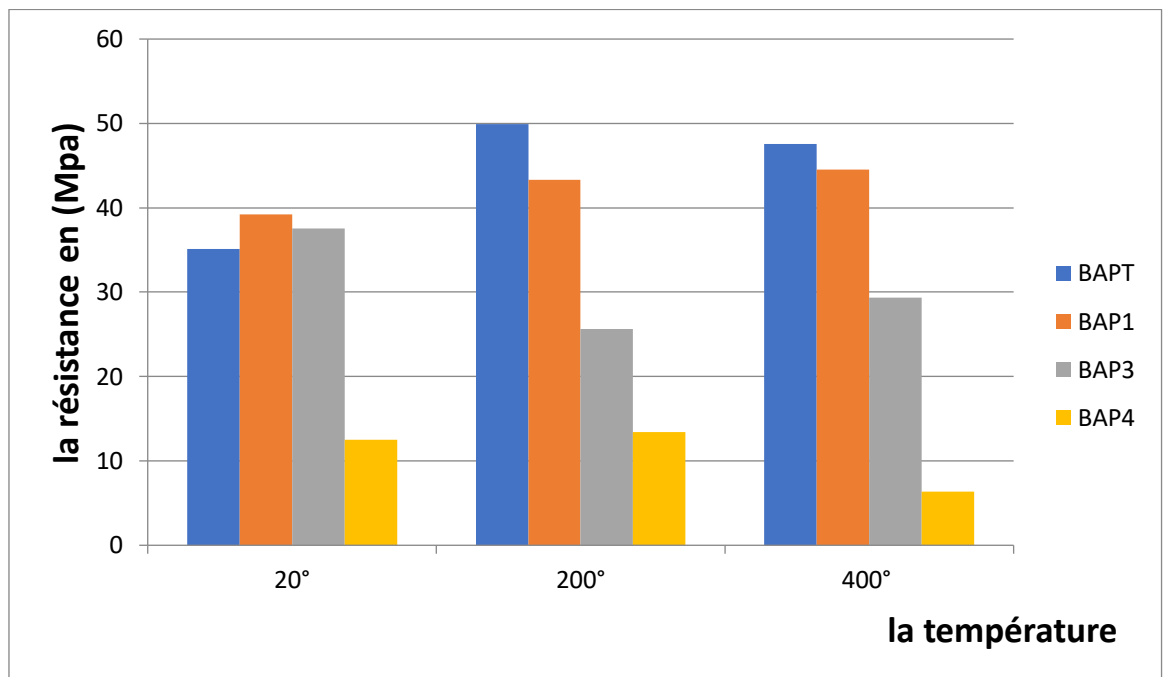


Fig.VI. 6 La résistance à la compression en fonction de l'âge de béton.

Remarque :

La figure VI.6 présente l'évolution de la résistance à la compression en fonction de la température pour les formulations BAPT, BAP1, BAP3 et BAP4.

On remarque qu'à 200°C, une augmentation de la résistance est observée pour BAPT et BAP1, ce qui s'explique par l'activation thermique de la réaction pouzzolanique. En revanche, à 400°C, toutes les formulations enregistrent une diminution progressive due à la dégradation de la matrice cimentaire.

Dans l'ensemble, BAPT et BAP1 maintiennent les meilleures performances mécaniques tout au long de l'exposition thermique, contrairement à BAP4 qui présente la chute la plus importante.

3.2 Résistance à la traction

3.2.1- l'effet des déchets :

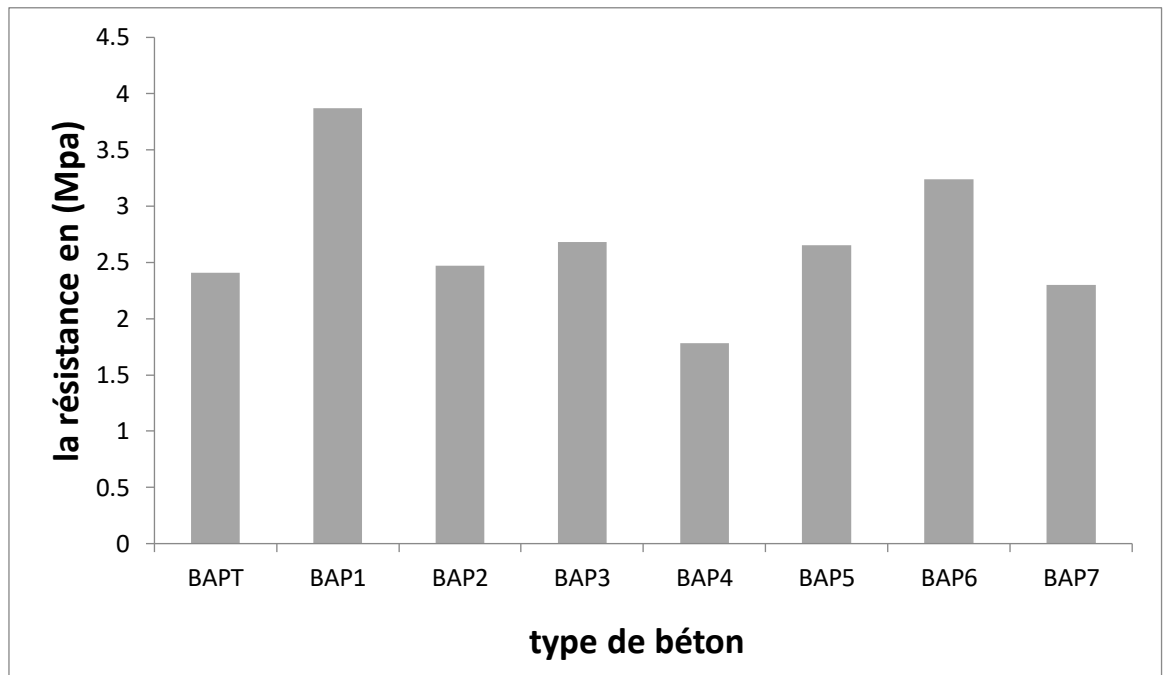


Fig. VI 7 La résistance à la Traction par flexion en fonction de type de béton

Remarque :

La figure VI.7 présente les valeurs de la résistance à la traction par flexion à 20°C en fonction du type de béton. On constate que les valeurs sont comprises entre 1,7 MPa et 3,8 MPa.

La formulation BAP1 enregistre la valeur la plus élevée avec environ 3,8 MPa, dépassant ainsi la formulation témoin BAPT qui affiche 2,4 MPa. Les formulations BAP2 et BAP3 présentent des valeurs proches de 2,5 MPa et 2,6 MPa respectivement, tandis que BAP4 enregistre la valeur la plus faible avec 1,7 MPa.

Les formulations BAP5, BAP6 et BAP7 affichent des valeurs intermédiaires de 2,6 MPa, 3,2 MPa et 2,3 MPa respectivement. Ces résultats confirment qu'un taux de substitution modéré améliore la résistance à la traction, alors qu'un taux excessif tend à la réduire.

3.2.2- À haute température :

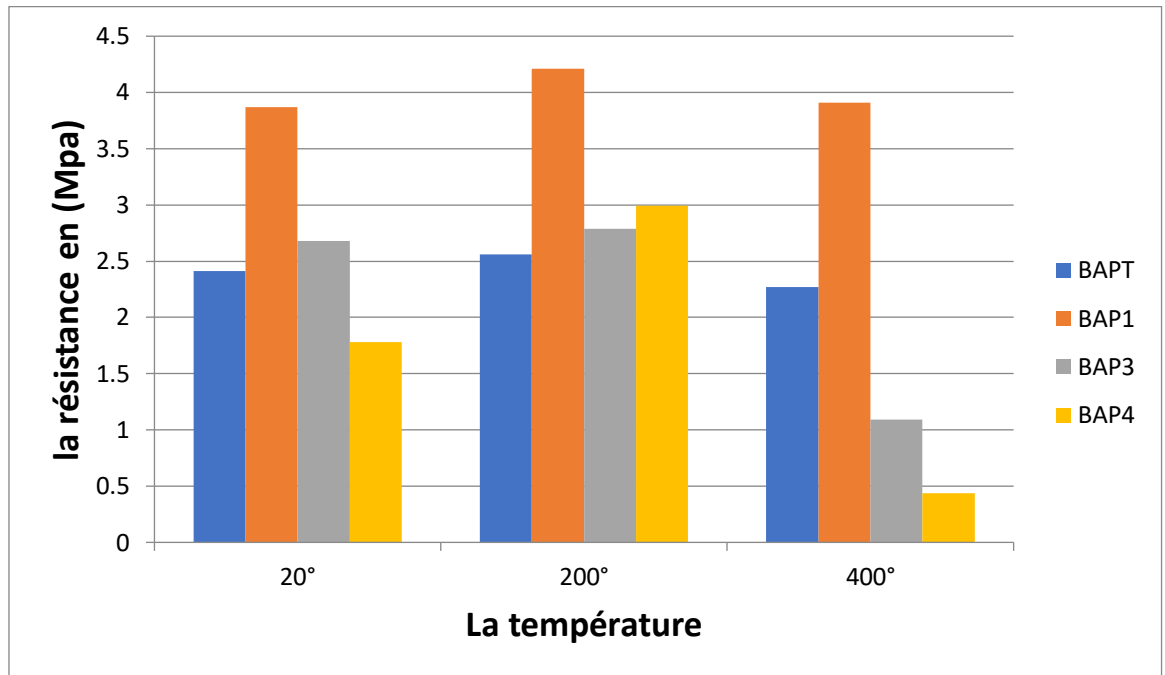


Fig VI. 8 La résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge des bétons

Remarque :

La figure VI.8 montre que la résistance à la traction par flexion évolue différemment selon les formulations. À 200°C, une légère augmentation est observée pour la plupart des formulations grâce à l'activation thermique de la réaction pouzzolanique.

À 400°C, une chute notable est enregistrée, particulièrement pour BAP3 et BAP4, tandis que BAP1 maintient la meilleure performance thermique parmi toutes les formulations étudiées. Il est également important de noter que l'utilisation de matériaux plastiques dans les fours à haute température provoque des dommages environnementaux considérables, car la combustion du plastique dégage des odeurs nauséabondes et des gaz toxiques nocifs pour la santé humaine.

3.3 La porosité :

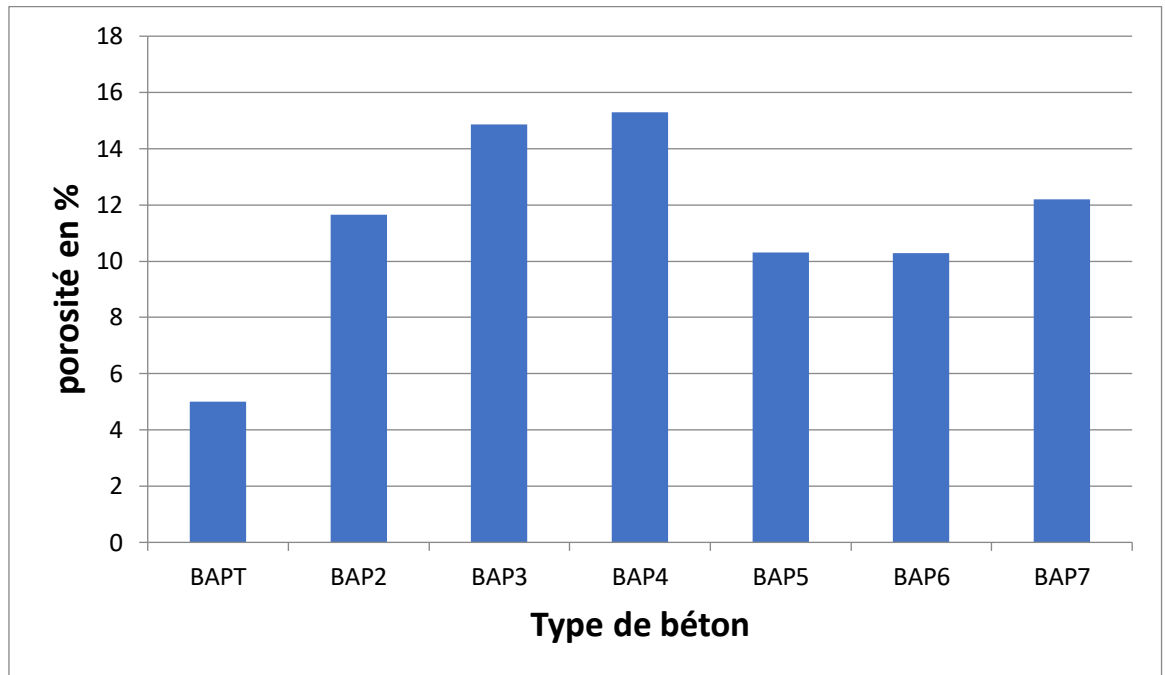


Fig VI. 9 la porosité des différents types de béton

Remarque :

Les résultats obtenus montrent que le béton témoin BAPt présente la porosité la plus faible (~4,5%), confirmant la bonne compacité de la formulation de référence sans substitution.

Les formulations BAP3 et BAP4 enregistrent les valeurs les plus élevées (~14%), ce qui indique que le taux de substitution du sable par le plastique et le verre recyclé broyé a engendré une augmentation du réseau poreux au sein de la matrice cimentaire. Les formulations BAP5, BAP6 et BAP7 affichent des porosités modérées entre 8% et 10%, tandis que BAP2 présente une valeur intermédiaire d'environ 11%.

Ces résultats confirment que l'augmentation du taux de substitution du sable naturel par des granulats recyclés (plastique et verre) tend à accroître la porosité, ce qui peut être attribué à la faible adhérence interfaciale entre ces matériaux et la pâte cimentaire.

3.4 La perte de masse :

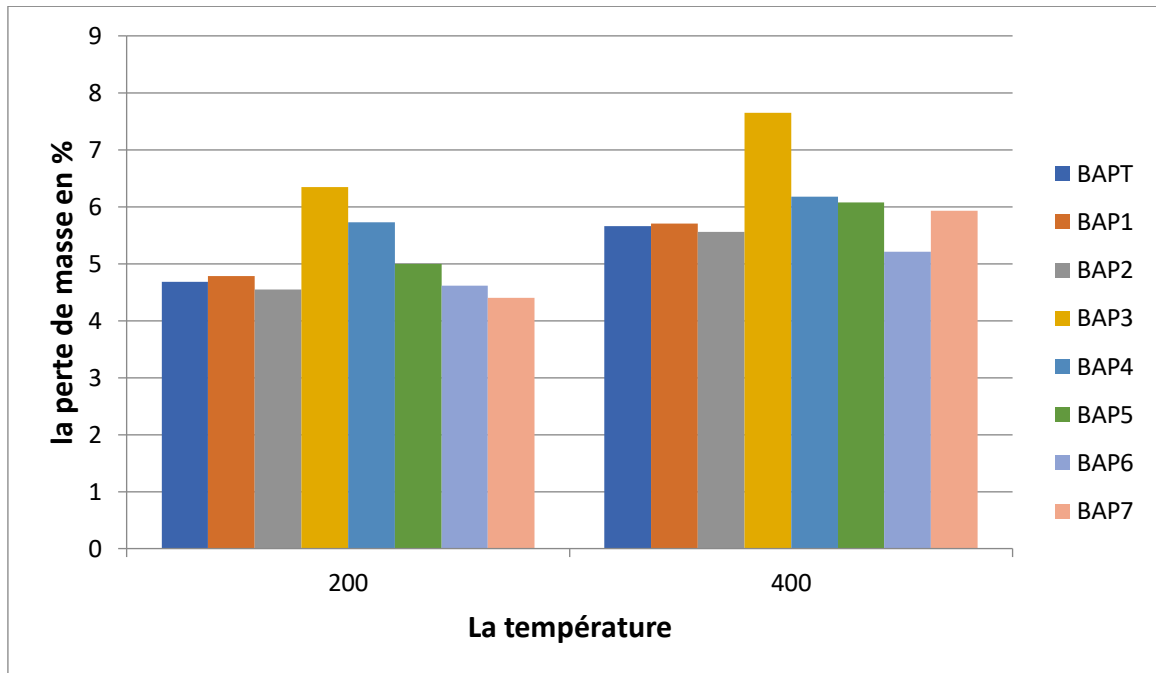


Fig VI. 10 La perte de masse des différents types de béton

Remarque :

Les résultats montrent que la perte de masse augmente avec l'élévation de la température pour toutes les formulations, ce qui est attribué à l'évaporation de l'eau libre et à la déshydratation progressive de la pâte cimentaire.

À 200°C, les valeurs restent relativement proches pour l'ensemble des formulations, comprises entre 4,3% et 6,3%, la formulation BAP3 enregistrant la valeur la plus élevée.

À 400°C, cette tendance se confirme, avec BAP3 qui atteint la perte de masse maximale (~7,5%), tandis que les formulations BAPT, BAP1, BAP2, BAP5 et BAP6 présentent des valeurs modérées.

Ces résultats suggèrent que l'augmentation du taux de substitution du sable par le plastique et le verre recyclé influence la stabilité thermique du béton autoplaçant, notamment pour les forts taux de substitution.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans ce travail de recherche, nous avons étudié l'effet combiné de la substitution partielle du sable par des granulats de verre et de plastique recyclé dans le béton autoplaçant (BAP), en analysant son comportement à l'état frais et à l'état durci, ainsi que son comportement après exposition à des températures élevées.

Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

À l'état frais :

L'incorporation combinée des granulats de verre et de plastique recyclé influence la rhéologie du BAP. Les essais d'étalement au cône d'Abrams ont montré des valeurs variables selon les formulations, avec des résultats satisfaisants pour la majorité des mélanges étudiés.

Les essais de stabilité au tamis ont confirmé que toutes les formulations respectent les critères normatifs ($0 \leq \Pi \leq 15$), tandis que l'essai de la boîte en L a révélé que certaines formulations seulement satisfont la condition ($H2/H1 \geq 0,8$), confirmant leur aptitude à la mise en place.

La masse volumique des BAP contenant les granulats recyclés est légèrement inférieure à celle du béton de référence, traduisant ainsi un allègement du béton.

À l'état durci :

Les résistances à la compression et à la traction par flexion à 20°C ont montré que les formulations à taux de substitution modéré présentent des performances comparables, voire supérieures, à celles du béton témoin.

À 200°C, une légère augmentation des résistances mécaniques est observée pour certaines formulations, attribuée à l'activation thermique de la réaction pouzzolanique. En revanche, à 400°C, une dégradation progressive est enregistrée pour l'ensemble des formulations, accompagnée d'une perte de masse due à l'évaporation de l'eau et à la décomposition des hydrates.

Comportement à haute température :

Les résultats confirment que les formulations à faible taux de substitution maintiennent de meilleures performances mécaniques sous l'effet thermique, confirmant ainsi la stabilité relative des granulats recyclés à haute température.

Les résultats confirment l'intérêt de l'utilisation combinée des déchets de verre et de plastique comme substitut du sable dans le BAP, constituant ainsi une solution écologique et économique prometteuse, à condition de respecter un taux de substitution optimal.

Conclusion Générale

Toutefois, il est important de signaler que malgré les avantages environnementaux visés par l'incorporation du plastique recyclé, son exposition à de hautes températures engendre des dégagements de gaz toxiques et des odeurs nauséabondes, constituant ainsi un risque réel pour la santé humaine et l'environnement. Des études complémentaires sont donc nécessaires pour mieux évaluer et limiter ces effets néfastes

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques introduction générale :

[1] Aimeur &Baghdadi.Caractérisation d'un béton autoplaçant à base de poudre mémoire finale master 02 Université Mohamed Boudiaf _Msila2022

[2] SEDKI MERIEM (Etude expérimentale d'un béton à base de déchets de verre).mémoire de master. UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU 2019

Références Bibliographiques du Chapitre I

[1] OKAMURA, H. & OUCHI, M. (2003). Self-Compacting Concrete.

[2] EFNARC (2005). Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete.

[3] SAADALLAH & LAZREG (2024). Étude expérimentale d'un béton autoplaçant à base de déchets recyclés.

[4] ZAIDI & SAADOUNE. Caractérisation mécanique d'un béton autoplaçant à partir d'un essai d'indentation. Mémoire Finale Master 02, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi, Bordj Bou Arreridj 2020.

[5] REBBOLH, N. Formulation et caractérisation d'un béton autoplaçant. École Nationale Polytechnique 2006.

[6] AIMEUR & BAGHDADI. Caractérisation d'un béton autoplaçant à base de poudre. Mémoire Finale Master 2, Université Mohamed Boudiaf, Msila 2022.

[7] SOUFIIENNE, M. (2019). Évaluation de la qualité des bétons autoplaçants (BAP) fibré aux moyens des essais non-destructifs (END) et essais directs. Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf, M'sila.

[8] LARIBI, I. & BOURAHDDOUNE, N. Valorisation des déchets dans le béton autoplaçant. Mémoire Fin d'Études de Master, Boumerdes 2016.

[10] AFROUKH, F. (2018). Étude de l'influence des ajouts sur le comportement du BAP.

[11] BENNA, M. (2021). Guide technique pour la caractérisation des BAP.

[12] DAOUD, A. (2016). Valorisation des déchets plastiques dans les matériaux de construction.

[13] TADJINE, Z. (2020). Étude des performances mécaniques.

Références Bibliographiques

[14] DJIAB & HAFFAF. L'effet de l'utilisation des résidus dans la formulation des BAP à l'état frais et durci.

[15] MEZGHICHE, B. Essais non-destructifs du béton. Cours du 3ème année Licence, Université Mohamed Kheider, Biskra 2013.

Références Bibliographiques du Chapitre II

[1] BAHACHE, Z. Étude expérimentale d'un BAP à base de déchets de verre exposé à la haute température. 2024/2025.

[2] Article L.541-3 Code de l'environnement - Livre V. Titre IV Chapitre 1er relatif à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux. 2018.

[3] DJIAB, N., ELBOUDA & HAFFAF, F. L'effet de l'établissement des résidus (Incorpores métalliques) dans la formulation des bétons autoplaçants à l'état frais et durci. 2021.

[4] CHELABI, H., TALEB, Z. Amélioration des propriétés mécaniques du plâtre de construction avec des déchets plastique et verre. Mémoire de master, Université Bouira 2017.

[6] FERGUENE, H. Valorisation des granulats recyclés de déchets des carrières et faïence dans la formulation des BAP. Mémoire Fin d'Étude de Master, Boumerdes 2016.

[7] PERCHE, F. Adsorption de poly carboxylates et de lignosulfonates sur poudre modèle et ciment. 2004. Thèse de doctorat, EPFL.

[8] SAADANI, S. Comportement des bétons à base de granulats recyclés. Thèse de magister, Université Mentouri de Constantine.

[9] LARIBI, I. & BOURAHDDOUNE, N. Valorisation des déchets dans le béton autoplaçant : État de l'art. Mémoire de master, Université 8 Mai 1945, Guelma. Septembre 2020.

[10] Document d'une entreprise canadienne qui travaille en Algérie.

[11] NF EN 934-2 (Sept. 2002). Adjuvant pour béton, mortier et coulis.

Références Bibliographiques

[12] AICHOUGH, A. & BELKBIRE, H. Élaboration d'un béton autoplaçant léger à base des déchets de plastique. DEUA, Boumerdes 2011.

Références Bibliographiques du Chapitre III

[1] Bahache Ziad, "Étude expérimentale du béton autoplaçant à base de déchets de verre exposés à haute température", 2024 / 2025.

[2] Nguyen V.T., "Comportement des Bétons ordinaires et à hautes températures Performances soumis à haute températures : Application à des éprouvettes de Grandes Dimensions", Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2013.

[3] Laneyrie C., "Valorisation des Déchets de chantier du BTP : Comportement à haute Température Des Bétons de granulats recyclés", Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2014.

[4] Mindeguia J.C., "Contribution Expérimentale à la compréhension Des Risques D'instabilité Thermique Des bétons", Thèse de doctorat, Université de Pau et des pays de l'Adour, 2009.

[5] Xing Z., "Influence de la Nature Minéralogique Des granulats sur leur Comportements et celui Du Béton à Haute Température", Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2011.

[6] Hachemi Samia, Thèse de doctorat, "Étude du comportement du béton soumis à haute température", Université Mohamed Khider Biskra, 2015.

[7] Zoubiri Amina, "Comportement du béton à base de la poudre de verre à haute température effet de l'âge", Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2015 / 2016.

[8] Benkhalfa Khalid & Zalani Mohamed, "Comportement du béton autoplaçant à haute température".

[9] Djebri Noura, "Formulation et caractérisation d'un béton autoplaçant fibré à base de matériaux locaux exposé aux hautes températures", Thèse de doctorat, Faculté des Sciences, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 13/05/2018.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques du Chapitre IV :

[1] Fiche technique de Medaflow.

[2] Melle Naima Rebbouh, "Formulation et caractérisation d'un béton autoplaçant", École Nationale Polytechnique, 2006.

[3] Aimeur & Baghdadi, "Caractérisation d'un béton autoplaçant à base de poudre", Mémoire de master de fin d'études, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2022.

Références Bibliographiques du Chapitre V :

[1] Norme NF EN 12350-8, Essais pour béton frais - Partie 8 : Béton autoplaçant - Essai d'étalement au cône d'abrams, AFNOR, 2010.

[2] Norme NF EN 12350-10, Essais pour béton frais - Partie 10 : Béton autoplaçant - Essai à la boîte en L, AFNOR, 2010.

[3] Norme NF EN 12350-11, Essais pour béton frais - Partie 11 : Béton autoplaçant - Essai de stabilité au tamis, AFNOR, 2010.

[4] Norme NF EN 12390-3, Essais pour béton durci - Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes, AFNOR, juin 2019.

[5] Norme NF EN 12390-5, Essais pour béton durci - Partie 5 : Résistance à la flexion sur les éprouvettes, AFNOR, 2019.

Annexes



SPA BISKRIA CIMENT



FICHE TECHNIQUE

CEM I 42.5R

CIMENT PORTLAND

CEM I 42.5R Ciment portland, pour les bétons hautes performances et a une résistance rapide à court terme, destiné aux domaines où les délais de décoffrage sont courts, il est recommandé particulièrement pour le bétonnage par temps froid

CEM I 42.5R :

Conforme à la norme Algérienne (NA442-2013)

👍 DOMAINES D'APPLICATION

Un ciment pour tous vos travaux de constructions de haute résistance a jeune âge, il est aussi recommandé pour les utilisations suivantes :

- Produits en bétons qui demandent un durcissement rapide.
- Le bétonnage dans des coffrages coulissant, surtout en période hivernale.
- Béton résistant au gel en présence de sels de déverglaçage.
- Tabliers de ponts.
- Béton pompé.
- Béton projeté



✓ APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Béton armé à haute résistance.
- Béton autoplaçant.

🏠 FORMULATION CONSEILLÉE

	ciment	Sable (sec) 0/5	Gravillons (sec) 0/15mm 15/25mm	Eau (litres)
Dosage pour béton	50k X1	+ X7	+ X5 + X4	+ 25 L
	ciment	Sable Correcteur 0/1mm	Sable (sec) 0/4mm	Eau (litres)
Mortier de briquetage	50k X1	+ X6	+ X9	+ 35 L
Mortier de finitions	50k X1	+ X9	+ X6	+ 35 L

Remarque: un bidon = 10 litres

🔍 CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Analyses chimiques (%)	valeur
Perte au feu	2.6 – 3.7
Teneur en sulfates (SO3)	2.2 – 2.8
Teneur en Oxyde de Magnésium (MgO)	1.7 – 2.8
Teneur en Chlorures (Cl ⁻)	0.03 – 0.07
Composition Potentielle du Clinker (Selon Bogue) (%)	valeur
C ₃ S	56 – 66
C ₂ A	5.1 – 7.2
Propriétés physiques	valeur
Consistance normale (%)	25.8 – 26.4
Expansion à chaud (mm)	0.25 – 1.0
Temps de prise (min)	valeur
Début de prise	150 – 190
Fin de prise	220 – 250
Résistance à la compression	valeur
2 jours (MPa)	20 – 29
28 jours (MPa)	42.5 – 52.5



Version : 01/2021

SPA BISKRIA CIMENT
Adresse : Djar Belahrache
Branis, Biskra, Algérie

Tel : +213 (0) 560 753 424
Fax : +213 (0) 33 558 108
contact@biskriaciment-dz.com
www.biskriaciment-dz.com

