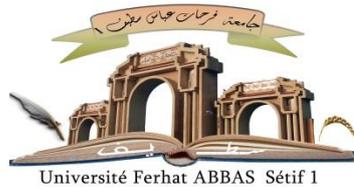


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIF1

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

THÈSE

Présentée au Département de Génie Civil

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Civil

Option : Matériaux et Structures

Par

ABDELLI Houssam Eddine

THÈME

**Contribution à l'étude de la valorisation des
déchets industriels dans l'amélioration des
performances du béton.**

Soutenue le 29/07/2021 devant le Jury:

KEBBICHE Khelifa	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Président
MOKRANI Larbi	M.C.A	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Directeur de thèse
José Luis Barroso de AGUIAR	Professeur	Univ. Minho Guimarães Portugal	Co-Directeur
BELGASMIA Mourad	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Examineur
BAHLOUL Ouassila	M.C.A	Univ. Batna 2	Examineur
BENSEBTI Salah- Eddine	M.C.A	Univ. Constantine 1	Examineur

Remerciements

Toute ma gratitude, mon crédit et mes remerciements à **Dieu** tout-puissant, qui m'ont donné force, patience, courage et volonté pour développer ce travail.

Je remercie également mes très **Chers Parents** pour leurs encouragements, soutiens et surtout pour leur patience durant toute mes études.

Je remercie et apprécie mon directeur de ma thèse Monsieur **Dr. MOKRANI Larbi** maitre de conférences à l'université de Ferhat Abbas Sétif 1 pour son acceptation de superviser ce travail et son soutien ; et sa confiance qu'il a mise en moi et ses encouragements.

Je tiens à remercier chaleureusement mon codirecteur de ma thèse Monsieur **Pr. José Luis Barroso de AGIUAR** Professeur associé à l'université de Minho au Portugal pour l'accueil chaleureux dans le laboratoire des matériaux de construction dans l'université du Minho ; et ses conseils précieux durant mon séjour au Portugal et son assentiment de dirigé ce travail.

Toute ma gratitude et ma vive sympathie vont à Monsieur **Dr. KENNOUCHE Salim** maitre de conférences à l'université de Bouira pour ses orientations et ses précieux conseils ; et pour sa grande contribution à la réalisation de ce travail et sans qui cette thèse n'aurait jamais vu le jour.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à **BERKANE Farid** et **CHALABI Louiza** les ingénieurs de laboratoire des matériaux et structures à l'université de Bouira pour leur aide à mener des expériences dans le laboratoire et de fournir toutes les exigences.

Je transmets mes remerciements et son appréciation à **Carlos JESUS** le technicien de laboratoire des matériaux de construction à l'université de Minho au Portugal pour son instruction et son aide dans la conduite des essais expérimentaux et de donner toutes les informations nécessaires.

Je remercie aussi toute l'équipe du centre pour le territoire, l'environnement et la construction (CTAC) pour leur aide dans les travaux réalisés aux laboratoires.

Mes remerciements à **Dr. DABBEBI Rawia** Chercheur postdoctoral à l'Université d'Oulu en Finlande pour ses conseils et son aide sur l'analyse thermogravimétrique ; et diffraction des rayons X.

Merci beaucoup à mes chers parents et mes frères pour leur encouragement, leur patience et leur soutien en toutes circonstances durant mon cursus scolaire.

Publications relatives aux travaux de thèse

Publications internationales

- **Houssam Eddine Abdelli**, Larbi Mokrani, Salim Kennouche et JL Barroso de Aguiar. Utilization of waste glass in the improvement of concrete performance: A mini review. Waste Management and Research. 2020, Vol. 38(11), p.1204–1213. Impact factor 2.771, 2020, Sage. <https://doi.org/10.1177/0734242X20941090>
- **Houssam Eddine Abdelli**, Larbi Mokrani, Salim Kennouche et JL Barroso de Aguiar. Mechanical and durability properties of concrete incorporating glass and plastic waste. Advances in Concrete Construction. 2021, Vol. 11, No. 2, p. 173-181. Impact factor 2.443, 2020, Techno press. <http://dx.doi.org/10.12989/acc.2021.11.2.173>
- S. Kennouche, **Houssam Eddine Abdelli**, B. Amrane, and B. Hami « Reinforcement of Building Plaster with Plastic Waste and Glass Powder » Proceedings of the 4th International Symposium on Materials and Sustainable Development, Volume 2: Waste Recycling and Environment, SBN 978-3-030-43210-2 ISBN 978-3-030-43211-9 (eBook), Springer Nature Switzerland AG 2020, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-43211-9>
- Kennouche Salim, **Houssam Eddine Abdelli**, Amrane Belaid, HamiBrahim « Reinforcement of building plaster by waste plastic and glass » Procedia Structural Integrity, Volume 17, 2019, Pages 170-176 <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.023>

Communications internationales

- **ABDELLI Houssam Eddine**, MOKRANI Larbi, KENNOUCHE Salim. Contribution à l'étude de la valorisation des déchets industriels dans l'amélioration des performances du béton. Symposium international sur la gestion de la construction et le génie civil, 15 et 16 novembre 2017, p. 61, Skikda-Algérie.
- **ABDELLI Houssam Eddine**, MOKRANI Larbi, KENNOUCHE Salim. L'effet de la poudre de verre sur les propriétés physico-mécanique du béton. 4ème conférence internationale sur l'Energie, les matériaux, l'énergétique appliquée et la pollution (ciemeap'2018), 29-30 avril 2018, p. 607-613 Constantine, Algérie.
- **ABDELLI Houssam Eddine**, MOKRANI Larbi, KENNOUCHE Salim. Valorisation des déchets plastiques dans l'amélioration des propriétés du béton. 23-24 Octobre 2018, p. 77, Skikda-Algérie.
- Kennouche Salim, Chelabi Hameza, Taleb Zahir, **ABDELLI Houssam Eddine**, Amrane Belaid « Renforcement du Plâtre de Construction par les Déchets Plastique et Verre » International Symposium on Construction Management and Civil Engineering ISCMCE 2017, November 15-16, 2017 University 20 aout 1 955-Skikda/ ALGERIA.

Communication nationale

- **ABDELLI Houssam Eddine**, MOKRANI Larbi, KENNOUCHE Salim. L'influence des fibres de déchets plastiques dans l'amélioration des propriétés du béton. 04 et 05 Décembre 2018, p. 34, Boumerdes- Algérie.
- **ABDELLI Houssam Eddine**. Contribution à l'étude de la valorisation des déchets industriels dans l'amélioration des performances du béton. Doctorales de l'UFAS, 18 mai 2017, El Bez -Sétif, Algérie.
- **ABDELLI Houssam Eddine** « Contribution à l'étude de la valorisation des déchets industriels dans l'amélioration des performances du béton. 1ère Ecole d'Automne sur les Matériaux Emergents (EAME 2017), 27-28 Novembre 2017, Sétif- Algérie.

DEDICACES

Avec tous mes sentiments de tendresse, je dédie ce modeste travail :

À mes très **chers parents** qui m'ont appris la patience et la persévérance.

À mes **grands-mères** et à mes **grands-pères**.

À mon frère **Riad** et mes sœurs **Amani** et **Ibtissam**.

À tous mes chers **collègues** et **amis**.

À toute la famille **ABDELLI** et **ASSAM** sans exception.

À toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin pour concrétiser ce travail.

Table des matières

Remerciements	II
Publications relatives aux travaux de thèse.....	III
DEDICACES	V
Liste des figures	IX
Liste des Tableaux.....	XI
Liste des symboles	XIII
Liste des abréviations	XV
Introduction générale.....	3
Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le verre	5
I.1 Généralité sur le matériau du verre.....	6
I.1.1 Introduction.....	6
I.1.2 Définition de verre	6
I.1.3 Structure du verre.....	7
I.1.4 La production du verre.....	8
I.1.5 Propriétés du verre	9
I.1.6 Recyclage et l'impact environnemental des déchets de verre.....	10
I.1.7 L'utilisation de verre dans le béton.....	12
I.2 Valorisation des déchets de verre dans le béton	13
I.2.1 Introduction.....	13
I.2.2 Valorisation des déchets de verre sous forme de granulats	14
I.2.3 L'effet du remplacement des granulats sur les propriétés du béton	15
I.2.4 Valorisation des déchets de verre comme remplacement partiel du ciment.....	18
I.2.5 L'effet de la taille des particules des déchets de verre	18
I.2.6 Le taux de remplacement du ciment par la poudre de verre	19
I.2.7 Effet de la poudre de verre sur les propriétés du béton frais.....	19
I.2.8 Effet de la poudre de verre sur les propriétés du béton durci	20

I.2.9	Valorisation simultanée des déchets de verre comme remplacement partiel du ciment et des granulats.....	28
I.2.10	Valorisation des déchets de verre dans la production de ciment.....	28
II-3	Conclusions	29
Chapitre II : Synthèse bibliographique sur le plastique		31
II.1	Introduction sur la matière plastique	32
II.1.1	Historique	32
II.1.2	Définitions et production de matières plastiques	32
II.1.3	Classification de plastique.....	33
II.1.4	Structure de plastique	34
II.1.5	Taux d'élimination des plastiques	35
II.1.6	La valorisation et le recyclage du plastique	36
II.1.7	Avantages des matières plastiques	38
II.1.8	Inconvénients des matières plastiques.....	38
II.2	La valorisation des déchets plastiques dans les bétons.....	39
II.2.1	Introduction	39
II.2.2	Valorisation des déchets plastiques sous forme de granulats.....	40
II.2.3	L'effet des granulats plastiques sur les propriétés des bétons	41
II.2.4	L'effet de l'utilisation des déchets plastiques sous forme des fibres dans les bétons	49
II.3	Conclusion	58
Chapitre III : Matériaux et Méthodes		60
III.1	Introduction	61
III.2	Matériaux utilisés	61
III.2.1	Ciment	61
III.2.2	Poudre de verre.....	61
III.2.3	Les granulats	64
III.3	Formulation du béton.....	71

III.3.1	Données indispensables.....	71
III.3.2	Volume absolu des constituants	72
III.3.3	Les dosages des constituants du béton en kg dans 1m ³	73
III.4	Préparation et composition des mélanges des bétons	73
III.5	Essais et programme expérimental	74
III.5.1	La masse volumique	74
III.5.2	Essai de la résistance à la compression	75
III.5.3	La résistance à la flexion	76
III.5.4	Etude de la microstructure.....	77
III.5.5	Durabilité.....	79
III.6	Conclusion	85
Chapitre IV: Résultats et discussions		86
IV.1	Introduction	87
IV.2	La masse volumique à l'état durci	87
IV.3	La résistance à la compression	87
IV.4	La résistance à la flexion	88
IV.5	Les analyses DRX et DSC-ATG	89
IV.6	Caractérisation par microscope électronique à balayage.....	91
IV.7	Essai d'absorption d'eau par capillarité.....	94
IV.8	Essai d'absorption d'eau par immersion	95
IV.9	Résistivité électrique.....	95
IV.10	Vitesse d'impulsion des ultrasons	96
IV.11	Essai d'attaque acide	97
IV.12	Conclusion	98
Conclusion générale		127
Recommandations et perspectives		129
Références bibliographiques		105

Annexe	121
--------------	-----

RESUME

Liste des figures

Figure I. 1 : La transition vitreuse et la formation de verre. 1 : liquide, 2 : liquide en surfusion, 3 : verre à refroidissement rapide, 4 : verre à refroidissement lent, 5 : cristal ; Ts : température de fusion, Tg : température de transition vitreuse (Hasanuzzaman et al. 2016).	7
Figure I. 2 : La représentation de l'arrangement des atomes dans un réseau cristal (a) et un réseau de verre a trois dimensions (Zachariasem, 1932).....	8
Figure I. 3 : Processus de recyclage typique des déchets de verre (Kazmi et al, 2020).....	11
Figure I. 4 : La quantité de chaux consommée par le verre et d'autres matériaux (Idir, 2009).....	12
Figure I. 5 : Résumé des résultats de l'effet de la teneur de poudre de verre sur l'affaissement du béton.	20
Figure I. 6 : Différents résultats de l'effet de la teneur de poudre de verre sur la densité du béton durci.	21
Figure I. 7 : La résistance à la compression en fonction de la teneur de poudre de verre dans le béton à 28 jours de durcissement.	22
Figure I. 8 : Effet de l'utilisation du pourcentage de poudre de verre sur la résistance à la traction du béton à 28 jours de durcissement.	23
Figure I. 9 : Effet de la teneur de poudre de verre sur la résistance à la flexion du béton à 28 jours de durcissement.	24
Figure II. 1 : Classification des plastiques (Klein, 2011).....	34
Figure II. 2 : Exemples de structures moléculaires possibles dans un polymère (Harper et Petrie, 2003).	35
Figure II. 3 : Approche du cycle de vie pour analyser les impacts environnementaux du recyclage du plastique (Commission Européenne, 2011).	37
Figure II. 4 : Les résultats de l'effet des déchets plastiques sur l'affaissement du béton.....	42
Figure II. 5 : L'effet des déchets plastiques sur la densité à l'état frais du béton.	43
Figure II. 6 : La résistance à la compression du béton en fonction du pourcentage de remplacement des déchets plastiques à 28 jours.	45

Figure II. 7 : La résistance à la traction en fonction des taux de déchets plastiques à 28 jours.....	46
Figure II. 8 : L'effet des déchets plastiques sur la résistance à la flexion après 28 jours de durcissement.....	47
Figure II. 9 : L'affaissement du béton en fonction des taux de fibres des déchets plastiques..	52
Figure II. 10 : Variation de la résistance à la compression du béton en fonction du taux de fibres plastiques à 28 jours.	53
Figure II. 11 : Effet du taux des fibres de déchets plastiques sur la résistance à la traction du béton.	55
Figure II. 12 : Variation de la résistance à la flexion en fonction du taux de fibres plastiques à 28 jours.....	56
Figure III. 1 : Déchets de verre et la poudre de verre.....	62
Figure III. 2 : Diagramme de diffraction de rayon X du ciment et de la poudre de verre.....	62
Figure III. 3 : L'indice d'activité pouzzolanique du béton avec poudre de verre.	64
Figure III. 4 : Equipement de l'analyse granulométrique.	64
Figure III. 5 : La courbe granulométrique du sable.....	65
Figure III. 6 : La courbe granulométrique des deux types de gravier 3/8 et 8/16.	68
Figure III. 7 : Machine de Los Angeles.	68
Figure III. 8 : Machine d'essai Micro Deval.	69
Figure III. 9 : Déchets plastiques et fibre plastique.....	70
Figure III. 10 : La courbe de traction (contrainte/déformation) des fibres plastiques.....	70
Figure III. 11 : Dosage des granulats par la méthode de Dreux Gorisse.....	72
Figure III. 12 : Les échantillons pour mesurer la masse volumique à l'état frais.	74
Figure III. 13 : La détermination de la masse volumique des bétons à l'état durci.	75
Figure III. 14 : L'essai de la résistance à la compression.	76
Figure III. 15 : L'essai de la résistance à la flexion.	76
Figure III. 16 : Dispositif de l'analyse thermique.	77
Figure III. 17 : Diffraction des rayons X (DRX) - Bruker D8 Discover.....	78
Figure III. 18 : Microscope électronique à balayage à émission de champ.	79
Figure III. 19 : Essai d'absorption d'eau par capillarité.....	80
Figure III. 20 : Mesure de la masse hydrostatique des échantillons du béton.....	81
Figure III. 21 : Schéma du fonctionnement des électrodes.	82
Figure III. 22 : Essai de résistivité électrique.....	83
Figure III. 23 : Essai de vitesse de propagation des ultrasons.....	84

Figure III. 24 : Essai l'attaque d'acide sur les échantillons du béton.....	85
Figure IV. 1 : La masse volumique des variantes de béton durci.	87
Figure IV. 2 : La résistance à la compression des variantes de béton à 7, 14, 28 et 90 jours. .	88
Figure IV. 3 : La résistance à la flexion des mélanges de béton à 7, 14, 28 et 90 jours.	89
Figure IV. 4 : L'analyse de diffraction de rayon X sur les mélanges de béton BT et BPV.	90
Figure IV. 5 : DSC-ATG du béton témoin (BT).	90
Figure IV. 6 : DSC-ATG de béton avec poudre de verre (BPV).	91
Figure IV. 7 : Analyse MEB-EDS du béton de contrôle BT.....	92
Figure IV. 8 : Analyse MEB-EDS du béton BPV.....	92
Figure IV. 9 : Analyse MEB-EDS du béton BFP.	93
Figure IV. 10 : Analyse MEB-EDS du béton BM.	93
Figure IV. 11 : Analyse MEB-EDS du béton BM dans un autre point.....	94
Figure IV. 12 : Absorption d'eau par capillarité des bétons en fonction du temps.....	94
Figure IV. 13 : Absorption d'eau par immersion des différents mélanges de béton.....	95
Figure IV. 14 : La résistivité électrique dans les différents mélanges de béton.....	96
Figure IV. 15 : La vitesse de propagation des ultrasons dans différents bétons.	97
Figure IV. 16 : La perte de masse des bétons immergés dans l'acide de (5X5) cm ²	98
Figure IV. 17 : La perte de masse pour les bétons immergés dans l'acide de (5X10) cm ²	98

Liste des Tableaux

Tableau I. 1 : Module de Young E des différents verres (Barton et Guillemet, 2005).	9
Tableau I. 2 : La résistance aux chocs thermiques de divers verres (Glas Trösch Holding AG, 2013).....	10
Tableau I. 3 : Résumé des recherches utilisant des déchets de verre comme granulats.....	17
Tableau I. 4 : Résumé des recherches sur l'utilisation des déchets de verre comme remplacement partiel du ciment.	26
Tableau I. 5 : Résumé des recherches sur l'utilisation des déchets de verre comme remplacement partiel du ciment (Suite).	27
Tableau II. 1 : les taux de déchets plastiques post-consommation des différents pays du monde (Hassanpour et Unnisa 2017).	36
Tableau II. 2 : Résumé de quelques recherches utilisant des déchets plastiques comme granulats dans le béton.	49
Tableau II. 3 : Travaux de recherches sur l'effet des fibres plastiques dans le béton.....	58
Tableau III. 1 : Caractéristiques physiques du ciment.	61

Tableau III. 2 : Composition chimique du ciment.	61
Tableau III. 3 : Composition chimique de la poudre de verre.....	62
Tableau III. 4 : Exigences de la norme ASTM C 618 - 05 pour les matériaux pouzzolaniques.....	63
Tableau III. 5 : Résultats de la résistance à la compression sur béton.	63
Tableau III. 6 : Analyse granulométrique de sable.	65
Tableau III. 7 : Analyse granulométrique de gravier 3/8.	67
Tableau III. 8 : Analyse granulométrique du gravier 8/16.	67
Tableau III. 9 : La composition en masses obtenue pour 1 m ³ de béton.	73
Tableau III. 10 : Les proportions des constituants des mélanges de béton.	74
Tableau III. 11 : Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation des impulsions (Carcano and Moreno, 2008).	84

Liste des symboles

η : Viscosité

F : Force tangentielle

d : Distance

A : Surface

v : Vitesse relative des deux plans

G : Module de cisaillement

E : Module de young

pH : Puissance de l'hydrogène

AI : Indice d'activité de la résistance

A : résistance moyenne à la compression du mélange d'essai (MPa)

B : résistance moyenne à la compression du mélange témoin (MPa)

M_S : Masse sèche (g)

R : Refus cumulés (g)

P_n : Masse dans le fond (g)

T_n : Passant dans le dernier tamis (g)

M_f : Module de finesse

ρ_w : Masse volumique de l'eau (kg/m³)

ρ_{ab} : Masse volumique absolue (kg/m³)

L_A : Le coefficient de Los Angeles

M_{DE} : Le coefficient de Micro Deval

F_{C28} : Résistance visée (MPa)

D : Dimension maximale des granulats (mm)

$c = \gamma$: Le coefficient de compacité

C : Ciment

E : Eau

D : La masse volumique (kg/m³)

m : La masse de l'échantillon (kg)

V : Le volume de l'échantillon (m³)

f_c : La résistance en compression (MPa)

F : La charge maximale (N)

A_C : Aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée (mm)

f_{ef} : La résistance en flexion (MPa)

l : Ecartement entre les deux rouleaux d'appui (mm)

d_1 et d_2 : Les dimensions de la section transversale de l'éprouvette (mm)

A : Absorption d'eau par immersion

M_1 : masse de l'échantillon, saturé d'air (g)

M_2 : masse hydrostatique de l'échantillon (g)

M_3 : masse de l'échantillon sec (g)

ρ : Résistivité électrique ($\Omega.m$)

a : distance entre électrodes (m)

V : différence de potentiel (V)

I : intensité du courant (A)

V : La vitesse de propagation de l'échographie (km/s)

L : La longueur du trajet (mm)

T : Le temps nécessaire aux ultrasons pour traverser la longueur du parcours (μs)

$FPMA$: facteur de perte de masse acide

m_0 : La masse d'échantillons à l'état saturé d'eau (g)

m_1 : La masse d'échantillons après l'immersion dans la solution d'acide à un temps désirée (g)

Liste des abréviations

- RAS** : Réaction alcalines- silice
- E/C** : Rapport eau sur ciment
- PET** : Polyéthylène téréphtalate
- PS** : Polystyrène
- PVC** : Polychlorure de vinyle
- PHD** : Polyéthylène haute densité
- FPM** : Fibre de plastique métallisée
- RA** : Rapport d'aspect
- PAF** : Perte au feu
- CEM** : Ciment
- DRX** : Diffraction des rayons X
- MEB** : Microscope électronique à balayage
- EDS** : Spectromètre à dispersion d'énergie
- EBSD** : Diffraction de rétrodiffusion d'électrons
- DSC** : Flux de chaleur
- ATG** : Analyse thermogravimétrique
- BT** : Béton témoin
- BPV** : Béton avec poudre de verre
- BFP** : Béton avec fibres plastiques
- BM** : Béton avec poudre de verre et des fibres plastiques
- C-S-H** : Silicate de calcium hydrate
- CH** : Portlandite
- HF** : Acide fluorhydrique
- C₃S** : silicate tricalcique
- C₂S** : silicate bicalcique
- C₃A** : aluminat tricalcique
- NA** : Norme Algérienne

Introduction générale

Introduction générale

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde, soit 6 milliards de m³ par an, ce qui accélère l'épuisement des ressources naturelles, utilisées dans le processus de production des bétons. Cela a induit les différents acteurs du domaine, à mener des actions sous tous azimuts, dans l'objectif est d'améliorer les propriétés techniques, le coût et l'impact environnemental de la technologie des bétons.

L'expansion et le développement des zones industrielles qu'a connu l'Algérie surtout avec l'avènement du marché libre ont engendré une grande quantité de déchets industriels. Cependant, l'utilisation et la valorisation de ces déchets industriels connaissent à l'heure actuelle un indéniable regain d'intérêt pour l'élaboration de matériaux de construction.

Chaque année, des millions de tonnes de déchets de verre constituent des problèmes environnementaux insupportables dans le monde entier dont l'Algérie fait partie. Le verre est principalement composé de silice, son utilisation dans le béton comme remplacement partiel du ciment pourrait constituer une solution appropriée vers le développement de systèmes d'infrastructure durables (respectueux de l'environnement, énergétiques et économiques) sous condition qu'il soit finement broyé.

En Algérie, comme dans de nombreux pays du monde, la quantité de déchets plastiques augmente et occupe une grande partie des déchets solides. Ce type de déchet pose un grave problème pour l'environnement en raison de sa nature non biodégradable. La valorisation de ses déchets par leur introduction dans le béton apparaît comme l'une des solutions en raison de ses avantages économiques et écologiques.

C'est dans ce sens que notre travail s'inscrit, et la problématique prise en charge est axée sur l'exploration des possibilités de la valorisation combinée de ces deux types de déchets dans les bétons.

L'objectif de cette thèse est de contribuer à la valorisation des déchets dans l'amélioration des performances du béton. En premier lieu, nous avons étudié les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons avec les déchets de verre sous forme de poudre qui sera utilisée comme ajout dans les ciments. Deuxièmement, nous avons ajouté au béton les fibres plastiques, tel que de polyester de polyéthylène Téréphtalate (PET) avec l'étude d'impact de la combinaison de ces deux déchets sur les différentes propriétés du béton. Confirmer ou infirmer si l'utilisation des déchets de verres sous forme de poudre et PET recyclé dans l'élaboration du béton peut

Introduction générale

aider à réduire le coût des matériaux et proposer une solution pour résoudre les problèmes de déchets solides.

Cette thèse est composée de quatre chapitres comme suit :

- Le premier chapitre représente une synthèse bibliographique sur le verre qui contient une généralité sur le matériau du verre avec étude de certaines propriétés de ce matériau ; et une recherche bibliographique sur l'utilisation des déchets de verre dans le béton sous différentes formes telles qu'un remplacement partiel du ciment et des granulats ou comme une matière première dans la fabrication du ciment.
- Le deuxième chapitre indique une synthèse bibliographique sur le plastique qui représente une introduction sur la matière plastique avec l'indication de la production et la classification de ce matériau ; et une recherche bibliographique sur l'effet de l'utilisation des déchets plastiques sous différentes formes sur les propriétés du béton comme un remplacement partiel des granulats et leur incorporation comme des fibres.
- Le troisième chapitre présente la caractérisation des matériaux utilisés dans la préparation des différents mélanges de béton et la méthode de la formulation du béton, ainsi que la description des essais thermiques, microstructures, mécaniques et de la durabilité.
- Le dernier chapitre expose les résultats des différents essais sur les mélanges de béton avec leurs interprétations.

Ce travail est finalisé par une conclusion générale de cette étude et des résultats obtenus, accompagnée de suggestions de perspectives des travaux futurs.

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le verre

I.1 Généralité sur le matériau du verre

I.1.1 Introduction

Le verre est l'un des plus anciens matériaux formés par l'homme. Selon les spécialistes, l'apparition du verre remonte vers le VIIe siècle av. J.-C à travers les glaçures de céramiques. La technique à base de sable a permis vers 1500 av. J.-C de créer de petits vases et des conteneurs avec l'utilisation des colorants appropriés tels que le cuivre et le cobalt.

L'art du vitrage était répandu dans plusieurs pays, dont l'Égypte, l'Irak et la Syrie, ainsi qu'à Chypre vers 1000 avant J.-C cela a entraîné la naissance d'une sorte d'industrie du verre préhistorique (Glas Trösch Holding AG, 2013). Au siècle dernier avant J.-C, les Romains ont commencé le soufflage du verre dans des moules, ce qui a entraîné une grande augmentation de la variété des formes et de la topographie des objets en verre. Le soufflage du verre permettait d'offrir une grande variété de formes qui pouvaient être traitées ultérieurement pendant leur recuit. Après la Seconde Guerre mondiale, la société britannique Pilkington Brother Ltd a élaboré une procédure de flottation qui constitue une révolution dans la fabrication de verre plat. Cela permet de garantir une meilleure qualité de surface et une excellente transparence sans l'opération de polissage de verre établi antérieurement. En 1959, après sept ans de recherches et un investissement de 7 millions de livres sterling, Pilkington Ltd a lancé ce moyen économique de produire du verre sans distorsion. Aujourd'hui, environ 90 % du verre plat silico-sodocalcique est exclusivement fabriqué de cette manière. Le procédé est basé sur l'idée d'utiliser une surface plane de métal fondu pour supporter un ruban de verre continu. Le métal à utiliser doit être liquide sur la plage de température de 600 à 1050 °C correspondant au traitement du verre (Le Bourhis, 2014).

I.1.2 Définition de verre

Le verre est un matériau transparent, uniforme et un liquide solidifié. Les molécules sont dans un ordre entièrement aléatoire et ne créent pas des réseaux cristallins. Le verre utilisé aujourd'hui dans la construction est un verre de silice sodocalcique obtenu en chauffant les matières premières à haute température pour les rendre visqueuses avant de les refroidir. Le silicate et l'oxygène ne peuvent pas constituer une structure cristalline, autrement dit l'état moléculaire irrégulier est « gelé ». Les principales matières premières utilisées dans la fabrication du verre sont la silice et d'autres oxydes de calcium, sodium et le magnésium. En outre, une faible proportion d'autres matières peut être introduite afin d'influencer les caractéristiques et la couleur (Schittich et al. 1999). D'après Zarzycki (1991) le verre est un

solide non cristallin présentant le phénomène de transition vitreuse. Le phénomène de transition vitreuse est bien expliqué par la variation de volume en fonction de la température (Figure I.1). Le verre est généralement formé par solidification à partir de l'étape de fusion. Le refroidissement est si rapide que la cristallisation n'a pas le temps de se produire. La viscosité continue d'augmenter avec une diminution de la température, ce qui conduit à une congélation progressive du liquide jusqu'à sa solidification finale (Hasanuzzaman et al. 2016).

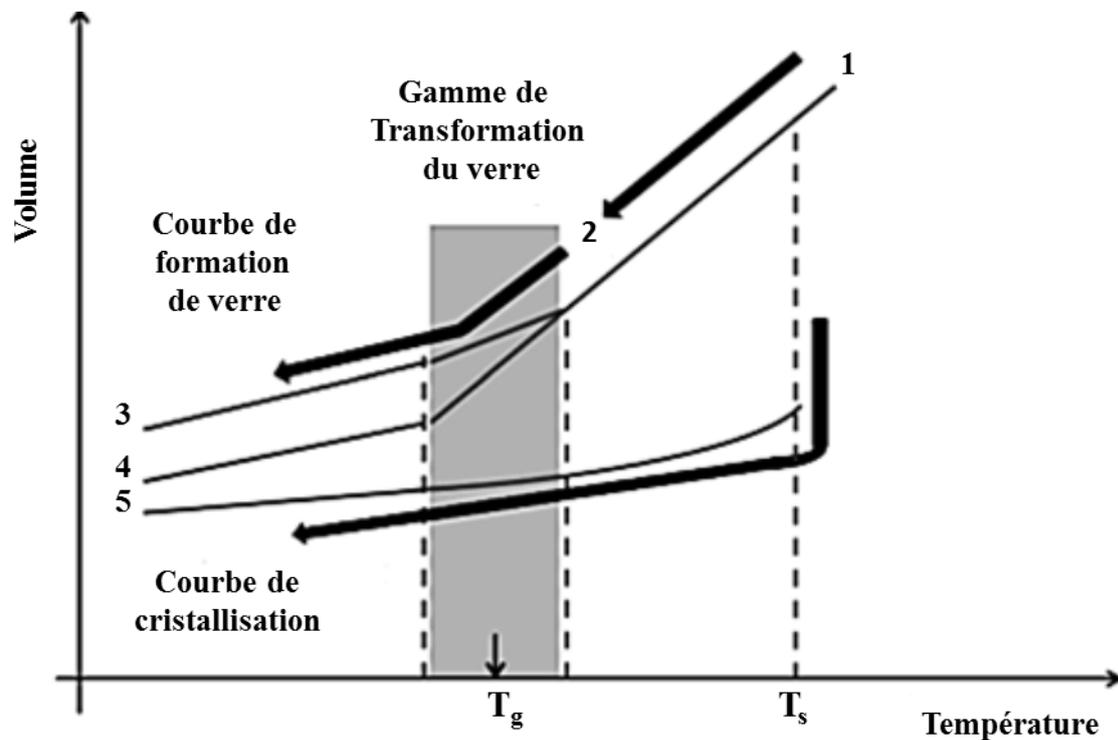


Figure I. 1 : La transition vitreuse et la formation de verre. 1 : liquide, 2 : liquide en surfusion, 3 : verre à refroidissement rapide, 4 : verre à refroidissement lent, 5 : cristal ; T_s : température de fusion, T_g : température de transition vitreuse (Hasanuzzaman et al. 2016).

I.1.3 Structure du verre

Les atomes du verre sont reliés entre eux par des forces essentiellement similaires à celles des cristaux. Les atomes oscillent autour de positions d'équilibre bien définies sur de grands intervalles de température ainsi que la formation des réseaux tridimensionnels étendus dans les cristaux. La différence entre un réseau de cristaux et un réseau de verre est la présence de symétrie et de périodicité dans le premier et l'absence dans le second (Zachariasen, 1932).

Zachariasen (1932) a proposé quatre conditions pour la formation d'un verre d'oxyde :

- 1- Un atome d'oxygène peut être lié à deux atomes au maximum ;

- 2- Le nombre d'atomes d'oxygène qui accompagnent les atomes qui le composent doit être petit ;
- 3- Les polyèdres de l'oxygène ont des coins en commun, et non des bords ou des faces ;
- 4- Pour le réseau tridimensionnel, chaque polyèdre d'oxygène doit avoir au moins trois coins en commun.

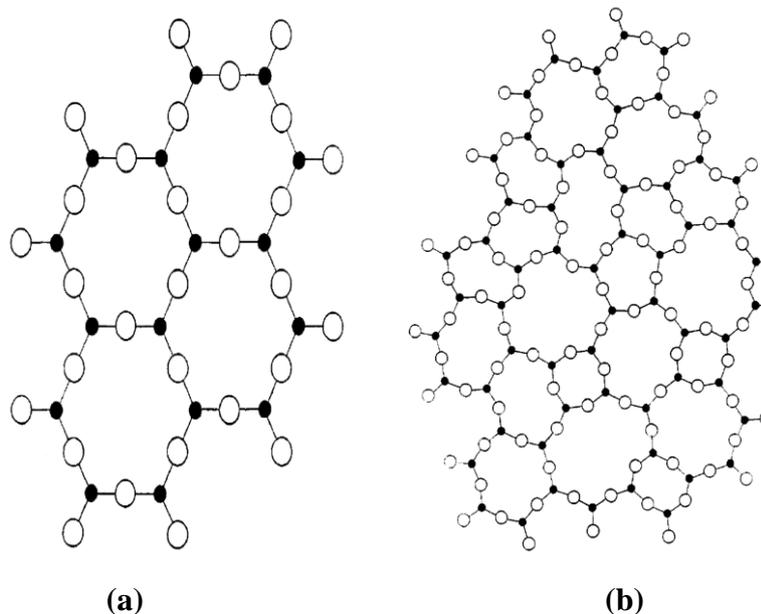


Figure I. 2 : La représentation de l'arrangement des atomes dans un réseau cristallin (a) et un réseau de verre à trois dimensions (Zachariasem, 1932).

I.1.4 La production du verre

En général, le verre sodocalcique, qui sert à fabriquer des bouteilles, des bocaux, des verres à boire et du verre de fenêtre, se compose de 70 à 75 % de sable de quartz (SiO_2 , taille des particules 0,1 à 0,4 mm) ; et de 12 à 16 % de soude (Na_2O , Na_2CO_3), de 10 à 15 % de chaux (CaO , CaCO_3) et de traces d'autres matériaux. Le verre cristal, qui est utilisé pour les verres à boire, les vases, les objets d'art, etc. de haute qualité est habituellement fabriqué à partir de 54-65 % de SiO_2 , 18-38 % de PbO , 13-15 % de Na_2O ou K_2O ; et de divers autres oxydes.

La fabrication du verre borosilicaté, qui est employé pour la verrerie de laboratoire, la verrerie de cuisine et les lampes à haute température, se fait généralement à partir de 70-78 % de SiO_2 ; et de 7-13 % de B_2O_3 , 4-8 % de Na_2O ou K_2O et 2-7 % d' Al_2O_3 . Le verre borosilicaté est résistant à la corrosion et à la température. Le verre sodocalcique est le seul de ces types de verre qui peut être recyclé par refonte. En raison de la différence de leurs propriétés chimiques, les deux autres types de verre ne doivent pas être mélangés avec le verre sodocalcique (Christensen, 2010).

I.1.5 Propriétés du verre

I.1.5.1 Viscosité

La viscosité d'un verre est la plus importante de ses propriétés technologiques. Elle permet de définir les conditions de fusion, ainsi que le comportement d'affinage, le taux de dévitrification et la température supérieure d'utilisation. De plus, les viscosités des différents verres dépendent énormément de la composition et de la température. Quand on applique une force de cisaillement à un liquide, celui-ci s'écoule et la viscosité est le rapport entre la force et la vitesse d'écoulement. Dans le cas où deux plans parallèles de surface A , séparés par une distance d , sont soumis à une différence de force tangentielle F , la viscosité η est définie comme : $\eta = Fd / Av$, où v est la vitesse relative des deux plans (Bansal et Doremus, 1986).

I.1.5.2 Elasticité

Le module de Young E est la constante de proportionnalité entre une contrainte uniaxiale et une déformation uniaxiale et G associe une contrainte et une déformation de cisaillement.

Le module d'élasticité est mesuré au mieux par la méthode de l'écho d'impulsion, qui consiste à transmettre une impulsion sonore à travers l'épaisseur d'un échantillon de verre par un transducteur. À la réception, l'impulsion est réfléchiée par la surface arrière. La durée du parcours peut être liée aux modules d'élasticité. Les ondes longitudinales et transversales nécessitent d'être employées dans des essais séparés pour mesurer les deux modules (Varshneya et Mauro, 2019).

Tableau I. 1 : Module de Young E des différents verres (Barton et Guillemet, 2005).

Type de Verre	E (GPa)
Sodocalcique	66
Borosilicate	68
Verre E	73
Verre S	87
SiO ₂	70
B ₂ O ₃	17
GeO ₂	43

I.1.5.3 La résistance du verre

Ce matériau peut s'étirer en réponse à une tension, et se contracter en répondant à une compression, puis se déformer en réponse à un cisaillement, sans pouvoir s'écouler. Il peut se briser dans certaines circonstances, et cela est la caractéristique du verre, la raison pour laquelle on s'en méfie le plus. Le verre ne se brise dans des circonstances ordinaires qu'en réponse à

une contrainte de traction, et la fracture est produite à angle droit par rapport à la tension maximale (Preston, 1942).

I.1.5.4 Résistance aux chocs thermique

La résistance aux chocs thermiques est la capacité à résister à un changement brusque de température. Elle est exprimée en degrés Kelvin et représente la probabilité d'un choc thermique, à savoir la rupture suite à une surcharge thermique. La résistance au choc thermique d'un verre est d'autant plus élevée que le risque de choc thermique est faible (Glas Trösch Holding AG, 2013).

Tableau I. 2 : La résistance aux chocs thermiques de divers verres (Glas Trösch Holding AG, 2013).

Type de verre	Résistance aux chocs thermiques
Verre flotté	40° K
Verre de sécurité trempé (ESG)	150° K
Verre borosilicate	260° K
Verre céramique	> 300° K

I.1.5.5 Durabilité chimique des verres

Pour un matériau, la durabilité chimique est une caractéristique qui se mesure par sa capacité à résister à l'action corrosive de l'eau, de la solution aqueuse d'acides, d'alcalis et de sels.

Les verres ont une durabilité chimique supérieure à celle de la plupart des métaux et polymères. Mais les verres non silicatés sont susceptibles de se dissoudre dans des solutions aqueuses, surtout dans des solutions à faible pH. La plupart des verres se dissolvent facilement dans l'acide fluorhydrique (HF) qui s'attaque aux liaisons du réseau (Hasanuzzaman et al, 2016).

I.1.6 Recyclage et l'impact environnemental des déchets de verre

Le verre représente une grande partie des déchets ménagers et industriels. Dans les déchets de verre, le verre d'emballage occupe environ 80 % de la quantité totale de verre usagé. Selon la couleur, 63 % sont clairs, 25 % ambrés, 10 % verts et 2 % bleus ou d'autres couleurs. Ces verres ont la même composition principale, à l'exception de quelques additifs utilisés pour la couleur (Zheng, 2013). Les impacts environnementaux principaux de la production de verre sont la consommation élevée d'énergie lors de sa fusion, qui provoque des émissions de gaz de combustion et la réaction thermique des éléments du mélange. Pour chauffer le verre en fusion, on brûle habituellement des combustibles fossiles au-dessus d'un bain de matière première, qui est continuellement alimenté, puis retiré du four à l'état fondu. La chaleur est principalement

assurée par la transmission radiative de la couronne du four, qui est chauffé par les flammes jusqu'à 1650 °C, dont certaines proviennent également des flammes elles-mêmes (Butler et Hooper, 2019). Le verre est un matériau réutilisable sous de nombreuses formes. Cela a encouragé les fabricants à considérer que des économies en matière d'énergie et de ressources pouvaient être réalisées grâce à la récupération et à la réutilisation ou au recyclage du verre. Il existe des avantages environnementaux plus importants pour le recyclage, parmi ceux-ci, la réduction des déchets. Le verre est un déchet inerte, en raison de son insolubilité et de sa non-réactivité chimique dans des conditions normales et la diminution de la demande d'énergie qui entraîne une réduction de la pollution (Worrell et Reuter, 2014). La fabrication de nouvelles bouteilles et de nouveaux pots à partir de verre recyclé permet de réduire considérablement l'énergie nécessaire au four. De plus, le recyclage permet de réduire la demande de matières premières et la quantité de déchets de verre qui doivent être mis en décharge. Cela nous permet de contribuer à un plus grand niveau de développement durable (Siddique, 2008).

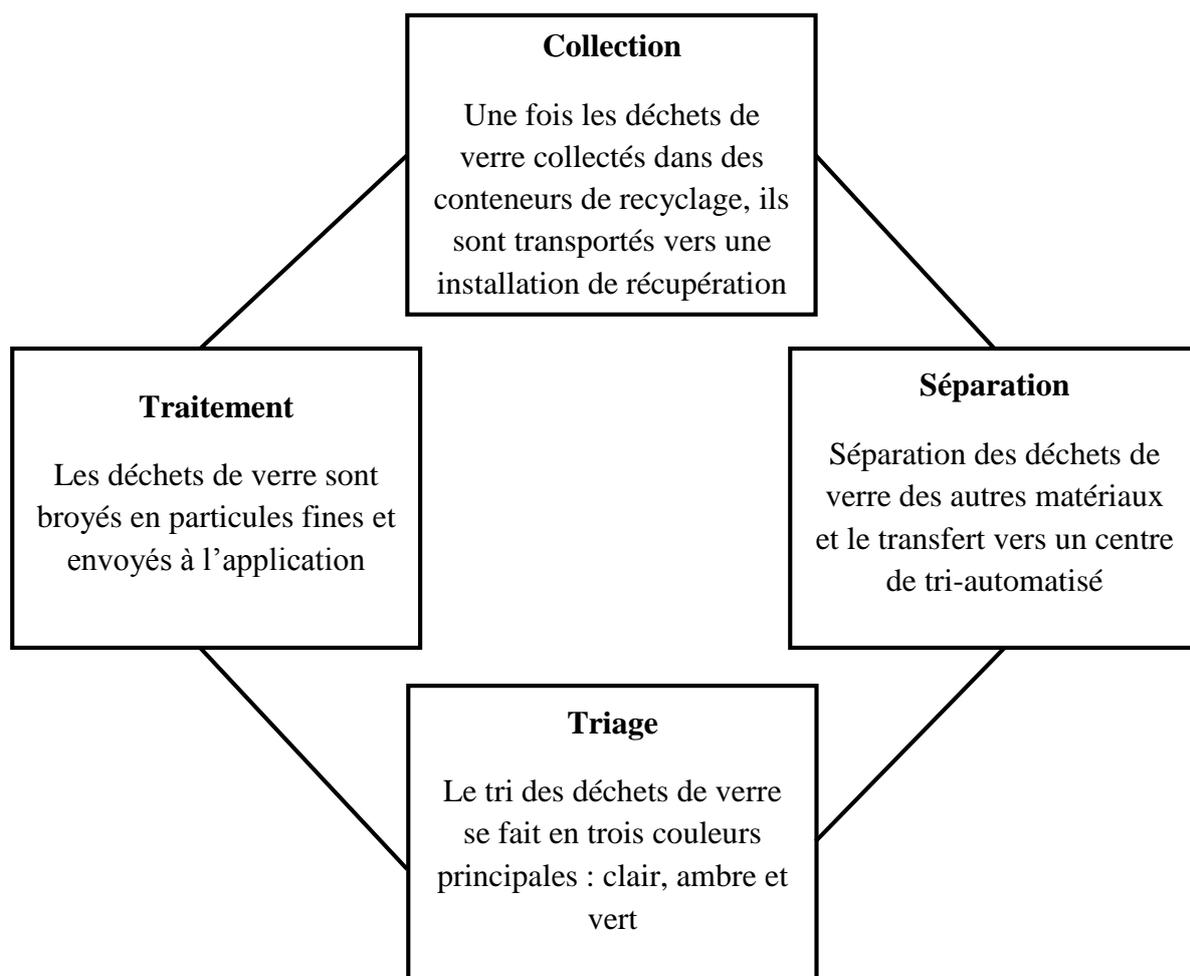


Figure I. 3 : Processus de recyclage typique des déchets de verre (Kazmi et al, 2020).

I.1.7 L'utilisation de verre dans le béton

I.1.7.1 Réaction alcali-silice du verre

Les propriétés mécaniques du béton sont améliorées avec le remplacement partiel du ciment ou des granulats, mais il y a des problèmes qui apparaissent dans la durabilité du béton. La silice du verre se combine avec les alcalins de la pâte cimentaire conduisant à la fissuration et le gonflement du béton. La réaction alcali-silice du verre est influencée par plusieurs facteurs tels que :

- La taille des grains de verre ;
- La teneur en verre ;
- La porosité du verre ;
- Les éléments mineurs (chrome, lithium, fer) (Idir, 2009).

I.1.7.2 Réaction pouzzolanique du verre

L'utilisation des pouzzolanes naturelles contenant une teneur élevée de silice comme le verre dans le béton entraîne la formation de silicate de calcium hydraté CSH après la réaction avec la portlandite CH en présence d'eau selon la forme suivante :



Selon Idir (2009) après la détermination de l'activité pouzzolanique par le test de chapelle sur le verre et d'autres minéraux fins tels que la cendre volante, la fumée de silice et la CALSiFrit. Il montre que la meilleure consommation de la chaux est obtenue par la fumée de silice et le verre consomme plus que la cendre volante et la CALSiFrit comme le montre la figure I.4.

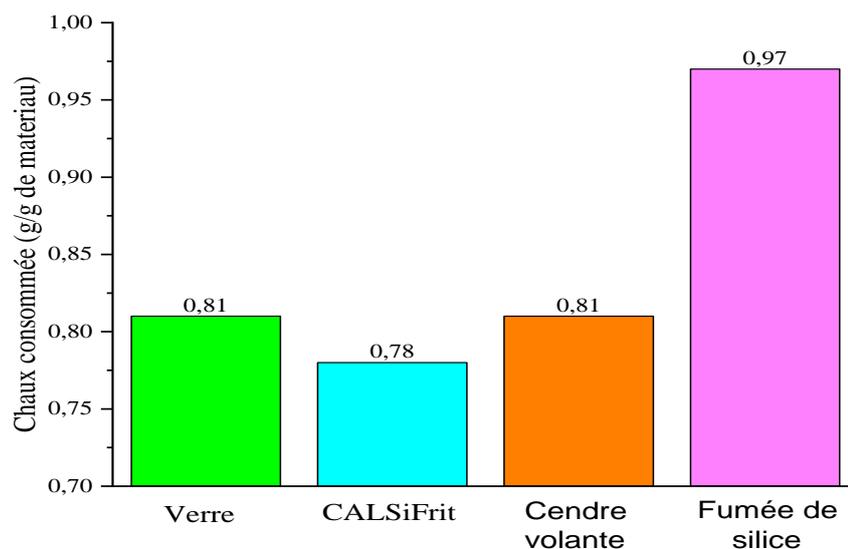


Figure I. 4 : La quantité de chaux consommée par le verre et d'autres matériaux (Idir, 2009).

I.2 Valorisation des déchets de verre dans le béton

I.2.1 Introduction

Le béton est le matériau le plus utilisé dans les structures et les bâtiments. C'est un mélange de pâte de ciment avec des agrégats, et il est bien connu que le dosage et le mélange des composants du béton sont des étapes importantes de sa fabrication (Donadkar et Solanke, 2016). Il est évident que le ciment est un ingrédient clé de la matrice du béton, car il est le liant de tous les autres composants du mélange, représentant 7 à 15 % de celle-ci (Olutoge, 2016).

Le verre est considéré comme l'un des plus anciens matériaux façonnés par l'homme. L'origine de la fabrication du verre reste, aujourd'hui, une énigme. Selon les spécialistes, les plus anciens objets en verre qui ont été découverts, tels que les glaçures de céramique, datent du 7^e siècle avant Jésus-Christ. On peut parler d'une véritable activité de production dès 3500 avant J.-C sous forme de perles de verre, puis de bagues et de petites figurines à l'aide de moules.

La technique du sable a été développée vers 1500 avant J.-C (Glas Trösch Holding AG, 2013). Les principales matières premières utilisées dans la fabrication du verre sont le sable (qui fournit le dioxyde de silicium), la soude et le calcaire, qui constituent généralement plus de 85 % du mélange. En 2016, la production mondiale de verre était de 140 millions de tonnes, dont 72 millions de tonnes de verre plat, 50 % produit en Chine, 15 % en Europe ; et 10 % en Amérique du Nord, 7 % en Asie du Sud-Est, 5 % au Japon et 4 % en Amérique du Sud. En 2010, sur une production mondiale de 56 millions de tonnes, le verre plat de faible qualité (principalement en Chine) constituait 20 millions de tonnes ; et le verre étiré et feuilleté représentaient 1 million et 2 millions de tonnes respectivement (Entreprise chimique française, 2017).

L'intérêt environnemental et économique du recyclage des déchets de verre est intéressant. L'utilisation du calcin comme additif aux matières premières permet aux producteurs de verre de réduire leur consommation d'énergie et de diminuer les émissions de gaz à effet de serre. L'augmentation du recyclage du verre contribue également à résoudre les grands problèmes environnementaux liés à la gestion des déchets solides (Sibelco Green Solutions, 2019).

Les déchets de verre de différentes origines peuvent être collectés et recyclés dans le secteur de la production de ciment et de béton. Plusieurs options de recyclage sont envisagées, par le remplacement des granulats ou du ciment et des additifs au ciment, qui peuvent offrir au secteur de la construction de véritables solutions pour participer au développement durable.

Ce chapitre examine les différentes façons d'utiliser les déchets de verre dans le béton sous forme de granulats et/ou de ciment ou encore comme ajout cimentaire. Il montre également l'effet du ratio de remplacement et de la taille des particules de ces déchets sur les performances

et la durabilité du béton. Son objectif est d'apporter une solution écologique en réduisant ces déchets et une solution économique en déminant le coût du béton.

I.2.2 Valorisation des déchets de verre sous forme de granulats

L'utilisation des déchets de verre comme granulats dans le béton offre une opportunité d'éliminer ces déchets et de réduire la consommation des granulats minéraux utilisés dans la construction. Cela permet de réduire les coûts de transport des déchets de verre vers les installations de recyclage et les chantiers de construction (Afshinnia, 2015).

La faible conductivité thermique du verre par rapport aux granulats de calcaires est un avantage technique, qui donne au béton une meilleure isolation thermique. Les granulats de verre améliorent également la résistance à l'abrasion des bétons (Polley et al., 1998).

Cependant, l'utilisation de déchets de verre comme granulats peut provoquer des réactions alcalines-silice (RAS) qui produisent des matériaux expansifs, qui peuvent détériorer les propriétés mécaniques du béton (Lee et al., 2011). De nombreuses recherches ont été menées, dont l'objectif d'utilisation des déchets de verre comme remplacement partiel des granulats fins et grossiers du béton. Ismail et AL-Hashmi (2009) ont examiné l'utilisation des déchets de verre comme remplacement partiel des granulats fins dans le béton à des pourcentages de 5 %, 10 % et 20 %. Les résultats ont indiqué que le remplacement partiel des granulats fins par des poudres de verre diminue l'expansion des RAS et que les déchets de verre finement broyés réduisent l'expansion par rapport au mélange témoin. Cette diminution est liée à la réduction de l'alcali disponible due à la consommation de chaux par réaction avec les déchets de verre et à la réduction prévue de l'alcalinité du système. Kumar et Nagar (2017) dans leur travail sur la détermination des pourcentages de remplacement des agrégats fins par des déchets de verre, afin d'avoir une valeur optimale de résistance à la compression. Il a été constaté que le pourcentage optimal est de 25 %, auquel la résistance à la compression du béton a augmenté de 11,56 % à 28 jours.

Liaqat et al. (2018), ont mené des expériences sur la résistance mécanique du béton fabriqué avec des déchets de verre comme granulats grossiers avec une taille de particules de 4,75 à 12,5 mm et des pourcentages de 10 %, 20 %, 30 % et 40 % en poids. Ils ont conclu que le niveau de remplacement idéal des déchets de verre est de 10 %. D'autre part, Nwofor et Ukpaka (2017) ont étudié le remplacement des granulats fins et grossiers par les déchets de verre à des pourcentages de 20 %, 40 %, 60 % et 80 %. Ils ont constaté que le remplacement optimal dans les deux cas (fin et grossier) était de 20 % par rapport aux autres pourcentages. Par ailleurs,

Rajitha et al (2017) ont trouvé que le remplacement optimal en tant que granulats fins et grossiers était de 5 %.

La résistance à la compression des bétons produits par la substitution de granulats fins et grossiers est liée à de nombreux paramètres des déchets de verre tels que le pourcentage de remplacement et la taille des particules de ces derniers. Les travaux de recherche réalisés s'accordent sur la possibilité d'utiliser les déchets de verre sous forme de granulats dans le béton.

I.2.3 L'effet du remplacement des granulats sur les propriétés du béton

Pour le test d'affaissement, les recherches effectuées se sont avérées contradictoires dans leurs résultats. Les travaux d'Ismail et AL-Hashmi (2009) ont montré que l'affaissement des échantillons de béton diminuait avec l'augmentation du taux de déchets de verre. Cette diminution peut être expliquée par la forme angulaire des granulats de déchets de verre, qui réduit la fluidité du mélange. D'autre part, Liaqat et al. (2018) ont constaté que la maniabilité du mélange de béton augmente avec l'augmentation de la teneur en déchets de verre.

Adaway et Wang (2015) ont constaté que la résistance à la compression augmente avec l'ajout de déchets de verre au mélange jusqu'à 30 %. Cela peut être attribué à la forme angulaire des particules de verre qui facilite une liaison accrue avec la pâte de ciment. Le même résultat est obtenu par (Park et al., 2004). Mageswari et Vidivelli (2011) ont montré que la résistance à la compression des cubes et cylindres de béton pour tous les mélanges augmente avec l'augmentation du pourcentage de poudre de verre. Néanmoins, une diminution a été constatée avec l'augmentation de l'âge, expliquée par la réaction de la silice alcaline. Saand et al. (2017) ont constaté que la résistance à la compression du béton augmente avec le remplacement des granulats fins par des déchets de verre (4-12 %) ; au-delà de 12 %, la résistance diminue. Le remplacement de 12 % des agrégats fins par des déchets de verre ayant une taille de particules comprise entre 1,19 mm et 1,71 mm a donné les meilleurs résultats durant les essais de compression mécanique. Kervou et Ibrahim (2014) ont conclu que la meilleure variante donnant la meilleure résistance mécanique a été observée lors du remplacement des granulats grossiers à 25 % en poids, comme indiqué dans le tableau I.3. Ibrahim (2017) a montré qu'il était possible d'utiliser les déchets de verre comme substitut partiel du sable jusqu'à 40 % en poids sans réduire les résistances à la traction et à la compression par rapport au béton témoin ; et le meilleur taux de remplacement était de 15 %. Rahim et al. (2015) ont constaté que la meilleure valeur de la résistance à la compression est obtenue dans le mélange contenant 10 % de déchets

de verre comme remplacement des granulats fins. Cela représente une augmentation de 13,6 % par rapport au béton de référence comme illustré dans le tableau I.3.

Abdellah et Fan (2014) ont montré une augmentation continue de la résistance à la flexion avec l'âge lors du remplacement des agrégats fins par des déchets de verre. À 28 jours, la résistance a augmenté de 3,54 %, 5,03 %, 8,92 % lorsque la teneur en verre a augmenté de 5 %, 15 % et 20 %. Cela pourrait être attribué à la réaction pouzzolanique au fil du temps.

Pour l'essai d'absorption d'eau, Liaqat et al. (2018) ont conclu que l'absorption d'eau diminue avec l'augmentation de la teneur en déchets de verre comme remplacement de granulats grossiers. Saand et al. (2017) ont montré que l'absorption d'eau du béton diminue lorsque le dosage de déchets de verre augmente et la diminution maximale a été observée avec un remplacement de 40 % du sable. Lam et al. (2007) ont constaté que l'incorporation de 25 % ou moins de verre concassé recyclé comme remplacement partiel des granulats naturels induit une expansion négligeable des RAS après une période d'essai de 28 jours. Mais les résultats de l'expansion des RAS doivent être confirmés par d'autres méthodes d'essai telles que le test du prisme en béton. Romero et al. (2013) ont montré que l'utilisation de plus de 10 % de verre de tube cathodique pour le remplacement partiel des granulats fins dans le béton peut entraîner des dilatations délétères tout au long de sa durée de vie.

Saccani et al. (2010) ont conclu que la composition chimique du verre influence fortement la dilatation des échantillons de béton contenant du calcin en tant qu'agrégat. En vue de l'élargissement du recyclage du verre, il est nécessaire de déterminer les compositions d'expansion et d'introduire des procédures sélectives pour le traitement du verre post-consommation. Limbachiya et al. (2012) ont conclu que la présence des granulats de verre moussé n'affecte pas la profondeur de carbonatation des mélanges de béton et que la profondeur de carbonatation était réduite de moitié lorsque le rapport E/C passait de 0,76 à 0,62. Les auteurs précédents ont montré que la présence de matériaux cimentaires supplémentaires réduit l'expansion causée par les déchets de verre dans le béton. Lu et al. (2019 a) ont constaté que la perméabilité à l'eau des bétons était améliorée, en particulier pour les bétons préparés avec du calcin de verre comme granulats grossiers. L'utilisation de ce dernier était favorable à l'amélioration de la perméabilité à l'eau en raison de l'absorption d'eau négligeable due à la surface lisse du calcin de verre. Aghabaglou et al. (2016 a) ont conclu que la résistance au gel-dégel des mélanges contenant des granulats de verre est meilleure que celle du mélange témoin. Cette résistance était plus prononcée en augmentant la teneur en agrégats de verre du mélange. Aghabaglou et al. (2016 b) ont conclu que les mélanges de béton recyclé contenant plus de

50 % de granulats recyclés présentent de meilleures performances que le mélange témoin en termes de résistance aux sulfates. Aghabaglou et al. (2018) ont conclu que la profondeur de carbonatation de l'échantillon de référence est similaire à celle des mélanges avec des agrégats de verre et ces derniers présentaient une meilleure durabilité que le mélange de référence.

Le tableau I.3 présente le résumé des recherches utilisant les déchets de verre comme agrégat.

Tableau I. 3 : Résumé des recherches utilisant des déchets de verre comme granulats.

Type de déchets de verre	Pourcentage étudié (%)	Taille des particules étudiées (mm)	Pourcentage optimal de déchets de verre (%)	Taux d'augmentation de la résistance à la compression à 28 jours (%)	Taux d'augmentation de la résistance à la flexion à 28 jours (%)	Taille optimale (mm)	Référence
Bouteilles Pots, fenêtres	0-20 (0,15-4,75)	Fin	20	66,30	55,21	0,15-4,75	Ismail et AL-Hashmi (2009)
Déchets de verre recyclé	0-45	Fin (< 4,75)	25	11,56	/	Non indiqué	Kumar et Nagar (2017)
Le verre des fenêtres brisées	0-40	Grossier (4,75-12,5)	20	6,56	/	4,75 - 12,5	Liaquat et al, (2018)
Déchets de verre des fenêtres	0-80	Fin (≤ 4,75) Grossier (≤ 25)	20	,01	/	NI	Nwofor et Ukpaka (2017)
Déchets de verre recyclé	0-15	Non indiqué	5	/	1,28	Non indiqué	Rajitha et al, (2017)
Déchets de verre recyclé	0-40	Fin (< 4,75)	30	6	/	NI	Adaway et Wang (2015)
Déchets de verre sodocalcique	0-70	Grossier (6-20)	30	/	/	Non indiqué	Park et al, (2014)
Déchets de feuilles de verre	0-50	Fin (≤ 4,75)	10	/	/	NI	Mageswari et Vidivelli (2010)
Déchets de verre recyclé	0-40	Fin (1,19-1,71 ; 0,5-1,19)	12	36,85	/	1,19-1,71	Saand et al, (2017)
Déchets de verre des fenêtres	0-30	Grossier (0,15-20)	25	30,03	30,64	NI	Kervou et Ibrahim (2014)
Déchets de verre recyclé	0-40	Fin (< 4,75)	15	25	/	Non indiqué	Ibrahim (2017)
Bouteille (verre-sodocalcique)	0-50	Fin (< 4,75)	10	13,6	/	Moins de 4,75	Rahim et al, (2015)
Déchets de verre des fenêtres	0-20	Fin (< 4,75)	20	5,28	8,92	NI	Abdellah et Fan (2014)

NI: Non indiqué.

I.2.4 Valorisation des déchets de verre comme remplacement partiel du ciment

De nombreuses recherches ont été menées sur le remplacement du ciment Portland par des déchets ayant des effets pouzzolaniques tels que les cendres volantes, les fumées de silice. Le verre est principalement composé de silice, son utilisation dans le béton comme remplacement partiel du ciment pourrait constituer une solution technico-économique respectueuse de l'environnement à condition qu'il soit finement broyé. Lorsque les déchets de verre sont finement broyés, la réaction pouzzolanique avec les hydrates de ciment est favorisée, formant ainsi le silicate de calcium hydraté (C-S-H) (Abdelli et al, 2020).

I.2.5 L'effet de la taille des particules des déchets de verre

Les résultats expérimentaux de Zakir et al. (2016) ont montré que la résistance du béton augmente lorsque la taille des particules de la poudre de verre diminue dans le béton. Une taille de grain inférieure à 75 μm donnait une résistance supérieure à celle de la taille des particules de 90 à 150 μm . Prudhvi et al. (2016) ont étudié la résistance du béton avec des déchets de verre comme remplacement partiel du ciment avec une taille de particules de 90 à 150 μm . Ils ont conclu que 20 % de la poudre de verre ayant une taille inférieure à 100 μm peut être inclus comme remplacement du ciment dans le béton sans aucun effet défavorable.

Shanmuganathan et al. (2017) ont utilisé des déchets de verre dont la taille des particules était inférieure à 90 μm . Ils ont constaté que la résistance à la flexion est plus élevée à 15 % et 20 % par rapport au béton témoin à 14 et 28 jours. Sreenivasulu et Prudhvi (2016) ont évalué l'activité pouzzolanique de la poudre de verre dans le béton avec deux tailles de particules entre 100 μm et 150 μm et l'autre inférieure à 100 μm . Ils ont conclu que la poudre de verre avec une taille de grain inférieure à 100 μm présente un comportement pouzzolanique, ce qui favorise l'amélioration des résistances des mélanges de béton. Harish et al. (2016) ont conclu que la résistance à la compression et à la traction augmente dans les mélanges contenant de la poudre de verre avec une taille inférieure à 150 μm ; et ils ont noté une diminution dans les mélanges contenant de la poudre de verre avec une taille de particules inférieure à 300 μm .

Hussain et Verma (2016) ont constaté que la taille plus fine des particules de déchets de verre usagé a une activité plus intense avec le ciment, ce qui se traduit par une résistance à la compression plus élevée dans le mélange de béton.

I.2.6 Le taux de remplacement du ciment par la poudre de verre

Divers travaux de recherche ont été menés pour étudier le pourcentage optimal de déchets de verre qui peuvent être introduits pour remplacer partiellement le ciment dans le béton, Vandhiyan et al. (2013) ; Gahoi et Kansal (2016) et Olutoge (2016) ont conclu que 10 % de remplacement du ciment par la poudre de verre est la meilleure proportion. D'autre part, Meena et al. (2018) ; Karde et al. (2018) et Khan et al. (2015) ont constaté que 15 % de poudre de verre est la teneur optimale pour conserver la résistance mécanique.

En outre, Prudhvi et al. (2016) et Sakale et al. (2016) ont conclu que le pourcentage optimal de déchets de verre pour améliorer les performances du béton est de 20 %.

Kumar et Sood (2017) ont constaté que le ciment peut être remplacé par la poudre de verre jusqu'à 20 % sans perte de résistance à la flexion et à la traction dans toutes les variantes de béton étudiées. Rahman et Uddin (2018) ont conclu que 30 % du remplacement du ciment permet d'obtenir une résistance maximale à la traction par fendage par rapport au béton témoin à 28 jours. Olofinnade et al. (2017) ont montré qu'il est possible de produire un béton durable de résistance moyenne pour des applications structurelles en utilisant 20 % de poudre de verre comme remplacement du ciment. L'étude menée par Aliabdo et al. (2016) montre l'effet de l'utilisation de la poudre de verre dans le béton comme remplacement et addition au ciment. Les résultats des tests ont montré que l'utilisation de 15 % de poudre de verre en tant qu'addition au ciment permet une augmentation de la résistance de 16 %.

I.2.7 Effet de la poudre de verre sur les propriétés du béton frais

La maniabilité du béton est une caractéristique souhaitée. Il existe de nombreux tests pour mesurer cette propriété du béton, basé sur différents principes tels que l'affaissement au cône d'Abrams et la table d'écoulement. Vandhiyan et al. (2013) ont conclu que la maniabilité du béton réduite avec l'augmentation du remplacement du ciment par la poudre de verre. Ceci est dû à l'augmentation de la surface de la poudre de verre et aussi à la forme angulaire de ces dernières. Le même résultat a été observé par (Olutoge, 2016).

En outre, Khan et al. (2015) ont constaté que la valeur d'affaissement diminue avec l'ajout de la poudre de verre, de sorte qu'une grande quantité d'eau est requise pour obtenir la même maniabilité que le mélange témoin. Aliabdo et al. (2016) ont montré que l'utilisation de la poudre de verre comme addition au ciment réduit l'affaissement du béton. Cette tendance peut s'expliquer par l'augmentation de la teneur en matériaux fins qui augmente la cohésion du mélange de béton et diminue ainsi l'affaissement du béton. Les résultats ont montré que

l'augmentation du niveau de remplacement du ciment par la poudre de verre augmente l'affaissement du béton. Ce comportement peut être expliqué par la faible absorption d'eau de la poudre de verre ou peut être attribué aux particules plus grossières de la poudre de verre par rapport au ciment. Arora (2015) a montré que l'affaissement du béton augmente avec l'augmentation de la teneur de la poudre de verre dans le mélange de béton.

Keerio et al. (2017) ont constaté que la maniabilité du béton augmente lorsque le dosage des déchets de verre augmente, l'augmentation maximale de la maniabilité a été observée à 25 % de remplacement du ciment par des déchets de verre. Les différents résultats d'ouvrabilité sont résumés dans la figure I.5.

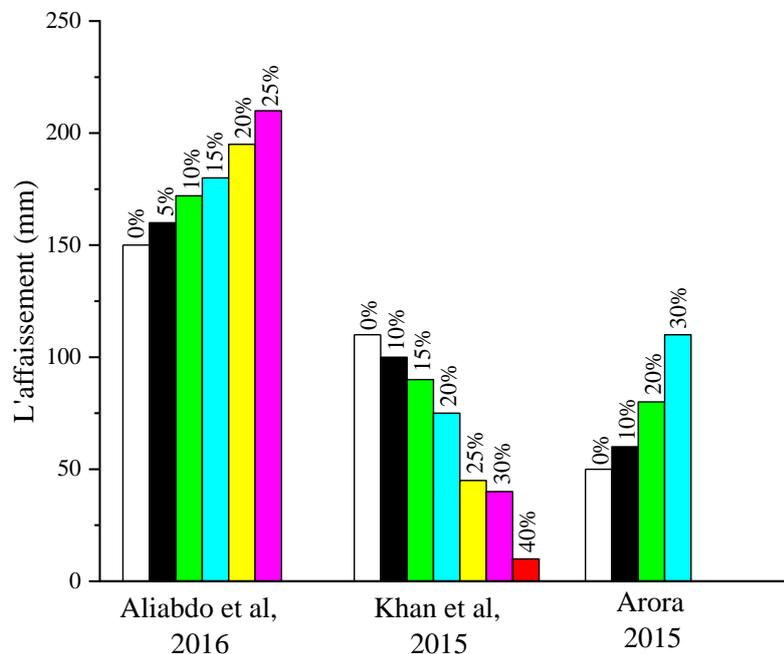


Figure I. 5 : Résumé des résultats de l'effet de la teneur de poudre de verre sur l'affaissement du béton.

I.2.8 Effet de la poudre de verre sur les propriétés du béton durci

Kumar et al. (2014) ont constaté que la densité du béton à 28 jours diminue avec l'augmentation du pourcentage de remplacement du ciment par la poudre de verre. Ceci est dû à la faible valeur de densité du verre utilisé ($2,58 \text{ g/cm}^3$) par rapport au ciment ($3,15 \text{ g/cm}^3$). Le même résultat a été confirmé par (Bhat et Rao 2014). Keerio et al. (2017) ont observé que la densité du béton durci augmente avec le remplacement du ciment par des déchets de verre de 5 %, 10 % et 15 %. L'augmentation maximale de 1,25 % a été notée lors du remplacement de 10 % du ciment par

la poudre de verre. Aliabdo et al (2016) ont conclu que l'utilisation de la poudre de verre comme remplacement partiel du ciment a un effet significatif sur la densité du béton.

La figure I.6 montre les différents résultats de l'effet de la poudre de verre sur la densité du béton durci.

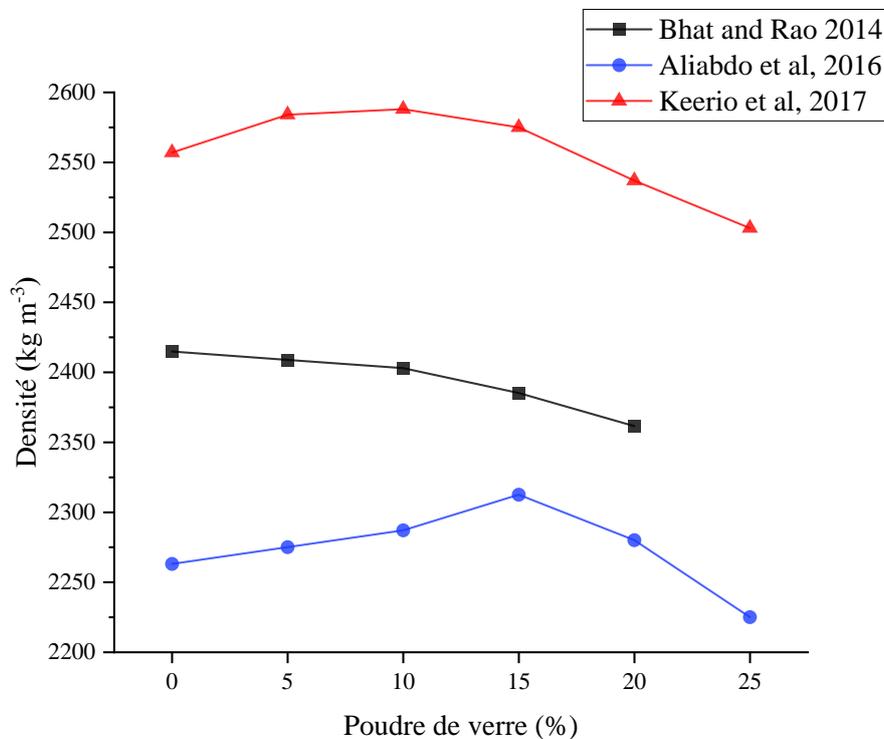


Figure I. 6 : Différents résultats de l'effet de la teneur de poudre de verre sur la densité du béton durci.

La caractéristique essentielle du béton durci est la résistance à la compression à un âge donné. Olofinnade et al. (2017) ont rapporté que le béton contenant de la poudre de verre montre une amélioration considérable du développement de la résistance à la compression à 28 jours par rapport au béton témoin, en raison de l'activité pouzzolanique de la poudre de verre. Vandhiyan et al. (2013) ont conclu que la résistance à la compression du béton augmente jusqu'à 10 % du remplacement du ciment. Zakir et al. (2016) ont constaté qu'il y a une augmentation de la résistance à la compression à 28 jours. Mounika et al. (2017) ont constaté que la résistance à la compression optimale est obtenue dans le mélange contenant 10 % de la poudre de verre et croit de 28,3 %, 31,1 % et 36 % respectivement à 7, 14 et 28 jours. Gahoi et Kansal (2016) ont remplacé le ciment Portland par la poudre de verre à des pourcentages allant de 0 à 25 %. Ils ont noté qu'il y avait une augmentation significative de la résistance à la compression du béton, lorsque le taux de poudre de verre était porté à 10 %.

Du et Tan (2014) ont montré que le remplacement de 30 % du ciment par des déchets de verre est optimal pour une résistance à la compression du béton à 7 jours. Les résultats de Khan et al. (2015) ont montré une diminution de la résistance à la compression, mais avec le temps la résistance obtenue augmente avec un taux constant ; et à 84 jours d'essai des mélanges M2 (10 %), M3 (15 %), M4 (20 %), a atteint 88 % de la résistance à la compression du béton témoin. Bhat et Rao (2014) ont conclu que la résistance à la compression du béton contenant 20 % de poudre de verre présente une résistance maximale par rapport au béton témoin, ce résultat est cohérent avec (Sakale et al., 2016). La figure I.7 montre les différents résultats de résistance à la compression en fonction de la teneur en poudre de verre dans le béton.

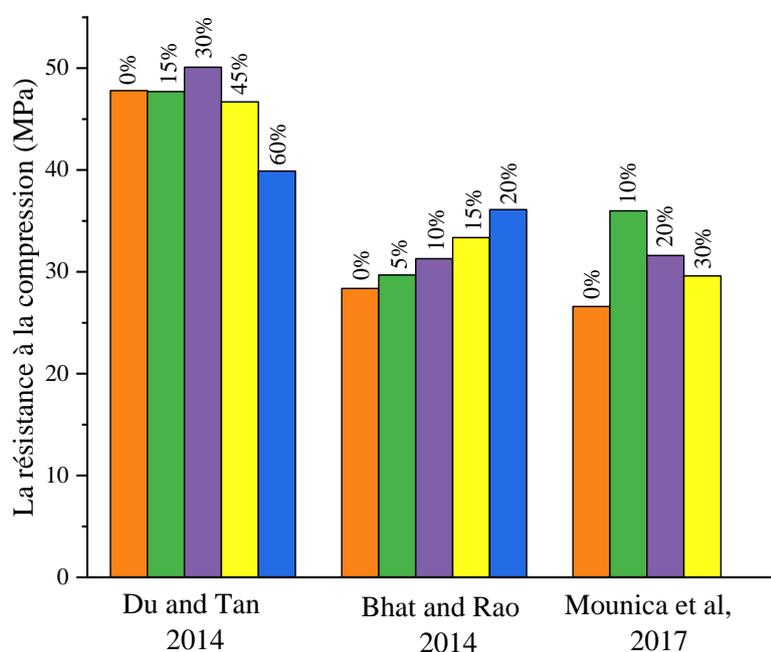


Figure I. 7 : La résistance à la compression en fonction de la teneur de poudre de verre dans le béton à 28 jours de durcissement.

Pour la résistance à la traction, Kumar et al. (2014) ont trouvé que la résistance à la traction est maximale à 20 % de remplacement du ciment par la poudre de verre. Le même résultat est observé par (Sakale et al., 2016). D'autre part, Shekhawat et Aggarwal (2014) et Aliabdo et al. (2016) ont conclu que la résistance à la traction par fendage augmente à 10 % du remplacement du ciment par la poudre de verre par rapport au béton témoin, puis diminue avec l'augmentation de la poudre de déchets de verre. Karde et al. (2018) ont constaté que la résistance à la traction

augmentait jusqu'à 5,05 %, 6,52 % et 6 % respectivement à 28, 56 et 90 jours dans les pourcentages de 5 %, 10 % et 15 %. Kumar et Sood (2017) ont conclu que la résistance à la traction par fendage du béton M20 a augmenté de 39 % à 7 jours et de 38 % à 28 jours par rapport au béton de référence ; et dans le béton M25, ils ont noté une augmentation de 40 % à 7 jours et 28 % à 28 jours par rapport au béton témoin. Tandis que, Zakir et al. (2016) ont montré que la résistance à la traction par fendage du béton à base de poudre de verre augmente d'environ 29 % à 28 jours. Rahman et Uddin (2018) et Mwizerwa et Garg (2017) ont constaté une augmentation de la résistance à la traction par fendage de 3,04 % à 7 jours et 51,16 % à 28 jours dans le remplacement de 30 % du ciment par la poudre de verre.

La figure I.8 résume les résultats de l'effet de la poudre de verre sur la résistance à la traction obtenue par les différents auteurs.

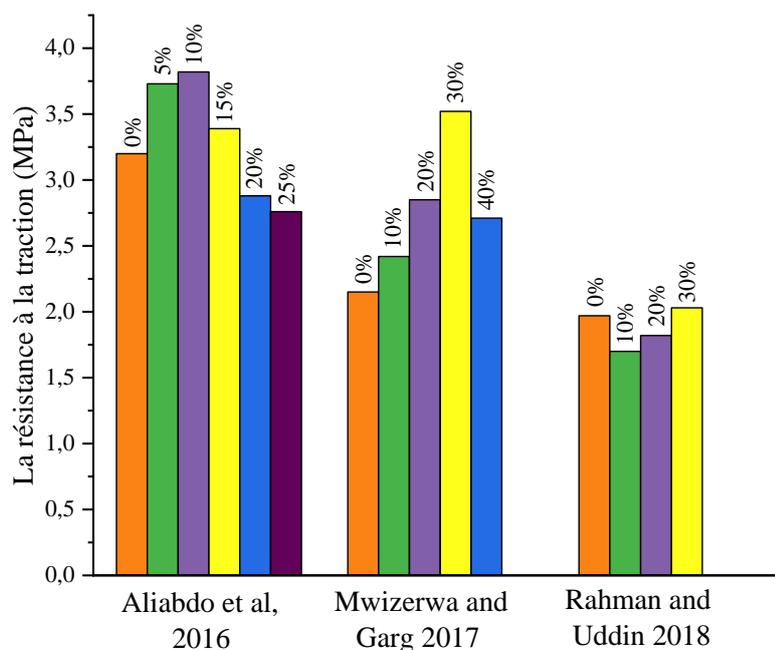


Figure I. 8 : Effet de l'utilisation du pourcentage de poudre de verre sur la résistance à la traction du béton à 28 jours de durcissement.

Pour la résistance à la flexion, Mounika et al. (2017) ont constaté que la résistance à la flexion augmente lorsque le ciment est remplacé par la poudre de verre broyé de 10 % et 20 %. L'augmentation de la résistance observée est de 1,46 % et 1,66 % à 7 jours, 8,21 % et 8,60 % à 14 jours, puis 9,74 % et 10,10 % à 28 jours. Arora (2015) a conclu que la résistance à la flexion d'un béton contenant 10 % et 20 % de poudre de verre est supérieure à celle du béton de

référence ; et que le dosage optimal du remplacement est de 20 %, puisque la résistance maximale est atteinte à ce pourcentage. En outre, Gahoi et Kansal (2016) ont conclu que pour les bétons de classe M20 et M30, il y avait une augmentation de 22,5 % et 7 %, respectivement. Zakir et autres (2016) ont constaté que la résistance à la flexion du béton à base de poudre de verre montre une augmentation à 28 jours par rapport au béton témoin. Karde et al. (2018) ont observé une diminution de la résistance à la flexion lors du remplacement initial de 5 % et 10 %. La résistance augmente après remplacement de 15 % et 20 % pendant 28 jours et 56 jours. Après 90 jours, ils ont constaté que seul 15 % de poudre de verre participe à l'augmentation de la résistance à la flexion par rapport au mélange de référence et à d'autres pourcentages. En revanche, Rokdey et al. (2018) ont constaté que la résistance à la flexion augmente jusqu'à 15 %. Cette augmentation s'explique par la réaction pouzzolanique de la poudre de verre et le remplissage efficace des vides, qui se traduit par une microstructure de béton dense. Cependant, au-delà de 20 %, la résistance diminue. Le travail de Mwizerwa et Garg (2017) a conclu que le verre de couleur verte offre une résistance à la flexion plus élevée que le verre clair avec le même taux de remplacement ; et que le pourcentage de remplacement optimal dans le béton était de 30 % pour les deux types de verre. La figure I.9 montre les résultats de l'effet de la teneur en poudre de verre sur la résistance à la flexion du béton à 28 jours de durcissement.

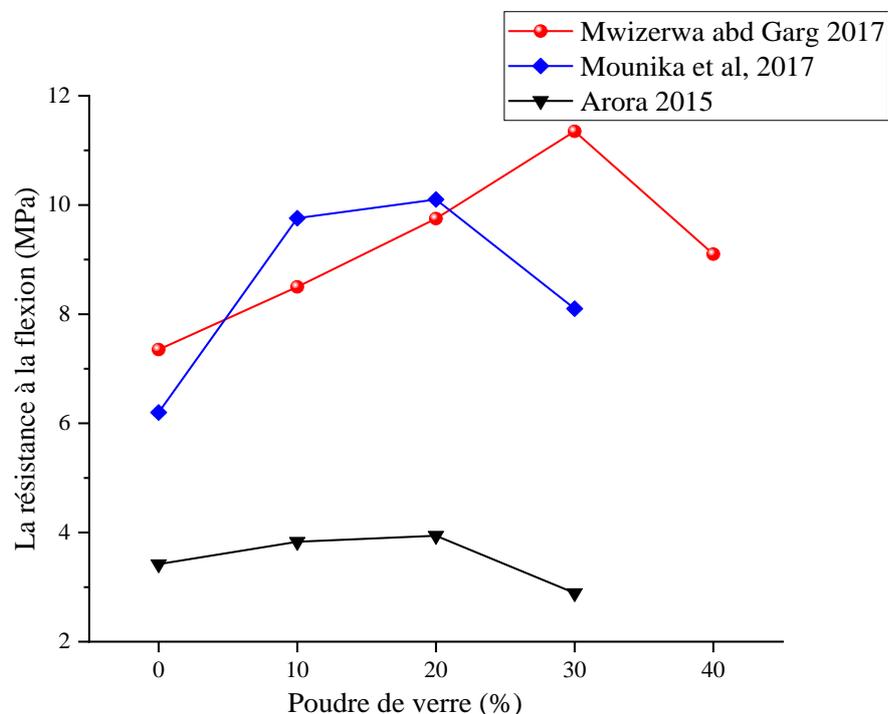


Figure I. 9 : Effet de la teneur de poudre de verre sur la résistance à la flexion du béton à 28 jours de durcissement.

D'autres propriétés ont été étudiées par différents chercheurs pour examiner la durabilité du béton. Shekhawat et Aggarwal (2014) ont conclu que plus la teneur en poudre de verre augmente, plus le pourcentage d'absorption d'eau diminue et la valeur minimale se situe à 10 % de remplacement du ciment par la poudre de verre. Bhat et Rao (2016) ont conclu que l'absorption d'eau diminue avec l'augmentation du pourcentage de poudre de verre dans le béton. De plus, Gahoi et Kansal (2016) ont conclu que le pourcentage d'absorption d'eau diminue par rapport au béton de référence pour les deux classes de béton M20 et M30.

Olofinnade et al. (2017) ont constaté qu'une augmentation de la porosité peut être liée à une augmentation de la teneur en poudre de verre. Du et Tan (2014) ont étudié les propriétés du béton avec le remplacement partiel du ciment par la poudre de verre. Ils ont conclu que la résistance à la pénétration des ions chlorure et de l'eau est grandement améliorée en remplaçant le ciment par la poudre de verre grâce à la microstructure raffinée de la pâte. Ils ont constaté que l'utilisation de la poudre de verre comme matériau cimentaire peut évidemment réduire la porosité et la distribution de la taille des pores. Nassar et Soroushian (2012) ont conclu que l'utilisation de déchets de verre broyé comme remplacement partiel du ciment dans le béton de granulats recyclés permet d'améliorer les propriétés de durabilité ; telles que la perméabilité aux chlorures et la résistance au gel-dégel grâce à l'amélioration des caractéristiques du système poreux et à l'effet de remplissage des particules de verre.

Les tableaux I.4 et I.5 présentent le résumé des recherches sur l'utilisation des déchets de verre comme remplacement partiel du ciment.

Tableau I. 4 : Résumé des recherches sur l'utilisation des déchets de verre comme remplacement partiel du ciment.

Type de déchets de verre	Pourcentage de remplacement étudié (%)	Taille des particules étudiées (µm)	Pourcentage optimal de déchets de verre (%)	Taux d'augmentation de la résistance à la compression à 28 jours (%)	Taux d'augmentation de la résistance à la flexion à 28 jours (%)	Taille optimale des particules (mm)	Référence
Déchets de verre recyclé	0-5-10- 15-20-30	< 75 90- 150	20	16,02	27,30	< 75	Zakir et al. (2016)
Déchets de pièce en verre	0-2-4-8-16-20	90-150	16	24,56	/	< 100	Prudhvi et al. (2016)
Déchets de verre recyclé	0-10-15-20	< 90	20	4,04	16,21	NI	Shanmuguanathan et al. (2017)
Déchets de verre recyclé	0-10-20-30-40-50	(100-150) < 100	30	/	31,55	< 100	Sreenivasulu et Prudhvi (2016)
Déchets de verre broyé	0-10-20-30-40	< 150 < 300	30	14,15	/	< 150	Harish et al. (2016)
Déchets de verre broyé	0-5-10-15-20-25	< 75	15	17,15	18,13	< 75	Hussain et Verma (2016)
Déchets de verre vert	0-5-10-15	< 90	10	8,98	37	NI	Vandhiyan et al. (2013)
Déchets de verre broyé	0-5-10-15-20-25	< 90	10	29,51	17,27	< 90	Gahoi et al. (2016)
Déchets de verre broyé	0-10-20-30	< 300	10	/	/	Non indiqué	Olutoge (2016)
Déchets de bouteille en verre	0-10-15-20-25	100	15	24,94	19,11	Non indiqué	Meena et al. (2018)
Déchets de verre recyclé	0-5-10-15-20-25-30	< 90	15	3,71	/	Non indiqué	Karde et al. (2018)
Déchets de verre recyclé	0-10-20-30-40	< 90	20	24,61	/	Non indiqué	Sakale et al. (2016)
Déchets de verre recyclé	0-5-10-15-20	< 75	20	/	25,40	/	Kumar et Sood (2017)
Déchets de bouteille en verre	0-10- 20- 30	< 75	20	6,12	/	< 75	Rahman et al. (2018)

Tableau I. 5 : Résumé des recherches sur l'utilisation des déchets de verre comme remplacement partiel du ciment (Suite).

Type de déchets de verre	Pourcentage de remplacement étudié	Taille des particules étudiées (µm)	Pourcentage optimal de déchets de verre	Taux d'augmentation de la résistance à la compression à 28 jours (%)	Taux d'augmentation de la résistance à la flexion à 28 jours (%)	Taille optimale des particules (mm)	Référence
Bouteille (verre-sodocalcique)	0-15-18-21-24-27-30	< 75	21	/	/	< 75	Olofinnade et al. (2017)
Déchets de verre de construction et bouteille	0-5-10-15-20-25	< 75	10	4.81	/	< 75	Aliabdo et al. (2016)
Déchets de verre recyclé	0-5-10-15-20-25	< 45	15	/	/	Non indiqué	Khan et al. (2015)
Déchets de verre recyclé	0-5-10-15-20-25	NI	10	12.95	/	Non indiqué	Keerio et al. (2017)
Déchets de verre recyclé	0-5-10-15-20-25-30-35-40	< 100	20	35,74	/	< 100	Kumar et al. (2014)
Déchets de verre broyé	0-5-10-15-20	< 600	20	27,32	/	Non indiqué	Bhat et Rao (2016)
Déchets de verre broyé	0-10-20-30	NI	10	36	9,74	Non indiqué	Mounica et al. (2017)
Déchets de verre recyclé	0-10-20-30	< 90	20	19.11	15,20	NI	Shekhawat Aggarwal (2016)
Déchets de verre broyé	0-10-20-30	NI	20	19,11	15,20	Non indiqué	Arora (2015)
Déchets de verre broyé	0-5-10-15-20-25	< 150	15	41,23	40,76	Non indiqué	Rockdey et al. (2018)
Déchets de verre vert	0-10-20-30-40	< 90	30	22,87	54,42	NI	Mwizerwa et Garg (2017)
Déchets de verre recyclé	0-15-30-45-60	< 100	15	/	/	Non indiqué	Du et Tan (2016)

I.2.9 Valorisation simultanée des déchets de verre comme remplacement partiel du ciment et des granulats

La possibilité de valoriser simultanément les déchets de verre sous forme des granulats et de poudre dans un même mélange a fait l'objet de nombreuses recherches.

Shaikh et al. (2015) ont conclu que le remplacement du ciment par la poudre de verre, ainsi que le sable par le granulats de verre de 5 %, 10 %, 15 % et 20 % ; favorise l'augmentation de la résistance à la compression de 9,25 %, 38,50 %, 70,80 % et 33,09 % respectivement après 28 jours. Le remplacement de ciment et de sable par le verre à 15 % augmente la résistance à la traction par fendage après 28 jours de 4,25 %. En outre, le verre finement broyé peut avoir des propriétés pouzzolaniques efficaces pour servir de substitut partiel du ciment. Les grains de verre broyés qui sont retenus sur un tamis de 3,36 mm et 1,18 mm présentent également un bon matériau de remplissage. Taha et Nounu (2008) ont observé une réduction moyenne de la résistance à la compression de 16 % lorsque 20 % du ciment était remplacé par la poudre de verre. Cela peut résulter directement de la modification de la nature des produits d'hydratation et du gel C-S-H. La résistance à la traction par fendage du béton a été considérablement réduite lorsque les déchets de verre ont été ajoutés comme remplacement du ciment et des granulats dans le même mélange du béton. Toutefois, ils ont constaté qu'il n'y avait aucune différence observée dans les résultats de la résistance à la flexion du béton, même lorsque le sable de verre recyclé et la poudre de verre étaient utilisés dans le même mélange du béton. Shayan et Xu (2006) ont conclu que la résistance à la compression du béton avec des déchets de verre a été améliorée par rapport au béton sans verre. D'autre part, le résultat expérimental a montré que 30 % du remplacement du ciment par la poudre de verre et 50 % du remplacement des granulats naturels par des granulats grossiers et fins en verre ; pouvaient également être remplacés dans un béton de la classe de résistance 32 MPa avec des propriétés de développement de la résistance acceptable. Lu et al. (2019) ont conclu que l'incorporation de 20 % de poudre de verre dont la taille des particules est inférieure à 50 μm dans les pavés pouvait réduire fortement l'expansion des RAS causée par l'utilisation d'un taux élevé en granulats de verre. La teneur importante en silice et la taille fine des particules de la poudre de verre pourraient jouer un rôle important dans la prévention de la formation de gel des RAS.

I.2.10 Valorisation des déchets de verre dans la production de ciment

Dans le cadre de la valorisation des déchets de verre, l'industrie du ciment s'intéresse également à ces déchets, en raison de leur composition chimique similaire à celle de l'argile. Chen et al.

(2002) ont constaté une légère augmentation de la teneur en alcali. L'analyse détaillée de la qualité du ciment montre qu'il n'y a pas d'impact significatif du verre sur le procédé de production. En outre, ils ont montré que les propriétés physiques et chimiques du ciment de verre produit étaient identiques à celles du ciment Portland sans verre. Xie et Xi (2002) ont examiné l'utilisation de déchets de verre comme remplacement partiel de l'argile. Les tests montrent que l'ajout de verre dans la pâte de ciment favorise la formation de la phase liquide entre 950 °C et 1250 °C par rapport à sa forme habituelle, diminue le niveau de silicate tricalcique dans le clinker ; et augmente celui de NC_8A_3 , ce qui entraîne une prise rapide et un faible développement de la résistance mécanique du ciment. En outre, le verre en tant que matière première a les mêmes effets sur le processus de combustion du clinker que d'autres matières premières à forte teneur en alcali. On s'attend à ce que les propriétés du ciment fabriqué avec les déchets de verre soient les mêmes que celles du ciment alcalin ordinaire. En revanche, l'analyse par diffraction des rayons X indique que l'ajout du verre dans le mélange du ciment brut n'entraîne pas la formation de nouveaux minéraux dans le clinker. Le verre peut être ajouté au ciment en tant que matière première avec une petite fraction. Dvorak et al. (2017) ont étudié l'amélioration des propriétés pouzzolaniques du verre recyclé lors de la production de ciment Portland mélangé. Les résultats montrent qu'il est possible d'améliorer les propriétés pouzzolaniques du verre recyclé en l'utilisant comme matière de base pour la fabrication du ciment et cela influencera positivement sur les propriétés physiques et mécaniques du matériau. L'analyse de la spectroscopie dispersive d'énergie confirme la présence de produits d'hydratation (gel C-S-H) dans la zone de contact entre la particule de verre et les produits d'hydratation du ciment.

II-3 Conclusions

Ce chapitre illustre une généralité sur le matériau de verre et une présentation des différents travaux de recherche sur la valorisation des déchets de verre dans les bétons comme remplacement des agrégats ; et du ciment ou comme ajout cimentaire, ce qui conduit à l'élimination de ce type de déchets dans la nature et à la réduction du coût du béton.

Les résultats des travaux des différents chercheurs mentionnés ci-dessus indiquent ce qui suit :

- Le remplacement partiel du sable par la poudre de verre réduit l'expansion des RAS si les déchets de verre sont finement broyés.
- La résistance du béton avec l'ajout de déchets de verre comme remplacement partiel des granulats fins et grossiers ou du ciment est liée à de nombreux paramètres tels que le

pourcentage de remplacement, la taille et la forme des particules de verre ; ainsi que la nature du déchet.

- La résistance à la compression du béton avec l'ajout de poudre de verre comme remplacement partiel du ciment augmente avec la diminution de la taille des particules des déchets.
- La taille des particules inférieure à 100 μm présente un comportement pouzzolanique qui favorise l'amélioration de la résistance à la compression des bétons.
- La surface et la forme angulaire des déchets de verre affectent la maniabilité du béton.
- L'ajout de poudre de verre dans le béton comme remplacement partiel du ciment remplit les vides et réduit ainsi la porosité, ce qui entraîne une augmentation de la résistance à la traction, flexion et à la pénétration des ions chlorure.
- La composition chimique du verre est similaire à celle de l'argile, ce qui permet d'utiliser le verre comme matière première dans la production de ciment sans modifier les propriétés physiques et chimiques de ce dernier.

Chapitre II : Synthèse bibliographique sur le plastique

II.1 Introduction sur la matière plastique**II.1.1 Historique**

Le premier à utiliser le terme matière plastique pour définir les objets fabriqués à partir de macromolécules (résines, élastomères et fibres artificielles) a été apparemment Leo Hendrik Baekeland en 1909. Deux ans avant ça, il a fabriqué la première résine entièrement synthétique : la bakélite, l'industrie a entrepris dès 1920 de les exploiter pour produire des téléphones et les appareils électroménagers (Chalmin, 2019). La période principale de développement de l'industrie du plastique était entre 1930 et 1940 avec une apparence des thermoplastiques les plus importants d'aujourd'hui ; le polystyrène (PS), le polychlorure de vinyle (PVC), les polyoléfines et le poly méthacrylate de méthyle avec la production de polyéthylène a basse densité (Gilbert, 2017). En 1953, le polyéthylène téréphtalate (PET) a fait son apparition sous forme de fibre pour l'industrie textile grâce à la technologie du nylon modifié de Dupont. La production de PET a augmenté rapidement et pendant les deux dernières décennies, le PET est un matériau de choix dans plusieurs applications (Lepoittevin et Roger, 2011). À la fin des années 1960, le problème de manque de nouveaux plastiques n'a pas arrêté la croissance des industries du plastique dans le monde entier. Cette augmentation a été stoppée en 1973 à cause de la crise du pétrole et il est important de prendre en compte la dépendance des plastiques au cours des années à venir par rapport au pétrole et aux autres matières premières (Brydson, 1999).

II.1.2 Définitions et production de matières plastiques

Les plastiques jouent un rôle très important dans la vie quotidienne. Les objets élaborés à base de plastique vont des produits sophistiqués comme les prothèses de hanche, de genou et d'ustensiles alimentaires jetables. La popularité des plastiques dans une large variété d'applications industrielle s'explique par la grande diversité de leurs propriétés et leur facilité de transformation (Barry et al., 2006). Les plastiques sont des résines ou des polymères, obtenus à partir des dérivés de pétrole ou des gaz naturels. Le terme plastique désigne une grande gamme de résines, qui présentent différentes propriétés et fonction (Curlee et Das, 1991). Il existe quatre secteurs qui représentent 72 % de la demande de plastiques : l'emballage, la construction, l'automobile et les équipements électriques et électroniques. Le reste représente des secteurs tels que les ménages, l'ameublement, l'agriculture et les appareils médicaux. La production mondiale de plastiques est tombée, selon les estimations, de 245 Mt en 2008 à environ 230 Mt en 2009 à cause de la crise économique. Cependant, au cours des cinquante

dernières années, la production de plastique a fortement augmenté, en particulier en Asie. L'UE représente environ 25 % de la production mondiale et la Chine en représente à elle seule 15 % (Commission européenne, 2011). La production mondiale de plastiques a atteint un niveau record de 359 millions de tonnes en 2018, cette production a augmenté de 3,2 % par rapport à 2017 ; en 2017, la hausse avait déjà été de 3,9 % par rapport à 2016, 320 millions de tonnes de plastique ont été fabriquées en 2015 ; comparé 311 millions de tonnes en 2014, et 299 millions de tonnes en 2013, conformément à la Fédération des producteurs de plastique PlasticsEurope (Planetscope, 2018).

II.1.3 Classification de plastique

Les matières plastiques peuvent être classées en trois sous-familles (figure II.1) : les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères ; le domaine d'application des thermoplastiques est l'élasticité dure ou solide et peut être fusionné par un apport d'énergie (mécanique, thermique ou de rayonnement). La plupart des élastomères sont d'une élasticité souple et ne peuvent généralement pas être fondus. La plage d'application des thermodurcissables est celle de l'élasticité dure et ne peut être fondue (Klein, 2011).

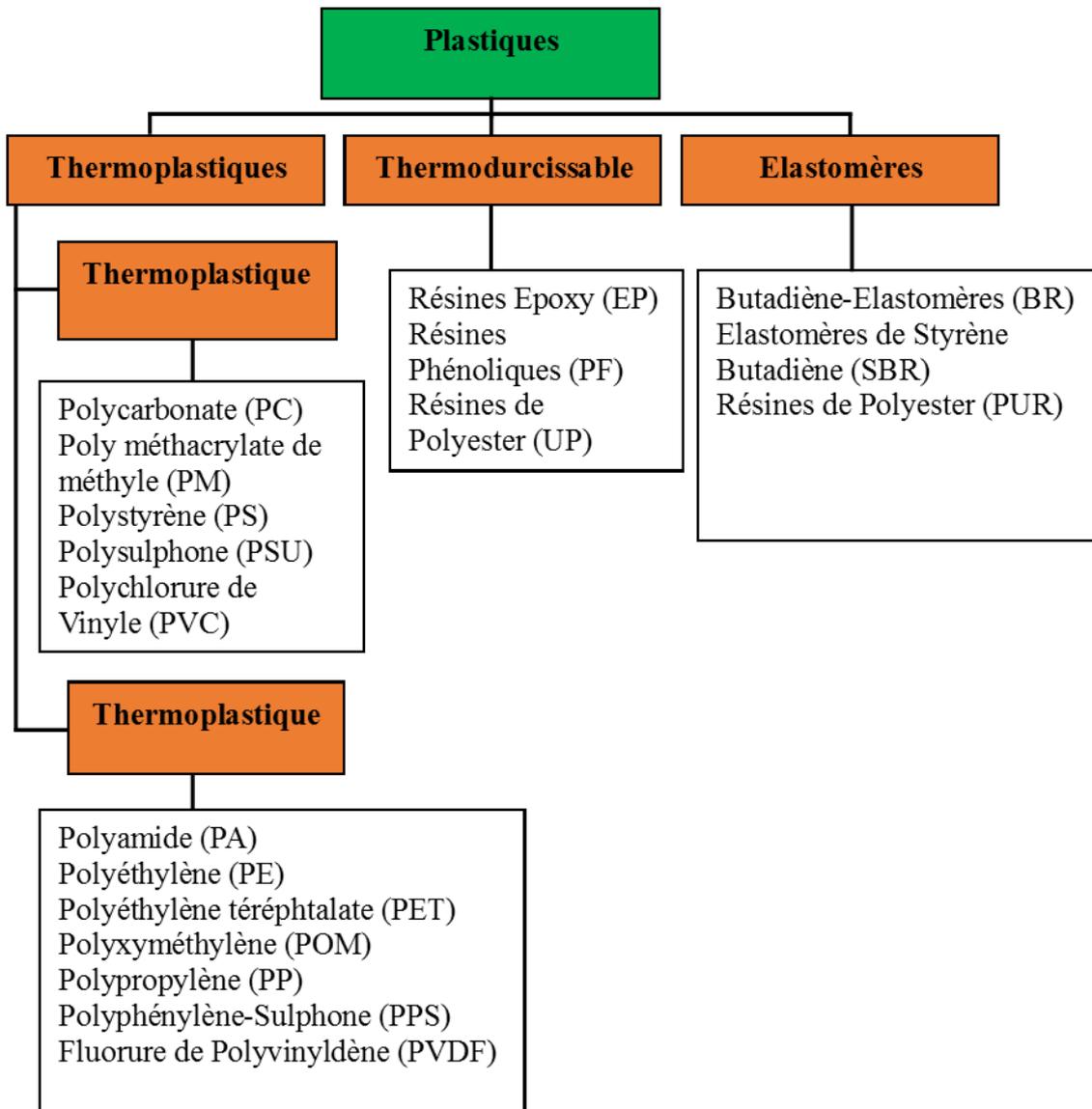


Figure II. 1 : Classification des plastiques (Klein, 2011).

II.1.4 Structure de plastique

Les polymères sont obtenus par la formation de liaisons chimiques entre des molécules ou monomères relativement petits pour former de très grosses molécules ou polymères.

Le plastique thermodurcissable est produit si les liaisons chimiques créent une structure moléculaire rigide et réticulée. Par contre, le thermoplastique est obtenu par la formation d'une structure moléculaire assez souple, linéaire ou ramifiée. La figure II.2 présente des illustrations de ces structures moléculaires (Harper et Petrie, 2003).

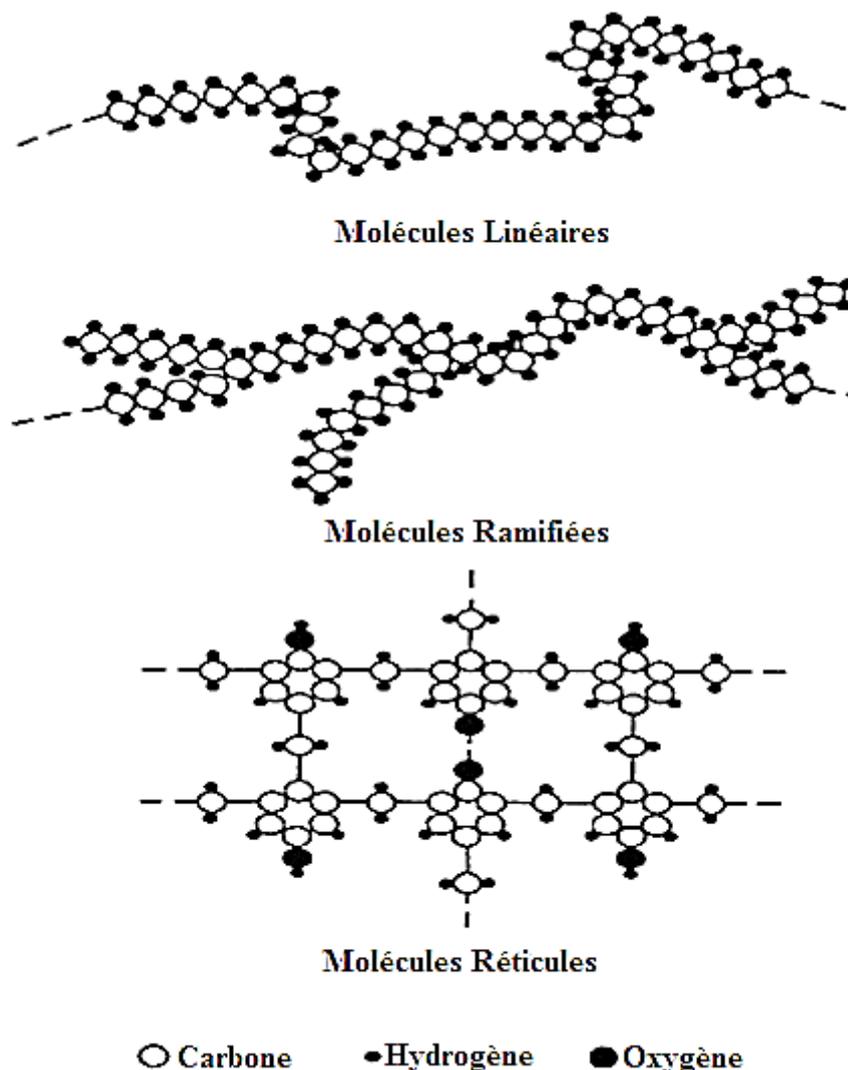


Figure II. 2 : Exemples de structures moléculaires possibles dans un polymère (Harper et Petrie, 2003).

II.1.5 Taux d'élimination des plastiques

Au niveau mondial, les plastiques conventionnels représentent environ 9 % de la production de pétrole et de gaz, 5 % comme matière première et environ 4 % pour l'énergie exploitée dans la production. Les déchets plastiques de post-consommation en Europe sont actuellement à 74 % soit incinérés, ou bien mis en décharge. La plupart des produits de consommation en plastique sont produits pour être jetés après une utilisation unique ; ou ont une courte durée de vie, sauf que certains plastiques ont une longue durée de vie comme les conduites d'eau, les gains des câbles électriques, un grand nombre de produits ménagers et les boîtiers électroniques.

La production de déchets plastiques post-consommation en Europe est d'environ 25 Mt par an, dont 6,6 Mt sont récupérés principalement par recyclage mécanique, 8,9 Mt sont destinés pour

des objectifs de conversion énergétique et 9,6 Mt sont éliminés dans des décharges. Au Canada, environ 2,8 millions de tonnes de déchets plastiques sont mises en décharge chaque année (Hassanpour et Unnisa 2017).

Le tableau II.1 indique les taux de déchets plastiques post-consommation des différents pays du monde.

Tableau II. 1 : les taux de déchets plastiques post-consommation des différents pays européens (Hassanpour et Unnisa 2017).

Pays	Taux de recyclage (%)	Taux de récupération de l'énergie (%)	Taux d'élimination (%)
Pologne	25	17	58
Bulgarie	17	9	74
Norvège	37	55	8
Belgique	32	62	6
France	19	43	38
Grèce	17	8	75
Italie	26	16	48
Portugal	34	13	53
Espagne	28	16	56
Autriche	24	72	4

II.1.6 La valorisation et le recyclage du plastique

On appelle le recyclage des plastiques le retraitement des déchets plastiques de post-consommation et de pré consommation en des produits exploitables. Le recyclage du plastique réduit le besoin de nouvelles matières en plastique et réduit ainsi les quantités de ressources et d'énergie employées pour sa production. À cause des nombreux types de plastique, le recyclage des plastiques est une opération plus complexe que le recyclage du métal ou d'autres matériaux. Il faut donc que la possibilité de recyclage et la compatibilité environnementale soient des paramètres à prendre en considération au début du processus de conception des produits en plastique plus tôt qu'après leur apparition. (Rudolph et al., 2017).

La valorisation des déchets plastiques préserve les ressources qu'ils contiennent, mais demande des intrants pour assurer le processus de transformation, qui peut entraîner des impacts sur l'environnement et des coûts. Les plastiques ne se recyclent pas tous de la même façon.

La bouteille offre beaucoup d'avantages par rapport à des produits plus complexes comme les composites, les articles de faible poids ou les produits contaminés par d'autres produits, qui sont moins favorables au recyclage. La figure II.3 illustre un exemple du cycle de vie des déchets recyclés (Commission européenne, 2011).

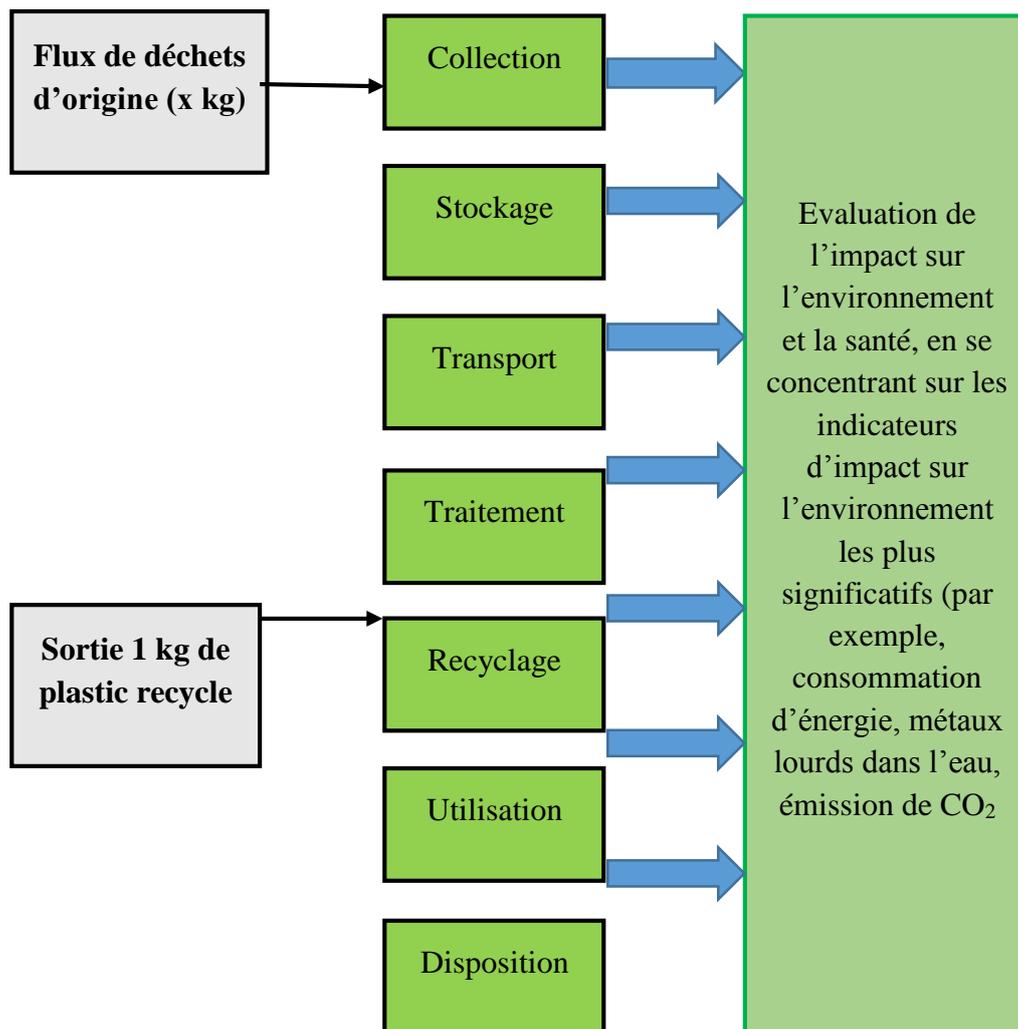


Figure II. 3 : Approche du cycle de vie pour analyser les impacts environnementaux du recyclage du plastique (Commission Européenne, 2011).

D'autre part, plusieurs facteurs économiques doivent être pris en compte tels que les coûts de recyclage du plastique en fonction du processus (collecte, transport, etc.) ; coûts de la conformité réglementaire et des travaux administratifs (licences, redevances, paperasse, etc.) ; valeur marchande du plastique recyclé par rapport au matériau vierge qu'il remplace ; la stabilité des prix du plastique recyclé et estimations des coûts de transport (Commission européenne, 2011).

II.1.7 Avantages des matières plastiques

La croissance de l'utilisation du plastique est principalement due à ses propriétés bénéfiques, dont :

- Une grande polyvalence et la possibilité d'être adapté pour satisfaire des besoins techniques spécifiques et un poids plus léger que les matériaux concurrents, ce qui permet de diminuer la consommation de carburant pendant le transport ;
- De bonnes propriétés de sécurité et d'hygiène pour les emballages alimentaires, excellente isolation thermique et électrique ;
- La résistance chimique à l'eau et aux chocs et une capacité exceptionnelle de combinaison avec d'autres matériaux comme les feuilles d'aluminium, le papier, les adhésifs ;
- Durabilité et longévité et un coût de la fabrication comparativement inférieur ;
- Un aspect esthétique de qualité supérieure (Siddique et al, 2008).

II.1.8 Inconvénients des matières plastiques

- L'utilisation des produits chimiques potentiellement dangereux pour la nature terrestre, qui sont ajoutés comme stabilisateurs ou colorants dans la fabrication des plastiques ;
- La plupart des plastiques ne sont pas biodégradables et mettent beaucoup de temps, voire des centaines d'années, à se décomposer ;
- Les produits en plastique, en particulier les emballages en plastique que les humains se débarrassent juste après leur achat et qui affectent ainsi l'aspect environnemental et la santé publique ;
- Leur collecte pour recyclage demeure insuffisante. Quant à leur distribution dans des centres d'enfouissement technique (C.E.T) efficace demeure une préoccupation majeure pour les pouvoirs publics.

II.2 La valorisation des déchets plastiques dans les bétons**II.2.1 Introduction**

Le béton est un matériau synthétique utilisé dans les constructions de génie civil en raison de sa résistance, de sa durabilité, de sa capacité de moulage et de sa stabilité structurelle (Nibudey et al, 2013).

Les plastiques sont devenus une partie intégrante et inséparable de nos vies. La quantité de cette matière consommée annuellement a augmenté de façon constante. Sa faible densité, sa conception conviviale, ses capacités de fabrication, sa durabilité, sa légèreté et son faible coût sont les facteurs qui expliquent cette croissance phénoménale. Les plastiques ont été utilisés dans l'emballage, les applications automobiles et industrielles, les systèmes de distribution médicale, d'autres applications sanitaires ; le dessalement de l'eau, la conservation des sols, la prévention des inondations, le transport des aliments et d'autres utilisations (Siddique et al., 2008).

Une grande quantité de déchets plastiques est produite chaque année. Le processus de recyclage et la réutilisation de ces déchets représentent un nombre important de mains-d'œuvre ; et les coûts de traitement énormes font qu'une très petite quantité de déchets plastiques recyclés sont stockés dans des décharges et des incinérateurs (Sadiq et Khattak, 2015). La plupart des déchets plastiques sont constitués de polyéthylène basse densité/polyéthylène basse densité linéaire à environ 23 % ; suivi de 17,3 % de polyéthylène haute densité, 18,5 % de polypropylène, 12,3 % de polystyrène (PS/PS expansé), 10,7 % de chlorure de polyvinyle, 8,5 de polyéthylène téréphtalate et 9,7 % d'autres types (Association des fabricants de plastiques en Europe, 2004) (Siddique et al., 2008). L'utilisation du plastique disponible en grande quantité est l'un des problèmes majeurs auxquels l'homme est confronté pour réduire les contraintes environnementales et toutes les formes de plastique deviennent des déchets après usage (Singh et al., 2017).

Le recours à la valorisation des déchets plastiques dans le domaine de la construction est de plus en plus adopté, notamment par l'introduction des déchets plastiques dans les bétons sous forme de granulats et fibres.

Plusieurs travaux de recherches ont été réalisés dans ce sens, Ismail et EL-Hashmi (2008) ont utilisé un déchet plastique composé d'environ 80 % de polyéthylène et 20 % de polystyrène avec une longueur variable de 0,15 à 12 mm ; et une largeur de 0,15 à 14 mm pour différentes couleurs en remplacement partiel du sable dans le béton. Rahmani et al. (2013) ont étudié l'utilisation de déchets plastiques (polyéthylène téréphtalate PET) comme substitut partiel des

granulats fins d'une taille maximale de 7 mm. Usman et al. (2015) ont utilisé les sacs de polyéthylène dans le béton pour remplacer les granulats grossiers. Rahim et al. (2013) ont examiné l'utilisation de déchets plastiques en polyéthylène à haute densité (PHD) comme granulats grossiers dans le béton avec une taille comprise entre 4,75 mm et 20 mm. Guendouz et al. (2016) ont étudié l'ajout de deux types de déchets plastiques : le polyéthylène téréphtalate PET et le polyéthylène à basse densité extrudé utilisé pour la fabrication de sacs en remplacement partiel du sable et comme fibres introduites dans le mélange de béton. Lawrance et George (2016) ont étudié les propriétés du béton avec des fibres plastiques (frisées) provenant de bouteilles en PET ayant trois rapports d'aspect de 15, 35 et 50 (une longueur de 30, 70 et 100 et une largeur de 2 mm). Bhogayata et Arora (2017) ont examiné les propriétés du béton frais et durci renforcé avec des fibres de déchets plastiques métallisées de 5 mm, 10 mm et 20 mm avec des pourcentages de (0 à 2) % par volume d'un mélange.

Dans cette partie, nous présentons les différents travaux de recherche sur l'utilisation des déchets plastiques dans le béton sous différentes formes et leur effet sur les performances du béton.

II.2.2 Valorisation des déchets plastiques sous forme de granulats

En raison de leurs grands problèmes d'élimination, les déchets plastiques ont été utilisés dans le béton par de nombreux chercheurs comme remplacement partiel des granulats fins ou grossiers.

Rai et al. (2012) ont étudié les propriétés des mélanges de béton avec des déchets plastiques, qui ont remplacé les granulats fins par 5 %, 10 % et 15 % en volume. Ils ont conclu que la résistance à la compression du béton diminue en fonction de l'augmentation du taux de déchets introduit. Cela pourrait être expliqué par la faible adhérence entre la surface des déchets plastiques et la pâte de ciment, ainsi qu'à l'augmentation de la taille des particules de plastique. Ramedvi et Manju (2012) ont examiné la possibilité d'utiliser des bouteilles en PET comme remplacement partiel des granulats fins dans le béton. Ils ont constaté que la résistance à la compression a augmenté jusqu'à 2 % des fibres de PET et a progressivement diminué de 4 et 6 % des substitutions ainsi que pour la résistance à la traction. Khan et al. (2017) ont étudié la possibilité d'utiliser des capsules de déchets de bouteilles comme substitut partiel des granulats grossiers dans la production de béton. Ils ont conclu que la résistance à la compression augmente avec le pourcentage croissant de capsules de bouteilles et la résistance maximale obtenue avec un remplacement de 10 %. D'autre part, Mishra et Mishra (2015) ont examiné

l'utilisation de plastiques recyclés comme remplacement partiel des granulats grossiers naturels dans le mélange de béton. Ils ont constaté qu'il n'y avait pas de changement notable dans les propriétés mécaniques du béton jusqu'à 20 % de remplacement. Saikia et Brito (2014) ont évalué les effets de la taille et la forme des granulats de PET sur les propriétés fraîches et durcies des bétons avec l'utilisation de trois types de granulats en déchets plastiques. L'un sous forme de pellets remplaçant le granulats fin par 5 %, 10 % et 15 % et les deux autres sous forme de morceaux déchiquetés, l'un remplaçant l'agrégat fin avec 5 %, 10 % et 15 % et le dernier remplaçant le granulats grossier avec les mêmes pourcentages. Ils ont constaté que la taille et la forme des granulats de PET affectent le rapport E/C et l'affaissement. D'autre part, la résistance à l'abrasion des mélanges de béton contenant des types de PET a été améliorée par rapport au béton de référence.

II.2.3 L'effet des granulats plastiques sur les propriétés des bétons

II.2.3.1 Propriétés du béton frais

II.2.3.1.1 Ouvrabilité

Ismail et Al-Hashmi (2008) et Rai et al. (2012) ont observé que les valeurs d'affaissement des mélanges de béton avec les déchets plastiques tendaient à diminuer avec l'augmentation du taux de ces déchets. Cette réduction pourrait être due au fait que certaines particules ont une forme angulaire et d'autres non uniformes.

Rahmani et al. (2013) ont conclu que la valeur d'affaissement diminue avec l'augmentation du pourcentage de remplacement du sable par le PET dans les deux rapports E/C de 0,42 et 0,54. Ainsi, la maniabilité du béton diminuait lorsque la teneur en PET était augmentée, cela est justifié par le fait que les particules de PET ont une surface spécifique élevée par rapport au sable naturel. Guendouz et al. (2016) ont montré que l'utilisation de déchets plastiques de type polyéthylène basse densité comme remplacement partiel du sable contribue à augmenter la maniabilité du béton d'environ 40 %. Cela est lié à la quantité d'eau libre dans les mélanges contenant du plastique, qui est supérieure à celle du béton avec des granulats naturels. En effet, contrairement aux granulats naturels, les granulats plastiques n'absorbent pas d'eau lors du malaxage.

Shubbar et Al-Shadeedi (2016) ont examiné l'effet de l'utilisation des déchets de PET sous forme de fibre en tant que remplacement partiel des granulats fins sur les propriétés mécaniques du béton. Ils ont constaté, que les variantes avec les déchets plastiques ont donné des valeurs d'affaissement faible, ce qui réduit la fluidité du béton. Cette réduction est due à l'aspect lisse

des granulats plastiques, ce qui favorise une abondance d'eau dans le mélange. Usman et al. (2015) ont constaté que la maniabilité du mélange diminue à mesure que le taux de déchets de polyéthylène augmente, mais l'ouvrabilité peut être ajustée en faisant varier la quantité d'eau. Islam et al. (2016) ont étudié l'effet des déchets plastiques PET en tant que granulat grossier sur diverses propriétés fraîches et durcies du béton. Ils ont conclu que la maniabilité du béton de granulats de PET s'est améliorée par rapport au béton ordinaire avec le même rapport E/C. Cela permet de travailler avec un faible rapport (E/C) et d'obtenir la résistance souhaitée du béton. Hama et Hilal (2017) ont conclu que les valeurs d'affaissement des mélanges produits avec des déchets plastiques grossiers sont inférieures à ceux produits avec des déchets plastiques fins et des déchets plastiques mélangés (fins et grossiers).

La figure II.4 illustre les résultats de l'effet des déchets plastiques sur l'affaissement du béton.

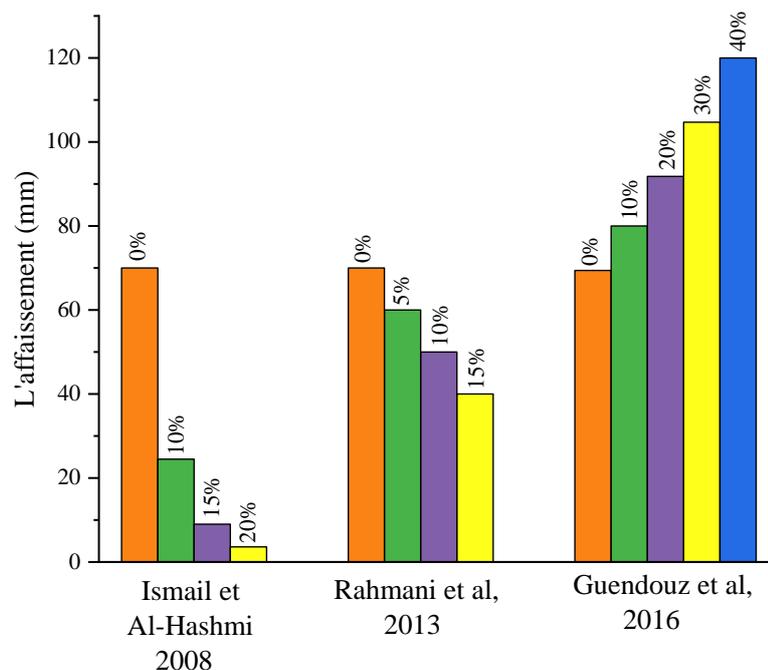


Figure II. 4 : Les résultats de l'effet des déchets plastiques sur l'affaissement du béton.

II.2.3.1.2 Densité

Rai et al. (2012) ont constaté que la densité à l'état frais diminue de 5 %, 8,7 % et 10,71 % pour des remplacements respectifs de 5 %, 10 % et 15 %. Cette tendance pourrait être attribuée au fait que la densité des déchets plastiques était inférieure de 70 % à celle du sable, ce qui a entraîné une réduction de la densité à l'état frais. Les mêmes résultats ont été constatés par Ismail et EL-Hashmi (2008). Le remplacement des granulats fins par des déchets de PET a eu

un effet notable sur la densité à l'état frais, avec une tendance à la baisse résultant de l'ajout de déchets plastiques au mélange. Des résultats indiquent qu'à un niveau de remplacement du PET de 1 %, 2 %, 4 % et 8 %, il y avait une diminution respective de 0,5 %, 2,8 %, 7,3 % et 9 % de la densité. Cela s'explique par la densité plus légère de granulat plastique, qui était inférieure de 13,75 % à celle de granulat fin utilisé (Shubbar et Al-Shadeedi, 2016). Saikia et Brito (2014) ont montré qu'il y avait une réduction de la densité du béton frais lorsque la teneur en granulats plastiques augmente, cela est attribué à la faible densité des particules de granulats plastiques par rapport aux granulats naturels. Silva et al. (2013) ont constaté que la densité du béton avec plastique est inférieure à celle du béton témoin, en raison de la faible densité des granulats plastiques. La chute de la densité est plus importante lorsque les granulats plastiques sont grossiers.

La figure II.5 résume les résultats de l'effet des déchets plastiques sur la densité du béton frais.

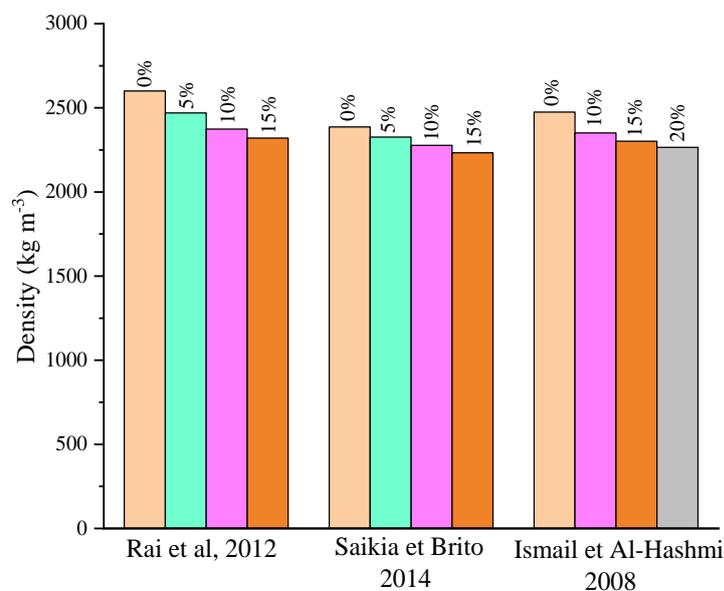


Figure II. 5 : L'effet des déchets plastiques sur la densité à l'état frais du béton.

II.2.3.2 Propriétés du béton durci

II.2.3.2.1 La résistance à la compression

Ismail et EL-Hashmi (2008) ont conclu que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de la teneur en plastique pour tous les mélanges de béton à tous les âges de durcissement. Cela pourrait être attribué à la réduction de l'adhérence entre la surface des granulats plastiques utilisés et la pâte de ciment. Ces résultats concordent avec ceux de Rai et

al (2012). Rahmani et al. (2013) ont constaté que le remplacement de 5 % du sable par du PET donne la résistance optimale pour les deux rapports E/C de 0,42 et 0,54 et qu'une augmentation de la teneur en PET entraînait une diminution de la résistance. Les résultats ont indiqué qu'à mesure que la taille des granulats augmente, la résistance à la compression diminue. Shubban et Al-Shadeedi (2016) ont observé une augmentation de la résistance à la compression de 1,6% et 13% respectivement dans les remplacements de 1% et 2% et une diminution de 25% et 13% respectivement pour les remplacements de 4% et 8% à 28 jours. Mustafa et al. (2019) ont constaté que la résistance à la compression du béton plastique diminue avec l'augmentation de la teneur en plastique. Lorsque le sable était remplacé par des déchets plastiques, la contrainte de compression moyenne diminuait de 24 % avec un remplacement de 20 % en volume. Rahim et al. (2013) ont conclu que la résistance à la compression du béton contenant des granulats de polyéthylène à haute densité (PHD) est moins importante que celle des échantillons témoins. Cependant, la résistance diminue de manière significative lorsque la proportion de PHD est supérieure à 20 %. La diminution de la résistance pourrait être attribuée à la faible liaison entre la pâte de ciment et les agrégats PHD et à la fragilité du plastique.

Mishra et Mishra (2015) ont observé qu'une plus grande résistance à la compression est obtenue avec le remplacement du 20 % de granulat naturel par du granulat plastique recyclé dans le mélange de béton. La résistance maximale obtenue avec un remplacement de 10 % des capsules de bouteilles a augmenté de 9,72 % et de 5,97 % à 7 et 28 jours par rapport au béton de référence. Saxena et al. (2018) ont conclu que l'incorporation de déchets plastiques de PET en tant que granulats grossiers dans le béton entraîne une diminution de la résistance à la compression, en raison d'une mauvaise adhérence entre les déchets plastiques et la pâte de mortier. La figure II.6 montre les résultats de la résistance à la compression du béton avec le pourcentage de remplacement des déchets plastiques.

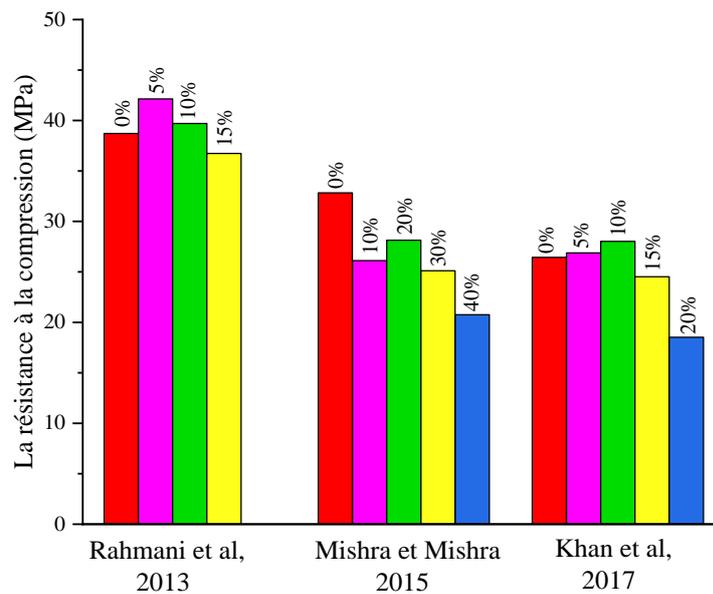


Figure II. 6 : La résistance à la compression du béton en fonction du pourcentage de remplacement des déchets plastiques à 28 jours.

II.2.3.2.2 La résistance à la traction

Pour la résistance à la traction, Arivalagam (2016) a conclu que la résistance à la traction par fendage est supérieure de 6 % à celle du béton de contrôle à 5 % de remplacement du sable par du PET. D'autre part, les résultats expérimentaux de Rahmani et al (2013) ont montré une diminution de la résistance à la traction avec une augmentation du PET jusqu'à 15 % pour les deux rapports E/C de 0,42 et 0,54. Shubbar et Al-Shadeedi (2016) ont observé une augmentation de la résistance à la traction par fendage avec l'augmentation de la substitution des granulats fins par les déchets de bouteilles en PET jusqu'à 2 % à 7 et 28 jours de durcissement ; puis une diminution a été notée pour les autres variantes étudiées. La diminution de la résistance pourrait être due à la densité des granulats et à l'adhérence entre les granulats et la pâte. Les mêmes résultats ont été observés par Ramadevi et Manju (2012). Albano et al (2009) ont étudié le remplacement du sable par du PET d'une taille de grain de 0,26 et 1,14 cm dans le béton avec la variation du rapport E/C (0,50 et 0,60). Ils ont constaté que pour un rapport E/C = 0,50, il y avait une diminution de la résistance à la traction par fendage par rapport au béton de référence, quelle que soit la taille du PET ajouté. Toutefois, lorsque la quantité de PET recyclé était de 20 %, la réduction est plus importante en raison de la porosité élevée du béton avec cette quantité de PET. Lorsque E/C= 0,60, les tendances observées restent les mêmes.

Aussi, les valeurs de résistance à la traction ont diminué par rapport au mélange témoin, pour les variantes avec des quantités plus importantes. Harini et Ramana (2015) ont examiné les propriétés de résistance du béton avec différentes proportions de plastique comme substitut aux granulats fins. Ils ont montré que la résistance à la traction augmente lorsque les granulats fins étaient partiellement remplacés par 6 % de plastique. Cependant, le remplacement de plus de 6 % diminue la résistance en traction. Khan et al. (2017) ont constaté que la résistance à la traction augmente avec l'augmentation du pourcentage de bouchons de bouteilles et la valeur maximale obtenue à 15 % de remplacement.

Manjunath (2016) a étudié l'utilisation des déchets plastiques dans le béton sous forme de granulats fins et grossiers à des pourcentages de 10 %, 20 % et 30 %. Il a conclu que la résistance à la traction des mélanges de béton à base de déchets plastiques augmente de 10,20 % avec un remplacement de 20 % par rapport au béton de référence à 28 jours.

La figure II.7 présente les résultats de la résistance à la traction par rapport au pourcentage des déchets plastiques.

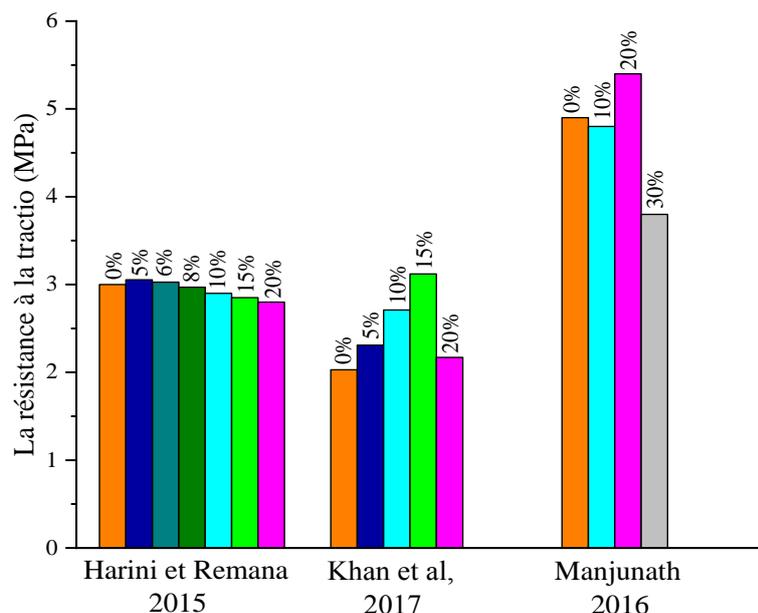


Figure II. 7 : La résistance à la traction en fonction des taux de déchets plastiques à 28 jours.

II.2.3.2.3 La résistance à la flexion

En ce qui concerne la résistance à la flexion, Ismail et EL-Hashmi (2008) ont constaté que la résistance à la flexion des mélanges de béton avec diminue avec l'augmentation des taux de plastique. Ces résultats concordent avec ceux du travail de Rai et al. (2012). Ramedvi et Manju (2012) ont conclu que la résistance à la flexion des échantillons avec le remplacement des

granulats fins par des fibres de bouteilles en PET augmentait progressivement avec l'augmentation du pourcentage de substitution. Harini et Ramana (2015) ont constaté que la résistance à la flexion à chaque âge de durcissement diminue avec l'augmentation du remplacement des granulats fins par des déchets plastiques. Cela pourrait être attribué à la réduction de la force d'adhérence entre la surface des particules de plastique et la pâte de ciment. Shyam et Drishya (2018) ont étudié le remplacement des granulats fins par de la poudre de polyéthylène haute densité (PHD) à des pourcentages de 5 %, 10 %, 15 % et 20 %. Ils ont conclu que la valeur optimale est obtenue avec un remplacement de 5 % des agrégats fins par de la poudre de PHD. La résistance à la flexion a augmenté de 46,34 % à 5 % du remplacement et largement supérieure à celle des échantillons témoins par rapport aux autres pourcentages de substitution. Malak (2015) a étudié l'utilisation des déchets plastiques dans le béton comme remplacement des granulats grossiers. Il a constaté que la résistance augmente jusqu'à 10 % du remplacement et à mesure que la quantité de déchets plastiques augmente, la résistance à la flexion diminue. Sur la base de résultats expérimentaux, Khan et al. (2017) ont conclu que lorsque le remplacement des granulats grossiers par des capsules de bouteille est de 10 %, la résistance de béton augmente de 96,87 % et de 19,01 % par rapport au béton témoin respectivement après 7 et 28 jours de durcissement. La figure II.8 montre les différents résultats de l'effet des déchets plastiques sur la résistance à la flexion du béton.

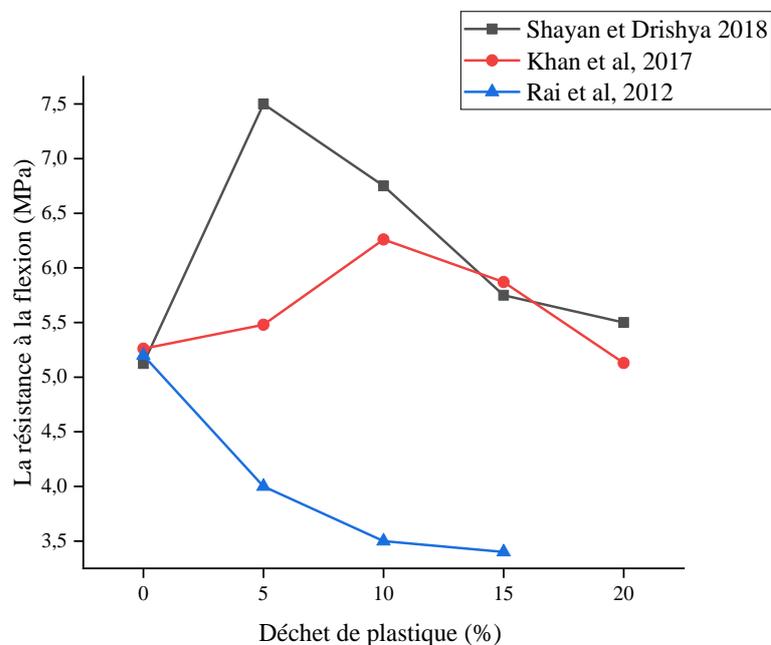


Figure II. 8 : L'effet des déchets plastiques sur la résistance à la flexion après 28 jours de durcissement.

II.2.3.2.4 Absorption d'eau et durabilité

Albano et al. (2009) ont constaté que pour le E/C égal à 0,50, les mélanges avec 10 % de PET présentent un pourcentage d'absorption inférieur à celui des mélanges avec 20 % de PET en raison de la réduction de la porosité. En outre, les mélanges contenant du PET de grande taille présentent des valeurs d'absorption d'eau élevées. Pour un E/C de 0,60, les tendances de la teneur et de la taille des particules étaient similaires à celles obtenues pour E/C = 0,50. De plus, la superficie couverte par les granulats est plus faible, ce qui fait qu'en diminuant la quantité de pâte, les vides ou les pores du béton augmentent, ce qui entraîne une augmentation de l'absorption d'eau. Elango et Ashok (2018) ont examiné le remplacement du sable par des déchets plastiques pulvérisés à des pourcentages de 10 %, 20 % et 30 %. Ils ont constaté que l'absorption d'eau est réduite en raison de l'augmentation des déchets plastiques sous forme des granulats fins, car les déchets plastiques ont une capacité d'absorption d'eau inférieure à celle des granulats fins naturels. Saikia et Brito (2014) ont conclu que la résistance à l'abrasion des mélanges de béton contenant divers types d'agrégats de PET est améliorée par rapport au béton témoin. La résistance à l'abrasion du béton avec l'incorporation de divers types et contenus d'agrégats de PET pourrait être attribuée à sa résistance à la compression.

Nikbin et al. (2016) ont constaté que la perte de vitesse des ultrasons diminue pour les échantillons contenant plus de proportions de particules de PET. Cette diminution pourrait être liée à la plus grande capacité du béton contenant des particules de PET à résister à la pression interne causée par l'expansion de la pâte de ciment ; et à maintenir plus d'intégrité pendant la réaction à l'acide sulfurique, laquelle pourrait être due à sa plus grande porosité pour accueillir les produits de la réaction et à la flexibilité des particules de PET.

Saxena et al. (2018) ont constaté que l'ajout de déchets plastiques de PET améliore le comportement ductile du béton et que la capacité d'absorption d'énergie du béton plastique augmente avec la teneur en granulats plastiques de déchets dans le béton. Silva et al. (2013) ont conclu que l'absorption d'eau augmente lorsque des granulats naturels sont remplacés par des granulats plastiques. Les bétons contenant des granulats plastiques présentaient des profondeurs de carbonatation et des coefficients de migration des chlorures plus élevés que les bétons témoins. Le tableau IV.1 présente un résumé de certaines recherches utilisant des déchets plastiques comme granulats dans le béton.

Tableau II. 2 : Résumé de quelques recherches utilisant des déchets plastiques comme granulats dans le béton.

Type de déchets plastiques	Pourcentage étudié (%)	Taille des particules étudiées (mm)	Pourcentage optimal (%)	Taille optimale (mm)	Référence
80 % polyéthylène; 20 % polystyrène	0-5-15-20	Fin (0.15–12 longueur; 0.15-14 Largeur)	10	Non indiqué	Ismail et AL-Hashmi (2008)
Polyéthylène Téréphtalate PET	0-5-10-15	Fin (< 7)	10	< 7	Rahmani et al. (2013)
Polyéthylène à haute densité	0-10-20-30	Grossier (4.75-20)	20	Non indiqué	Rahim et al. (2013)
Polyéthylène à basse densité	0-10-20-30-40	Fin (≤ 2)	20	Non indiqué	Guendouz et al. (2016)
Palette en plastique	0-5-10-15	Fin (NI)	5	Non indiqué	Rai et al. (2012)
Bouchons de bouteilles	0–5-10-15-20	Grossier (NI)	10	Non indiqué	Khan et al. (2017)
Sacs en plastique Polyéthylène à haute densité et autres	0-10-20-30-40	Grossier (< 20)	20	Non indiqué	Mishra et Mishra (2015)
Bouteille PET	0-5-10-15	Fin (< 4 ; < 2) Grossier (< 16)	10	Non indiqué	Saikia et Brito (2014)
Pallettes PET; Thermoplastique	0-1-2-4-8	Fin (< 4,75)	2	Non indiqué	Shubbar et AL-Shadeedi (2017)
Déchets de plastique	0-7.5-15	Fin (1-4) (2-11,2)	7,5	Non indiqué	Silva et al. (2013)
Bouteille PET	0-5-10-15-20	Fin (< 4,75) Grossier (4,75-20)	5	Non indiqué	Saxena et al. (2018)
Bouteille PET	0-5-10-15-20	Fin (< 4,75)	5	Non indiqué	Arivalagam (2016)
Polyéthylène Téréphtalate PET	0-5-6-8-10-15-20	Fin (< 4,75)	5	Non indiqué	Harini et Ramana (2015)
Déchets de plastique E	0-10-20-30	Fin (< 20)	10	Non indiqué	Manjunath (2016)

II.2.4 L'effet de l'utilisation des déchets plastiques sous forme des fibres dans les bétons

II.2.4.1 Valorisation des déchets plastiques sous forme de fibres dans le béton

Le béton se caractérise par une faible résistance à la traction, à la ductilité, un poids élevé et une faible absorption d'énergie. Ces inconvénients ont conduit les ingénieurs civils à utiliser des renforcements conventionnels pour améliorer la résistance à la traction et la ductilité. L'idée d'utiliser des fibres comme renforcement n'est pas une nouveauté. L'ajout de fibres au béton agirait comme un inhibiteur de fissuration ; et augmenterait considérablement la résistance à la traction, la résistance à la fissuration, la résistance aux chocs, l'usure, la résistance à la fatigue et améliore la ductilité du béton (Chavan et Rao, 2016). Diverses recherches ont examiné l'utilisation des déchets plastiques sous forme de fibres dans le béton. Irwan et al. (2013) ont étudié les performances du béton contenant des déchets de bouteilles en polyéthylène

téréphtalate PET sous forme de fibres à trois pourcentages en volume 0,5 %, 1 %, 1,5 %. Les résultats ont révélé que la présence de fibres de PET dans le béton augmente ces performances. Pesic et al (2016) ont étudié les propriétés mécaniques du béton renforcé avec des fibres plastiques extrudées de polyéthylène haute densité (PHD) recyclée. Deux diamètres de fibres de 0,25 mm et 0,40 mm avec trois fractions volumiques de 0,40 %, 0,75 % et 1,25 % ont été utilisés dans cette étude. Ils ont conclu que l'introduction de la fibre PHD ne produit aucun effet sur le module d'élasticité et la résistance à la compression du béton. Marthong et Sarma (2015) ont examiné l'influence de différentes géométries de fibres PET sur les propriétés physiques et mécaniques du béton. Les résultats des essais ont montré que la géométrie de la fibre a un effet négligeable sur la maniabilité du béton. Cependant, elle joue un rôle important dans l'amélioration de la résistance à la compression et à la traction du béton.

Chacko et George (2017) ont étudié les performances du béton avec des fibres de PET (polyester thermoplastique). La longueur des fibres a été maintenue à 5 mm, 15 mm, 20 mm et la largeur à 2 mm. Les résultats ont montré que la résistance était plus élevée à RA= 2,5 (longueur de 5 mm et largeur de 2 mm). Prabhu et al. (2014) ont étudié la possibilité d'utiliser des déchets de bouteilles en plastique PET sous forme de fibres dans le béton à des pourcentages de 0,5 %, 1 % et 1,5 %. Ils ont conclu que des améliorations significatives des résistances étaient observées avec l'introduction de fibres plastiques dans le béton.

II.2.4.2 Le taux optimal d'utilisation des déchets plastiques comme des fibres dans le béton

Sanjaykumar et Daule (2017) ont étudié l'utilisation des fibres plastiques dans le béton à des pourcentages de 0,5 %, 1 %, 1,5 % et 2 % en volume total avec un RA= 35. Ils ont conclu que les résistances à la traction indirecte et à la flexion sont maximales à une teneur de 1,5 %.

Irwan et al. (2013) ont constaté que les résistances à la compression et à la traction par fendage et le module d'élasticité augmentent avec une teneur en fibres de PET de 0,5 % dans le mélange par rapport au béton de référence. D'autre part, Shahidan et al (2018), Lawrance et George (2016) et Nibudey et al (2014) ont conclu que le pourcentage optimal est de 1 % en volume total pour tous les types de résistance. Par ailleurs, Maqbool et Sood (2016) ont montré que la résistance optimale à la compression du béton est obtenue avec l'ajout de 3 % de fibres de PET. Chacko et George (2017) ont conclu que le volume optimal de fibres de PET est de 1,4 % en poids de ciment pour les résistances à la compression, à la traction et à la flexion.

Divya et George (2017) ont observé que la fibre PET avec un rapport d'aspect $RA = 4$ jusqu'à un niveau de 2 % dans le béton peut être utilisée dans les structures en béton.

II.2.4.3 Propriétés du béton frais

Pelisser et al. (2012) ont montré qu'une perte d'affaissement plus importante se produisait lorsque la teneur en fibres augmente. Le béton renforcé par des fibres en PET présente toujours une bonne maniabilité et a été facilement compacté sans vibration excessive.

Bhogayata et Arora (2017) ont constaté que la maniabilité du béton est affectée par les deux paramètres, à savoir le taux et le type de fibres de déchets plastiques. Le béton contenant des fibres de type A (5 mm) a montré une réduction de l'affaissement de 5 %, 8 %, 12 % et 16 % dans des taux allant de 0,5 % à 2 %. Les bétons contenant des fibres de type B (10 mm) et de type C (20 mm) ont réduit l'affaissement d'une manière notable par rapport au premier type. Ils ont conclu qu'un dosage plus élevé de fibres augmente la viscosité de la matrice et diminue la consistance du mélange frais à une fraction volumique plus élevée.

Marthong et Sarma (2015) ont conclu que pour le rapport E/C de 0,5, la maniabilité du béton est légèrement réduite avec l'inclusion de 0,5 % de fibres PET. Cependant, la géométrie de la fibre a montré un effet significatif sur l'ouvrabilité du béton. Shamskia (2012) a examiné l'influence de la fibre PET sur les propriétés du béton frais et durci. Les résultats ont montré qu'avec l'augmentation du pourcentage de fibres, l'ouvrabilité diminue de manière significative. Ainsi, pour produire un mélange maniable, un super-plastifiant a été utilisé.

Singh et al (2017) ont utilisé différents types de fibres de PET dans le béton pour améliorer ses performances à des pourcentages de 0,8 %, 1 % et 1,2 % en poids de ciment. Ils ont conclu que la maniabilité du mélange de béton diminue linéairement avec l'incorporation de fibres de PET pour tous les rapports d'aspect. Les bétons contenant des fibres de PET droites ont une maniabilité plus grande que les bétons contenant des fibres de PET pliées. Shahidan et al. (2018) ont constaté que l'affaissement du béton diminue avec l'ajout de fibres dans le mélange de béton. La raison de cette diminution est expliquée par la présence de fibres de PET dans le béton, qui provoque une plus grande friction entre les particules. La figure II.9 illustre l'effet des fibres de déchets plastiques sur l'affaissement du béton.

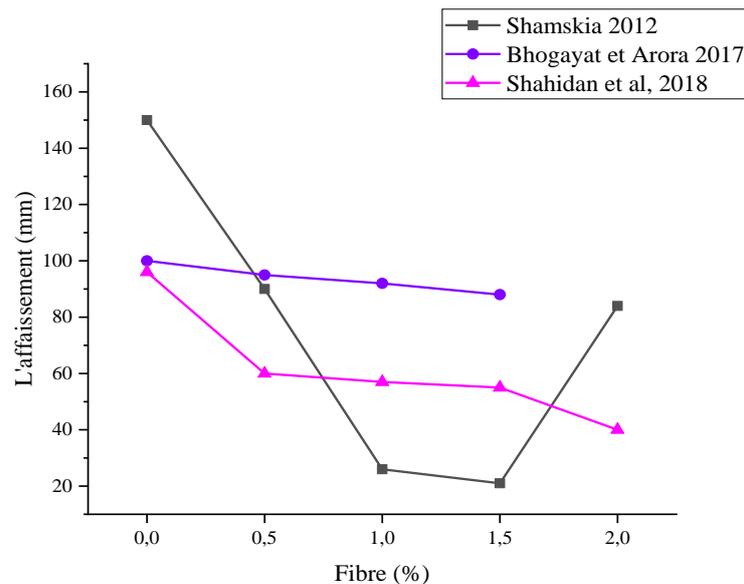


Figure II. 9 : L'affaissement du béton en fonction des taux de fibres des déchets plastiques.

II.2.4.4 Propriétés du béton durci

Irwan et al. (2013) ont conclu que la résistance à la compression pour le béton avec 0,5 % de PET augmente de 9,1 % par rapport au béton témoin à 28 jours ; et que la résistance des mélanges avec 1 % et 1,5 % de PET diminue respectivement d'environ 0,5 % et 17,65 %. Les résultats ont montré que seule une petite quantité de fibres augmente la résistance du béton.

Marthong et Sarma (2015) ont constaté que l'ajout de 0,5 % de fibre PET dans le béton améliore la résistance à la compression des échantillons et varie en fonction de la géométrie des fibres. D'autre part, de nombreux chercheurs ont constaté que la résistance à la compression n'a pas été influencée par les fibres plastiques Pesic et al. (2016) et Bhogoyata et Arora (2017).

Lawrance et George (2016) ont conclu que la résistance à la compression augmente avec un pourcentage croissant de fibres et la valeur maximale a été notée à 1 % de fibres.

Les résultats de Chacko et George (2017) ont montré que le pourcentage maximal d'augmentation de la résistance à la compression à une teneur en fibres de 1,4 % pour un rapport d'aspect de 2,5 était de 32,59 %. Borg et al. (2016) ont étudié les performances du béton renforcé par des fibres produites à partir de déchets plastiques, le polyéthylène téréphtalate (PET), dans leur recherche, différents types de fibres de PET recyclé déchiquetées, droites et déformées, avec différentes longueurs de 30 mm et 50 mm ont été utilisées à des taux allant de 0,5 % à 1 % dans le béton. Ils ont conclu que l'ajout de fibres de PET recyclées entraîne une chute de la résistance à la compression de 0,5 à 8,5 % par rapport au mélange témoin.

Maqbool et Sood (2016) ont observé que la résistance à la compression du béton augmente par l'ajout de fibres de PET de 2 % à 3 % ; puis montre une tendance à la baisse avec l'ajout de 4 % à 5 % de PET. De plus, selon les résultats expérimentaux de Nibudey et al. (2014) la résistance à la compression optimale a été observée à 1 % de la teneur en fibres. Taherkhani (2014) a étudié l'utilisation de déchets de PET comme fibre dans le béton avec différentes longueurs de 1,2 cm et 3 cm à des pourcentages de 0,5 à 1 % en volume du mélange. Ils ont conclu que la résistance à la compression à 7 et 28 jours diminue avec l'augmentation de la longueur et de la teneur en fibres, la valeur minimale de la résistance en compression a été notée pour le mélange contenant 1 % de PET de 3 cm. Cette réduction a été attribuée à la faible adhérence entre les fibres et la pâte de ciment, ce qui peut engendrer le développement de fissures. Sanjaykumar et Daule (2017) ont conclu que la résistance à la compression augmente en fonction du taux des fibres et la valeur maximale a été observée pour un taux de 1,5 %.

Mohammadhosseini et al. (2018) ont conclu que l'incorporation de déchets plastiques avec des pourcentages de 0,25 %, 0,5 %, 0,75 %, 1 % et 1,25 % réduit respectivement la résistance de 6 %, 7 %, 11 %, 18 % et 21 %, respectivement. Cette diminution peut s'expliquer par la porosité dans la matrice qui est proportionnelle à l'ajout de fibres dans le béton. La figure II.10 présente les résultats de la résistance à la compression par rapport aux fibres des déchets plastiques.

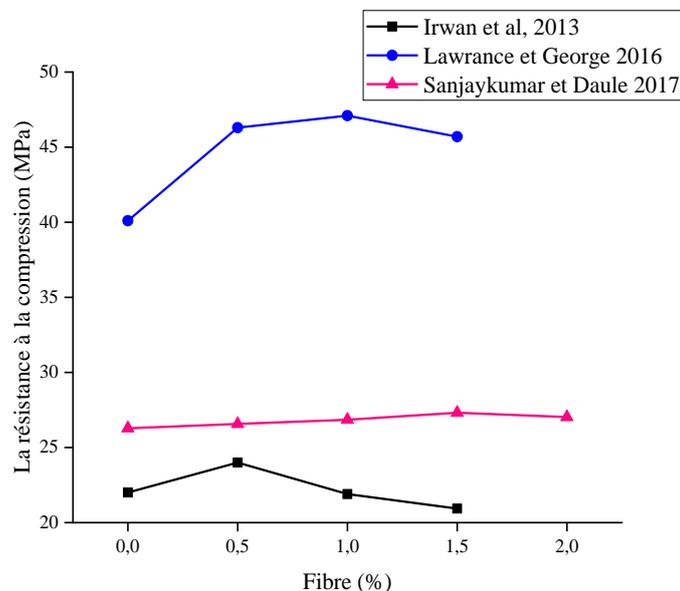


Figure II. 10 : Variation de la résistance à la compression du béton en fonction du taux de fibres plastiques à 28 jours.

Pour la résistance à la traction, Marthong et Sarma (2015) ont démontré que l'introduction de 0,5 % de fibre PET améliore cette propriété. Le résultat était conforme aux travaux de Prabhu et al. (2014). Reddy et Kumar (2014) ont étudié l'effet de l'utilisation des fibres de bouteilles en PET sur les propriétés mécaniques du béton. Dans cette étude, le dosage des fibres était de 0,25 %, 0,5 %, 0,75 % en poids de ciment. Ils ont montré que la résistance à la traction par fendage est améliorée de 16,2 % et 20,3 % par rapport au mélange de référence aux âges respectifs de 7 et 28 jours. D'autre part, Taherkhani (2014) a conclu que la résistance à la traction du mélange renforcé par des fibres est inférieure à celle du mélange de référence. La résistance a augmenté en fonction de la longueur des fibres, tandis qu'elle a diminué à des taux élevés, elle a diminué avec l'augmentation de la longueur des fibres. Pelisser et al. (2012) ont constaté que la résistance à la traction augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres, et ils ont constaté une diminution de cette dernière à 150 jours. Singh et al. (2017) ont conclu que la résistance des mélanges avec des fibres de PET augmente jusqu'à 1 % pour tous les rapports d'aspect. Le béton avec des fibres ondulées présente une valeur plus élevée que le béton avec des fibres droites. A 28 jours, l'augmentation de la résistance à la traction du béton avec des fibres de PET à des taux de 0,5 %, 1 % et 1,5 % est respectivement de 9,1 %, 15,5 % et 23,6 % par rapport au béton témoin (Irwan et al, 2013). Bui et al. (2018) ont conclu que les déchets de bouteilles en PET recyclées et les déchets de sacs en plastique tissé recyclés améliorent la résistance à la traction du béton d'agrégats recyclés.

La résistance à la traction du béton de granulats recyclés renforcé avec des fibres de PET a augmenté de 11,8 % à 20,3 %, tandis que les fibres de sacs en plastique ont amélioré la résistance de 9 % à 16,6 %. Mohammadhosseini et al. (2018) ont conclu que la résistance à la traction augmente de 12 %, 19 %, 17 %, 13 % et 8 % pour les dosages de fibres plastiques respectifs de 0,25 %, 0,5 %, 0,75 %, 1 % et 1,25 %, respectivement par rapport au béton de référence. La figure II.11 illustre les résultats de l'effet des fibres de déchets plastiques sur la résistance à la traction du béton.

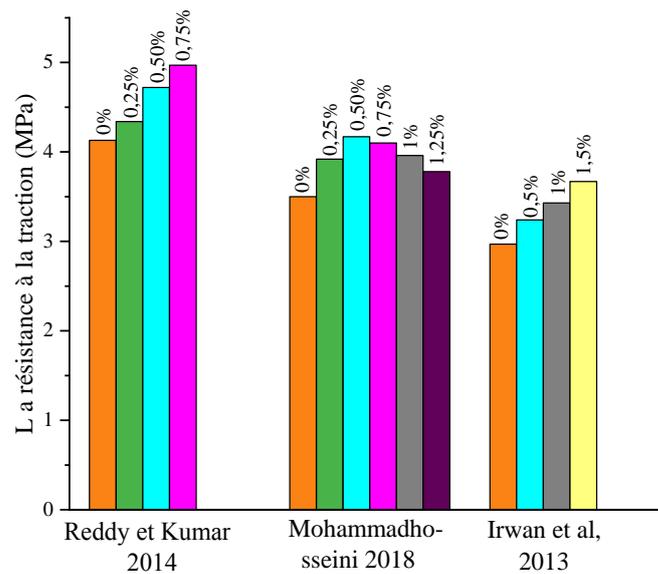


Figure II. 11 : Effet du taux des fibres de déchets plastiques sur la résistance à la traction du béton.

Pour la résistance à la flexion, Taherkhani (2014) a conclu que la résistance à la flexion des mélanges augmente en fonction de l'augmentation de la longueur des fibres. Il a également constaté que la résistance des mélanges diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres. Cela a été attribué au fait que plus d'eau reste dans le mélange avec un taux de fibres plus élevé et en raison de la surface lisse des fibres, qui entraîne une faible adhérence entre les fibres et la pâte de ciment. Chacko et George (2017) ont constaté que la résistance à la flexion de la poutre en béton augmente de 40,47 % grâce à l'ajout de fibres ondulées ; ayant un rapport d'aspect de 2,5 avec un taux de 1,4 % par rapport à celle de l'échantillon témoin. Reddy et Kumar (2014) ont observé que la résistance à la flexion dans le mélange de PET 0,75 % est améliorée de 35 % et 33 % par rapport au béton de référence respectivement à 7 et 28 jours.

En revanche, Bhogayata et Arora (2017) ont constaté que la résistance à la flexion n'est pas affectée par l'inclusion de fibres de PET dans le béton.

Sanjaykumar et Daule (2017) ont conclu que la résistance à la flexion augmente dans le béton avec l'introduction de fibre PET et la valeur maximale notée dans le mélange avec 1,5 %.

La figure II.12 illustre la résistance à la flexion du béton avec différents pourcentages de fibres de déchets plastiques.

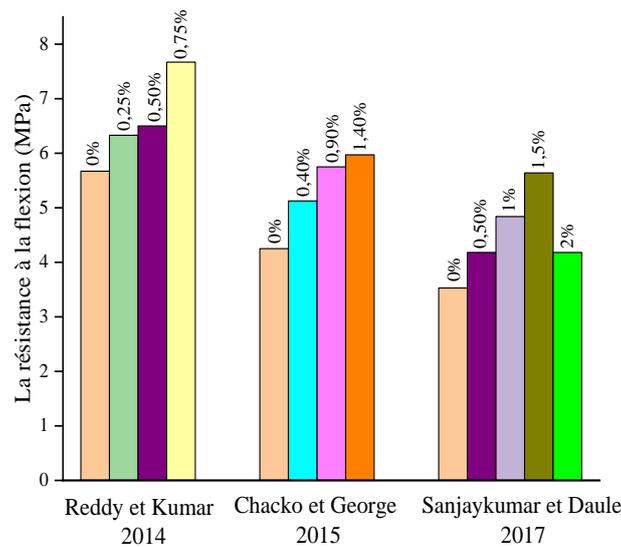


Figure II. 12 : Variation de la résistance à la flexion en fonction du taux de fibres plastiques à 28 jours.

II.2.4.5 Durabilité

Taherkhani (2014) a constaté que le mélange contenant des fibres en PET est plus résistant à l'abrasion que le mélange témoin. La résistance à l'abrasion a augmenté en fonction de la longueur des fibres. En revanche, les mélanges contenant des fibres courtes ont un module d'élasticité plus faible que le mélange témoin. Shamskia (2012) a constaté que les fibres de PET augmentent à la fois la ductilité et l'absorption d'énergie des échantillons de béton comprimés axialement. La ductilité la plus élevée est notée dans les éprouvettes contenant 1,5 % de fibres. Les résultats ont montré que l'inclusion de fibres de PET dans le béton améliore la résistance à la fissuration du béton. La présence de fibres de plastique métallisée FPM a amélioré la ductilité de la pâte de ciment et a réduit la propagation des microfissures dans la masse durcie. En outre, les fibres FPM ont amélioré la capacité de déformation à des charges plus élevées soumises à une compression axiale (Bhogayata et Arora, 2017).

Pesic et al. (2016) ont constaté que les fibres de polyéthylène à haute densité PHD réduisent la perméabilité à l'eau du béton d'une quantité significative de 17 à 42 % lorsque la profondeur de pénétration de l'eau est mesurée. Ceci va influencer positivement sur la durabilité des bétons. L'ajout d'une petite quantité de fibres de PHD a montré une réduction significative de la fissuration précoce de retrait plastique du béton, car la réduction de la largeur des fissures de plus de 50 % a été obtenue avec un volume de 0,40 % à 1,25 % de fibres de PHD. Le mélange de 0,5 % de fibres de PET dans le béton a fortement réduit la porosité. Cette dernière est déduite

des valeurs UPV (3,5 km/s à 4,5 km/s) obtenue (Marthong et Sarma, 2015). Krislnammorthy et al. (2017) ont étudié la durabilité du béton avec des fibres en PET, dans leur travail, trois fractions volumiques de 0,5 %, 1 % et 1,5 % utilisées avec trois rapports d'aspect de 0,15 - 0,30 et 0,45, les résultats de l'étude a montré que le mélange avec des fibres de PET à un taux volumique de 1 % et un rapport d'aspect de 0,45 a amélioré la résistance aux attaques d'acide et de chlorure. Kim et al. (2010) ont examiné les propriétés du béton avec l'incorporation de fibres en PET recyclé. Ils ont constaté que la fissuration due au retrait par séchage est retardée dans les échantillons de béton avec des fibres en PET par rapport aux échantillons témoins sans renfort. Aswathy et Abraham (2016) ont cherché à optimiser les avantages de l'utilisation de fibres plastiques droites et ondulées provenant d'une bouteille en PET usagée. Ils ont conclu que l'ajout de fibres de PET de différentes formes au béton améliore la capacité de cisaillement, bien que la fraction de 1 % en volume de la fibre semble donner des résultats optimaux. La réduction au-delà de ce pourcentage pourrait être due à la faible adhérence dans la matrice de fibres du béton. La durabilité des éprouvettes en béton a été étudiée sur des échantillons de béton immergés dans la solution de chlorure de magnésium pendant 30, 60 et 90 jours, Vijaya et al. (2018) ont observé que le pourcentage de réduction de la perte de poids diminue à mesure que le pourcentage en fibres PET augmente et la pénétration du chlorure diminuait avec l'augmentation du pourcentage de la teneur en fibres.

Bui et al. (2018) ont constaté que les déchets de sacs plastiques tissés recyclés et les fibres de déchets de bouteilles en PET recyclées améliorent la résistance au cisaillement du béton de granulats recyclés d'environ 2-4 % et 7-15 %, respectivement. Les deux déchets ont amélioré le comportement post-fissuration et la capacité de ductilité du béton. Kim et al. (2010) ont conclu que les mélanges de béton contenant des fibres de PET recyclé avaient des indices de ductilité relative estimés à (7-10) fois plus élevées que les mélanges sans fibres. Au-delà d'une fraction volumique d'environ 0,5 %, l'indice de ductilité et la capacité énergétique diminuent lorsque la fraction volumique des fibres augmente. Le tableau II.3 illustre le résumé de certaines recherches sur l'utilisation des déchets plastiques comme fibres dans le béton.

Tableau II. 3 : Travaux de recherches sur l'effet des fibres plastiques dans le béton.

Type de déchets plastiques	Pourcentage étudié (%)	Taille des fibres étudiées	Pourcentage optimal (%)	Taille optimale RA	Référence
Bouteille d'eau PET	0-0,5-1-1,5- 2-2,5-3	RA= 35-50	1	50	Nibudey et al. (2014)
Bouteille PET	0-0,6-0,8-1-1,2	RA= 30-50-70	1	50	Singh et al. (2017)
Bouteille PET	0-0,5-1-1,5	RA= 15-35-50	1	15	Lawrance et George (2016)
Déchets de plastique métallisé	0-0,5-1-2	RA= 5-10-20	1	20	Bhogoyata et Arora (2017)
Polyéthylène à haute densité	0-0,4-0,75-1,25	$\theta = 0,25-0,40$	1,25	Non indiqué	Pesic et al. (2016)
Polyéthylène téréphthalate	0-0,4-0,9-1,4	RA= 2,5-7,5-10	1,40	2,5	Chacko et George (2017)
Bouteille PET	0,5-1-1,5	RA= 16,67-33,33-50	1	33	Prabhu et al, (2014)
Bouteille PET	0-0,5-1-1,5-2	RA= 10	1	Non indiqué	Shahidan et al (2018)
Polyéthylène téréphthalate	0-2-3-4-5	Non indiqué	3	Non indiqué	Maqbool et Sood (2016)
Bouteille PET	0-0,5-1-1,5	RA= 4-8-12	2	4	Divya et George (2017)
Bouteille PET	0-0,5-1-1,5	RA= 1,33-1,67-2	0,5	1,33	Shamskia (2012)
Bouteille d'eau PET	0-0,5-1	RA= 0,5-1-1,5	0,5	Non indiqué	Taherkhani (2014)
Polyéthylène	0-0,25-0,5-0,75-1-1,25	RA= 10	0,5	Non indiqué	Mohammadhosseini et al. (2018)
Polyéthylène téréphthalate	0-0,5-1-1,5	RA= 0,15-0,30-0,45	1	0,30	Krishnamoorthy et al. (2017)

II.3 Conclusion

Ce chapitre présente des généralités sur la matière plastique et une contribution sur les différentes formes d'utilisation des déchets plastiques dans le béton comme remplacement partiel des granulats ou addition sous forme de fibres. Son objectif est d'améliorer des caractéristiques physicomécaniques.

Les résultats des différents travaux de recherche sont synthétisés comme suit :

- La maniabilité et la densité du béton diminuent avec le remplacement partiel des granulats fins par des déchets plastiques.
- La résistance à la compression du béton augmente avec l'augmentation du pourcentage de plastique comme remplacement partiel des granulats grossiers.
- L'ajout de plastique comme substitut aux granulats augmente les résistances à la traction et à la flexion par rapport au béton de référence. D'autre part, une diminution de la résistance à la flexion a été constatée en raison de la réduction de l'adhérence entre la surface des particules de plastique et la pâte de ciment.

- L'absorption d'eau diminue dans les mélanges de béton contenant du plastique sous forme de granulats, car les déchets plastiques ont une capacité d'absorption d'eau faible par rapport au granulats naturels.
- La résistance à l'abrasion des mélanges de béton contenant divers types de granulats en PET est meilleure que celle du béton témoin.
- L'ajout de déchets de plastique PET améliore le comportement ductile du béton ; et la capacité d'absorption d'énergie du béton est améliorée avec l'introduction des déchets plastiques dans le béton.
- L'incorporation de granulats plastiques dans le béton a montré des profondeurs de carbonatation et des coefficients de migration des chlorures plus élevés que le béton témoin.
- L'inclusion de fibres en PET dans les mélanges de béton diminue la maniabilité. Cette diminution est due au fait des fibres qui provoquent un plus grand frottement entre les particules.
- Les résistances à la compression et à la traction augmentent avec l'ajout de fibres plastiques dans les mélanges de béton.
- La résistance à l'abrasion et à la flexion du béton augmente avec la longueur des fibres.
- La ductilité et l'absorption d'énergie diminuent à mesure que les fibres augmentent dans les mélanges de béton.
- L'inclusion de fibres de polyéthylène à haute densité réduit la perméabilité du béton ; et les fibres métallisées améliorent la capacité de déformation aux charges de compression axiale.
- La pénétration du chlorure réduite avec l'augmentation du pourcentage de fibres dans le béton.
- Les fibres de déchets plastiques améliorent la résistance au cisaillement, le comportement post-fissuration et la capacité de ductilité du béton.
- L'indice de ductilité et la capacité énergétique du béton diminuent à mesure que la fraction volumique des fibres augmente.

Chapitre III : Matériaux et Méthodes

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des matériaux utilisés dans la partie expérimentale réalisée au niveau de laboratoire des matériaux à l'université de Bouira ; et au centre du territoire, de l'environnement et de la construction (CTAC) à l'Université du Minho au Portugal, ainsi que les essais physico-mécaniques effectués sur l'ensemble des variantes étudiées.

III.2 Matériaux utilisés

III.2.1 Ciment

Le ciment utilisé est un ciment gris MATINE NA442 CEM II/B-L 42,5 N provenant de l'usine « LAFARGE » Algérie, dont les caractéristiques physiques ainsi que les compositions chimiques sont présentées dans les tableaux III.1 et III.2. Les caractéristiques du ciment sont détaillées dans l'annexe.

Tableau III. 1 : Caractéristiques physiques du ciment.

Propriétés	Valeurs
Densité (kg/m ³)	3100
Consistance Normale (%)	26,5 ± 2
Finesse suivant la méthode Blaine cm ² /g	3700 - 5200
Début de prise (min)	150 ± 30
Fin de prise (min)	230 ± 50
Retrait à 8 jours (µm/m)	< 1000
Expansion (mm)	< 3,0

Tableau III. 2 : Composition chimique du ciment.

Composants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	PAF
Teneur %	17,50	4,36	3,10	60,40	1,70	2,50	0,58	10

III.2.2 Poudre de verre

La poudre de verre utilisée provenant des emballages des boissons alcoolisées ramassés, après lavage, un broyage fin est effectué, le broyage est fait à l'aide d'un broyeur à boulets jusqu'à l'obtention de la finesse désirée. La figure III.1 illustre le déchet de verre de bouteille et la poudre de verre obtenue après broyage. Un tamisage est réalisé au laboratoire pour obtenir une taille inférieure à 80 µm, la densité de cette poudre est de 2590 kg/m³ et la composition chimique de la poudre de verre est présentée dans le tableau III.3.

Tableau III. 3 : Composition chimique de la poudre de verre.

Composant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	PAF	Na ₂ O
Teneur %	70,90	1,93	0,40	13,30	0,18	0,06	0,33	0,5	12,40



Figure III. 1 : Déchets de verre et la poudre de verre.

La figure III.2 montre la diffraction de rayon X du ciment et de la poudre de verre indiquant la présence des phases cristallines de clinker, qui sont les minéraux C₃S, C₂S et C₃A avec la phase de calcite et de gypse dans le ciment. La poudre de verre correspond à la nature amorphe du verre sans aucun pic d'un composé cristallisé avec un pic large à 25°(2θ) qui représente la silice amorphe.

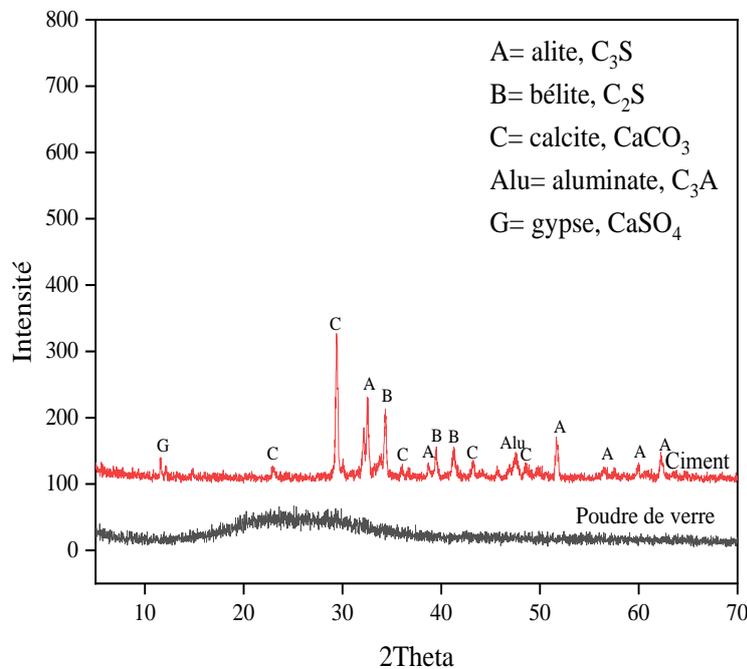


Figure III. 2 : Diagramme de diffraction de rayon X du ciment et de la poudre de verre.

III.2.2.1 L'activité pouzzolanique de la poudre de verre

En accord avec la norme ASTM C 618 - 05 qui exige pour que la poudre de verre soit acceptable comme matériau pouzzolanique si :

- Une somme de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ au minimum : 70 % ;
- Le pourcentage de soufre en maximum : 4 % ;
- Le pourcentage de teneur en humidité en maximum : 3 % ;
- Le pourcentage de perte au feu en maximum : 10 %.

Le tableau suivant présente les valeurs exigées par la norme ASTM C 618-05 comparée à celle de la poudre de verre utilisée dans ce travail.

Tableau III. 4 : Exigences de la norme ASTM C 618 - 05 pour les matériaux pouzzolaniques.

ASTM C618-05	Exigence	Poudre de verre
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, min %	70	73,23
SiO_3 , max %	4	0,06
Teneur en humidité, max %	3	-
Perte eu feu, max %	10	0,50

La norme ASTM C 618 – 05, recommande qu'une pouzzolane doit avoir un indice d'activité de résistance minimale de 75 %, conformément à la norme ASTM C 311 – 05, (AI) l'indice d'activité de la résistance est défini comme suit :

$$AI = (A/B) \times 100$$

A : résistance moyenne à la compression du mélange d'essais (MPa) ;

B : résistance moyenne à la compression du mélange témoin (MPa).

Le tableau suivant et la figure III.3 résument les valeurs d'indice d'activité obtenues aux âges 7, 14 et 28 jours.

Tableau III. 5 : Résultats de la résistance à la compression sur béton.

		A	B	AI
Béton	7 jours	29,43	36,18	81,34
	14 jours	33,90	40,13	84,48
	28jours	53,40	49,45	107,99

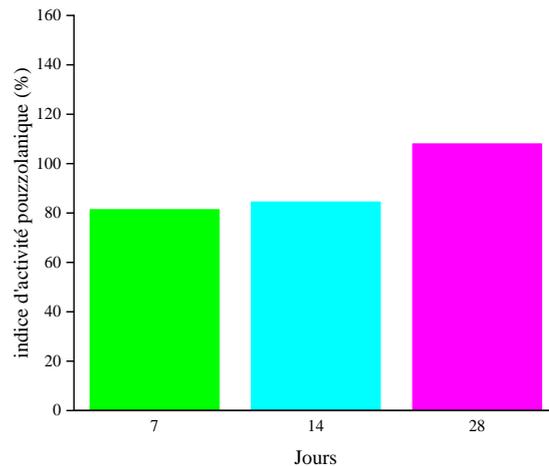


Figure III. 3 : L'indice d'activité pouzzolanique du béton avec poudre de verre.

Les conditions de la norme ASTM C618 - 05 sont vérifiées. L'indice d'activité pouzzolanique est supérieur à 75 % donc la poudre de verre est un matériau pouzzolanique.

III.2.3 Les granulats

III.2.3.1 Sable

Le sable utilisé dans ce travail est concassé 0/5 provenant d'une des carrières de Sétif.

III.2.3.1.1 Analyse granulométrique par tamisage [NF P18-560]

➤ Principe de l'essai

Ce test permet de diviser un matériau en plusieurs classes granulaires de taille décroissante à travers une série de tamis. La taille des mailles et le nombre de tamis (figure III.4) sont sélectionnés selon la nature de la matière et la précision souhaitée. Les masses des différents refus ou celles des différents tamis sont rapportées à la masse initiale du matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont utilisés, soit sous forme numérique, soit sous forme graphique.



Figure III. 4 : Equipement de l'analyse granulométrique.

Masse totale sèche : $M_S = 1200$ g.

Le tableau III.6 résume les valeurs obtenues après l'analyse granulométrique, la courbe granulométrique obtenue est illustrée par la figure III.5 ci-après.

Tableau III. 6 : Analyse granulométrique de sable.

Tamis	Refus cumulés (g) R_i	Refus cumulés % $R_i/M_S * 100$	Tamisât cumulés % $100 - (R_i/M_S * 100)$
5	32	2,67	97,33
4	110	9,17	90,83
3,15	178	14,83	85,17
2	354	29,50	70,50
0,5	830	69,17	30,83
0,25	989	82,42	17,58
0,125	1109	92,42	7,58
0,08	1172	97,67	2,33
Fond	1192	99,33	0,67

- La masse sèche d'un échantillon $M_s = 1200$ g ;
- Après Tamisage, le refus cumulé sur le dernier tamis de la série $R_n = 1172$ g ;
- Dans le fond, il reste $P = 20$ g. La masse totale sèche = $1172 + 20 = 1192$ g ;
- Ce qui signifie que les pertes dues aux imprécisions de mesures durant la manipulation sont de $1200 - 1192 = 8$ g ;
- L'imprécision relative à l'échantillon vaut : $8/1200 \times 100 = 0,67$ %.

La norme indique qu'en dessous de 1 % il n'y a pas des conséquences sur l'analyse.



Figure III. 5 : La courbe granulométrique du sable.

III.2.3.1.2 Module de finesse

On peut quantifier le caractère plus ou moins fin d'un sable en calculant le module de finesse (MF). Plus le module de finesse est petit, plus le granulat est riche en éléments fins.

Selon la norme française (NF P 18-540), le module de finesse est égal au centième de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm.

$M_f = 1/100$ la somme refus cumulés % des tamis (0,16-0,315-0,63-1,25-2,5-5)

$$M_f = 1/100 (89,17 + 78,75 + 62,92 + 43,25 + 22,25 + 2,67) \rightarrow M_f = 2,99$$

Donc le sable utilisé est un peu grossier qui correspond à des sables à utiliser pour la recherche des résistances élevées.

III.2.3.1.3 La masse volumique absolue

Pour étudier la formulation d'un béton, il est indispensable de connaître la masse volumique absolue des granulats. Elles sont exprimées en kg/m^3 , la densité absolue est la masse par unité de volume du matériau qui compose le granulat, sans prendre en compte les vides qui peuvent être présents dans ou entre les grains.

Méthode au pycnomètre :

La détermination de la masse volumique absolue est effectuée selon les étapes suivantes :

- Pycnomètre rempli de liquide jusqu'au trait de repère puis peser M_1 ;
- Peser une masse de l'échantillon « sable » M_2 ;
- Diminuer le volume de liquide puis on remplit le sable dans le pycnomètre (utiliser un entonnoir) ;
- Compléter le remplissage de pycnomètre avec l'eau jusqu'au trait de repère puis peser l'ensemble M_3 ;

$$M_3 = M_1 + M_2 - (M_2/\rho_s) \rho_w$$

Après la moyenne de trois essais on trouve $\rho_{ab} = 2630 \text{ kg/m}^3$.

III.2.3.2 Gravier

Dans notre travail, nous avons utilisé deux classes de gravier 3/8 et 8/16, qui proviennent d'une des carrières de Sétif avec des masses volumiques absolues de 2640 kg/m^3 et 2690 kg/m^3 respectivement.

III.2.3.2.1 Analyse granulométrique

➤ Gravier 3/8

Masse totale sèche : $M_s = 1200 \text{ g}$

Masse sèche après lavage : $M_{s1} = 1192$ g

Le tableau III.7 présente les résultats de l'analyse granulométrique de gravier 3/8.

Tableau III. 7 : Analyse granulométrique de gravier 3/8.

Tamis	Refus cumulés (g) R_i	Refus cumulés % $R_i/M_S * 100$	Tamisât cumulés % $100 - (R_i/M_S * 100)$
8	100	8,33	91,67
6,3	657	54,75	45,25
5	1058	88,17	11,83
4	1171	97,58	2,42
3,15	1184	98,67	1,33
2	1192	99,33	0,67
1	0	0	100
Fond	0	0	100

Passant au dernier tamis $T_n = 0$

$R_n + T_n = 1192$

$100[M_{S1} - (R_n + T_n) / M_{S1}] = 0 < 2$ % condition vérifiée.

➤ **Gravier 8/16**

Masse totale sèche : $M_s = 3500$ g

Masse sèche après lavage : $M_{s1} = 3470$ g

Le tableau III.8 illustre les résultats de l'analyse granulométrique de gravier 8/16.

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

Tamis	Refus cumulés (g) R_i	Refus cumulés % $R_i/M_S * 100$	Tamisât cumulés % $100 - (R_i/M_S * 100)$
16	148	4,23	95,77
12,5	1104	31,54	68,46
10	2224	63,54	36,46
8	3040	86,86	13,14
6,3	3470	99,14	0,86
5	0	0	100
3,15	0	0	100
Fond	0	0	100

Passant au dernier tamis $T_n = 0$

$R_n + T_n = 3470$

$100 [M_{S1} - (R_n + T_n) / M_{S1}] = 0 < 2$ % condition vérifiée

La figure III.6 présente la courbe granulométrique des différents types de gravier utilisé dans notre travail.

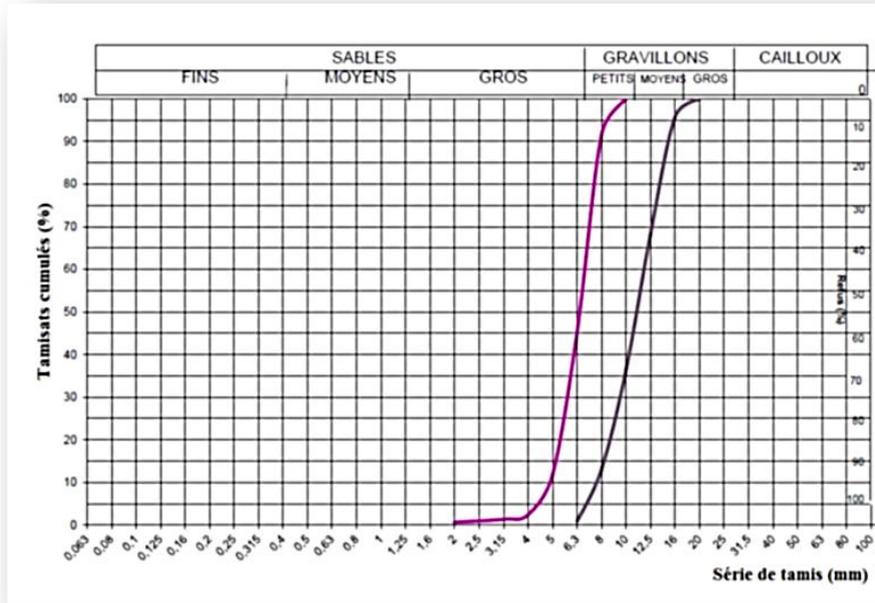


Figure III. 6 : La courbe granulométrique des deux types de gravier 3/8 et 8/16.

III.2.3.2.2 Essai Los Angeles [NF P 18-573]

La qualité des granulats peut être déterminée par des essais d'écrasement et d'usure. Dans notre travail, nous avons effectué les deux essais Los Angeles (figure III.7) et Micro Deval (figure III.8) pour trouver la qualité de deux classes du gravier.



Figure III. 7 : Machine de Los Angeles.

L'essai de Los Angeles consiste à insérer une quantité de granulat dans une machine à abraiser avec un nombre de boules en acier et de mesurer la quantité des éléments fins inférieurs à 1,6 mm après un certain nombre de rotations.

Le coefficient de Los Angeles est :

$$L_A = 100 (m / 5000)$$

Où :

$m = 5000 - m'$ est la masse sèche du matériau passant à travers le tamis de 1.6 mm après l'essai.

m' est le résultat de la pesée du refus sur le tamis 1.6 mm.

1- Gravier 3/8 $\rightarrow m' = 3900 \rightarrow L_A = 22$

2- Gravier 8/16 $\rightarrow m' = 3948g \rightarrow L_A = 21,04$

Donc la qualité de notre granulat est bonne.

III.2.3.2.3 Essai d'usure Micro Deval [NP P18-572]

L'essai Micro Deval (figure III.8) consiste à déterminer la résistance à l'usure du granulat soumis à un cycle d'usure dans un cylindre en rotation par le contact avec des billes en acier en présence d'eau.



Figure III. 8 : Machine d'essai Micro Deval.

Le coefficient de Micro Deval en présence d'eau est :

$$M_{DE} = 100m / M$$

Où :

M est la masse sèche du matériau soumis à l'essai.

$m = M - m'$ est la masse sèche du matériau passant après l'essai à travers le tamis 1.16 mm.

1- Gravier 3/8 $\rightarrow m' = 450g \rightarrow M_{DE} = 10$

2- Gravier 8/15 $\rightarrow m' = 445g \rightarrow M_{DE} = 11$

Donc la qualité de notre granulat est bonne.

III.2.3.3 Fibre plastique

Les fibres plastiques utilisées dans notre recherche sont des polyesters PET à haute résistance provenant du ruban servant à sceller les palettes de brique avec RA= 2,5 (rapport d'aspect : une longueur de 1,5 cm avec une largeur de 0,6 cm) (Figure III.9) ; et une densité de 1310 kg/m^3 introduite dans le béton avec 1 % en volume total des mélanges.

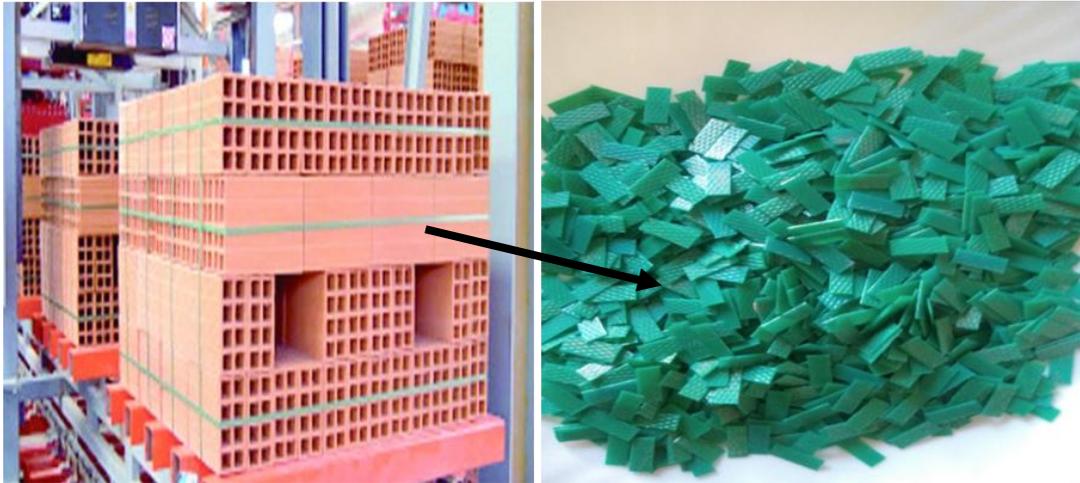


Figure III. 9 : Déchets plastiques et fibre plastique.

La figure III.10 présente la courbe de contrainte-déformation de l'essai de résistance à la traction sur les fibres plastiques utilisées et l'essai a été réalisé conformément à la norme ASTM D882-02 (2002).

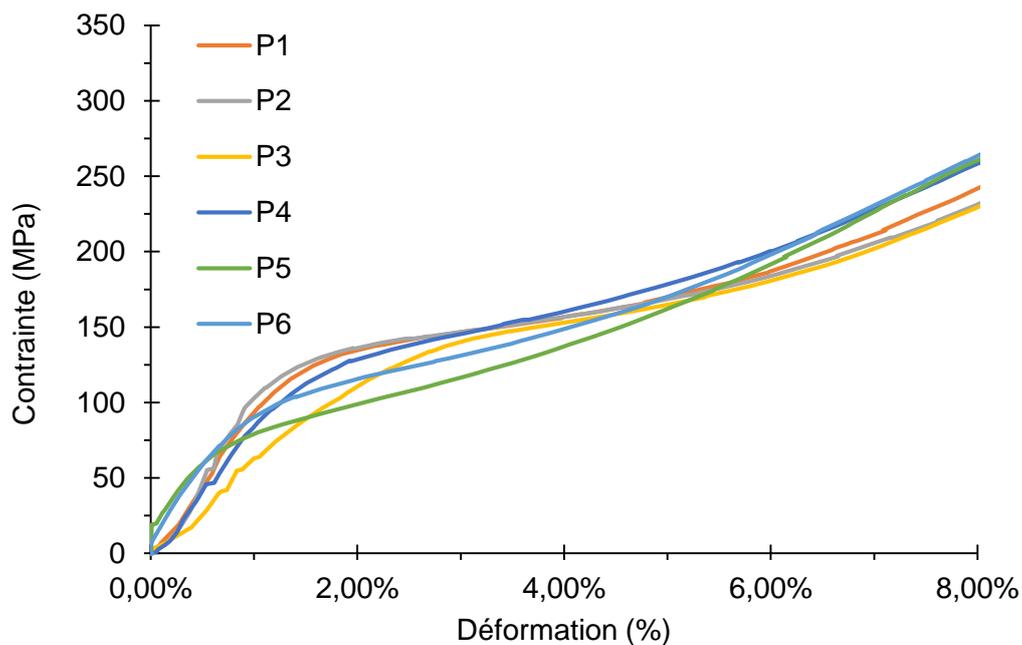


Figure III. 10 : La courbe de traction (contrainte/déformation) des fibres plastiques.

III.2.3.4 Adjuvant

L'adjuvant utilisé dans notre travail SIKAPLAST BV 40+ est un plastifiant réducteur d'eau à haute performance qui confère au béton une augmentation de l'affaissement au cône d'Abrams et prolonge le maintien de l'ouvrabilité. Les caractéristiques d'adjuvant sont détaillées dans l'annexe.

III.2.3.5 Eau de gâchage

L'eau utilisée dans notre travail est l'eau potable du robinet.

III.3 Formulation du béton

Pour l'étude expérimentale de la formulation du béton, nous avons utilisé la méthode de Dreux Gorisse (Festa et Dreux 1998). Elle a pour but de déterminer la teneur des différents composants du béton.

III.3.1 Données indispensables

➤ Données sur le béton

- Résistance visée F_{C28} (par mesure de sécurité, on doit majorer la résistance minimale en compression par 15 % qui est nécessaire à la stabilité de l'ouvrage) ;

$$F_{C28} = 1,15 \times 30 \text{ (classe de résistance C30/37)} \rightarrow F_{C28} = 34,5 \text{ MPa ;}$$

- Affaissement (cm) pour un béton très plastique (10-13 cm) = 12 cm ;
- Serrage (vibration) → Vibration normale ;
- Non-pompage pour béton.

➤ Données sur le ciment :

- Classe vraie à 28 jours : 42,5 MPa ;
- Masse volumique réelle : 3,1 g/cm³.

➤ Données sur les granulats :

- Qualité des granulats : Bonne ;
- Forme des granulats : Concassé ;
- Module de finesse $M_f = 2,99$;
- Dimension maximale des granulats $D_{\max} = 16 \text{ mm}$;
- Masses volumiques réelles des granulats :

$$\text{Sable} \rightarrow 2,63 \text{ g/cm}^3 ;$$

$$\text{Gravier 3/8} \rightarrow 2,64 \text{ g/cm}^3 ;$$

$$\text{Gravier 8/16} \rightarrow 2,69 \text{ g/cm}^3 .$$

III.3.1.1 Courbe granulométrique OAB

O : Origine → x = tamis 20 (0,063) ; y = passant 0 %

B : Extrémité → x = tamis de D (plus gros granulat) tamis 43 (16 mm)

A : Brisure

Abscisse :

Si $D \leq 20$ mm, l'abscisse est $D/2$

Le plus gros granulat est $D= 16$ mm, donc le point de brisure a pour abscisse : $D/2= 8$ mm

Ordonné :

$$Y = 50 - \sqrt{1,25D + K'} \rightarrow Y = 48 \%$$

La courbe granulaire de référence OAB est tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants. Relient les points à 95 % et 5 % des courbes successives (figure III.11) On obtient les pourcentages des granulats comme suit :

Sable corrigé : 41 %

Gravier 3/8 : 5 %

Gravier 8/16 : 54%

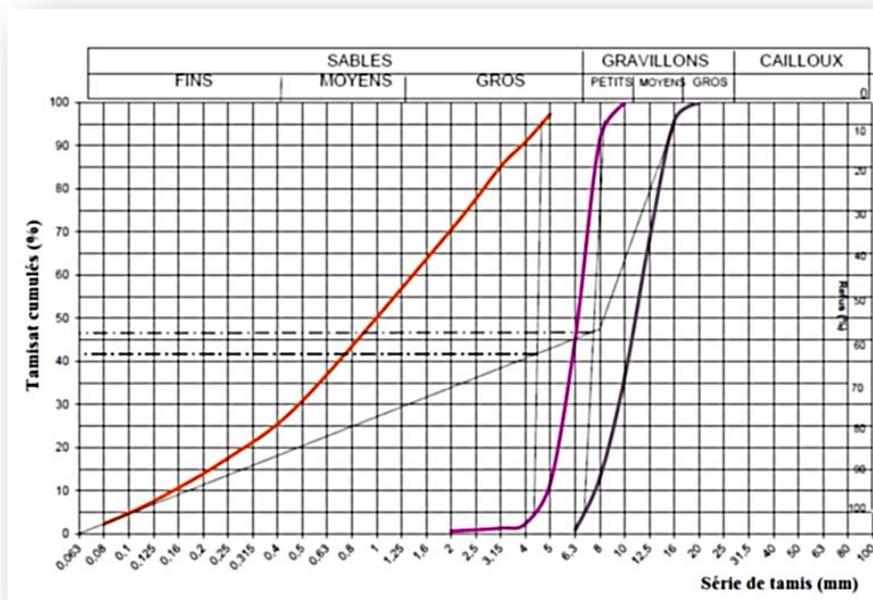


Figure III. 11 : Dosage des granulats par la méthode de Dreux Gorisse

III.3.2 Volume absolu des constituants

Le coefficient de compacité est : $c = 0,782 = \gamma$

Volume absolu du béton : $V_{abs.béton} = 1000 \gamma = 0,782 \text{ m}^3 \rightarrow 782 \text{ L}$

Volume absolu du ciment : $c = C/3,1 = 138,7 \text{ L} \rightarrow 116 \text{ L}$

Volume absolu des granulats :

$$V_{\text{abs.gra}} = V_{\text{abs.béton}} - V_{\text{abs.ciment}} = 1000 \gamma - c$$

$$V_{\text{abs.gra}} = 782 - 116 = 666 \text{ L} \rightarrow 666 \text{ L}$$

$$V_{\text{abs.sable}} = 666 \times 0,41 = 273 \text{ L}$$

$$V_{\text{abs.G3/8}} = 666 \times 0,05 = 33 \text{ L}$$

$$V_{\text{abs.G8/16}} = 666 \times 0,54 = 360 \text{ L}$$

III.3.3 Les dosages des constituants du béton en kg dans 1m³

$$C = 360 \text{ kg} \quad E = 177 \text{ kg}$$

$$\text{Sable 0/5} \rightarrow 2,63 \times 267 = 718 \text{ kg}$$

$$\text{Gravier 3/8} \rightarrow 2,64 \times 33 = 87 \text{ kg}$$

$$\text{Gravier 8/16} \rightarrow 2,69 \times 360 = 968 \text{ kg}$$

Adjuvant : 2% du poids de ciment $\rightarrow 7,2 \text{ kg}$

Le tableau III.9 présente les quantités en kilogramme pour un mètre cube de béton.

Tableau III. 9 : La composition en masses obtenue pour 1 m³ de béton.

Constituants	Masse (kg)
Ciment CEM II / B-L 42,5N	360
Eau	177
Sable 0/5	718
Gravier 3/8	87
Gravier 8/16	968
Poudre de verre (15% du poids du ciment)	54
Fibre plastique (1% en volume total)	23
Plastifiant (2 % du poids de ciment)	7

III.4 Préparation et composition des mélanges des bétons

D'après l'étude bibliographique sur l'utilisation des deux déchets de verre et de plastique dans le béton, les paramètres suivants ont été fixés : la taille des particules de la poudre de verre est inférieure à 80 μm ; et le pourcentage de remplacement du ciment par de la poudre de verre est de 15 %, le pourcentage de fibres plastiques par rapport au volume total de béton est de 1 % ; et le rapport d'aspect des fibres $RA = 2,5$.

Dans cette étude, quatre mélanges de béton ont été préparés avec un rapport E/C de 0,49.

Le premier était le mélange de béton témoin (BT), le deuxième contenant de la poudre de verre comme remplacement partiel du ciment à 15 % (BPV), le troisième élaboré par l'introduction de fibres plastiques à 1 % du volume total (BFP) ; et le dernier contient de la poudre de verre et des fibres plastiques avec les mêmes pourcentages, respectivement 15 % en poids de ciment et

1 % du volume total (BM) (Abdelli et al, 2021). La composition des variantes élaborées est mentionnée dans le tableau III.10.

Tableau III. 10 : Les proportions des constituants des mélanges de béton.

Type de béton	Ciment (Kg/m ³)	Eau (Kg/m ³)	Sable (Kg/m ³)	Gravier 3/8 (Kg/m ³)	Gravier 8/16 (Kg/m ³)	Poudre de verre (Kg/m ³)	Fibre plastique (Kg/m ³)	Adjuvant (Kg/m ³)	E/C
BT	360	177	718	87	968	/	/	7	0,49
BPV	306	177	718	87	968	54	/	7	0,49
BFP	360	177	718	87	968	/	23	7	0,49
BM	306	177	718	87	968	54	23	7	0,49

La figure III.12 montre les moules et la préparation des échantillons pour les différents types des bétons



Figure III. 12 : Les échantillons pour mesurer la masse volumique à l'état frais.

III.5 Essais et programme expérimental

III.5.1 La masse volumique

La masse volumique du béton à l'état durci (figure III.13) est calculée conformément à la norme NF EN 12390-7 selon la formule suivante :

$$D = \frac{m}{V}$$

Où :

D est la masse volumique, en kilogrammes par mètre cube ;

m est la masse de l'échantillon, en kilogrammes ;

V est le volume de l'échantillon, en mètres cubes.



Figure III. 13 : La détermination de la masse volumique des bétons à l'état durci.

III.5.2 Essai de la résistance à la compression

La résistance à la compression (figure III.14) a été déterminée conformément à la norme NF EN 12390-3.

64 cubes de dimension $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ ont été coulés et testés pour les différents mélanges de béton pendant 7, 14, 28 et 90 jours de durcissement. En utilisant une machine d'essai de compression XP sur pied d'une capacité de 3000 kN avec une course de 50 mm.

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

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

Où :

f_c est la résistance à la compression, exprimée en méga pascal (N/mm^2) ;

F est la charge maximale, exprimée en Newton ;

A_c est l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée.



Figure III. 14 : L'essai de la résistance à la compression.

III.5.3 La résistance à la flexion

La résistance à la flexion a été réalisée selon la norme NF EN 12390-5. 64 prismes de dimension (70x70x280) mm³ ont été testés à 7, 14, 28 et 90 jours de durcissement pour les quatre types de mélange de béton. En utilisant une machine de flexion trois points comme le montre la figure III.15.

La résistance en flexion est donnée par l'équation suivante : d_1 d_2

$$f_{cf} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2}$$

Où :

f_{cf} est la résistance à la flexion, en (MPa) ;

F est la charge maximale, en newtons ;

l est l'écartement entre les deux rouleaux d'appui, en millimètres ;

d_1 et d_2 sont les dimensions de la section transversale de l'éprouvette, en millimètres.



Figure III. 15 : L'essai de la résistance à la flexion.

III.5.4 Etude de la microstructure

III.5.4.1 Analyses thermiques par ATG, DSC

L'analyse thermique DSC-ATG a été réalisée par TA Instrument - SDT 2960 DSC-TGA simultanée (figure III.16). La DSC-ATG simultanée permet de déterminer les flux de chaleur (DSC) et les variations de poids (ATG) liés aux transitions dans un matériau en fonction de la température et du temps dans une atmosphère contrôlée. Cette mesure simultanée de ces caractéristiques clés du matériau améliore non seulement la productivité, mais également facilite l'interprétation des résultats.

➤ Préparation de l'échantillon

Les échantillons du béton à analyser ont été broyés afin d'obtenir une finesse inférieure à 2,5 mm. Ensuite, une quantité de chaque échantillon a été prélevée et tamisée à 3,15 μm jusqu'au passage complet de l'échantillon. Une prise d'échantillon de 150 à 200 mg a été introduite dans un creuset en aluminium placé sur une canne d'analyse reliée à une microbalance.

➤ Déroulement de l'essai

Les échantillons préparés ont été chauffés à la température ambiante 25 °C jusqu'à 1100 °C avec une vitesse de 10 °C/min sous balayage d'air (80 ml/min).



Figure III. 16 : Dispositif de l'analyse thermique.

III.5.4.2 Diffraction aux rayons X

La diffraction des rayons X est une méthode non destructive puissante pour caractériser les matériaux cristallins. Elle donne des informations sur les phases, les structures, et d'autres paramètres structuraux, tels que la taille des grains, la déformation, les défauts des cristaux et la cristallinité. Les pics de DRX sont obtenus par l'interférence constructive d'un faisceau monochromatique de rayons X dispersés à des angles de chaque série de plans de treillis dans un spécimen. En effet, les intensités de crête sont identifiées par les positions atomiques dans les plans du réseau (Kohli et Mittal, 2019). L'appareil utilisé dans notre travail est diffraction des rayons X (DRX) - Bruker D8 Discover (figure III.17).

➤ Préparation de l'échantillon

Les échantillons de béton à étudier ont été concassés afin d'obtenir une granulométrie inférieure à 2,5 mm. Ensuite, une quantité d'échantillons a été prélevée et tamisée à 80 μm jusqu'à ce que l'échantillon ait traversé. Une partie de quantité de 90 à 110 mg a été placée dans la zone de la porte-échantillon et recouverte de manière à obtenir une surface plane pour éviter l'exaltation de raies de diffraction des rayons X.

Les analyses par diffraction des rayons X ont été effectuées à l'aide de XRD - Bruker D8 Discover, utilisant une anticathode de cuivre ($\text{Cu K}\alpha$, $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$) avec un pas d'avancement de $0,02^\circ$ et un temps de comptage de 1 seconde.



Figure III. 17 : Diffraction des rayons X (DRX) - Bruker D8 Discover.

III.5.4.3 Observation au microscope à balayage

Le microscope électronique à balayage (MEB) est employé pour produire des images de surface d'un échantillon à un niveau microscopique. Cette opération est réalisée par le balayage d'un échantillon avec un faisceau d'électrons à haute énergie dans une colonne optique. Les électrons

envoyés par le faisceau entrent alors en interaction avec la structure atomique de l'échantillon et produisent des images de la surface. Différents types d'électrons sont produits par le faisceau, secondaires et rétrodiffusés. De plus, si le microscope est muni de capacités de rayons X, l'équipement peut fournir des informations sur la composition élémentaire de la structure et l'emplacement spécifique de ces éléments (Velasco, 2013).

Le microscope utilisé est un microscope électronique à balayage ultra haute résolution à émission de champ fonctionnant à 15 kV (figure III.18), avec EDS (spectromètre à dispersion d'énergie) intégré et système de détection et d'analyse du diagramme de diffraction électronique rétrodiffusé (EBSD). Les échantillons ont été revêtus par pulvérisation cathodique d'un film de 40 nm de Au-Pd (80 à 20 % en poids) avant l'analyse.

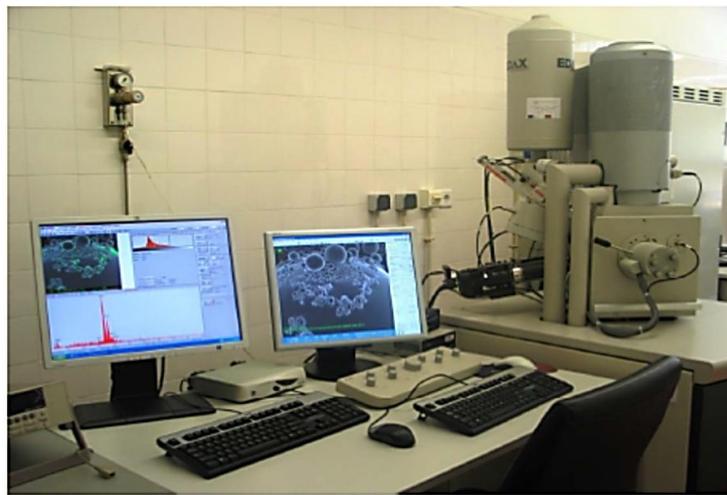


Figure III. 18 : Microscope électronique à balayage à émission de champ.

III.5.5 Durabilité

III.5.5.1 Essai d'absorption d'eau par capillarité

Le phénomène d'absorption d'eau par capillarité est le résultat de la différence entre la pression capillaire à la surface du fluide et sa pression de gravité, qui entraîne un mouvement du fluide jusqu'à ce qu'un équilibre soit atteint. La pression capillaire augmente avec la réduction du diamètre des capillaires et est plus importante aux limites des éléments en béton. Le processus est notamment évident dans des conditions sèches humides et il est le plus important à proximité de la surface de l'élément. (Evangelista et de Brito, 2010).

L'absorption d'eau par capillarité se traduit par la différence entre la masse de l'échantillon de béton durci qui a été en contact avec l'eau durant un certain temps et la masse de l'échantillon séché. Elle peut également être mesurée par la hauteur moyenne de la levée verticale mesurée perpendiculairement à la face de l'échantillon en contact avec l'eau.

On détermine l'absorption d'eau par capillarité des différents mélanges de béton selon la spécification de la documentation normative LNEC Portugal E393- 1993.

➤ **La procédure de l'essai**

Pour déterminer l'absorption d'eau par capillarité des bétons, les échantillons ont été placés dans un four avec une température de 40 ± 5 mm pendant 14 jours jusqu'à une masse constante pour obtenir la masse sèche du spécimen (M_0). Ensuite, les échantillons du béton ont été placés dans un fond du plateau ; et ajouter l'eau soigneusement jusqu'à un niveau de 5 ± 1 mm au-dessus de la face inférieure de spécimen (Figure III.19) avec prudence de mouiller les autres côtés de l'éprouvette. Après cela, le plateau a été fermé avec tout en maintenant le niveau d'eau constant pendant toute la durée de test.

Enfin, les mesures des masses des échantillons ont été effectuées pour différents temps jusqu'à 72 heures à partir du moment où les échantillons ont été en contact avec l'eau.

L'absorption par capillarité dans le temps t_i a été calculée en divisant l'augmentation de la masse $M_i - M_0$ par la surface de la face inférieure de l'échantillon qui était en contact avec l'eau.



Figure III. 19 : Essai d'absorption d'eau par capillarité.

III.5.5.2 Essai d'absorption d'eau par immersion

Le test d'absorption d'eau par immersion a pour but d'évaluer les pores ouverts dans le béton. Ils sont généralement liés aux pores qui se trouvent dans les granulats ; et aussi à l'air qui reste après la fabrication du mélange des composants et à la présence d'eau de gâchage supérieure à celle indispensable à l'hydratation du ciment (Bravo et al, 2015).

L'absorption d'eau par immersion est le résultat de la différence entre la masse de l'échantillon de béton durci immergé dans l'eau et la masse de l'échantillon séché, exprimée en volume de

l'échantillon. L'absorption d'eau par immersion des différents bétons a été déterminée selon la spécification de la documentation normative LNEC Portugal E394- 1993.

➤ **La procédure de l'essai**

Les échantillons du béton ont été introduits dans un récipient rempli d'eau potable avec une température de 20 ± 3 °C jusqu'à une masse constante (M_1). Dans cette étape, l'eau a été ajoutée dans le récipient par des intervalles liés avec la hauteur du spécimen, au départ avec 1/3 de sa hauteur dans une durée d'une heure ; et après 2/3 de sa hauteur dans une heure et dans toute la hauteur jusqu'à la masse constante. Le niveau d'eau final ne doit pas dépasser 10 mm de la face supérieure de l'éprouvette immergée. Ensuite, les échantillons ont été pesés dans l'eau pour déterminer la masse hydrostatique après saturation (M_2) (figure III.20). Enfin, les spécimens ont été retirés de l'eau et mis dans une étuve ventilée à une température de 105 ± 5 °C jusqu'à une masse constante (M_3). La masse de l'éprouvette saturée ou séchée était considérée comme constante lorsque la différence entre les masses obtenues à deux intervalles d'au moins 24 heures ont été inférieure à 0,1 % de la moyenne de deux lectures.

L'absorption d'eau par immersion a été calculée, en pourcentage, par l'expression suivante :

$$A = \frac{M_1 - M_3}{M_1 - M_2} \times 100$$

D'où :

M_1 : masse de l'échantillon, saturé d'air exprimé en gramme ;

M_2 : masse hydrostatique de l'échantillon exprimé en gramme ;

M_3 : masse de l'échantillon sec exprimé en gramme.



Figure III. 20 : Mesure de la masse hydrostatique des échantillons du béton.

III.5.5.3 Résistivité électrique [LMC- PE 002]

La résistivité électrique est une propriété du matériau qui peut être utilisée à différentes fins.

La réduction de l'espace des pores capillaires dans le béton entraîne une augmentation de sa résistivité électrique. Comme le courant électrique est transporté par les ions chargés dissous qui pénètrent dans la solution des pores du béton, il est un indicateur de la structure des pores du béton (Azarsa et Gupta, 2017).

La résistivité électrique du béton correspond au rapport entre le courant électrique appliqué et la chute de potentiel produite dans une cellule unitaire qui constitue une propriété matérielle spécifique indépendante de la géométrie. L'unité de résistivité électrique est la résistance multipliée par la longueur ($\Omega.m$). La conductivité correspond à l'inverse de la résistivité.

Les quatre électrodes de la sonde sont réglées pour être équidistantes, comme l'illustre les figures III.21 et III.22. Un courant alternatif est appliqué entre les électrodes extérieures et le potentiel électrique existant entre les électrodes intérieures est mesuré.

La résistivité électrique peut être calculée par l'expression suivante :

$$\rho = 2\pi aV/I$$

Dans lequel :

- ρ : résistivité électrique ($\Omega.m$) ;
- a : distance entre électrodes (m) ;
- V : différence de potentiel (V) ;
- I : intensité du courant (A).

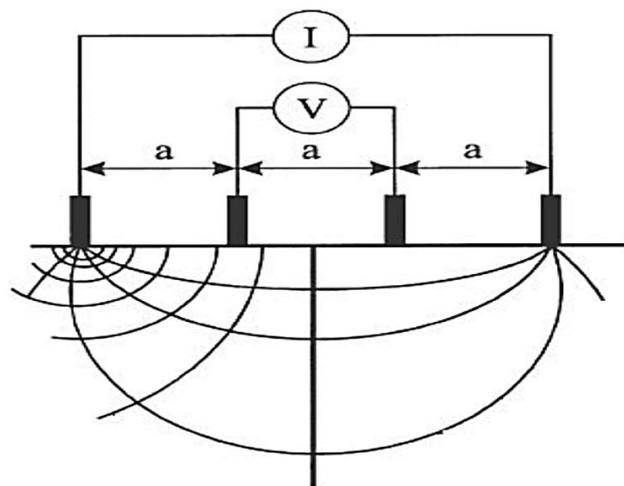


Figure III. 21 : Schéma du fonctionnement des électrodes.



Figure III. 22 : Essai de résistivité électrique.

III.5.5.4 Vitesse de propagation des ultrasons (NP EN 12504-4 2007)

La méthode de la vitesse d'impulsion est une méthode non destructive, puisqu'elle utilise des ondes mécaniques qui ne provoquent aucun dommage à l'échantillon du béton à examiner.

De plus, il est possible de tester une éprouvette à plusieurs reprises au même endroit, ce qui est intéressant pour contrôler le béton soumis à des modifications structurelles internes sur une longue durée (Naik et al, 2004).

La méthode de la détermination de la vitesse de propagation d'ultrason consiste à mesurer le temps de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le béton.

Un transducteur électroacoustique mis en contact avec la surface du béton à tester permet de générer un train d'ondes longitudinal. Une fois qu'il a parcouru une longueur connue dans le béton, le train d'ondes est transformé en un signal électrique par un second transducteur ; et le temps de l'impulsion de vibration est mesuré à l'aide d'une horloge électronique (figure III.23).

Dans les transmissions directes et semi-directes, la vitesse de propagation par ultrasons a été calculée à l'aide de la formule suivante :

$$V = \frac{L}{T}$$

Où

V : est la vitesse de propagation des ultrasons, en m/s ;

L : est la longueur du trajet en mm ;

T : est le temps nécessaire aux ultrasons pour traverser la longueur du parcours, en μs .

Le tableau III.11 illustre les différentes qualités du béton en fonction de la vitesse de propagation des impulsions.

Tableau III. 11 : Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation des impulsions
(Solis-Carcano and Moreno, 2008).

Qualité du béton	Vitesse de propagation (m/s)
Excellente	Supérieure à 4575
Bonne	3660 à 4575
Douteuse	3050 à 3660
Mauvaise	2135 à 3000
Très mauvaise	Inférieure à 2135



Figure III. 23 : Essai de vitesse de propagation des ultrasons.

III.5.5.5 Attaque d'acide

L'essai de résistance à l'acide a été effectué avec une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) à deux concentrations de 5 % et 10 % (en volume) dans un laboratoire avec une température ambiante. Deux dimensions des échantillons ont été utilisées dans ce test pour les quatre mélanges de béton avec $(5 \times 5 \times 5) \text{ cm}^3$ et $(5 \times 5 \times 10) \text{ cm}^3$.

Les échantillons de $(5 \times 5 \times 5) \text{ cm}^3$ et $(5 \times 5 \times 10) \text{ cm}^3$ ont été immergés dans la solution à une concentration de 5 % et 10 % d'acide respectivement. La solution a été renouvelée tous les 15 jours pour maintenir le pH constant. Les huit spécimens ont été immergés dans l'eau jusqu'à une masse constante saturée m_0 avant l'immersion dans les deux solutions. Après l'immersion dans les solutions pour certains temps, la détermination de masse des spécimens m_1 a été réalisée après un lavage à l'eau à l'aide d'une brosse douce (figure III.24). Le rapport entre le changement de masse de l'échantillon et la masse initiale, appelée facteur de perte de masse acide (FPMA), après avoir retiré les sédiments, a été calculé (Goriparthi et Rao 2017).

Le facteur de perte de masse acide a été déterminée selon la formule suivante :

$$FPMA = \frac{m_1 - m_0}{m_0}$$

D'où :

$FPMA$: facteur de perte de masse acide ;

m_0 : la masse d'échantillons à l'état saturé d'eau ;

m_1 : la masse d'échantillons après l'immersion dans la solution d'acide à un temps désiré.



Figure III. 24 : Essai l'attaque d'acide sur les échantillons du béton.

III.6 Conclusion

En premier lieu, nous avons montré une caractérisation des matériaux utilisés dans l'étude expérimentale ainsi que l'ensemble des résultats obtenus dans la méthode de formulation des bétons.

En deuxième lieu, nous avons présenté les procédures des différentes méthodes d'essais effectuées pour examiner les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des bétons avec l'étude des microstructures des bétons élaborés dans notre travail.

Chapitre IV: Résultats et discussions

IV.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats des différents essais physicomécaniques et de durabilité pour les quatre types des mélanges de béton avec aussi les résultats des observations microstructure des bétons réalisés.

IV.2 La masse volumique à l'état durci

Les résultats sont présentés dans la figure IV.1 à 7, 14, 28 et 90 jours. Une augmentation de la densité a été obtenue dans le mélange BPV par rapport au béton témoin. Cela peut être dû à la formation de plus de produits hydratés par la réaction pouzzolanique conduisant à une diminution de la porosité (Elaqra et al, 2019). Une diminution a été observée dans le mélange BFP à tous les âges de maturation. Cette diminution est liée à la présence de fibres plastiques qui réduit la masse du béton et provoque des vides entre ses composants et donc une augmentation de la porosité. Dans le mélange BM, une légère augmentation a été notée dans la densité à 7, 14 et 90 jours. Ce qui s'explique par l'effet favorable de la poudre de verre par rapport aux fibres plastiques.

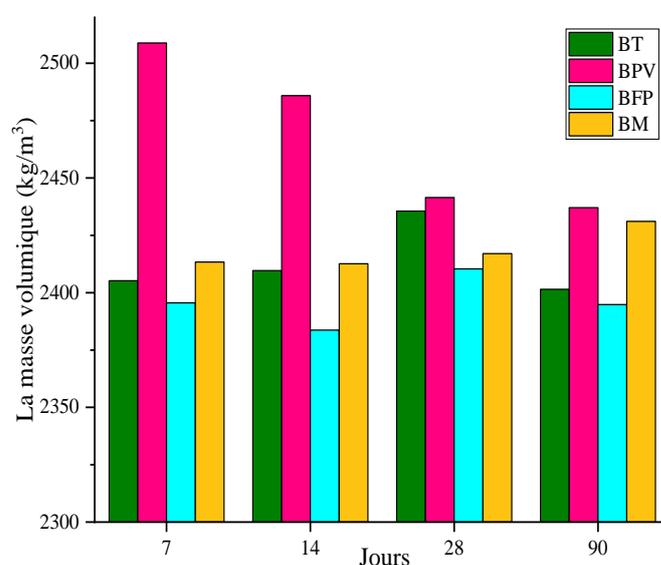


Figure IV. 1 : La masse volumique des variantes de béton durci.

IV.3 La résistance à la compression

Les résultats des tests de compression sont présentés dans la figure IV.2. Une diminution de la résistance est observée dans les mélanges BPV et BM par rapport au mélange de référence à 7 et 14 jours, ce qui s'explique par le remplacement du ciment par de la poudre de verre.

À 28 jours, une augmentation de 7,99 % de la résistance a été constatée dans le mélange BPV. Cela est attribué à la réaction pouzzolanique de la poudre de verre. La silice se combine avec la portlandite pour former des hydrates de silicate de calcium comme le montre l'analyse DSC-ATG de la figure IV.6, en réduisant la quantité de CH ; et également en raison de la poudre de verre qui remplit les vides entre les particules réduisant ainsi la porosité. Les mêmes résultats ont été trouvés par Dubey et al. (2016). Dans le mélange BM, une augmentation de 1,78 % par rapport au béton de référence a été constatée, ce qui confirme l'effet efficace de la poudre de verre par rapport aux fibres plastiques.

En outre, la résistance a diminué dans le mélange BFP par rapport au béton témoin à tous les âges de durcissement, ce qui est attribué au manque de liaison adéquate entre les fibres plastiques et la pâte de ciment (Taherkhani 2014).

À 90 jours, on a constaté une augmentation de la résistance de 20,58 %, 26,72 % respectivement dans les bétons BPV et BM. Cette augmentation indique la poursuite de la réaction pouzzolanique de la poudre de verre, formant des CSH dans les mélanges. Ceci a été confirmé par Du et Tan (2014) et comme le montre l'analyse MEB des figures IV.8 et IV.11 par la diminution de la quantité de portlandite.

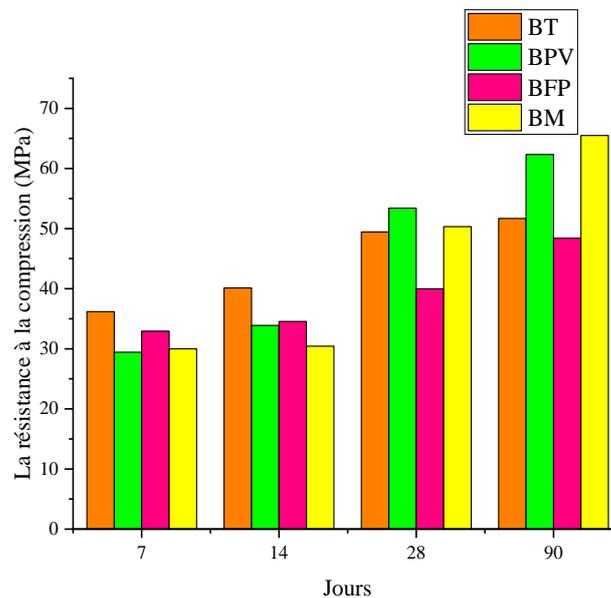


Figure IV. 2 : La résistance à la compression des variantes de béton à 7, 14, 28 et 90 jours.

IV.4 La résistance à la flexion

Les résultats des tests de résistance à la flexion sont présentés à la figure IV.3. On observe une augmentation de la résistance dans le mélange BPV par rapport au mélange témoin de 24,07 %, 47,26 %, 46,26 % et 51,01 % respectivement à 7, 14, 28 et 90 jours. Cette augmentation est due

à la réaction pouzzolanique de la poudre de verre et au remplissage efficace des vides, qui conduit à une microstructure dense du béton (Rokdey et al. 2018).

En revanche, on constate une augmentation dans le mélange BFP de 17,22 %, 3,81 % et 10,74 % respectivement à 14, 28 et 90 jours. Cela s'explique par le renforcement du béton avec des fibres à surface rugueuse qui réduisent la fissuration. Une augmentation de la résistance à la flexion a été observée dans le mélange BM par rapport au mélange de référence de 6,50 %, 28,07 %, 35,37 % et 39,33 % respectivement à 7, 14, 28 et 90 jours de durcissement. Ceci est attribué à la présence combinée de la poudre de verre et de fibres plastiques dans le mélange. Ce qui montre l'effet positif de l'introduction combinée de la poudre de verre et de fibres plastiques sur le comportement mécanique du béton à long terme (90 jours).

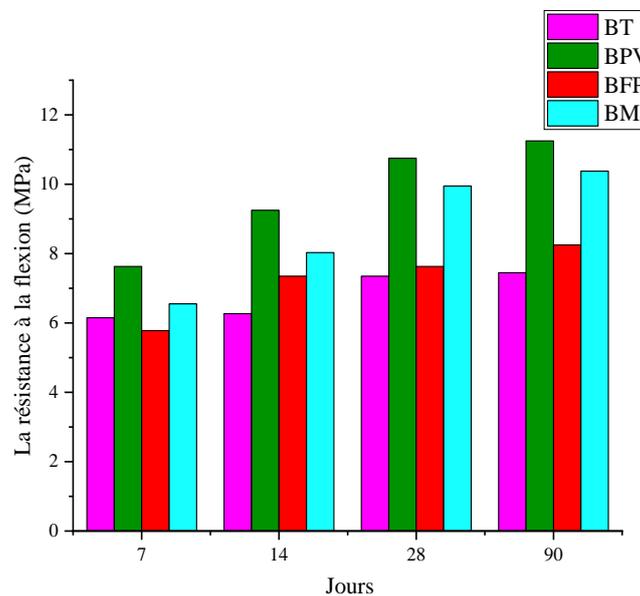


Figure IV. 3 : La résistance à la flexion des mélanges de béton à 7, 14, 28 et 90 jours.

IV.5 Les analyses DRX et DSC-ATG

Les résultats de la diffraction des rayons X pour les mélanges de béton BT et BPV sont présentés à la figure IV.4. Les pics de BPV montrent la présence des mêmes phases minéralogiques dans le mélange BT. On a constaté une diminution des pics indiquant la portlandite CH dans le BPV par rapport au BT. Ce qui s'explique par la consommation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ par réaction pouzzolanique due la présence de la poudre de verre pour former ainsi du silicate de calcium hydraté CSH.

Les phases minéralogiques que l'on trouve dans le béton sont la phase principale de la calcite CaCO_3 à $29^\circ(2\theta)$, ainsi que la portlandite à $18^\circ(2\theta)$ et $34^\circ(2\theta)$, la phase de la dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (pic principal à $31^\circ(2\theta)$). Il y a également eu les phases de l'oxyde de calcium

CaO (pic principal à $47^\circ(2\theta)$) et enfin le CSH (pic principal à $39^\circ(2\theta)$). Cette analyse confirme l'effet pouzzolanique de la poudre de verre pour la formation de CSH supplémentaire dans le béton, après consommation de portlandite comme mentionné dans les travaux de Chabil (2009) et Toumi (2010).

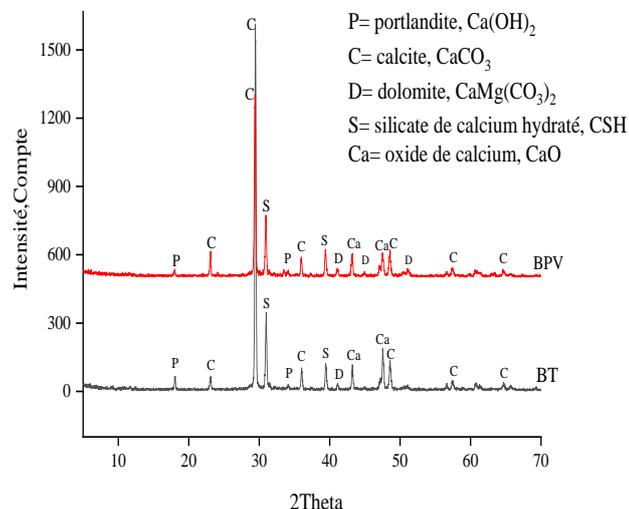


Figure IV. 4 : L'analyse de diffraction de rayon X sur les mélanges de béton BT et BPV.

L'analyse thermique gravimétrique (DSC-ATG) des échantillons du béton témoin est présentée dans la figure IV.5. Elle montre la présence de trois pics endothermiques, qui se traduisent par la présence, en premier lieu, d'une perte de masse à 125°C de 1,55 % (environ 0,54 mg) par rapport à la masse initiale.

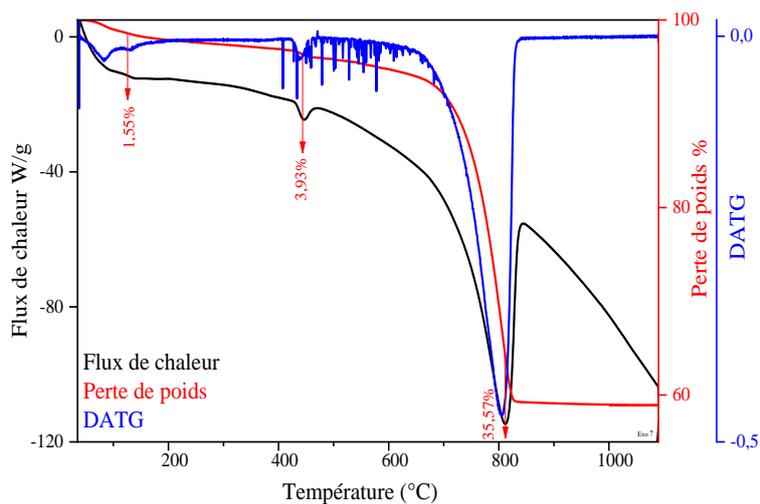


Figure IV. 5 : DSC-ATG du béton témoin (BT).

Ce phénomène s'explique par l'évaporation de l'eau libre, la déshydratation du silicate de calcium hydraté et de l'ettringite (Fares 2009). En second lieu, le pic constaté à une température

comprise entre 450 °C et 550 °C. Cela montre une perte de masse de 3,93 % (1,37 mg), correspond au phénomène de décomposition de la portlandite en chaux libre, selon la réaction suivante : $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$, que les auteurs ont mentionnées dans leur travail (Elkacemi et al. 2014). Enfin, environ 650 °C et 850 °C, soit une perte de masse de 35,57 % (environ 12,41 mg), ce qui illustre la décomposition du carbonate de calcium CaCO_3 selon la réaction suivante : $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ qui libère du dioxyde de carbone CO_2 .

La figure IV.6 montre la courbe DSC-ATG du mélange de béton BPV.

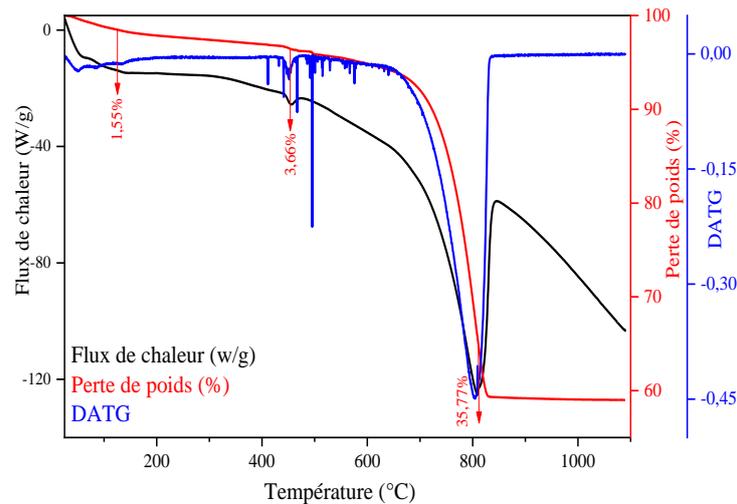


Figure IV. 6 : DSC-ATG de béton avec poudre de verre (BPV).

La même valeur de perte de masse dans le premier pic de 1,55 % indique qu'il n'y a pas d'effet de la poudre de verre dans le béton jusqu'à 125 °C. On a constaté une diminution de la perte de masse dans le deuxième pic en raison d'une réduction de la quantité de portlandite qui réagit avec la silice de la poudre de verre pour former du CSH. On a également noté une augmentation de la perte de masse dans le troisième pic, ce qui explique l'augmentation de la quantité de calcite due à la réaction pouzzolanique, donc la décomposition du CaCO_3 avec une grande quantité (Belouadah et al. 2018).

L'analyse thermique montre effectivement la réaction pouzzolanique de la poudre de verre, qui est avantageuse pour la durabilité du béton.

IV.6 Caractérisation par microscope électronique à balayage

Les images au microscope électronique à balayage des échantillons du béton témoins (Figure IV.7) montrent l'existence de silicate de calcium hydraté CSH avec portlandite CH résultant de l'hydratation du ciment (hydratation des minéraux C_3S et C_2S) ; comme l'ont confirmé les résultats du DRX. L'analyse chimique EDS a détecté la présence de calcium et d'oxygène en grande partie avec la présence d'autres éléments (Mg, Si, S....).

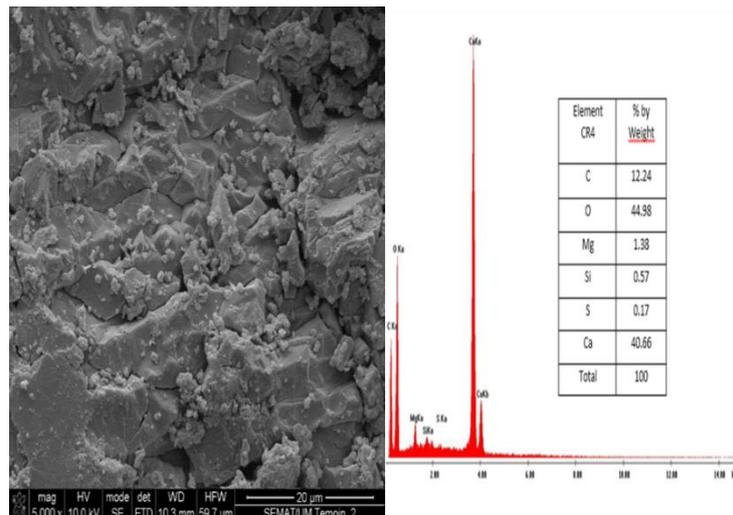
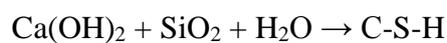


Figure IV. 7 : Analyse MEB-EDS du béton de contrôle BT.

La microstructure du béton avec de la poudre de verre comme remplacement partiel du ciment (Figure IV.8) montre la réduction des pores due au remplissage des vides par la poudre de verre. On note également la diminution de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ qui se combine avec la silice pour former du C-S-H selon la réaction suivante :



L'analyse chimique (EDS) a également révélé la présence de calcium et d'oxygène avec l'existence d'autres éléments (Al, Na, K...). Cela semble indiquer la présence de la poudre de verre.

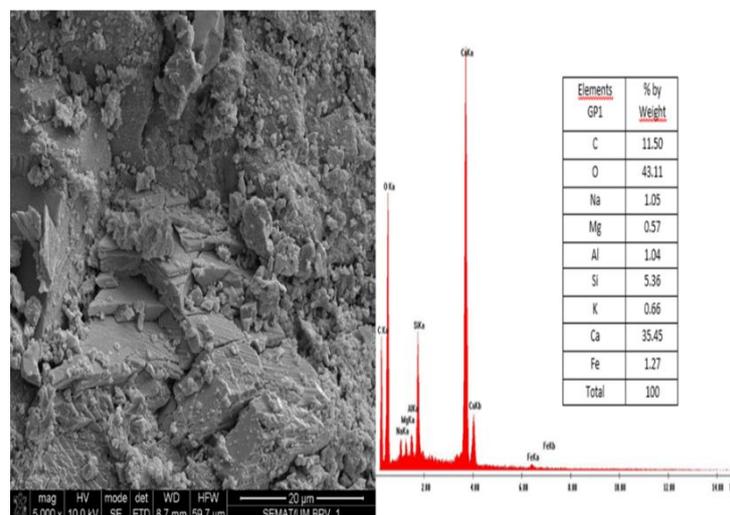


Figure IV. 8 : Analyse MEB-EDS du béton BPV.

La figure IV.9 montre la microstructure du béton renforcé de fibres plastiques. Il y a eu des vides avec la présence de silicate de calcium hydraté CSH et de portlandite CH. L'analyse

chimique (EDS) a montré la présence d'une teneur en carbone supérieure à 50 %, ce qui confirme l'existence du polymère.

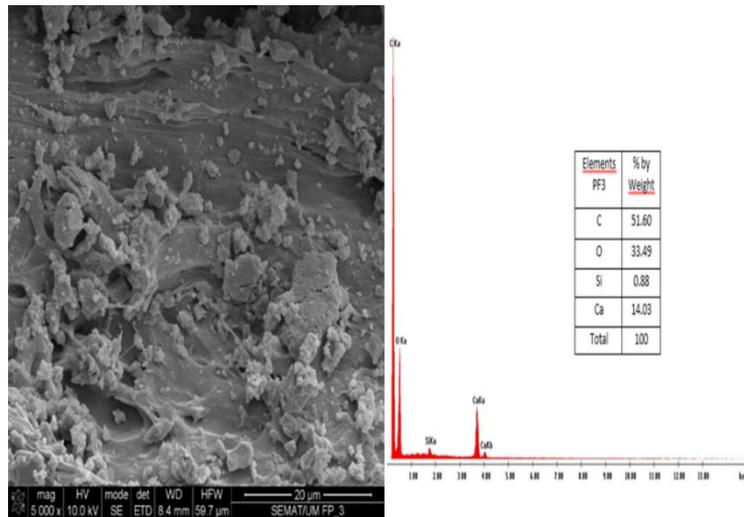


Figure IV. 9 : Analyse MEB-EDS du béton BFP.

Les figures IV.10 et IV.11 montrent les microstructures du béton avec de la poudre de verre et des fibres plastique. Ces figures illustrent la diminution de la portlandite qui réagit avec la silice pour former des CSH et la consolidation de la structure due à la présence de la poudre de verre. L'analyse chimique EDS (Fig. 31) montre la présence d'une teneur en carbone supérieure à 60 %, ce qui confirme l'existence du polymère ; et l'analyse EDS (Fig. 32) note la présence des éléments (Na, Al...) indiquant l'existence de la poudre de verre.

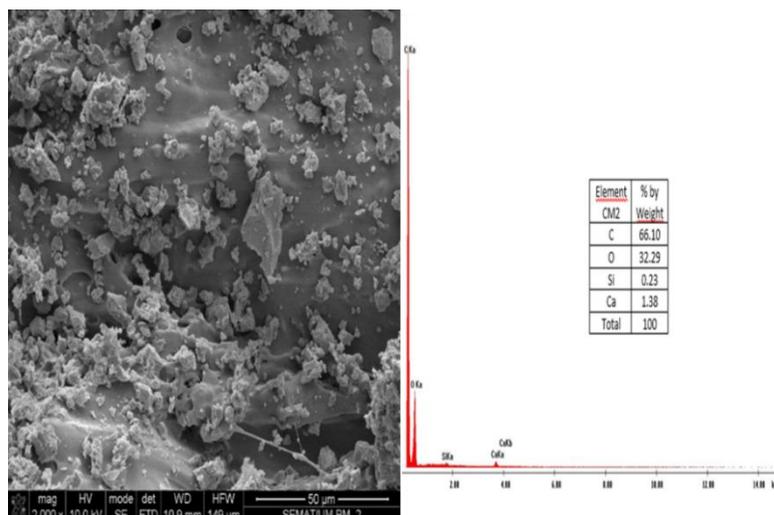


Figure IV. 10 : Analyse MEB-EDS du béton BM.

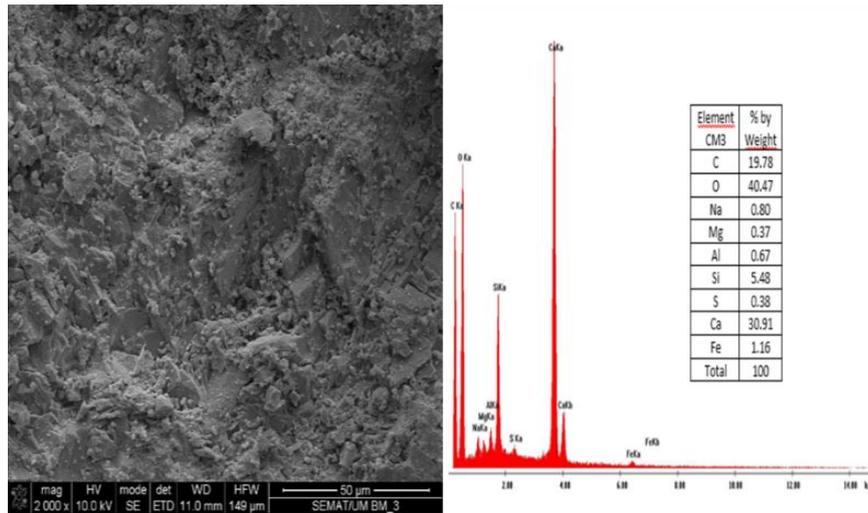


Figure IV. 11 : Analyse MEB-EDS du béton BM dans un autre point.

IV.7 Essai d'absorption d'eau par capillarité

Les résultats sont présentés à la figure IV.12. Au début de l'essai, on peut remarquer que l'absorption d'eau par capillarité de tous les bétons augmente rapidement, en particulier dans les bétons ne contenant que des fibres plastiques (BFP). L'augmentation dans le béton BPF est due aux fibres plastiques qui créent des vides entre les constituants du béton. L'absorption dans les bétons BPV et BM est inférieure à celle des bétons BFP et BT. Ceci est lié à la poudre de verre qui remplit les vides dans le mélange de béton.

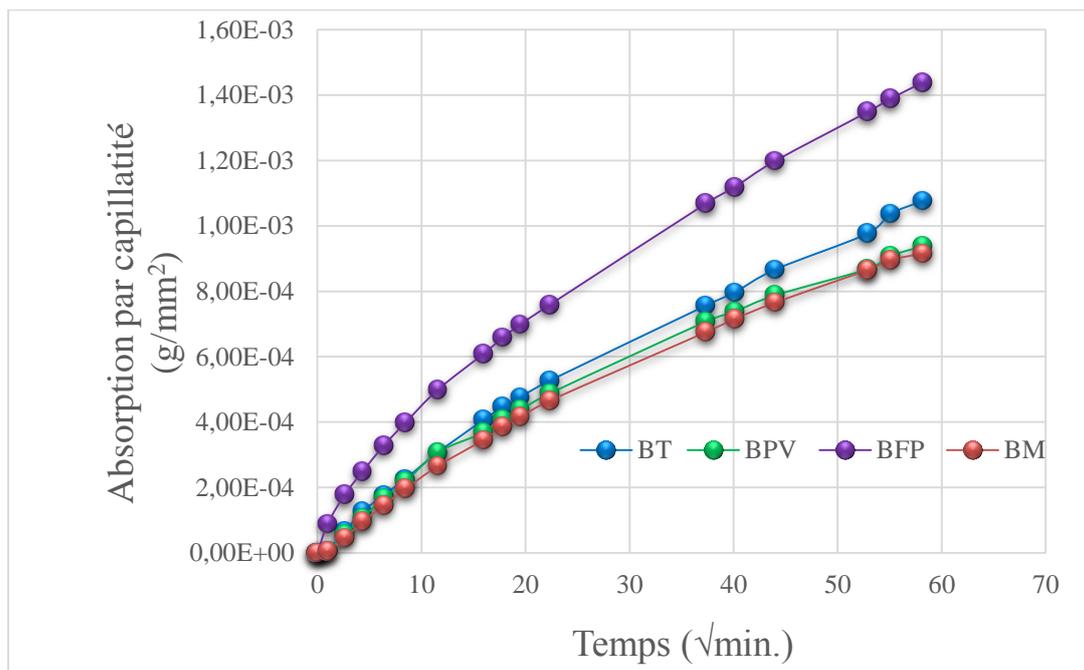


Figure IV. 12 : Absorption d'eau par capillarité des bétons en fonction du temps.

IV.8 Essai d'absorption d'eau par immersion

Selon les résultats présentés à la figure IV.13. Il y a une augmentation de l'absorption d'eau par immersion dans les différents mélanges BPV, BFP et BM par rapport au mélange témoin. Il y a eu une augmentation significative dans le béton BFP. Ceci est lié aux fibres plastiques qui provoquent des vides dans la matrice. Dans les bétons BPV et BM, on observe une légère augmentation de l'absorption d'eau par rapport au béton de référence et une diminution par rapport au béton BFP. Ceci est dû à la poudre de verre qui remplit les vides entre les constituants du béton.

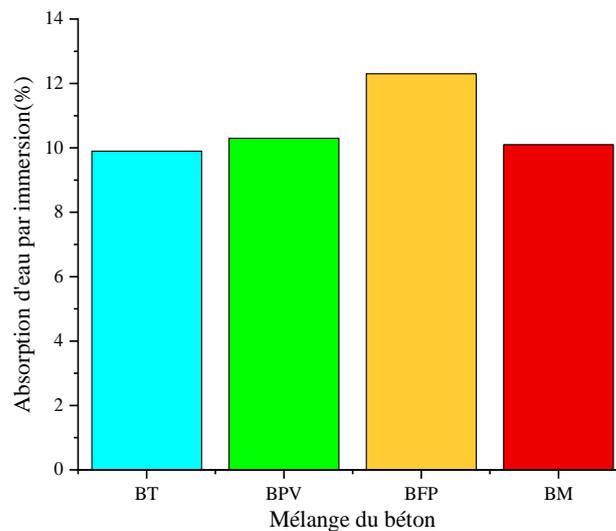


Figure IV. 13 : Absorption d'eau par immersion des différents mélanges de béton.

IV.9 Résistivité électrique

Les résultats de l'essai de la résistivité électrique dans les différents mélanges de béton sont présentés dans la figure IV.14. On remarque une augmentation de la résistivité électrique dans les bétons BPV et BM par rapport au béton témoin, donc la diminution des pores dans ces bétons. Cela est dû à la poudre de verre qui remplit les pores entre les particules du béton. Par contre, on observe une diminution de la résistivité dans le béton BFP par rapport au béton de référence et les autres bétons. Cela est expliqué par l'augmentation des pores dans ce mélange de béton à cause de l'existence de fibres plastiques qui créent des vides entre les constituants du béton.

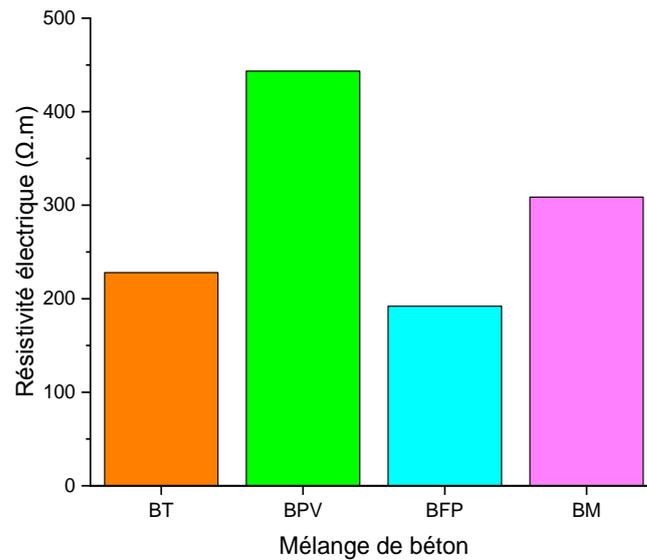


Figure IV. 14 : La résistivité électrique dans les différents mélanges de béton.

IV.10 Vitesse d'impulsion des ultrasons

Les résultats des essais de la détermination de vitesse d'impulsion des ultrasons sont illustrés dans la figure IV.15. Les résultats obtenus montrent que la qualité des différents mélanges de béton est d'excellente qualité, car la vitesse de propagation est supérieure à 4 575 m/s (Solis-Carcano et Moreno, 2008). On observe une légère diminution de la vitesse dans le béton BFP par rapport au béton témoin. Cette diminution peut être due à la présence de fibres plastiques qui provoquent une augmentation de la taille des pores dans le béton comme le montre l'analyse MEB et allongent le temps de propagation du son. Une légère augmentation de la vitesse de propagation est observée dans les bétons BPV et BM. Ceci est dû à la poudre de verre qui remplit les vides dans le béton, réduisant ainsi la porosité.

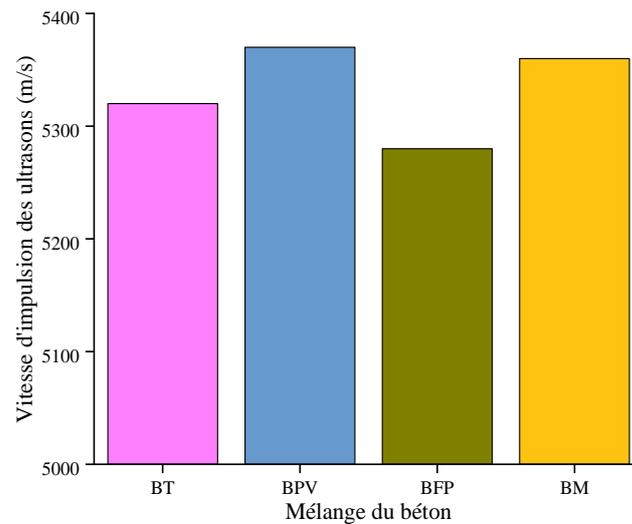


Figure IV. 15 : La vitesse de propagation des ultrasons dans différents bétons.

IV.11 Essai d'attaque acide

Les figures IV.16 et IV.17 montrent les résultats de la perte de masse après immersion dans la solution d'acide sulfurique à 5 % et 10 %. On constate dans les différents mélanges de béton une augmentation de la perte de masse à 63 et 190 jours. La perte de masse dans le mélange BM donne des valeurs plus faibles par rapport aux autres mélanges à un âge avancé. Cela est dû à l'effet de la poudre de verre, qui est plus importante que les fibres plastiques dans ce mélange, ce qui a pour conséquence de remplir les vides entre les particules de béton. Dans le mélange BFP, il y a eu une augmentation par rapport au béton témoin. Cette tendance est liée à la présence de fibres plastiques qui provoquent des vides entre les composants du béton. D'autre part, on observe des valeurs élevées dans le mélange BPV. Cela peut être dû à une grande quantité de pâte cimentaire dans ces échantillons.

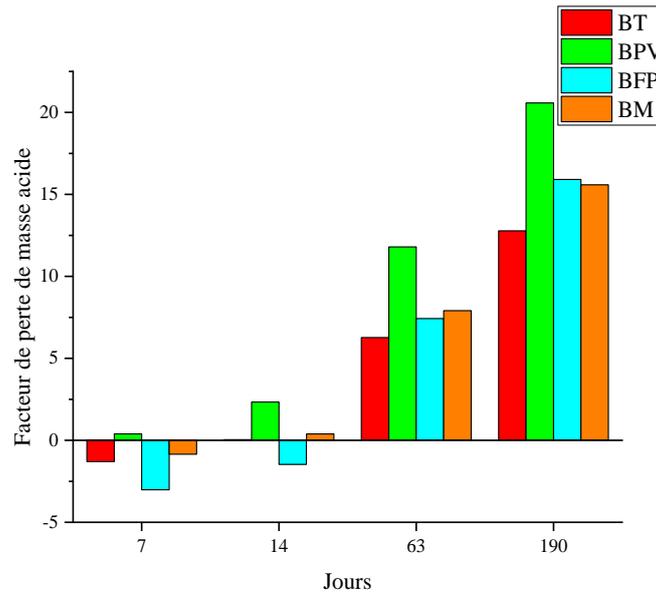


Figure IV. 16 : La perte de masse des bétons immergés dans l'acide de (5X5) cm².

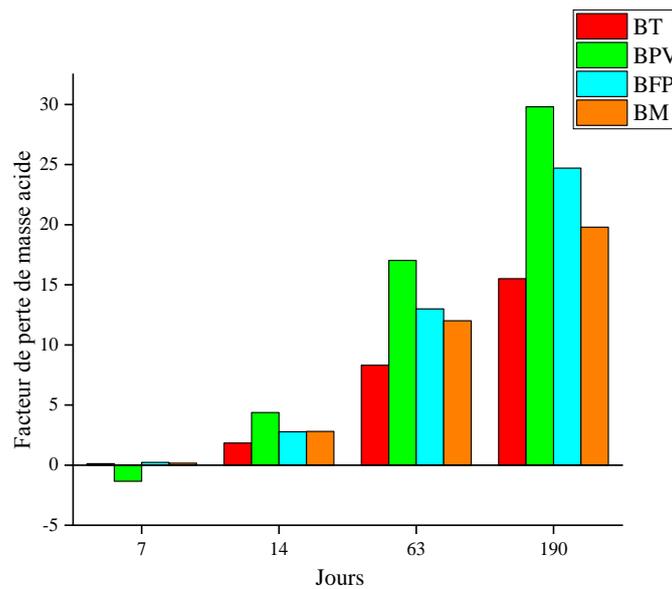


Figure IV. 17 : La perte de masse pour les bétons immergés dans l'acide de (5X10) cm².

IV.12 Conclusion

Le but de ce travail est d'étudier l'effet des déchets de plastique et de verre sous forme de poudre sur les propriétés mécaniques et la microstructure des mélanges de béton étudiés.

Les résultats des études expérimentales indiquent :

- L'incorporation de la poudre de verre dans le béton augmente la masse volumique du béton durci en raison de la réduction de la porosité. En revanche, cette masse volumique diminue à cause de la présence de fibres plastiques.
- Cette étude confirme l'effet positif de l'introduction de la poudre de verre finement broyée ($<80\ \mu\text{m}$), qui est prouvé dans les tests DRX et DSC-ATG par la consommation de portlandite par la réaction pouzzolanique. Ce phénomène est illustré par la diminution des pics de portlandite.
- L'étude de la microstructure des échantillons révèle une identification des variantes en présence de la poudre de verre, qui consolide les bétons davantage.
- La résistance à la compression diminue dans le mélange BFP par rapport au béton témoin à tous les âges de la cure. Cela est dû à l'absence de liaison adéquate entre les fibres plastiques dans le béton.
- Les résultats de la résistance à la flexion montrent l'avantage d'introduire des fibres plastiques dans le béton.
- L'inclusion de la poudre de verre ou la combinaison avec les fibres plastiques dans le béton améliore à long terme la résistance à la compression et à la flexion. Il contribue également à améliorer la durabilité de ces bétons.
- L'utilisation du verre dans les mélanges de béton réduit l'absorption d'eau par capillarité. Ceci est attribué à la poudre de verre qui remplit les vides entre les constituants du béton.
- L'introduction des déchets plastiques dans le béton augmente l'absorption d'eau par capillarité et immersion. Ceci est dû aux fibres plastiques qui créent des vides dans la matrice du béton.
- La vitesse des impulsions ultrasoniques montre une amélioration dans les mélanges contenant des déchets de verre et l'ajout de fibres plastiques dans le béton présente une diminution de la vitesse de propagation.
- L'ajout de la poudre de verre dans les mélanges de béton augmente la résistivité électrique. Par contre, le mélange contenant seulement les fibres plastiques illustre une réduction de la résistivité électrique.
- Le mélange contenant de la poudre de verre et des fibres plastique présente une meilleure résistance aux attaques acides.
- Enfin, ce travail apporte une solution durable grâce à la réduction des déchets de verre et de plastique.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est d'étudier la valorisation des déchets (verre et plastique) dans l'amélioration des performances du béton. Dans ce but, les deux déchets ont été introduits au béton sous forme de poudre comme remplacement partiel du ciment pour le verre et de fibre pour le cas du plastique séparément et combinés dans le même mélange.

Nous avons préparé quatre types de mélanges de béton avec un rapport E/C =0,49 avec la méthode de formulation de Dreux Gorisse.

Les essais effectués sont la masse volumique, la résistance à la compression et à la flexion, l'absorption d'eau, la vitesse des impulsions ultrasoniques, la résistivité électrique et l'attaque par les acides. D'autres analyses approfondies ont également été effectuées sur des échantillons de chaque variante, comme la diffraction des rayons X (DRX), l'analyse thermogravimétrique (DSC-ATG) et le microscope électronique à balayage (MEB).

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude conduisent aux conclusions suivantes :

- La masse volumique des bétons avec la présence de la poudre de verre est supérieure par rapport au béton témoin, en raison de la réduction de la porosité.
- Amélioration de la résistance à la compression et à la flexion avec l'introduction de la poudre de verre ou combiné avec les déchets plastiques à long terme.
- Amélioration de la résistance à la flexion avec l'inclusion des déchets plastiques.
- Ce travail confirme l'effet efficace de l'inclusion des deux déchets de verre et de plastique dans le même mélange de béton dans l'amélioration des résistances aux attaques d'acide.
- Les résultats des essais de l'absorption d'eau, la résistivité électrique et la vitesse des impulsions ultrasoniques montrent l'effet bénéfique de l'ajout de la poudre de verre.
- D'après l'étude de la microstructure des échantillons, on peut observer une identification des variantes en présence de la poudre de verre, qui consolide davantage les bétons.
- L'utilisation des déchets plastiques et de verre dans le béton peut être exploitée, vu qu'ils auront un impact bénéfique pour l'environnement par la réduction de ces déchets dans la nature d'une part ; et d'autre part, ils présentent un intérêt économique par la réduction de coût du béton après remplacement partiel d'une quantité de ciment par la poudre de verre. Ceci va contribuer positivement sur la durabilité des bétons, car la poudre de verre aura un effet pouzzolanique.

Recommandations et perspectives

Recommandations et perspectives

À l'issue des résultats de ce travail de thèse, des perspectives ont été soulevées, pour d'autres travaux dans cet axe de valorisation des déchets dans le domaine des matériaux de construction, entre autres :

- La vérification de la résistance à la traction des éprouvettes en béton avec les fibres PET.
- Mener une étude comparative des bétons à base de fibres PET et d'autres fibres.
- Vérification de l'effet de la température sur le comportement des bétons avec les fibres PET.
- Une campagne d'essais de durabilité, telle que : la pénétration des gaz, la carbonatation, gel dégel... etc.
- Mener une réflexion sur l'élaboration d'un fascicule sur les recommandations d'utilisation des bétons fibrés au niveau des chantiers.
- Vérification de l'effet des paramètres sur les caractéristiques des bétons, notamment le pourcentage et nature des déchets de verre et de plastique.
- Réaliser une modélisation numérique afin de vérifier l'effet de la disposition des fibres sur les propriétés physico-mécaniques des bétons.
- Etudier le comportement rhéologique, contrainte déformation (σ - ϵ) des bétons considérés dans ce travail. Le but est d'opter pour une loi de comportement permettant de prédire le comportement des éléments structuraux renforcé par des armatures en acier.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Abdallah S et Fan M (2014) Characteristics of concrete with waste glass as fine aggregate replacement. *International Journal of Engineering and Technical Research* 2: 11–17.

Abdelli HE, Mokrani L, Kennouche S, Aguiar JB (2020) Utilization of waste glass in the improvement of concrete performance: A mini review. *Waste Management and Research* 38: 1204–1213.

Abdelli HE, Mokrani L, Kennouche S, Aguiar JB (2021) Mechanical and durability properties of concrete incorporating glass and plastic waste. *Advances in Concrete Construction* 11: 173–181.

Adaway M et Wang Y (2015) Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete – effects on compressive strength. *Electronic Journal of Structural Engineering* 14: 116–122.

Afshinnia K (2015) Investigation into mechanisms and mitigation of alkali silica reaction in sustainable Portland cement concrete containing recycled glass materials. PhD Thesis, Clemson University, USA.

Aghabaglou AM, Beglarigale A, Yazici H et Ramyar K (2016a) Transport properties and freeze-thaw resistance of mortar mixtures containing recycled concrete and glass aggregates. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 23: 53–69.

Aghabaglou AM, Beglarigale A, Yazici H et Ramyar K (2016b) Microstructural analyses of recycled aggregate-bearing mortar mixture. *ACI Materials Journal* 113: 769–780.

Aghabaglou AM, Beglarigale A, Yazici H et Ramyar K (2018) Comparison of recycled glass and recycled concrete aggregates bearing mortar mixtures exposed to high temperature, abrasion and drying. *Journal of Green Building* 13: 39–59.

Albano C, Camacho N, Hernández M, Matheus A et Gutiérrez A (2009) Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Management* 29: 2707–2716.

Aliabdo AA, Abd Elmoaty AE et Aboshama AY (2016) Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. *Construction and Building Materials* 124: 866–887.

Références bibliographiques

Arora R (2015) Determination of compressive and flexural strength of concrete using waste glass powder. *International Journal of Engineering Trends and Technology* 19: 150–153.

Arivalagan.S (2016) Experimental investigation on partial replacement of waste plastic in concrete. *International Journal of Engineering Sciences and Research Technology* 5: 443–449.

ASTM C 311- 05 (2006) Standard test methods for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use in Portland cement concrete. Annual book of ASTM standard. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C 618- 05 (2005) Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolans for use in concrete. Annual book of ASTM standard. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D 882- 02 (2002), Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting, American National Standards Institute; New York, NY, USA.

Aswathy N et Abraham A (2016). Experimental study on concrete with straight and crimped plastic fibres. *International Journal of Science and Research* 5: 1589–1592.

Azarsa, P et Gupta, R (2017) Resistivity of concrete for electrical durability evaluation: a review. *Advanced Materials Science Engineering* 2017: 1–30.

Bansal NP et Doremus RH (1986) Handbook of Glass Properties. *Handb Glas Prop*, Presse académique, INC, Floride, Amérique, 680 pages.

Barry CMF, Baker AM et Mead JL (2006) Introduction to polymers and plastics. In: Harper CA. *Handbook of plastics technologies: The complete guide to properties and performance*. McGraw- Hill Companies Inc.

Belouadah M, Rahmouni ZEA et Tebbal N (2018), “Effects of glass powder on the characteristics of concrete subjected to high temperatures”, *Advances in Concrete Construction* 6: 311–322.

Bhat P et Rao NB (2014) Influence of glass powder on the properties of concrete. *International Journal of Engineering Trends and Technology* 16: 196–199.

Bhogayata AC et Arora NK (2017) Fresh and strength properties of concrete reinforced with metalized plastic waste fibers. *Construction and Building Materials* 146: 455–463.

Références bibliographiques

- Borg RP, Baldacchino O et Ferrara L (2016) Early age performance and mechanical characteristics of recycled pet fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials* 108: 29–47.
- Bui NK, Satomi T et Takahashi H (2018) Recycling woven plastic sack waste and pet bottle waste as fiber in recycled aggregate concrete: An experimental study. *Waste Management* 78: 79–93.
- Bravo M, De Brito J, Pontes J et Evangelista L (2015) Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. *Construction and Building Materials* 77: 357–69.
- Butler JH et Hooper PD (2019) Glass Waste. In: *Waste*. Elsevier Inc.; 307–322.
- Brydson JA (1999) *Plastics Materials 7th Edition*. Elsevier. 920 pages.
- Chabil FZD (2009) Carbonatation de bétons adjuvantes à base de ressources locales Algériennes. Ph.D. Dissertation. Université Mentouri Constantine, Constantine, Algérie.
- Chacko B et George S (2017) Performance of concrete with pet fibers. *International Journal of Engineering Science Invention Research and Development* 3:725–728.
- Chalmin P (2019) The history of plastics: From the capitol to the tarpeian rock. *Field Actions Science Reports*. *The Journal of Field Actions*. 6–11.
- Chavan S et Rao P (2016) Utilization of waste pet bottle fibers in concrete as an innovation in building materials. *International Journal of Engineering Research* 5: 304-307.
- Chen G, Lee H, Young KL, Yue PL, Wong A, Tao T, Choi KK (2002) Glass recycling in cement production- an innovative approach. *Waste Management* 22: 747–753.
- Christensen TH et Damgaard A (2010) Recycling of Glass. In: Christensen TH. *Solid Waste Technologie and Management*. Blackwell publishing Ltd. 212-219.
- Curlee TR et Das S (1991) *Plastic wastes: Management, control, recycling, and disposal*. Noyes Data Corporation. Etat-Unis d'Amérique. 479 pages.
- Divya PVM et George S (2017) Shear behaviour of reinforced concrete using pet bottle fibre. *International Journal of New Technology and Research* 3: 54–56.
- Donadkar MU et Solanke SS (2016) Review of e-waste material used in making of concrete. *International Journal of Science Technology & Engineering* 2: 66–69.

Références bibliographiques

- Du H et Tan KH (2014) Waste glass powder as cement replacement in concrete. *Journal Advanced Concrete Technology* 12: 468–477.
- Dubey S, Goliya SS et Dhakre OS (2016) Feasibility of study on effect of waste glass powder as a partial replacement of cement on compressive strength of concrete. *International Journal for Scientific Research & Development* 4: 38–41.
- Dvorak K, Dolak D et Dobrovolný P (2017) The improvement of the pozzolanic properties of recycled glass during the production of blended Portland cements. *Procedia Engineering* 180: 1229–1236.
- Elango A et Ashok KA (2018) Study on partial replacement of plastic waste as fine aggregate in concrete. *International Journal of Current Engineering and Scientific Research* 5: 1-9.
- Elkacemi S, Abahlous L, Ait amar S, Boukbir L et El alem N (2014) Heat treatment of concrete and its influence on the mechanical properties. *Proceedings of the International Congress on Materials and Structural Stability*, Rabat. Novembre.
- Entreprise chimique française (2017) Available at: <http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees/mater/verre/texver.htm> (accessed 20 December 2017).
- European Commission DG ENV. *Plastic Waste in the Environment - Final Report*. BIO Intell Serv. 2011;(April):171.
- Elaqra HA, Haloub MAA et Rustom RN (2019) Effect of new mixing method of glass powder as cement replacement on mechanical behavior of concrete. *Construction and Building Materials* 203: 75–82.
- Evangelista L et de Brito J (2010) Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composite* 32: 9–14.
- Festa J. et Dreux, G. (1998), *New Guide to Concrete and its Constituents*, (8th edition), Eyrolles Group, Paris, France. 411 pages.
- Gahoi G et Kansal R (2016) Waste glass powder as a partial replacement of PPC. *International Journal of Science and Research* 5: 1414–1418.
- Gilbert M (2017) *Plastics materials: Introduction and historical development*. In: *Brydson's Plastics Materials*. Elsevier Ltd. 1–18.

Références bibliographiques

Glas Trösch Holding AG (2013) *Le verre et ses applications*. Glas Trosch AG, Bützberg. 380 pages.

Goriparthi MR et Rao GTD (2017) Effect of fly ash and GGBS combination on mechanical and durability properties of GPC. *Advanced Concrete Construction* 5: 313-330.

Guendouz M, Debieb F, Boukendakdji O, Kadri EH, Bentchikou M et Soualhi H (2016) Use of plastic waste in sand concrete. *Journal of Materials and Environment Science* 7: 382–389.

Hama SM et Hilal NN (2017) Fresh properties of self-compacting concrete with plastic waste as partial replacement of sand. *International Journal of Sustainable Built and Environment* 6: 299–308.

Harini B et Ramana K V (2015) Use of recycled plastic waste as partial replacement for fine aggregate in concrete. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 4: 8596–8603.

Harish BA, Hanumesh BM, Siddesh TM et Siddhalinges BK (2016) An experimental study on partial replacement of cement by glass powder in concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology* 3: 1218–1224.

Hasanuzzaman M, Rafferty A, Sajjia M et Olabi A-G (2016) Properties of Glass Materials. In: *Reference Module Materials Science Materials Engineering*. 1–12.

Harper CA et Petrie EM (2003) *Plastics Materials and Processes: A concise encyclopedia*. John Wiley and Sons Inc. New Jersey. 974 pages.

Hassanpour M et Unnisa SA (2017) *Plastics; applications, materials, processing and techniques. Plastic Surgery and Modern Techniques 2017*: 1-5.

Hussain G et Verma G (2016) Experimental investigation on glass powder as partial replacement of cement for M-30 concrete. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology* 2: 846–853.

Ibrahim KI (2017) The effect of using Waste Glass [WG] as partial replacement of sand on concrete. *Journal of Mechanical and Civil Engineering* 14: 41–45.

Idir R (2009) *Mécanisme d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique*. Thèse en vue de l'obtention du doctorat de l'université de Toulouse, France, 304 pages.

Références bibliographiques

Islam MJ, Meherier MS et Islam AKMR (2016) Effects of waste pet as coarse aggregate on the fresh and harden properties of concrete. *Construction and Building Materials* 125: 946–951.

Ismail ZZ et AL-Hashmi EA (2009) Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete. *Waste Management* 29: 655–659.

Ismail ZZ et AL-Hashmi EA (2008) Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. *Waste Management* 28: 2041–2047.

Irwan JM, Asyraf RM, Othman N, Koh HB, Annas MMK et Faisal SK (2013) The mechanical properties of PET fiber reinforced concrete from recycled bottle wastes. *Advanced Materials Research* 795: 347–351.

Barton J et Guillemet C G (2005), *Le verre Science et technologie*, EDP Sciences. Les Ulis, France, 460 pages.

Karde AD, Bagwan MI, Gowda MR, Kudale RR et Jagtap PM (2018) To study properties of concrete using waste glass powder replacement to cement. *International Journal for Scientific Research and Development* 6: 992–996.

Kazmi D, Williams DJ et Serati M (2020) Waste glass in civil engineering applications—A review. *International Journal Applied Ceramic Technology* 17: 529–554.

Keerio MA, Khoso S, Khan JS, Ansari AA, Bhatti NK (2017) The effect of waste glass as partial replacement of cement on properties of concrete. *Engineering Science and Technology International Research Journal* 1: 59–63.

Keryou AB et Ibrahim GJ (2014) Effect of using windows waste glass as coarse aggregate on some properties of concrete. *Engineering and Technology Journal* 32: 1519–1529.

Khan FA, Fahad M, Shahzada K, Alam H et Ali N (2015) Utilization of waste glass powder as a partial replacement of cement in concrete. *International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering* 4: 181–185.

Kim SB, Yi NH, Kim HY, Kim JHJ et Song YC (2010) Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Composite* 32 :232–240.

Références bibliographiques

- Kumar P, Ananthayya M et Vijay K (2014) Effect of partial replacement of cement with waste glass powder on the properties of concrete. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research* 3: 1–6.
- Kumar S et Nagar DB (2017) Effects of waste glass powder on compressive strength of concrete. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development* 1: 289–298.
- Kumar V et Sood H (2017) Effect of waste glass powder in concrete by partial replacement of cement. *International Journal of Civil Engineering* 4: 13–22.
- Lam CS, Poon CS et Chan D (2007) Enhancing the performance of pre-cast concrete blocks by incorporating waste glass-ASR consideration. *Cement and Concrete Composites* 29: 616–625.
- Lawrance L et George S (2016) Study on properties of concrete with crimped pet fibers. *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology* 5: 9843–9850.
- Le Bourhis E, (2014) *Glass: Mechanics and Technology* Second Edition. Wiley VCH. Allemagne. 388 pages.
- Lee G, Ling TC, Wong YL et Poon CS (2011) Effects of crushed glass cullet sizes casting methods and pozzolanic materials on ASR of concrete blocks. *Construction and Building Materials* 25: 2611–2618.
- Lepoittevin B et Roger P (2011) Poly (ethylene terephthalate). In: Thomas S and Visakh PM. *Handbok of Engineering and Speciality Thermoplastics*. Scrivener Publishing LLC. 97–126.
- Liaqat M, Shah ML et Baig MA (2018) Effect of waste glass as partial replacement for coarse aggregate in concrete. *International Journal of Technical Innovation in Modern Engineering & Science* 4: 609–619.
- Limbachiya M, Meddah MS et Fotiadou S (2012) Performance of granulated foam glass concrete. *Construction and Building Materials* 28: 759–768.
- LMC PE-002 (2005) (Concrete) Electrical Resistivity- Measurement of the electrical resistivity of a concrete element surface. Building Materials Laboratory - University of Minho. Portugal.
- LNEC E 393- 1993 (1993), Concrete, Determination of the absorption of water through capillarity, National Laboratory of Civil Engineering, Lisbon, Portugal.

Références bibliographiques

LNEC E 394- 1993 (1993), Concrete, Determination of the absorption of water by immersion, National Laboratory of Civil Engineering, Lisbon, Portugal.

Lu JX, Yan X, He P et Poon CS (2019a) Sustainable design of pervious concrete using waste glass and recycled concrete aggregate. *Journal of Cleaner Production* 234: 1102–1112.

Lu JX, Zheng H, Yang S, He P et Poon CS (2019b) Co-utilization of waste glass cullet and glass powder in precast concrete products. *Construction and Building Materials* 223: 210–220.

Mageswari M et Vidivelli DB (2010) The use of sheet glass powder as fine aggregate replacement in concrete. *The Open Civil Engineering Journal* 4: 65–71.

Malak KR (2015) Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. *International Journal of Engineering, Education and Technology* 3.

Manjunath BTA (2016) Partial replacement of e-plastic waste as coarse aggregate in concrete. *Procedia Environmental Sciences* 35: 731–739.

Maqbool S et Sood H (2016) Effect of pet fibers on the performance of concrete. *International Journal of Scientific Research and Education* 4: 6085-6089.

Marthong C et Sarma DK (2015) Mechanical behavior of recycled pet fiber reinforced concrete matrix. *International Scholarly and Scientific Research and Innovation* 9:879–883.

Meena MK, Gupta J et Nagar B (2018) Performance of concrete by using powder- an experimental study. *International Research Journal of Engineering and Technology* 5: 840–844.

Mohammadhosseini H, Tahir MM et Sam ARM (2018) The feasibility of improving impact resistance and strength properties of sustainable concrete composites by adding waste metalized plastic fibres. *Construction and Building Materials* 169: 223–236.

Mounika M, Lalith BV, Rao VR et Lalitha G (2017) Experimental study on strength parameters of concrete by partial replacement of cement recycled crushed glass powder. *International Journal of Civil Engineering and Technology* 8: 444–450.

Mishra B et Mishra RS (2015) A study on use of plastic waste aggregate as partial replacement of natural coarse aggregate in cement concrete mix. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering, and Technology* 4: 11232–11238.

Références bibliographiques

Mustafa MAT, Hanafi I, Mahmoud R et Tayeh BA (2019) Effect of partial replacement of sand by plastic waste on impact resistance of concrete: experiment and simulation. *Structures* 20: 519–526.

Mwizerwa F et Garg A (2017) Experimental study on effects on properties of concrete with different colours of glass powder as a partial replacement of cement. *International Journal of Civil Engineering and Technology* 8: 1639–1644.

NA 442 (2013), Cement Composition, specifications and conformity criteria of current cement; Alger, Algeria.

Naik TR, Malhotra VM et Popovics JS (2004) The ultrasonic pulse velocity method. In: Malhotra VM et Carino NJ (Eds) *Handbook on nondestructive testing of concrete*. CRC Press LLC.

Nassar RUD et Soroushian P (2012) Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement. *Construction and Building Materials* 29: 368–377.

NF EN 12390-3 (2003), Essai pour béton durci - Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes, Association Française de Normalisation (AFNOR) ; Saint-Denis, France.

NF EN 12390-5 (2001), Essai pour béton durci - Partie 5 : Résistance à la flexion sur éprouvettes, Association Française de Normalisation (AFNOR) ; Saint-Denis, France.

NF EN 12390-7 (2001), Essai pour béton durci - Partie 7 : Masse volumique du béton, Association Française de Normalisation (AFNOR) ; Saint-Denis, France.

NF P 18-560 (1990), Granulats : Analyse granulométrique par tamisage. Association Française de Normalisation. France.

NF P 18-572 (1990), Granulats : Essai d'usure micro- Deval. Association Française de Normalisation. France.

NF P 18-573 (1990), Granulats : Essai Los Angeles. Association Française de Normalisation. France.

NP EN 12504-4 (2007), Essais pour béton dans les structures - Part 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son ; Brussels, Belgique.

Références bibliographiques

Nibudey RN, Nagarnaik PB, Parbat DK et Pande AM (2014). Compressive strength and sorptivity properties of pet fiber reinforced concrete. *International Journal of Advances in Engineering and Technology* 7: 1206-1216.

Nikbin IM, Saman Rahimi R, Allahyari H et Fallah F (2016) Feasibility study of waste polyethylene terephthalate (PET) particles as aggregate replacement for acid erosion of sustainable structural normal and lightweight concrete. *Journal of Cleaner Production* 126: 108–117.

Nwofor TC et Ukpaka C (2017) Predictive models for compressive strength of concrete produced with waste glass as replacement for aggregates. *International Journal of Civil Engineering* 4: 31–34.

Olofinnade OM, Ndambuki JM, Ede AN et Booth C (2017) Application of waste glass powder as a partial cement substitute towards more sustainable concrete production. *International Journal of Engineering Research in Africa* 31: 77–93.

Olutoge FA (2016) Effect of waste glass powder (WGP) on the mechanical properties of concrete. *American Journal of Engineering Research* 11: 213–220.

Park SB, Lee BC et Kim JH (2004) Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate. *Cement and Concrete Research* 34: 2181–2189.

Pelisser F, Montedo ORK, Gleize PJP et Roman HR (2012) Mechanical properties of recycled pet fibers in concrete. *Materials Research* 15: 679–686.

Pešić N, Živanović S, Garcia R et Papastergiou P (2016) Mechanical properties of concrete reinforced with recycled HDPE plastic fibres. *Construction and Building Materials* 115: 362–370.

Polley C, Cramer SM et De La Cruz RV (1998) Potential for using waste glass in Portland cement concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering* 10: 210–219.

Planetoscope - Statistiques : " Production mondiale de plastique"
<https://www.planetoscope.com/petrole/989-production-mondiale-de-plastique.html>.

Prabhu PG, Kumar CA, Pandiyaraj R, Rajesh P et Kumar LS (2014) Study on utilization of waste pet bottle fiber in concrete. *International Journal of Research in Engineering and Technology* 2: 233–240.

Références bibliographiques

Preston FW (1942) The mechanical properties of glass. *Journal of Applied Physics* 13: 623–634.

Prudhvi K, Saiprasad K, Reddy KS, Manoj Kumar K et Vinay D (2016) Laboratory study on compressive strength of concrete with glass powder as partial replacement of cement. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research* 3: 272–277.

Khan NI, Agrawal SD et Kshirsagar DY (2017) Study of concrete by using waste plastic bottle caps as partial replacement of coarse aggregate. *International Research Journal of Engineering and Technology* 4: 1699-1704.

Klein R (2011) *Material Properties of Plastics*. In: *Laser Welding of Plastics*, first edition. Wiley VCH. 3-69.

Kohli R et Mittal KL (2019) *Methods for Assessing Surface Cleanliness*. In: *Developments in surface contamination and cleaning*. Elsevier.

Usman M, Javaid A et Panchal S (2015) Feasibility of waste polythene bags in concrete. *International Journal of Engineering Trends and Technology* 23: 317–319.

Rahim NL, Amat RC, Ibrahim NM, Amat RC et Ab Jalil MF (2015) Utilization of recycled glass waste as partial replacement of fine aggregate in concrete production. *Materials Science Forum* 803: 16–20.

Rahim NL, Salehuddin S, Ibrahim NM, Amat RC et Ab Jalil MF (2013) Use of plastic waste (highdensity polyethylene) in concrete mixture as aggregate replacement. *Advanced Materials Research* 701: 265–269.

Rahman S et Uddin MN (2018) Experimental investigation of concrete with glass powder as partial replacement of cement. *Civil Engineering and Architecture* 6: 149–154.

Rahmani E, Dehestani M, Beygi MHA, Allahyari H et Nikbin IM (2013) On the mechanical properties of concrete containing waste pet particles. *Construction and Building Materials* 47:1 302–1308

Rajitha D, Srinivas V et Nawaz MZ (2017) Experimental study on partial replacement of fine and coarse aggregate with waste glass. *International Journal of Civil Engineering and Technology* 8: 1521–1525.

Références bibliographiques

Rai B, Rushad ST, Kr B et Duggal SK (2012) Study of waste plastic mix concrete with plasticizer. *International Scholarly Research Network Civil Engineering* 2012:1–5.

Ramadevi KK et Manju R (2012) Experimental investigation on the properties of concrete with plastic pet (bottle) fibres as fine aggregates. *Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 2: 42–46.

Reddy AK et Kumar A (2014). Study of mechanical properties of concrete using waste pet bottle fibres for the reinforcement. *International Journal of Engineering and Management Research* 4: 232–240.

Rokdey MS, Dhawale GD et Wagh MS (2018) Partial replacement of cement by using refused glass powder in concrete for strengthening. *International Journal of Scientific and Engineering Research* 5: 77–82.

Romero D, James J, Mora R, et Hays CD (2013) Study on the mechanical and environmental properties of concrete containing cathode ray tube glass aggregate. *Waste Management* 33: 1659–1666.

Rudolph N, Kiesel R et Aumnate C (2017) Plastics recycling conservation of valuable resources. In: *Understanding Plastics Recycling*. Carl Hanser Verlag. Munich. 13–38.

Saand A, Keerio MA, Juj R, Khoso S et Bangwar DK (2017) Utilization of waste glass as partial replacement of fine aggregate in concrete. *Engineering Science and Technology International Research Journal* 1: 28–31.

Saccani A et Bignozzi MC (2010) ASR expansion behavior of recycled glass fine aggregates in concrete. *Cement and Concrete Research* 40: 531–536.

Sadiq MM, Khattak MR (2015) Literature review on different waste materials use in concrete. *Journal of Emerging Technology and Innovative Research* 2:1800–1803.

Saikia N et De Brito J (2014) Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and Building Materials* 52: 236–244.

Sanjaykumar B et Daule SN (2017) Use of plastic fiber in the concrete. *International Journal of Civil Engineering* 4: 4–7.

Références bibliographiques

- Sakale R, Jain S et Singh S (2016) Experimental investigation on strength of glass powder replacement by cement in concrete with different dosages. *International Journal of Science Technology and Engineering* 2: 76–86.
- Saxena R, Siddique S, Gupta T, Sharma RK et Chaudhary S (2018) Impact resistance and energy absorption capacity of concrete containing plastic waste. *Construction and Building Materials* 176: 415–421.
- Schittich C, Staib G, Balkow D, Schuler M et Sobek W (1999) *Glass Construction Manual*, Institut pour la documentation internationale de l'architecture. Allemagne. 328 pages.
- Shahidan S, Ranle NA, Zuki SSM, Khalid FS, Ridzuan ARM et Nazri FM (2018) Concrete incorporated with optimum percentages of recycled polyethylene terephthalate (pet) bottle fiber. *International Journal of Integrated Engineering* 10: 1–8.
- Shaikh S, Bachhav SS et Kshirsagar D (2015) Effective utilisation of waste glass in concrete. *International Journal of Engineering Research and Applications* 5: 1–4.
- Shamskia N (2012) The influence of Pet fibers on the properties of fresh and hardened concrete. *Journal of Structural Engineering and Geotechnics* 2: 13-17.
- Shanmuguanathan N, Gokila R, Parameshwari T et Hemath Naveen KS (2017) Study and experimental investigation of partial replacement of waste glass powder as cement in concrete. *International Journal of Engineering Trends and Technology* 8: 1–9.
- Shayan A et Xu A (2006) Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. *Cement and Concrete Research* 36: 457–468.
- Shekhawat BS et Aggarwal V (2014) Investigation of strength and durability parameters of glass powder based concrete. *International Journal of Engineering Research and Technology* 3: 333–338.
- Shubbar SDA et Al-Shadeedi AS (2016) Utilization of waste plastic bottles as fine aggregate in concrete. *Kufa Journal of Engineering* 8: 132-146.
- Shyam S et Drishya P (2018) Reuse of plastic waste as replacement of sand in concrete. *International organization of Scientific Research Journal of Engineering* 8: 41–47.

Références bibliographiques

- Sibelco Green Solutions (2019) Promoting glass: Your future our talent. Available at: <https://www.sibelco.com/wp-content/uploads/Sibelco-Green-Solutions-BrochureFR.pdf?x17555> (accessed 1 September 2019).
- Siddique R (2008) Waste glass. In: *Waste Materials and By-Products in Concrete*. Springer. 147-175.
- Siddique R, Khatib J et Kaur I (2008) Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste Management* 28: 1835–1852.
- Silva RV, De Brito J and Saikia N (2013) Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates. *Cement and Concrete Composites* 35: 23–31.
- Singh V, Kumar R, Singlar N et Vedpal (2017) To improve the properties of concrete by using strength and crimped waste pet. *International Journal of Recent Engineering Research and Development* 2: 76– 85.
- Solís-Carcaño R et Moreno EI (2008) Evaluation of concrete made with crushed limestone aggregate based on ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials* 22: 1225–1231.
- Sreenivasulu S et Prudhvi K (2016) Suitability of waste glass powder as pozzolanic material in concrete. *International Journal of Professional Engineering Studies* 7: 131–148.
- Taha B et Nounu G (2008) Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. *Construction and Building Materials* 22: 713–720.
- Taherkhani H (2014) An investigation on the properties of the concrete containing waste pet fibers. *International Journal of Science and Engineering Investigations* 3: 37-43.
- Toumi B (2010) Etude de l'influence des hautes températures sue le comportement du béton. Ph.D. Dissertation. Université Mentouri Constantine, Constantine, Algérie.
- Vandhiyan R, Ramkumar R et Ramya R (2013) Experimental study on replacement of cement by glass powder. *International Journal of Engineering Research and Technology* 2: 234–238.
- Varshneya AK, Mauro JC (2019) Elastic properties and hardness of glass. In: *Fundamentals of Inorganic Glasses*. Elsevier Inc, 187–214.

Références bibliographiques

Velasco E (2013) Scanning Electron Microscope (SEM) as a means to determine dispersibility. Graduate Theses and Dissertations. Iowa State University.

Vijaya GS, Ghorpade VG et Sudarsana Rao H (2018) The behaviour of self-compacting concrete with waste plastic fibers when subjected to chloride attack. *Materials Today Proceedings* 5: 1501–1508.

Worrell E et Reuter MA (2014) *Handbook of Recycling: State-of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists*. Elsevier, États-Unis d'Amérique, 581 pages.

Xie Z et Xi Y (2002) Use of recycled glass as a raw material in the manufacture of Portland cement. *Materials and Structure* 35: 510–515.

Zachariasen WH (1932) The atomic arrangement in glass. *Journal of American Chemical Society* 54: 3841–3851.

Zarzycki J (1991) *Glasses and the Vitreous State*. Cambridge. Cambridge University Press. NewYork.

Zakir M, Qadri SI et Siwach ER (2016) Experimental evaluation of waste glass powder as a partial replacement of cement in concrete. *International Journal of Recent Innovation in Engineering and Research* 1: 71–75.

Zheng K (2013) Recycled glass concrete. In: *Eco-Efficient Concrete*. Wood head Publishing Limited; 241–270.

Annexe

Annexe

A : Caractéristique des matériaux.

1- Les caractéristiques du ciment

APPLICATIONS RECOMMANDÉES



- Construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments
- Préfabrication légère
- Béton de haute performance



FORMULATION CONSEILLÉE



	Ciment 	Sable (sec) 	Gravillons (sec) 		Eau (litres) 
		0/5	8/15mm	15/25mm	
Dosage pour béton c25/30	X 1 	+ X7 	+ X5 	+ X4 	+ 25 L

Remarque: un bidon = 10 Litres

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES



Analyses chimiques	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	10.0±2
Teneur en sulfates (SO3) (%)	2.5±0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.7±0.5
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	0.02-0.05

Temps de prise à 20° (NA 230)	Valeur
Début de prise (min)	150±30
Fin de prise (min)	230±50

Composition minéralogique du Clinker (Bogue)	Valeur
C3S (%)	60±3
C3A (%)	7.5±1

Résistance à la compression	Valeur
2 jours (MPa)	≥ 10.0
28 jours (MPa)	≥ 42.5

Propriétés physiques	Valeur
Consistance Normale (%)	26.5±2.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm²/g) (NA231)	3 700 - 5 200
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1 000
Expansion (mm)	≤ 3.0

2- Les caractéristiques de plastifiant SIKAPLAST BV 40 +

Construction

Notice technique
Edition Janvier 2012
Notice n°1.19
Version n° 01.2012
SIKAPLAST® BV 40 +

SIKAPLAST® BV 40 +

Plastifiant/Réducteur d'Eau pour hautes résistances mécaniques.

Conforme à la norme NF EN 934-2 tab. 1 et 2

Présentation SIKAPLAST® BV 40 + est un plastifiant réducteur d'eau pour haute résistance mécanique non chloré et prêt à l'emploi, à base de polycarboxylates modifiés, qui se présente sous la forme d'un liquide marron.

Domaines d'application SIKAPLAST® BV 40 + permet d'obtenir des bétons plastiques ayant de fortes résistances mécaniques à court et à long terme.

- bétons à hautes performances,
- bétons précontraints,
- bétons préfabriqués étuvés.
- bétons avec des granulats concassés,
- bétons retarder en surdosage.

Pour les bétons étanches, le SIKAPLAST® BV 40 + diminue l'absorption capillaire des bétons et augmente leur compacité. Il permet donc de réduire la pénétration de l'eau et peut être utilisé dans les cas suivants: bétons enterrés, réservoirs, piscines, etc.

A dosage élevé, le SIKAPLAST® BV 40 + augmente le temps de prise du béton. La température jouant un rôle important, il est bon de procéder à des essais.

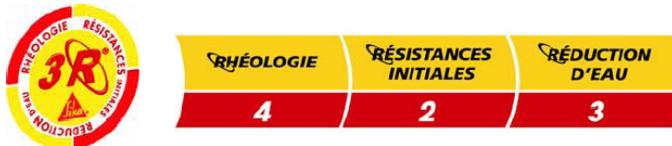
Le SIKAPLAST® BV 40 + est compatible avec nos entraîneurs d'air SIKA AER et SIKA AER5. Cette combinaison conduit à :

- l'amélioration des résistances aux cycles gel-dégel,
- la possibilité de coulage en continu (béton extrudé, béton routier),
- l'amélioration des résistances de tous bétons situés dans les zones de marnage.

Caractères généraux SIKAPLAST® BV40+ est un plastifiant réducteur d'eau à haute performance qui confère au béton les propriétés suivantes :

- haute réduction d'eau,
- maintien prolongé de la rhéologie,
- robustesse vis-à-vis de la ségrégation,
- bel aspect de parement au décoffrage.

CLASSIFICATION 3R



Caractéristiques

Aspect Liquide marron

Conditionnement

- Bidon de 5 kg
- Bidon de 10 kg
- Fût de 220 kg
- Cubiteinaire de 1000 kg



SIKAPLAST® BV 40 +

Stockage	Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. Le produit peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.
Conservation	Un an dans son emballage d'origine intact
Données techniques	
densité	1,040 ± 0,015
pH	4,7 ± 1
Teneur en ions Cl ⁻	≤ 0,1 %
Teneur en Na ₂ O Eq.	≤ 0,5 %
Extrait sec	11.5 ± 1,5 %
Conditions d'application	
Dosage	Plage d'utilisation recommandée : 0,3 à 1,5 % du poids de liant selon les performances recherchées. Dosage usuel du SIKAPLAST® BV40 +: 0,3 % à 1 %.
Mise en œuvre	SIKAPLAST® BV 40 + est ajouté, soit, en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.
Précautions d'emploi	En cas de contact avec la peau, laver abondamment à l'eau.
Mentions légales	
	Produit réservé à un usage strictement professionnel. Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile. «Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»



Sika El Djazair
08 route de l'Arbaa, 16111 Eucalyptus
Alger/ ALGERIE
Web : dza.sika.com

Tel.: 213 (0) 21 50 21 84
213 (0) 21 50 16 92 à 95
Fax: 213 (0) 21 50 22 08



SIKAPLAST® BV 40 +

RESUME

Les déchets se sont largement répandus ces dernières années, ce qui engendre un impact négatif sur la nature et l'environnement dans lequel nous vivons. Et parmi lesquels on trouve les déchets de verre et de plastique. La valorisation de ces déchets dans le béton semble être l'une des solutions en raison de ses avantages économiques et environnementaux.

L'objectif principal de ce travail est de contribuer à la valorisation des déchets plastiques et de verre par leur introduction dans la composition des bétons, dans le but d'améliorer les propriétés physicomécaniques de ses derniers.

Dans ce travail, les déchets de verre finement broyés ont été utilisés comme remplacement partiel du ciment avec un pourcentage de 15 % ; et les déchets plastiques sous forme de fibres PET, ayant un rapport d'aspect RA = 2,5 introduit à 1 % du volume total des bétons.

Des essais physicomécaniques ont été effectués pour les quatre variantes étudiées. Parmi cela, la masse volumique, la résistance à la compression et à la flexion, aussi des essais de durabilité ont été réalisés par l'essai d'absorption d'eau, la vitesse des impulsions ultrasonique, la résistivité électrique et l'attaque par les acides. D'autres analyses approfondies ont été également réalisées sur des échantillons de chaque variante, comme la diffraction des rayons X (DRX), l'analyse thermogravimétrique (DSC ATG) et le microscope électronique à balayage (MEB).

Les résultats montrent que l'ajout de la poudre de verre et les fibres plastiques séparément ou combinées dans le béton conduit à une amélioration des résistances à la compression et à la flexion à long terme. Expliquée par l'effet pouzzolanique de la poudre de verre et l'augmentation de la compacité des bétons confirmée par les essais DRX, ATG et MEB.

Ce travail apporte une solution, en réduisant les déchets de verre et plastique dans l'environnement, ce qui contribuera concrètement au développement durable.

Mots clés : Valorisation, déchets de verre, déchets plastique, béton, résistances mécaniques, durabilité.

ABSTRACT

Waste has become widespread in recent years, causing a negative impact on nature and the environment in which we live, including glass and plastic waste. The recycling of this waste in concrete seems to be one of the solutions due to its economic and environmental advantages.

The main objective of this work is to contribute to the valorisation of plastic and glass waste by introducing them into the composition of concrete, with the aim of improving the physical mechanical properties of the latter.

In this work, finely ground glass waste was used as a partial replacement for cement with a percentage of 15 % and plastic waste in the form of PET fibres, with an aspect ratio of RA= 2,5 introduced at 1 % of the total volume of concrete.

Physical-mechanical tests were carried out for the four variants studied, including density, compressive strength and flexural strength, and durability tests were performed by water absorption test, ultrasonic pulse velocity, electrical resistivity and acid attack. Other in-depth analyses were also carried out on samples of each variant, such as X-ray diffraction (XRD), thermogravimetric analysis (DSC TGA) and scanning electron microscopy (SEM).

The results show that the addition of glass powder and plastic fibres separately or combined in concrete leads to an improvement of the compressive and flexural strengths in the long term, explained by the pozzolanic effect of the glass powder and the increase of the compactness of the concretes confirmed by the DRX, ATG and MEB tests.

This work provides a solution, reducing glass and plastic waste in the environment, which will contribute concretely to sustainable development.

Keywords: Valorisation, waste glass, waste plastic, concrete, mechanical strength, durability.

ملخص

انتشرت النفايات على نطاق واسع في السنوات الأخيرة، مما تسبب في تأثير سلبي على الطبيعة والبيئة التي نعيش فيها، بما في ذلك النفايات الزجاجية والبلاستيكية. يبدو أن استعادة هذه النفايات في الخرسانة هو أحد الحلول بسبب فوائدها الاقتصادية والبيئية.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو المساهمة في استعادة النفايات البلاستيكية والزجاجية من خلال إدخالها في تكوين الخرسانة، بهدف تحسين الخصائص الفيزيائية الميكانيكية لهذه الأخيرة.

في هذا العمل، تم استخدام نفايات الزجاج المطحون جيداً كبديل جزئي للأسمنت بنسبة 15% ونفايات بلاستيكية على شكل ألياف بنسبة عرض إلى ارتفاع يساوي 2,5 تم إدخالها بنسبة 1% من الحجم الإجمالي للخرسانة.

تم إجراء الاختبارات الفيزيائية الميكانيكية للمتغيرات الأربعة التي تمت دراستها، من بينها الكثافة، وقوة الانضغاط، وقوة الانثناء، كما تم إجراء اختبارات المتانة من خلال اختبار امتصاص الماء، وسرعة النبضات فوق الصوتية، والمقاومة الكهربائية والهجوم الحمضي. كما تم إجراء تحليلات متعمقة أخرى على عينات من كل متغير، مثل حيود الأشعة السينية (DRX)، والتحليل الحراري الوزني (DSC ATG) ومسح المجهر الإلكتروني (MEB).

تظهر النتائج أن إضافة مسحوق الزجاج والألياف البلاستيكية بشكل منفصل أو معاً في الخرسانة يؤدي إلى تحسين مقاومة الانضغاط والانحناء على المدى الطويل، ويفسر ذلك بالتأثير البوزولاني للمسحوق الزجاج وزيادة انضغاط الخرسانة.

أكدتها اختبارات DRX, ATG, MEB

يوفر هذا العمل حلاً، من خلال تقليل النفايات الزجاجية والبلاستيكية في البيئة، مما يساهم بشكل ملموس في التنمية المستدامة.

الكلمات المفتاحية: استعادة، نفايات الزجاج، نفايات البلاستيك، الخرسانة، المقاومة الميكانيكية، المتانة.