



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOULOU MAMMARI DE  
TIZI OUZOU



FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

## MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Génie Civil

Option : Structure

Présenté par

**BEN ZAUCHE NADIA**

**Intitulé :**

**Etude expérimentale d'un béton à base de déchets de verre non coloré confiné avec des matériaux composites.**

### Les membres de jury :

**Présidente :** Mme AKMOUSSI.O

Maître de conférence B

**Examineur :** Mr IDDIR.K

Maître de conférence B

**Promotrice :** Mme KHELOUL.F

Maître de conférence A

**Invitée :** Mme HADDAD. O

Maître de conférence B

**Invité :** Mr BEN CHABANE.T

Doctorant

Promotion 2019/2020

# Remerciement

*On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce travail.*

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mme KHELLOUI. Fatma, Je l'ai remercié pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur, sa disponibilité, aussi pour son suivi et pour son énorme soutien, qu'elle n'a cessé de me prodiguer durant toute la période de préparation de ce mémoire.*

*Je tiens à remercier également Mme AKMOUSSI. Ouardia pour le temps qu'elle a consacré et les précieuses informations qu'elle m'a prodiguées.*

*Je remercie chaleureusement Mr BEN CHABANE. Tarik pour son aide pratique au laboratoire pour réaliser ce modeste travail et son soutien moral et ses encouragements.*

*J'adresse aussi mes vifs remerciements aux membres du jury pour avoir bien voulu examiner et Juger ce travail.*

*Mes remerciements vont à tout le personnel du Laboratoire de Génie Civil de l'Université Mouloud MAMMERI de Tizi Ouzou. Je remercie particulièrement Mme MEDJBAR Fadila et Mr BOUHERRAOUA Rachid, auprès desquelles j'ai trouvé un accueil chaleureux, un aide et une assistance dont j'avais besoin durant les investigations expérimentales.*

*Je remercie le département de Génie Civil pour leur soutien pédagogique durant tout mon parcours d'étude et aussi aux enseignants sans exception pour leurs aides, orientations et leurs précieux conseils.*

*Mes plus sincères remerciements vont également aux responsables et personnels de Laboratoire de Génie Civil de l'Université Akli Mohand OUALHADJ de Bouira pour leur accueil exceptionnel et leurs aides pour effectuer notre étude expérimentale.*

*Je ne laisserai pas cette occasion passer, sans remercier mes très chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières pour moi durant tout mon parcours scolaire. Je ne manquerai pas de remercier ma chère sœur Ouiza pour ses encouragements permanents et son soutien moral.*

## *Dédicace*

*Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie que je dédie ce travail à  
Tous ceux qui sont chers*

*; A ma très chère maman*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel à ma  
considération pour le sacrifice que vous avez consenti pour mon instruction et mon  
bien être.*

*Quoi que je fasse ou que je dise, je ne serai point te remercier comme il se doit. Ton  
affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours  
été ma source de force pour affronter les différents obstacles.*

*A mon très cher papa*

*Depuis ma tendre enfance, tu es mon plus fort repère, un être unique et magnifique, un  
exemple à suivre, le meilleur des pères, avec tes mots tu m'as montré le chemin à suivre  
dans ma vie. Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager.*

*Vous êtes mon support de la vie qui m'a pris m'a supporté et me dirigé vers la gloire.  
Que ce travail traduise ma gratitude et mon affection. Merci Papa, aujourd'hui je  
marche sur tes pas de miel.*

*A ma très cher sœur OUIZA*

*Tu es mon amie depuis toujours, celle qui connaît tout de moi, avec toi je partage pleurs  
et joie. Je te demanderai la lune, le soleil ou Saturne, tu laisserais tout tomber pour  
pouvoir m'épauler.*

*Merci énormément pour ton soutien très précieux, merci pour ton grand cœur toutes tes  
qualités qui sont trop long à énumérer. Ma vie ne serait pas aussi magique sans ta  
présence et ton amour.*

*Sans oublier la phrase qui nous dit notre cher papa « L'avenir du pays appartient aux  
étudiants qui porteront le flambeau de la nouvelle génération d'ingénieurs génie civil et  
d'architecture » vu que tu es en 2ème année architecture.*

*Je dédie ce travail à toute la famille BEN ZAOUCHE, ainsi que mes oncles maternelle  
la famille LASSOUAOUI.*

*Enfin, à toutes les personnes qui m'ont encouragé ou aidé dans ma vie.  
Puisse Dieu vous donner santé, bonheur, courage et surtout réussite.*

*BEN ZAOUCHE Nadia*

## Résumé

Le recyclage des déchets garantit la durabilité des agrégats naturels conventionnels, réduit les coûts des matériaux et les émissions de gaz à effet de serre. La valorisation des déchets urbains, en particulier le verre, réduit les volumes de stockage et permet la conservation des espaces de décharge. L'utilisation du verre sous forme de poudres légères et de granulats assure l'allègement des éléments de construction, un meilleur développement économique et la promotion de nouveaux matériaux de terrain.

Pour améliorer les performances de résistance du béton à base de déchets de verre, un renforcement par des textiles est proposé. En effet, la technologie de renforcement du béton par les TRC n'en demeure pas moins une solution potentiellement intéressante. Aussi, dans la perspective de performances améliorées, on utilise ce matériau pour améliorer la rigidité, s'opposer au développement des déformations et diminuer la vitesse de propagation des fissures. Ce nouveau composite permet de nouvelles applications, car il est utilisable en faible épaisseur, ce qui permet d'obtenir des éléments de poids réduit, résistant et fortement ductile.

Plusieurs variantes ont été proposées pour mesurer la résistance à la compression d'un béton à base de poudre et de sable de verre recyclé (non coloré), en substitution du ciment et du sable par des fractions massiques allant de 0% à 15% avec un pas de 5%. Les éprouvettes réalisées sont des cylindres (16 cm x 32 cm) écrasés avec une presse hydraulique à 28 jours d'âge et comparés à un béton témoin.

La variante présentant les meilleures performances est ensuite confinée à l'aide d'un tissu issu aussi de l'industrie de récupération. Dans cette partie, on a étudié le confinement du béton à base de déchets de verre en prenant en compte le type de confinement. Trois variantes de confinement sont traitées telles que le confinement total, confinement partiel par des cerces et un confinement hélicoïdal en hélices. Les résultats de tous les essais sont fidèlement reportés sur notre manuscrit sous forme de tableaux, histogrammes et courbes (contraintes- déformations).

**Mots clés** : Déchet de verre, béton, composite, confinement, analyse expérimentale.

## Abstract

Waste recycling ensures the sustainability of conventional natural aggregates, reduces material costs and greenhouse gas emissions. The recovery of urban waste, in particular glass, reduces storage volumes and allows the conservation of landfill spaces. The use of glass in light powders and aggregates form ensures lightening of building elements, better economic development and promotion of new field materials.

To improve the strength performance of concrete based on waste glass, reinforcement with textiles is proposed. Indeed, the technology of concrete reinforcement by TRC remains a potentially interesting solution. Also, in perspective to improved performance, this material is used to improve rigidity, oppose the development of deformations and reduce the rate of crack propagation. This new composite allows new applications because it can be used in low thickness, which allows to obtain elements of low weight and highly ductile.

Several variants have been used to measure the compressive strength of concrete containing not colored waste glass, replacing cement and sand by mass fractions ranging from 0% to 15% with a step of 5%. The mechanical characterization is carried out after 28 days on cylindrical specimens of 16x32cm using a hydraulic press. The results obtained were compared with those of a control concrete without addition.

The variant with the best performance is confined using fabric also from the salvage industry. In this part, we studied the confinement of concrete based on waste glass, taking into account the type of confinement. Three variants of confinement are treated such as total containment, partial confinement by hoops and helical confinement by helices. The results of all tests are faithfully reported in our manuscript in form of tables, histograms and curves (stress- strain).

**Keywords :** Glass waste, concrete, composite, confinement, experimental analysis.

Remerciement.....	i
Dédicace.....	ii
Résumé.....	iii
Abstrat.....	iv
Sommaire .....	v
Liste des figures.....	xii
Liste des tableaux.....	xvi
Introduction générale.....	01

## Chapitre I : Généralités sur le béton

I.1.Introduction.....	05
I.2.L’historique du béton.....	06
I.2.1. Les débuts du béton.....	06
I.2.2. Le réveil du béton.....	06
I.2.3. Un essor considérable.....	07
I.3. Définition du béton.....	08
I.3.1. Classification du béton.....	08
I.3.2. Composites du béton.....	09
I.3.2.1. Ciment.....	09
I.3.2.2. Granulats.....	10
I.3.2.3. Sable.....	10
I.3.2.4. Gravier .....	10
I.3.2.5. L’eaux de gâchage.....	10
I.3.2.6. Les adjuvants.....	11
I.4.Les différents types de béton .....	13
I.4.1. Béton léger.....	13

I.4.2. Béton renforcé de fibres.....	13
I.4. 3. Bétons pompés.....	14
I.4. 4. Bétons Autoplaçants.....	14
I.4. 5. Bétons de haute performance.....	15
I.5.Principaux avantage et inconvénient du béton .....	16
I.5.1. Avantage du béton.....	16
I.5.2. Inconvénients du béton.....	16
I.6. Domaine d'utilisation du béton.....	17
I.6.1. Le bâtiment.....	17
I.6.2. Les travaux publics.....	17
I.7. Conclusion.....	17
Référence biographique.....	18

## Chapitre II : Les déchets

II.1. Introduction.....	20
II.2. Histoire des déchets.....	20
II.3. Définition des déchets.....	21
II.4. La typologie des déchets.....	22
a- Distinction en fonction de l'activité à l'origine du déchet.....	22
b- Distinction en fonction de la nature du déchet.....	23
c- Distinction en fonction du mode (filière) de traitement des déchets.....	23
II.5. La gestion des déchets.....	24
II.6. Type de valorisation des déchets .....	25
II.6.1. Broyage-stérilisation.....	25
II.6.2. La pyrolyse et la gazéification.....	25
II.6.3. Le Recyclage.....	26

II.7. Le déchet de verre.....	28
II.7.1. Définition du verre.....	29
A. Les propriétés chimiques.....	29
B. Les propriétés physiques.....	29
C. Les propriétés mécaniques.....	30
D. Les propriétés thermiques.....	30
E. Les propriétés optiques.....	31
II.7.2. Le recyclage du verre .....	31
II.7.2.1. Étape de recyclage de verre.....	32
II.7.2.2. Le verre récupéré : le calcin.....	33
II.7.2.3. Le lit de fusion.....	35
A- Le verre coloré.....	35
B- Le verre incolore.....	36
II.7.3. Transformation du verre usagé en matériau isolant.....	36
II.8. Comportement du verre dans un milieu cimentaire.....	38
II.8.1. Comparaison du verre à d'autres pouzzolanes.....	39
II.8.2. Réaction alcali-silice du verre.....	39
II.8.3. L'activité des fines et des granulats de verre.....	40
II.9. Conclusion.....	41
Référence bibliographique .....	42

### Chapitre III : Confinement Du Béton

III.1. Introduction.....	45
III.2. Nécessité de confinement.....	45
A. Accroissement des charges qui sollicitent la structure.....	45
B. Défauts dans le projet ou dans l'exécution.....	45

---

C. Changements de la forme de la structure.....	46
D. Dégâts dans la structure.....	46
III.3. Démarche expérimentale du collage des composites sur le béton.....	46
III.3.1. Le système avec une fabrication in-situ.....	46
III.3.2. Le système préfabriqué (plaque préfabriquée) .....	47
III.4. Comportement du béton confiné.....	47
III.5. Mode de rupture du béton confiné.....	48
III.6. Comportement des mortiers sous fort confinement.....	49
III.6.1. Phénomène de compaction.....	49
III.7. Béton confiné avec des composites « PRF » .....	52
III.8. Renforcement de colonnes par confinement latéral.....	54
III.9. Type de confinement.....	57
III.9.1 Confinement interne. ....	57
III.9.2 Le confinement externe.....	57
III.10 Méthodes de confinement.....	57
III.10.1 Stratification au contact.....	58
III.10.2 Enroulement filamentaire.....	59
III.10.3 Chemisage par coquille préfabriquée en «PRF » .....	60
III.11 Renforcement de quelque élément de la structure avec le confinement.....	61
III.11.1 Renforcement des poteaux.....	61
III.11.2 Renforcement des poutres.....	61
III.11.3 Renforcement des dalles.....	62
III.11.4 Renforcement des murs.....	62
III.12 Avantages des matériaux composites.....	63
III.13. Conclusion.....	64

Référence biographique.....	65
-----------------------------	----

## Chapitre IV : Etude expérimentale

<b>Partie A : Matériaux utilisés et Confection du béton.....</b>	<b>68</b>
IV.1. Introduction.....	69
IV.2. Matériaux utilisés.....	70
IV.2.1. Granulats.....	70
IV.2.2. Ciment.....	70
IV.2. 3. L'eau d'hydratation. ....	71
IV.2.4. Déchets de verre.....	71
IV.3. Équipements utilisés.....	72
IV.4. Caractérisations expérimentales des matériaux .....	73
IV.4.1. Analyse granulométrique.....	73
IV.4.2. Module de finisse.....	75
IV.4.3. Masse volumique apparente et absolue .....	76
• Masse volumique apparente.....	76
• Masse volumique absolue.....	76
IV.4.4. Équivalent du sable.....	77
IV.5. Essai d'affaissement.....	79
IV.6. Formulation des bétons avec les déchets de verre non colorés.....	80
IV.7. Confection des spécimens d'essai.....	81
<b>Partie B : Confinement du béton</b>	
IV.1. Introduction.....	86
IV.2. Matériaux utilisés et les techniques de confinement des spécimens .....	86
IV.2.1. La résine.....	86
IV.2.2. Application des composites. ....	87

IV.2.2.1. Tissu de fibre de verre. ....	88
• Les avantages des fibres de verre. ....	88
• Les inconvénients de fibres de verre. ....	89
• Préparation du renfort.....	89
IV.2.3. Tissu recyclé.....	90
IV.2.3.1 Essai de traction du tissu recyclé.....	90
IV.3. Procédés de confinement des spécimens.....	91
IV.3.1. Confinement partiel.....	92
IV.3.2. Confinement total.....	93
IV.3.3. Confinement Hélicoïdal.....	94
IV.4. Chargement et acquisition (NF EN 12390-3) .....	95
Conclusion .....	95
Référence biographique.....	96

## Chapitre V : Résultats & Interprétations

V.1 Introduction.....	98
V .2. Comportement du béton en compression .....	99
V .2.1. Confinement partiel du béton.....	101
V .2.2. Confinement total du béton.....	102
V .2. 3. Confinement hélicoïdal du béton.....	102
V .2. 4. Comparaison entre les différents types de confinement. ....	103
V .3. Effet du type de confinement sur la résistance du béton.....	106
V .4. Mode de rupture sous l'essai de la comparaison .....	109
Conclusion .....	113

**Conclusion générale**

Conclusion générale.....	115
Les Annexes.....	118

## Chapitre I : Les généralités sur le béton

Figure I.1 : Une voûte de la basilique de Maxence.....	06
Figure I.2 : L'église St Jean de Montmartre à Paris en France.....	07
Figure I.3 : Le pont de l'Ile de Ré Rivedoux-Plage France.....	07

## Chapitre II : Les déchets

Figure II.1 : La collecte du verre en Suisse.....	32
Figure II.2 : Le traitement du verre en différent étapes.....	33
Figure II.3 : Le verre récupéré.....	34
Figure II.4 : Maison en béton isolant.....	36
Figure II.5 : Protection contre le bruit + construction des routes.....	37
Figure II.6 : Indices d'activité pouzzolanique du verre utilisé dans des conditions différentes...	38
Figure II.7. Résistances relatives (%) des mortiers en fonction des finesses du verre. Comparaison, avec les courbes de dilution obtenues par la loi de Bolomey.....	40
Figure II.8 : Particule de verre fissurée (classe C2) remplie de gel de RAS (cure60°C- 100%HR).....	41

## Chapitre III : Confinement Du Béton

Figure III.1 : Courbes contraintes déformations d'un béton confiné et non confiné.....	47
Figure III.2 : Mode de rupture des cylindres confinés avec le FRP.....	48
Figure III.3 : Évolution des dommages des colonnes confinées et non confinées durant le processus de chargement.....	49
Figure III.4 : Évolution Schéma de principe des essais œdométriques de Bažant et al.....	51
Figure III.5 : Schéma de principe des essais œdométriques de Burlion et al.....	51
Figure III.6 : Schéma de principe des essais œdométriques et hydrostatiques de Williams et al.	52
Figure III.7 : Action de confinement d'un composite PRF.....	53
Figure III.8 : Courbe contrainte-déformation idéalisée d'un composite et de l'acier.....	56
Figure III.9 : Courbe contrainte-déformation de cylindres confinés par une enveloppe de fibres de carbone Harmon et al (1992) .....	56
Figure III 10 : Stratification au contact (WBAC 2003).....	58

Figure III.11 : Méthodes typiques d'envelopper le « PRF » pour les colonnes en B.A ; (a) enveloppée totalement ; (b) partiellement enveloppée en spirale continue ; (c) partiellement enveloppée en anneaux discrets.....	58
Figure III 12 : Enroulement filamentaire ((a) Monti 2003, (b) Master Builders, Inc. and Structural Preservation Systems 1998, Balaguru et al. 2009).....	59
Figure III 13 : Chemisage par coquille préfabriquée en «PRF » (Monti 2003).....	60
Figure III.14 : Renforcement des poteaux.....	61
Figure III.15 : Système de renforcement FRP (Poutre renforcée à l'effort tranchant).....	61
Figure III 16 : Renforcement des dalles par la fibre de carbone.....	62
Figure III 17 : Renforcement des murs.....	63

## Chapitre IV : Etude expérimentale

### Partie A : Matériaux utilisés & Confection du béton

Figure IV. 1: Les granulats utilisés.....	70
Figure IV.2: Etuve utilisée.....	70
Figure IV. 3 : Le ciment.....	71
Figure IV. 4 : L'eau d'hydrations.....	71
Figure IV.5: Poudre de verre.....	72
Figure IV.6 : Sable de verre.....	72
Figure IV.7 : Appareillage de laboratoire.....	73
Figure IV.8 : Un vibro-tamis électrique.....	74
Figure IV 9 : Courbe analyse granulométrique. ....	75
Figure IV.10 : Mesure de la masse volumique apparente des graviers.....	76
Figure IV.11 : Mesure de la masse volumique absolue des graviers.....	77
Figure IV.12 : Es Visuel et Es à piston.....	78
Figure IV.13 : L'essai d'équivalent du sable.....	78
Figure IV.14 : Détermination d'affaissement du béton l'état frais.....	79
Figure IV.15: Préparation des constituants.....	82
Figure IV.16 : Mélange de sable et la poudre de verre non colorée avec le ciment.....	83

Figure IV.17 : Malaxage du béton.....	83
Figure IV.18 : Mise en place du béton dans le moule et vibration.....	83
Figure IV.19 : Remplissage et séchage du béton pendant 24 h.....	84
Figure IV.20 : Éprouvettes démoulées.....	84
Figure IV.21 : Conservation des éprouvettes pendant 28 jours dans l'eau.....	84
<b>Partie B : Confinement du béton</b>	
Figure IV.22 : Mélange des éléments de la résine.....	87
Figure IV. 23 : Fibre de verre.....	88
Figure IV.24: Découpage de la fibre de verre.....	89
Figure IV 25 : Le tissu recyclé.....	90
Figure IV.26 : Courbe de la résistance de traction du tissu recyclé.....	91
Figure IV.27 : Méthode de confinement partiel avec les bandes de tissu recyclé.....	92
Figure IV.28 : Éprouvettes confinées avec les bandes de tissu de la fibre verre.....	93
Figure IV. 29 : Confinement total des éprouvettes avec tissu recyclé.....	93
Figure IV.30: Confinement total des éprouvettes avec la fibre de verre.....	93
Figure IV.31 : Confinement hélicoïdal des éprouvettes avec le tissu recyclé.....	94
Figure IV.32 : Confinement hélicoïdal des éprouvettes avec le tissu de fibre de verre.....	94
Figure IV.33: La machine de l'essai de compression.....	95

## Chapitre V : Résultats & Interprétations

Figure V.1 : Histogramme des résistances en compression des bétons avec tissu recyclé.....	100
Figure V.2 : Histogramme des résistances en compression des bétons avec fibre de verre.....	101
Figure V.3 : Histogramme des résistances en compression des bétons avec tissu recyclé.....	102
Figure V.4 : Histogramme des résistances en compression des bétons par la méthode totale...	102
Figure V.5 : Histogramme des résistances en compression des bétons par la méthode hélicoïdale.....	103
Figure V.6 : Les différents types de confinement du béton à base de tissu recyclé et de fibre de verre.....	104
Figure V.7 : Courbe contrainte-déformation des bétons confinés avec le tissu recyclé.....	104

Figure V.8 : Courbe contrainte- déformation des bétons confinés avec la fibre de verre.....	106
Figure V.9 : Courbe contrainte-déformation des bétons par la méthode partielle.....	107
Figure V.10 : Courbe contrainte-déformation des bétons confinés par la méthode totale.....	108
Figure V.11 : Courbe contrainte-déformation des bétons confinés par la méthode hélicoïdale...	108

## Chapitre II : Les déchets

Tableau II.1. Temps dégradation naturelle de quelque produit dans l'environnement.....	21
Tableau II.2. Proportion des matières premières naturelles du verre d'emballage colore .....	35
Tableau II.3. Proportion des matières premières naturelles du verre d'emballage incolore .....	36

## Chapitre III : Confinement Du Béton

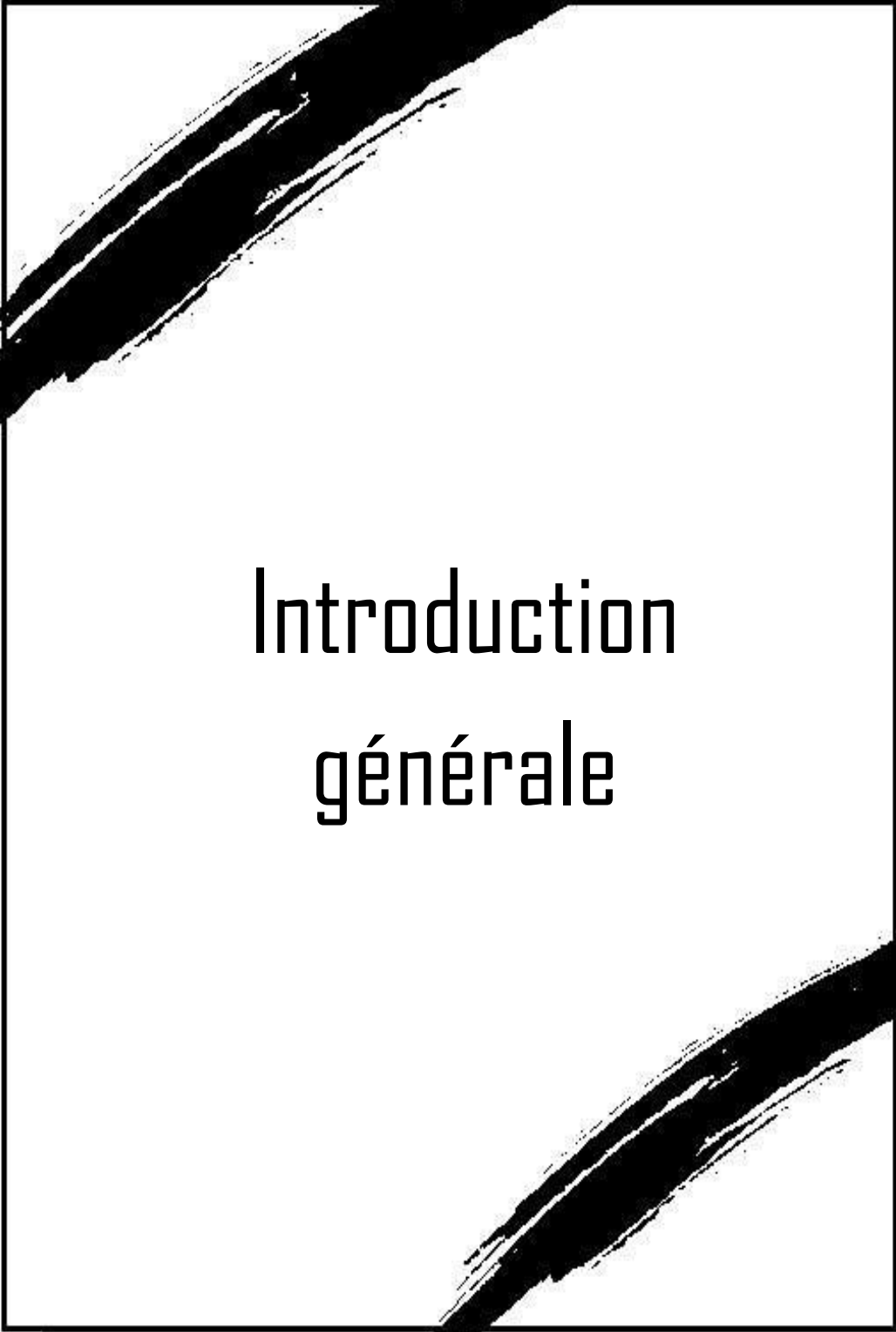
Tableau III.1 : Valeurs du coefficient de déformation effective $\eta$ des spécimens testés .....	54
---	----

## Chapitre IV : Etude expérimentale

Tableau IV.1 : Module de finesse du sable (0/3).....	75
Tableau IV.2: La masse volumique apparente et absolue des granulats .....	77
Tableau IV.3 :Valeur d'équivalent du sable. ....	78
Tableau IV.4 :Equivalent du sable (0/3).....	79
Tableau IV.5: Les résultats d'affaissement du béton .....	79
Tableau IV.6 : Dénomination des affaissements selon la norme EN 206-1 en mm .....	80
Tableau IV.7 : Formulation du béton .....	80
Tableau IV.8 : Composition du béton .....	80
Tableau IV. 9 : Les Caractéristiques de l'essai.....	90
Tableau VI.10 : Résultat de l'essai de traction .....	91
Tableau IV.11 : Le type de configuration de confinement pour chaque éprouvette de béton.....	92

## Chapitre V : Résultats & Interprétations

Tableau V.1 : Résultats d'essai de compression sur les bétons étudiés.....	100
Tableau V.2 : Mode de rupture du béton témoin .....	109
Tableau V .3 : Mode de rupture du béton confiné à base de tissu recyclé avec confinement total .....	110
Tableau V.4 : Mode de rupture du béton confiné à base de fibre de verre avec confinement total .....	110
Tableau V.5 : Mode de rupture du béton confiné à base tissu recyclé avec la méthode partielle .....	111
Tableau V.6 : Mode de rupture du béton confiné à base de fibre de verre avec la méthode partielle.....	111
Tableau V.7 : Mode de rupture du béton confiné à base de tissu recyclé avec la méthode hélicoïdale... ..	112
Tableau V.8 : Mode de rupture du béton confiné à base de fibre de verre avec la méthode hélicoïdale.....	122



# Introduction générale

### **Introduction Générale**

Nul ne peut ignorer les transformations que subissent aujourd'hui notre environnement et les dégradations tant qualitatives que quantitatives qui affectent les ressources naturelles que nous utilisons quotidiennement. La protection de l'environnement et de l'économie des ressources naturelles est devenue notre devoir. Le XXI<sup>ème</sup> siècle est caractérisé en partie par la prise de conscience générale de l'importance de la protection de l'environnement. Cette préoccupation est primordiale et incontournable dans le secteur de la construction. Humaniser le développement, le rendre moins prédateur et moins destructeur de la nature ne peut que préserver les équilibres entre le présent et l'avenir. C'est un processus exigeant de nouvelles visions et approches du développement et du bien être humain.

Le béton est aujourd'hui le matériau le plus utilisé dans le monde, plus que tous les autres matériaux réunis. Sans le béton, on ne pourrait pas réaliser ce qu'on construit aujourd'hui en matière de structures et d'infrastructures. A la fois robuste et universel, l'ampleur et l'étendue de ses performances mécaniques et physiques augmentent sans cesse. Sa formulation jusqu'aujourd'hui très empirique, est en passe de devenir une démarche rationnelle, avec des outils d'ingénieurs construits sur des bases scientifiques qui font appel à toutes les disciplines qui entrent dans ce qu'on appelle la science des matériaux. Le béton tient une place essentielle dans le monde du bâti.

Le monde a considérablement changé au cours du dernier siècle, il a connu des transformations, et des mutations économiques, politiques, sociales, technologiques, et surtout écologiques. Le XXI<sup>ème</sup> siècle a connu certes des améliorations et des réussites remarquables mais aussi des confusions et des désastres incomparables notamment sur le plan écologique à s'avoir la pollution, effet de serre, détérioration de la couche d'ozone avec ses retombées désastreuses en l'occurrence le réchauffement de la planète et son corollaire la montée de niveau des océans.

Notre recherche s'inscrit dans le cadre de la contribution au recyclage et valorisation des déchets de verre. En effet, ces déchets de verre sont proposés pour la fabrication des bétons dans le but de les éliminer ou au moins de minimiser leur abondance dans la nature. On propose une substitution au granulats naturels « sable » et

substitution au ciment. Les recherches actuelles dans le domaine des matériaux de construction sont orientées vers l'utilisation de nouveaux matériaux sous forme de fibres, poudres et granulats légers pour assurer d'une part, la pérennité des granulats naturels conventionnels, l'allègement des éléments de construction et d'autre part, un développement économique meilleur et une promotion de nouveaux matériaux de terrain.

Pour permettre une bonne gestion de ces déchets, il est primordial de mettre en place un plan d'action pour déterminer les voies favorables pour la gestion de ces déchets et proposer ainsi des solutions encourageantes et nécessaire pour optimiser leurs utilisations dans le domaine du génie-civil. Afin de répondre à ces objectifs, nous avons établi un plan de travail, dans ce mémoire, scindé en cinq chapitres.

**Le premier chapitre** de ce mémoire est consacré à une synthèse biographique qui porte sur les généralités des bétons, son histoire, ses composants, sa classification, ses différents types, les principaux avantages et inconvénients du béton et son domaine d'utilisation.

**Le deuxième chapitre** est destiné de manière générale à une recherche sur les déchets existants dans notre environnement. L'intérêt particulier de ce chapitre est de recenser tous les modes de recyclage du déchet de verre, ses différentes propriétés et les étapes de transformation du verre usagé en matériau isolant et enfin son comportement dans un milieu cimentaire.

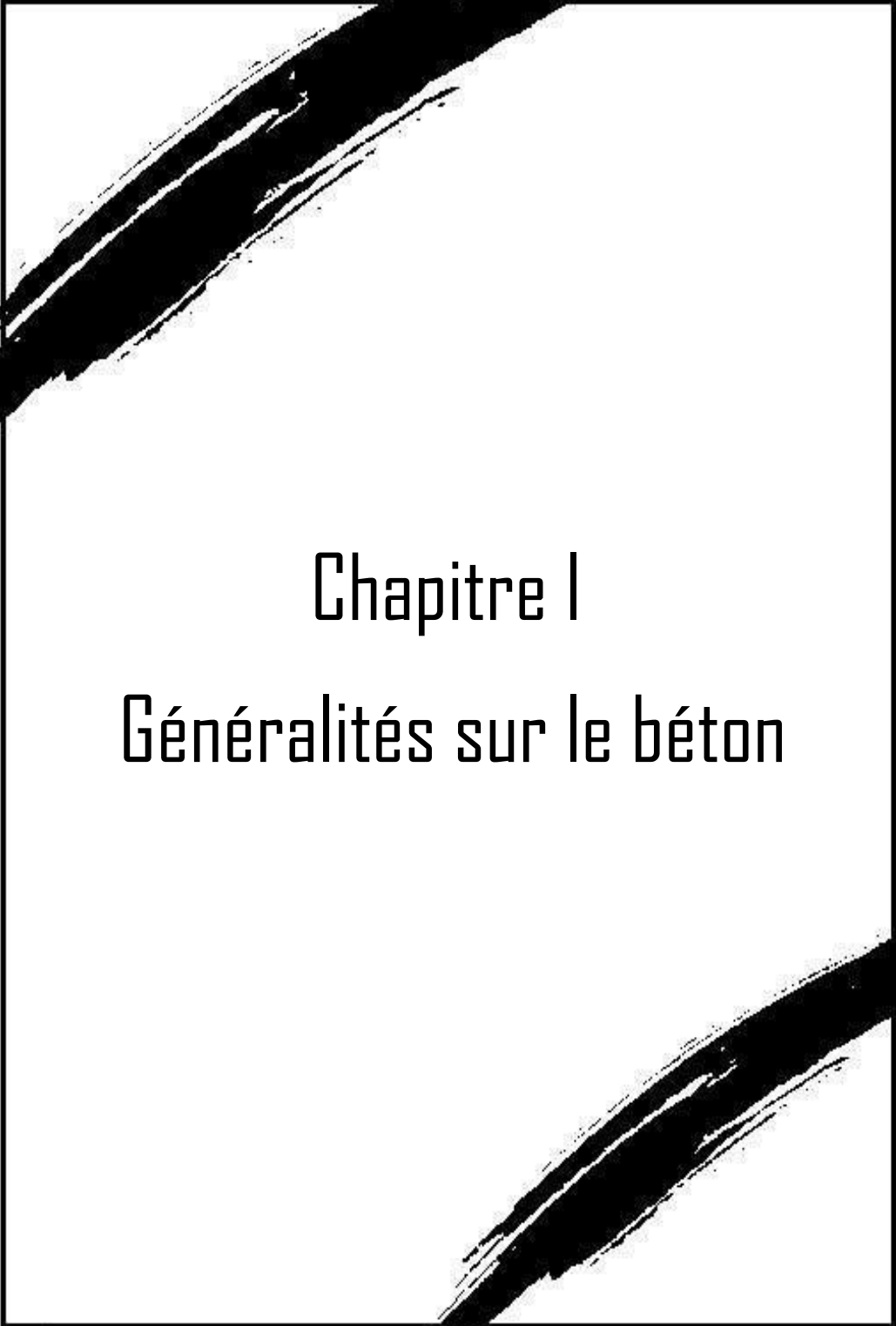
Pour améliorer les performances de résistance du béton à base de déchets de verre, nous proposons un confinement par des textiles issus aussi de l'industrie de récupération. **Le troisième chapitre** présente la technologie de confinement des bétons, les différentes méthodes de confinement, matériaux utilisés, les comportements sous sollicitations ainsi que les modes de rupture.

**Le quatrième chapitre** concerne la présentation du protocole expérimental. Dans la première partie de ce chapitre on a présenté toutes les étapes de confection de notre béton, les différents essais de caractérisation des granulats nécessaires et les modes opératoires tels que : Analyse granulométrique, masse volumique apparente et absolue, équivalent du sable, essai d'affaissement, méthode de formulation du béton,

la deuxième partie relate les différentes méthodes de confinement du béton à base d'une résine spéciale pour assurer une très bonne adhérence entre le tissu recyclé et notre béton. Une comparaison a été observé entre le comportement en compression d'un béton confiné avec ce tissu recyclé et un béton confiné avec un composite en fibre de verre.

Dans **le cinquième chapitre** tous les résultats expérimentaux effectués sur ces bétons confinés sont présentés sous forme de tableaux, histogrammes et courbes pour être exploités dans le but de déduire la meilleure variante d'étude tels que la meilleure composition entre les bétons proposés ainsi que la meilleure méthode de confinement du point de vue comportement en compression.

Pour finir une conclusion générale est présentée où sont rappelés l'essentiel des résultats obtenus dans ce travail.



# Chapitre I

## Généralités sur le béton

## I.1. Introduction

Plus de quatre milliards de mètres cubes de béton sont coulés chaque année dans le monde. Ce matériau permet de construire des ouvrages de toute nature et notamment, des bâtiments, des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des tunnels, des barrages, des centrales thermiques et nucléaires ainsi que des plates-formes d'exploitation pétrolière.

Le développement de l'emploi d'un matériau de construction repose sur des critères techniques et économiques. La résistance mécanique et la durabilité du matériau fondent les principaux critères de choix techniques. La disponibilité et le faible coût des matières premières, la facilité d'emploi et le prix de revient des matériaux valident les conditions économiques.

Le béton répond parfaitement à ces conditions de choix :

- Il est fabriqué à partir de matières premières naturelles largement répandues sur la surface de la terre ;
- Sa mise en œuvre est aisée et ne nécessite que l'emploi d'une main-d'œuvre rapidement formée ;
- Il autorise les plus grandes audaces architecturales et techniques, puisque, mis en place à l'état fluide, il épouse les formes de moules ou de coffrages les plus complexes ;
- Sa résistance mécanique dépasse aujourd'hui largement celle des meilleures roches naturelles ;
- Sa durabilité est plus que séculaire dès lors qu'il est correctement formulé et mis en œuvre ; il s'accommode des environnements corrosifs et résiste bien, en particulier, aux actions agressives de l'eau de mer ; il offre une bonne tenue au feu, garantie de sécurité vis-à-vis des incendies ;
- Son prix de revient fait du béton le matériau de construction par excellence.

Le béton est probablement le plus ancien matériau composite. Il est fabriqué à partir d'un mélange intime de ciment, de granulats, de fines et d'ultrafines, d'adjuvants et d'eau. Ces constituants sont dosés, en fonction de leurs propriétés propres, de manière à obtenir, après réaction physico-chimique entre eux, un produit solide dont les caractéristiques physiques et mécaniques peuvent être très supérieures à celles des roches les plus résistantes. Dans la mesure où le ciment est un liant hydraulique lui-même fabriqué avec des minéraux naturels, le béton peut être considéré comme une roche artificielle.[1]

## I.2. L'historique du béton

### I.2.1. Les débuts du béton

Le béton sous sa forme actuelle est le fruit de décennies d'études et d'expérimentations. Pourtant, les Romains et les Égyptiens utilisaient déjà des matériaux semblables pour leurs constructions. D'ailleurs, l'architecture romaine doit beaucoup à l'opus caementicium (du latin caementum = moellon, pierre brute). Cet ancêtre du béton était formé de mortier et de pierres de toutes sortes. Par sa solidité et sa rapidité de mise en œuvre et associé à d'autres matériaux tels que la brique, il a permis les prouesses architecturales que l'on connaît aux romains. [2]

La basilique de Maxence est une preuve du progrès technique réalisé à cette époque :



Figure I.1 : Une voûte de la basilique de Maxence.[2]

### I.2.2. Le réveil du béton

C'est au XIX<sup>ème</sup> siècle que le béton connu les plus grandes avancées :

Ces progrès furent amorcés par *John Smeaton* qui découvrit en 1756 que les chaux effectuant les meilleures prises sont obtenues à partir de calcaire et d'argile et pas seulement de calcaire comme on le pensait jusqu'alors. Puis, à partir de 1812, Louis Vicat commença à caractériser les propriétés des différents ciments en fonction de leur proportion calcaire/ argile. A partir de là, tout alla très vite. De nombreux scientifiques s'intéressèrent à ce nouveau matériau, ainsi en 1824, *John Aspdin* proposa la formule du ciment Portland.

La production industrielle du ciment fut rendue possible moins de 30 ans plus tard notamment grâce à *Demarle*, *Léopold* et *Augustin Pavin de Lafarge*, *Piquety* et *Vicat*. Premières constructions en béton ne tardèrent alors pas à arriver. L'église St Jean de Montmartre à Paris est l'une des premières constructions en béton. L'architecte *Anatole de Baudot* a eu l'audace de

construire entre 1894 et 1904 l'un des premiers bâtiments sacrés en béton armé. Il fut d'ailleurs sévèrement critiqué.[2]



Figure I.2 : L'église St Jean de Montmartre à Paris en France.[2]

### I.2.3. Un essor considérable

A partir de ce moment-là, on commença à s'intéresser aux propriétés des différents bétons. On innova dans le but de faciliter sa production et son utilisation mais aussi pour lui conférer de nouvelles caractéristiques. Les avancées scientifiques permirent de voir apparaître au début des années 1980 les premiers bétons à hautes performances. En effet, que ce soit grâce à l'ajout de plastifiants, de fibres ou de grains de plus en plus fins, le béton était devenu plus solide, plus fiable. Son utilisation dans des travaux de grande ampleur permit à ce matériau d'être mieux apprécié du public. Par exemple, le pont de l'Ile de Ré, achevé en 1988, est l'une des premières constructions à utiliser largement les BHP : [2]



Figure I.3 : Le pont de l'Ile de Ré Rivedoux –Plage France.[2]

### I.3. Définition du béton

Le béton est un matériau de construction formé par un mélange de granulats, de sable, et d'eau aggloméré par un liant hydraulique (ciment), éventuellement complété par des adjuvants et des additions. Ce mélange, qui est mis en place sur le chantier ou en usine à l'état plastique, peut adopter des formes très diverses parce qu'il est moulable ; il durcit progressivement pour former finalement un monolithe. Selon le choix du ciment et son dosage par rapport aux granulats, selon la forme des granulats, selon l'utilisation d'adjuvants, les bétons obtenus peuvent avoir des caractéristiques très diverses. Leur mise en œuvre et leur traitement de surface peuvent également faire varier leurs performances et leur aspect. Le béton est une pierre reconstituée, également appelée « pierre liquide » [3].

#### I.3.1. Classification du béton

Le béton fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place par sa caractéristique de résistance, ses propriétés en matière thermique, sa résistance au feu, son isolation phonique, son aptitude au vieillissement, ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les couleurs et les aspects. Le béton utilisé dans le bâtiment, ainsi que dans les travaux publics comprend plusieurs catégories. En général, le béton peut être classé en 4 groupes, selon la masse volumique :

- \* Béton très lourd :  $> 2500 \text{ kg/m}^3$  ;
- \* Béton lourd (béton courant) :  $1800 - 2500 \text{ kg/m}^3$  ;
- \* Béton léger :  $500 - 1800 \text{ kg/m}^3$  ;
- \* Béton très léger :  $< 500 \text{ kg/m}^3$ .

Le béton courant peut aussi être classé en fonction de la nature des liants :

- \* Béton de ciment (le ciment),
- \* Béton silicate (la chaux),
- \* Béton de gypse (le gypse),
- \* Béton asphalte ou bitumineux (bitume).

Le béton peut varier en fonction de la nature des granulats, des adjuvants, des colorants, des traitements de surface et peut ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ses performances et par son aspect.[7]

## I.3.2. Composites du béton

### I.3.2.1. Ciment

Les ciments sont des poudres fines obtenues par la cuisson à haute température (vers 1450 °C) et le broyage d'un mélange minéral (calcaire + argile en général). Ces poudres constituées de sels minéraux anhydres instables (en particulier silicates et aluminates de chaux) forment avec l'eau une pâte capable par hydratation de faire prise et durcir progressivement (plus ou moins rapidement d'ailleurs) d'où le nom de liants hydrauliques par opposition avec liants aériens (à base de chaux grasse et maigre) qui ne peuvent durcir qu'au contact de l'air.[4]

Le ciment est composé de :

- Clinker (K).
- Laitier granulé de haut fourneau (S).
- Cendres volantes (V ou W).
- Pouzzolanes (Z).
- Fillers (F).
- Autres composants : schistes calcisés (T) ; calcaires (L) ; fumée de silice (D) ; sulfate de calcium (Gypse).[4]

Il existe cinq types de ciments :

- Le CEM I (ciment Portland) est un ciment adapté pour la conception de béton armé ou précontraint car il offre un niveau de résistance élevé.
- Les CEM II A ou B (ciment Portland composé) ont pour particularité d'être très maniables. Ils sont donc utilisés dans les travaux d'usage courant tels que pour les chapes traditionnelles ou bien pour les enduits simples.
- Les CEM III A, B ou C (ciment de haut-fourneau) sont adaptés à des environnements difficiles, ils sont réputés pour être durables.
- Les CEM IV A ou B (ciment de type pouzzolanique) sont également adaptés à un milieu agressif, idéals pour des structures hydrauliques. Absents en France.
- Les CEM V A ou B (ciment composé) ont les mêmes propriétés physiques que les CEM III mais pas les mêmes constituants. [4].

### I.3.2.2. Granulats

Les granulats constituent le squelette du béton et ils représentent environ 80 % du poids total du béton. Ils sont constitués de Sables (Gros et Fin) et de gravier. Cependant, les granulats doivent Satisfaire à certaines exigences de qualité pour qu'ils soient utilisés dans le béton [5]. Un granulats est caractérisé du point de vue granulaire par sa classe d/D. Selon la norme NF P 18-101.

- Les fines 0/D avec  $D \leq 0,08$  mm,
- Les sables 0/D avec  $D \leq 6,3$  mm
- Les gravillons d/D avec  $d \geq 2$  mm et  $D \leq 31,5$  mm,

### I.3.2.3. Sable

On définit les sables comme étant la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre  $5\mu\text{m}$  et  $80\mu\text{m}$  ; il s'agit d'une définition globale dont les bornes varient d'une classification à une autre, c'est un matériau dont le diamètre maximal est inférieur à 6.3mm et dont le passant à  $80\mu\text{m}$  n'excède pas 30% Dans le sens le plus courant, on entend par « sable » les éléments de dimension 0 à 5mm les fines. [7]

Les sables rencontrés sont le résultat d'une décomposition chimique ou d'une désintégration mécanique des rochers, suivie par un processus de transport qui est à l'origine de leurs caractéristiques physico-chimiques ; les sables ainsi disponibles sont le résultat d'un processus souvent complexe d'érosion et de sédimentation. Ils comportent, à des degrés divers une décomposition sur place, des différentes roches, suivie d'un transport fluvial et parfois éolien.[7]

### I.3.2.4. Gravier

Les graviers ont des origines semblables à celles des sables, ils proviennent de la désagrégation des roches. La dimension maximale des agrégats est conditionnée, d'une part, par la distance minimale à réaliser et, d'autre part, de la distance minimale entre les différentes armatures de l'ouvrage. La fraction 3/8 est considérée comme sable concassé.[7]

### I.3.2.5. L'eau de gâchage

Pour convenir à la confection de béton, les eaux ne doivent contenir ni composés risquant d'attaquer chimiquement le ciment, les granulats ou les armatures, ni particules en suspension dont la quantité pourrait modifier ses qualités originelles. La norme P 18-303 limite à cet effet le pourcentage de matières en suspension à 2 ou 5 g/l et la teneur en sels dissous à 15 ou 30 g/l suivant

la nature du béton, précontraint ou non armé, spécifications qui ne différencient pas les éléments nocifs même en très faible pourcentage de ceux qui en pourcentage éventuellement plus important ne le sont pas. Dans la catégorie des eaux susceptibles de convenir à la confection de béton, on trouve :

- Les eaux potables (qui bien évidemment conviennent) ;
- Les eaux de recyclage provenant du rinçage des bétonnières ou des camions malaxeurs à condition de vérifier leur aptitude dans le cas de changement de ciment ou d'adjuvant d'une gâchée à l'autre sont utilisables lorsque ces eaux comportent des éléments fins provenant des matériaux entrant dans la confection des bétons (ciments. Fines des sables...). Il est possible de les utiliser après passage dans des bassins de décantation.
- Les eaux de pluie et de ruissellement, les eaux pompées, tant qu'elles restent confirmées aux prescriptions de la norme conviennent également.

À côté, les catégories d'eaux ne devant pas être utilisées comprennent :

- Les eaux usées ;
- Les eaux vannes ou contenant des déterge ;
- Les eaux industrielles susceptibles de contenir des rejets organiques ou chimiques.

Ces différentes eaux doivent obligatoirement subir des analyses concluant à leur non -nocivité avant tout emploi. Bétons non armés ne présente pas de risque quant à la pérennité de l'ouvrage. La norme autorise l'emploi d'eau de mer dans la confection des bétons qui ne sont ni armés ni précontraints, mais les spécifications du fascicule 65 A sont plus rigoureuses et en interdisent formellement l'emploi lors du gâchage. Bien que les textes officiels ne traitent pas de ce sujet, l'utilisation d'eau de mer pour le gâchage de seules des Efflorescences, dues à une migration des sels, pouvant apparaître sur les parements [4].

### **I.3.2.6. Les adjuvants**

On définit les adjuvants de la façon suivante :

Produits qui, ajoutés à moins de 5% du poids du liant, au moment des malaxages des mortiers et bétons ou à leur surface lorsqu'ils sont encore frais, améliorent certaines de leurs propriétés. Cette définition ne considère pas comme adjuvants des produits ajoutés au moment du broyage du clinker. Les adjuvants ne sont pas des panacées permettant de transformer un béton médiocre en bon béton. Mais, dans de nombreux cas, ces produits permettent l'exécution des travaux que les moyens classiques ne permettent pas de réaliser. [5]

Le critère essentiel permettant de classer les adjuvants est le résultat de leur action, ainsi on distingue.[6]

- Adjuvants modifiant la rhéologie et la teneur en air : plastifiants, plastifiants-réducteurs d'eau, rétenteurs d'eau et entraîneurs d'air.
- Adjuvants modifiant la prise et le durcissement : accélérateurs et retardateurs,
- Adjuvants modifiant la résistance aux actions aux physiques et chimiques : antigels et antigelifs, hydrofuges et produits de cure.
- Adjuvants pour coulis d'injection.

Il existe plusieurs types d'adjuvants :

- Hydrofuges de masse : Les hydrofuges de masse ont pour principale fonction de réduire la porosité du béton. Ils agissent sur les pores du béton en les colmatant. On les utilise en milieu agressifs ou pour la réalisation d'ouvrages tels que les fondations, les radiers, les piscines etc. Les hydrofuges de masse se trouvent sous forme de poudre ou de solution aqueuse.
- Accélérateurs de prise : Les accélérateurs de prise sont utilisés principalement en cas de températures basses empêchant ou entravant la prise du béton. Ils permettent de travailler la matière jusqu'à  $-10^{\circ}\text{C}$ . Les accélérateurs sont préconisés pour éviter que les températures basses ne bloquent la prise du béton, ne l'interrompent pas en le transformant en glace en cours de prise, ou pour accélérer sa montée en résistance. Ils sont employés pour les ouvrages épais ou volumineux particulièrement sensibles au gel en raison d'une prise plus longue.

Remarque : les accélérateurs de prise doivent répondre aux exigences de la norme NF EN 934-2 d'avril 1998.

- Retardateurs : À l'inverse des accélérateurs de prise, les retardateurs ont pour but de retarder la prise. Retarder la prise peut être utile en cas de fortes chaleurs, ou lorsque le béton est en attente pendant un certain temps avant d'être coulé (transport etc.). Les retardateurs de prise se présentent dans la majorité des cas sous forme liquide.[4]

## I.4. Les différents types de béton

### I.4.1. Béton léger

Le béton léger se distingue du béton courant par sa masse volumique réduite, obtenue grâce à l'ajout de granulats légers à haute porosité ou de faible masse volumique.

Les bétons légers se répartissent selon leur composition en différents groupes :

- Le béton de construction léger (à structure compacte)
- Le béton caverneux (sans composants fins)
- Le béton léger poreux (béton mousse)
- Le béton aéré

Le béton caverneux, le béton léger poreux et le béton aéré ainsi que tout béton d'une masse volumique inférieure à  $800\text{kg/m}^3$  ne tombent pas dans le domaine d'application de la norme SN EN 206-1.[9]

### I.4.2. Béton renforcé de fibres

Le béton renforcé de fibres est un béton auquel on ajoute des fibres, généralement des fibres métalliques ou polymères au moment de la fabrication, afin d'améliorer le comportement structural et l'aptitude service. Les fibres, enrobées dans la pâte de ciment durcie, agissent comme une armature. Dans des cas particuliers, les fibres sont additionnées pour améliorer les propriétés de béton frais, la rigidité du béton jeune, l'augmentation de la résistance au feu ou la réduction du rebond du béton projeté. Le terme béton renforcé de fibres est aussi employé lorsque le diamètre maximal du granulats est inférieur à 4 mm. Le béton fibré à ultra-hautes performances, les explications suivantes se limitent aux fibres courtes d'une longueur maximale de 50mm. L'orientation des fibres dans le béton durci varie en fonction de la technique de mise en œuvre :

- Dispersion spatiale régulière dans l'ensemble du volume du béton, y compris les surfaces, les arêtes et les angles
- Orientation préférentielle en un plan (béton fibré projeté)

L'addition de fibres peut réduire l'ouverture des fissures par la formation d'une multitude de très fines fissures qui sont en général sans conséquences. De cette manière, le développement des fissures est fortement limité. Lorsqu'une première fissuration s'est formée dans le béton, les fibres peuvent assurer la transmission des tensions et des forces dans la zone fissurée. A condition d'être

encastrées dans la pâte de ciment, elles relient les deux flancs de la fissure et entravent sa propagation [9].

### **I.4. 3. Bétons pompés**

Le pompage du béton a fait ses preuves durant les dernières décennies comme un moyen moderne et économique de mise en place. Un béton frais est apte au pompage, si sa consistance permet un transport à l'aide d'une pompe, tout en restant homogène pendant le processus de pompage. Le béton pompé se prête au bétonnage de tous les éléments de construction, en particulier lorsqu'une cadence élevée de bétonnage est exigée ou en cas d'accès difficile au lieu du bétonnage. Le pompage du béton offre les avantages suivants :

- Une mise en place rapide (selon la section de l'élément entre 30 à 150 m<sup>3</sup>/heure, normalement, env. 90 m<sup>3</sup>heure).
- Il ne nécessite pas de grue, respectivement la grue peut être occupée à d'autres travaux.
- Une mise en place aussi possible en cas d'ouvrages difficilement accessibles, par exemple : des éléments couverts, des tunnels.
- Une mise en place aisée pour l'équipe de bétonnage.
- Un remplissage propre du coffrage.
- Il permet d'opérer à de grandes distances, malgré des différences de hauteur importantes, jusqu'au lieu du bétonnage (distance de transport jusqu'à 2000 mètre différence de hauteur jusqu'à 500 m)
- La mise en place continue et rapide favorise la qualité, les couches de bétonnage sont moins visibles grâce à une mise en œuvre plus rapide
- Pour un mur, il permet d'éviter de grandes hauteurs de déversement du béton par l'introduction du tuyau de pompage au fond du coffrage. [8]

### **I.4. 4. Bétons Autoplaçants**

Le béton autoplaçant ou BAP est un béton capable de se mettre en place dans les coffrages les plus complexes et très encombrés uniquement sous l'effet de la pesanteur. Ainsi, ce type de béton ne requiert aucun moyen de vibration pour consolider le mélange avec comme résultat un produit très homogène. Un BAP doit être apte à passer à travers les armatures les plus serrées. Cependant, une vitesse dépendante de la viscosité du mélange. Pour remplir cette condition, le béton doit être très fluide, c'est-à-dire très déformable. Or ceci n'est possible que si le rapport eau/ciment est élevé ou si le béton contient un super plastifiant. Seulement, la fluidité n'est pas là

seule propriété recherchée, car il faut bien s'assurer d'homogénéité de l'ensemble pâte-granulats. De façon corollaire, le mélange du BAP doit être très cohésif et très stable lors de la mise en place et cela jusqu'à son durcissement. Ceci implique que le BAP doit présenter le minimum de tassement et de sédimentation des particules solides et éviter de présenter un ressuage trop fort, car cela génère une hétérogénéité des propriétés mécaniques, telle qu'une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées par rapport à celles situées en zone inférieure lors du coulage

Une bonne stabilité liée, entre autres, à la viscosité du mortier et de son seuil de cisaillement nécessite soit l'ajout d'un agent de viscosité afin d'améliorer la cohésion de l'ensemble, soit d'augmenter la teneur en matière cimentaire et de réduire la teneur en eau libre. Aussi une bonne stabilité est liée à une optimisation de la compacité granulaire. Or l'augmentation de la teneur en liant n'est pas sans conséquence sur la durabilité, vu le dégagement de la chaleur et le risque de nuire à la capacité de remplissage.

Cette complexité amène à combiner différents paramètres pour obtenir la résistance à la compression recherchée. Mais avant d'atteindre cette étape, il est indispensable de s'assurer d'une part de la bonne capacité de remplissage de ces bétons, donc une déformabilité supérieure à celle des bétons ordinaires [9].

#### **I.4. 5. Bétons de haute performance**

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) ont d'abord été utilisés pour leur haute résistance. Cette caractéristique facilement mesurable a fait des progrès spectaculaires à partir des années 80. Elle est passée de 30 à 35 MPa, à plus de 100 MPa pour les Bétons à Très Hautes Performances, voire plus de 200 MPa pour les Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances (BFUP).

Les BHP se caractérisent par une résistance caractéristique à la compression à 28 jours supérieure à 50 MPa sur cylindre, 8 un rapport  $E_{eff}/E_{liant}$  équivalent inférieur à 0,4. Mais les gains de résistance ne sont pas les seuls avantages de ces bétons qui tirent leurs propriétés de leur microstructure très dense, d'une forte réduction de leur porosité et d'un réseau capillaire non connecté. Ces bétons sont en fait des matériaux à très haute compacité. Les BHP sont également, du fait de leur porosité extrêmement réduite, plus résistants aux agents agressifs. De façon générale, présentent une durabilité accrue. Ils permettent d'optimiser les structures, de réaliser des ouvrages soumis à des contraintes élevées ou subissant un environnement sévère (climat rigoureux, agressions marines, effets du gel...) [10].

## I.5. Principaux avantages et inconvénients du béton

### I.5.1. Avantages du béton [7]

- Il est peu coûteux, facile à fabriquer et nécessite peu d'entretien ;
- Il épouse toutes les formes qui lui sont données. Des modifications et adaptations du projet sur le chantier sont faciles à effectuer ;
- Il devient solide comme la pierre. Correctement utilisé, il dure des millénaires. Il résiste bien au feu et aux actions mécaniques usuelles ;
- Associé à des armatures en acier, il acquiert des propriétés nouvelles qui en font un matériau de construction aux possibilités immenses (béton armé, béton précontraint) ;
- Il convient aux constructions similaires. Les assemblages sont faciles à réaliser dans le cas du béton coulé sur place. Dans la plupart des cas, les dimensions des ouvrages et éléments d'ouvrage en béton sont suffisants pour ne pas poser de problème délicat de stabilité ;
- Les ressources nécessaires pour sa fabrication existent dans de nombreux pays en quantités presque illimitées ;
- Il exige peu d'énergie pour sa fabrication.

### I.5.2. Inconvénients du béton

Les principaux inconvénients du béton ont pu être éliminés grâce à son association à des armatures en acier ou à l'utilisation de la précontrainte. De toute façon, il reste les inconvénients suivants :

- Son poids propre élevé (densité de 2,4 environ qui peut être réduite à 1,8 dans le cas de bétons légers de structure et à moins de 1,0 dans le cas de bétons légers d'isolation) ;
- Sa faible isolation thermique (elle peut être facilement améliorée en ajoutant une couche de produit isolant ou en utilisant des bétons légers spéciaux) ;
- Le coût élevé entraîné par la destruction du béton en cas de modification d'un ouvrage. [7]

## I.6. Domaine d'utilisation du béton

### I.6.1. Le bâtiment

Le béton tient une place essentielle dans l'urbanisme moderne. Cela semble normale lorsqu'on considère son utilisation dans la construction de logements : pour les murs, 80% des techniques en individuelle, plus de 90% en collectif pour les structures ; pour les planchers, le béton est pratiquement le matériau idéal. Le béton est largement imposé dans les autres secteurs de la construction : bureaux, hôpitaux, locaux, ainsi que dans grands édifices publics et les bâtiments industriels.

### I.6.2. Les travaux publics

- Les ponts : Les progrès techniques, en particulier, l'évolution des caractéristiques du béton, permettent de réaliser des portées atteignant plusieurs centaines de mètres.
- Les tunnels : Pour les grands tunnels dont les exemples se multiplient dans le monde, le béton est soit coulé surplace, soit utilisé dans des voussoirs préfabriqués. Ceux-ci sont posés à l'avancement de la machine à forer-le tunnelier.
- Les barrages : Les grands barrages sont le plus souvent en béton permettant des implantations dans les sites les plus difficiles.
- Les routes : La chaussée béton prend une part de plus en plus importante dans les grandes voiries routières et autoroutières, grâce au développement de techniques modernes : béton armé continu, dalle épaisse traitement de surface les voiries à faible trafic et aménagements urbains montrent un regain d'intérêt pour les solutions béton, qui leur assurent durabilité et faible cout d'entretien.
- Autres ouvrages : Il faut également citer les ouvrages hors du commun : structures offshores ou centrales nucléaires, dont les exigences requièrent des bétons aux caractéristiques mécaniques et à la durabilité élevées.[7]

## I.7. Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons présenté de manière générale le matériau béton dans tous ses états : historique, classification, composition, différents types, domaine d'application, ....

**Référence bibliographique**

- [1] **Lucien Pliskin**, « Le béton » C&T 1992 26 58 du livre de la fabrication du ciment. Secrétaire ; SOCIETE DES CIMENTS FRANCAIS, Editeur scientifique ; Paris : Eyrolles (1993).
- [2] Cours de l'histoire du béton et innovation architecturales (**d'IFIPS** Institut de la formation de l'ingénieur Université de Paris –Sud 11).
- [3] **Infociment** (l'industrie cimentaire française regroupe cinq société production de ciment et l'organisation professionnelles et membre de la filière béton). Publication de leur article.
- [4] **George Dreux et Jean Festa** « Nouveaux guide du béton » Septième Edition (1995).
- [5] **Ghomari Fouad**, « cours de Science des Matériaux de Construction » (Université Aboubekr Belkaid).
- [6] **Youssef Ouhani**, « Les adjuvants du béton » FST de Setta cours de licence professionnelle (2011/2012).
- [7] **Hachemi Nadir ; Boussad Adel**, mémoire de fin d'étude :« Influence des différentes granulométries du sable sur le comportement mécanique du béton » spécialité : Génie de matériaux. Université de Hamed Bougara-Boumerdes.
- [8] Guide pratique du béton « Concevoir et mettre en œuvre des bétons durable », Edition Suisse Editeur : Holcim (Suisse) S.A 6 ème édition (2015).
- [9] **Mouhammed Rissel Khelifa**, « Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des béton autoplacants » Thèse en Cotuelle Internationale pour obtenir le garde de docteur de l'université d'Orléans et l'université de Constantine soutenue (20 juin 2009).
- [10] Infociment article T 43 Béton et Génie Civil, « Les nouvelles solutions des bétons prêts à l'emploi».



# Chapitre II

## Les déchets

## II.1. Introduction

Depuis le regroupement des sociétés humaines dans des villes et des villages, les activités quotidiennes ont été sources de rejets de déchets. Qu'il s'agisse des excréments produits par tout être humain ou par les animaux d'élevages, de restes d'aliments non consommés, de sous-produits de l'artisanat puis de l'industrie, de biens de consommation généralisés par l'évolution socio-économique des dernières décennies, la ville a toujours cherché à gérer sa production de déchets solides et liquides.[1]

La notion de déchet recouvre aujourd'hui une réalité de plus en plus présente. Toujours plus nombreux en quantité, toujours plus importante et toujours plus difficile à faire disparaître, les déchets s'imposent parmi les réflexions politiques incontournables. La nature ou l'origine des résidus permettent de distinguer les catégories de déchets dont l'élimination sera encadrée par des réglementations distinctes. C'est aussi en fonction de la nature ou de l'origine des déchets que les différentes filières d'élimination devront être empruntées avec, comme priorité, de faciliter le recyclage et la valorisation.[2]

## II.2. Histoire des déchets

Les déchets apparaissent dans l'activité des humaines lorsque les habitants jetaient leurs ordures par les portes et les fenêtres au moyen âge, la taille des villes augmente et les déchets des citadins sont jetés dans la rue ou dans les rivières, provoquant des problèmes de salubrité.

Les habitudes de consommation héritées de la révolution industrielle du XIX<sup>e</sup> siècle croissent de plus en plus. Le début du XX<sup>ème</sup> siècle est marqué par une production diversifiée des déchets liée à la révolution technologique.

Les déchets sont des parties de matières rejetées. La croissance rapide économique dans laquelle les biens sont produits à partir de matières premières vendues à engendré une augmentation importante des volumes de déchets sur le territoire urbain. Cette situation, dont les effets sont visibles par tous, engendre des nuisances importantes pour les habitants et a des conséquences néfastes rejets ce qui fait d'elle une problématique nouvelle. Mise en décharge sauvage l'utilisation inconsidérée des ressources et l'élimination des déchets dans l'environnement contribuent à la dégradation du milieu.[3]

Jeter les déchets dans la nature, ce n'est pas sans conséquence ils y restent longtemps, parfois très longtemps. Un objet qu'on jette négligemment va polluer parfois bien longtemps après qu'on ne soit plus de ce monde.[3]

**Tableau II.1.** Temps dégradation naturelle de quelque produit dans l'environnement.

Produit	Temps de dégradation
Chaussures en cuir	25 à 40 ans
Tissu en nylon	30 à 40 ans
Boite de conserve	30 à 40 ans
Sac plastique	200 ans
Bouteilles en plastique	400 ans
Bouteilles verre	4 000 ans

**Source :** *Direction de l'environnement, service de l'environnement urbain et urbain et industriel bureau de promotion des activités de collecte récupération et traitement des déchets ménagers, assimilés et inertes de Bejaia, 2014.*

### II.3. Définition des déchets

Selon la loi du 15 juillet 1975, est considéré comme constituant un déchet : « Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit, ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que le détenteur destine à l'abandon » (article L.541-1-1 du Code de l'environnement). La définition de déchet est complétée par la notion de déchet ultime (loi du 13 juillet 1992) : « un déchet résultant ou non d'un traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans des conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux », et précisée par la circulaire d'avril 1998 « les déchets ultimes sont les déchets dont on a extrait la part récupérable ainsi que les divers éléments polluants comme les piles et accumulateurs ». Une substance ou un objet issu d'un processus de production dont le but premier n'est pas la production de cette substance, ou de cet objet, ne peut être considéré comme un sous- produit, et non comme un déchet au sens de l'article L. 541-1-1, que si l'ensemble des conditions suivantes est rempli :

- L'utilisation ultérieure de la substance ou de l'objet est certaine ;
- La substance ou l'objet peut être utilisé directement sans traitement supplémentaire autre que les pratiques industrielles courantes ;
- La substance ou l'objet a produit en faisant partie intégrante d'un processus de production ;
- La substance ou l'objet répond à toutes les prescriptions relatives aux produits, à l'environnement et à la protection de la santé prévues pour l'utilisation ultérieure ;

- La substance ou l'objet n'aura pas d'incidences nocives pour l'environnement ou la santé humaine. Les opérations de traitement de déchets ne constituent pas un processus de production au sens du présent article.

Les déchets des activités économiques peuvent également être définis comme étant tous les flux de matière non rentables pour l'entreprise et n'apportant pas de plus-value au produit ou au service final, que ces flux soient valorisés ou non. L'approche coût complet reprise dans cette boîte à outils repose sur cette définition. Les déchets peuvent être de 3 types [4] :

- Les déchets inertes,
- Les déchets dangereux,
- Les déchets non dangereux non inertes : les déchets non dangereux des activités économiques (DNDAE) sont souvent appelés DIB (déchets industriels banals),

#### II.4. La typologie des déchets

Les déchets sont classés en fonction de critères multiples. Ces critères déterminent des typologies de déchets qui sont utilisées par les différents acteurs pour conduire, surveiller et rendre compte de leurs activités. Un même acteur, par exemple une collectivité territoriale, pourra dans le cadre de ses activités suivre les indicateurs de plusieurs typologies de déchets. La classification peut être déterminée en fonction de l'origine du déchet, de ses propriétés de danger, ou encore, en fonction d'une filière de traitement dédiée. [5]

Les déchets peuvent être solides, liquides ou gazeux. Ils peuvent être dangereux ou non dangereux. Ils peuvent aussi être classés selon leur provenance ou leur composition et leurs propriétés physiques et chimiques. On peut classer les déchets selon plusieurs critères : en fonction de l'activité à l'origine du déchet, en fonction de la nature, en fonction du mode (filière) d'élimination du déchet.

##### *a- Distinction en fonction de l'activité à l'origine du déchet*

- Les déchets ménagers et assimilés : Les déchets ménagers et assimilés sont les déchets produits par les ménages, les commerçants, les artisans, et même les entreprises et industries quand ils ne présentent pas de caractère dangereux ou polluant : papiers, cartons, bois, verre, textiles, emballages. Ces déchets sont collectés par la commune si, eu égard à leurs caractéristiques et aux quantités produites, ils peuvent être éliminés sans sujétions techniques particulières et sans risques pour les personnes ou l'environnement.

- Les déchets industriels : Les déchets industriels non dangereux ou "banals". Ce sont les déchets des entreprises non dangereux qui sont aussi appelés "déchets assimilés aux déchets ménagers". Les déchets industriels dangereux ou "spéciaux", ce sont les déchets des entreprises qui, en raison de leurs propriétés dangereuses, ils ne peuvent pas être déposés dans des installations de stockage recevant d'autres catégories de déchets.
- Les déchets agricoles : Sont les déchets issus de l'activité agricole. Il s'agit essentiellement de déchets organiques comme les déjections des animaux, les déchets de culture, etc.
- Les déchets d'activité de soins de santé : ce sont les déchets issus des hôpitaux et les autres établissements de soins, les laboratoires et les centres de recherches, les morgues et les centres d'autopsie, les banques de sang et les services de collecte de sang.

*b- Distinction en fonction de la nature du déchet*

- Les déchets dangereux : Les déchets sont considérés comme dangereux s'ils présentent une ou plusieurs des propriétés suivantes : explosif, comburant, inflammable, irritant, nocif, toxique, cancérigène, corrosif, infectieux, toxique pour la reproduction, mutagène, écotoxique.
- Les déchets toxiques en quantités dispersées : Sont des déchets dangereux produits en petites quantités par les ménages, les commerçants ou les PME (garages, coiffeurs, laboratoires, photo, imprimeries, laboratoires de recherche...). Il peut s'agir de déchets banals souillés (chiffons, cartons,), piles, résidus de peinture, etc.
- Les déchets non dangereux : Les déchets non dangereux sont les déchets qui ne présentent aucune des caractéristiques relatives à la "dangerosité" mentionnées ci-dessus (toxique, explosif, corrosif, ...). Ce sont les déchets "banals" des entreprises, commerçants et artisans (papiers, cartons, bois, textiles...) et les déchets ménagers.
- Les déchets inertes : Sont des solides minéraux qui ne subissent aucune transformation physique, chimique ou biologique importante : pavés, gravats, carrelage. Ils proviennent des chantiers du bâtiment et des travaux publics, mais aussi des mines et des carrières.
- Les déchets ultimes : Est ultime un déchet, résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux.

*c- Distinction en fonction du mode (filrière) de traitement des déchets*

- Les déchets biodégradables ou compostables : comme les résidus verts, boues d'épuration des eaux, restes alimentaires. Ces déchets sont au moins pour partie détruits naturellement, plus ou moins rapidement, en général par les bactéries, champignons et autres micro-organismes et/ou par des réactions chimiques laissant des produits de dégradation identiques ou proches ceux qu'on peut trouver dans la nature, parfois néanmoins contaminés par certains résidus.
- Les déchets recyclables : comme le verre, métaux, matières plastiques. Ces déchets peuvent être réutilisés tels quels dans d'autres domaines ou recyclés.
- Les déchets ultimes : les déchets qui ne sont plus susceptibles d'être traités dans les conditions techniques et économiques du moment. Eux seuls devraient être mis en décharge.
- Les déchets spéciaux et déchets industriels spéciaux : dont font partie les déchets toxiques, les déchets radioactifs et déchets nucléaires qui doivent faire l'objet d'un traitement tout à fait particulier en raison de leur nocivité particulière liée à la radioactivité.

## II.5. La gestion des déchets

La priorité en matière de gestion des déchets est la réduction à la source : cela consiste à en produire le moins possible, voire pas du tout. Il s'agit « En priorité, de prévenir et de réduire la production et la nocivité des déchets, notamment en agissant sur la conception, la fabrication et la distribution des substances et produits et en favorisant leur réemploi... ». Dès lors que le déchet est produit, une hiérarchie des modes de traitement s'impose, justifiée par la finalité suivante : valoriser tout ce qui peut l'être afin de réduire le gaspillage, des ressources sans porter atteinte à l'environnement et à la santé, c'est à dire en limitant les rejets polluants. Ainsi dans l'ordre seront privilégiés :

- La réutilisation en l'état des matières et des objets usagés
- Le recyclage
- La valorisation matière comme le compostage
- La valorisation énergétique comme la méthanisation
- L'incinération avec récupération énergétique : co-génération

L'élimination du déchet proprement dite, vient en dernier recours ; les déchets dit ultimes sont déposés en centre de stockage (autrement dit : mis en décharge) ou incinérés. Qu'est-ce qu'un déchet ultime, au sens de la loi 92-646 du 13 juillet 1992 : « est ultime, un déchet, résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et

économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux ». Cette notion de déchet ultime a trouvé sa source dans l'intention du législateur de la loi de 1975 cherchant à limiter fortement la mise en décharge des déchets, car celle-ci était source potentielle de nuisances et de pollutions différées, mal acceptée par les riverains et gelant des terres au détriment d'autres utilisations. Il s'agissait également en « verrouillant » cette "issue" d'obliger l'ensemble des acteurs à développer le réemploi, le recyclage et la valorisation des déchets, ainsi que la collecte sélective auprès des ménages, comme c'était déjà le cas dans d'autres pays européens. Le souci de limiter le prélèvement des ressources et leur gaspillage : "STOP AU GASPI", était déjà présent dans les esprits de l'époque.

Contrôler le devenir des déchets, en assurer la traçabilité et organiser leur transport en le limitant en distance et en volume suppose de planifier la gestion des déchets selon quelques principes simples :

- Traiter les déchets produits au plus près de leurs lieux de production, dans les conditions techniques et économiques optimales du moment,
- Organiser la planification à l'échelle pertinente (nationale pour les déchets les plus dangereux : nucléaire, militaires ; régionale pour les déchets dangereux et départementale pour les déchets ménagers et assimilés).[7]

## **II.6. Type de valorisation des déchets**

### **II.6.1. Broyage-stérilisation**

Dans le système de traitement des déchets à risque par broyage et stérilisation les déchets sont stérilisés après broyage dans la même enceinte à 138 °C sous une pression de 3,8 bars. Le résultat final est constitué de broyats stérilisés qui peuvent rejoindre directement la filière des déchets ménagers. Le volume initial est réduit de 80%. Cette technique présente plusieurs avantages : neutralisation du risque infectieux près du lieu de production, aucune émanation de dioxines ou de furanes dans l'atmosphère, pas de rejets liquides polluants de nature à contaminer la nappe phréatique, ni de rejets polluants au sol, protection de l'environnement. Enfin, le coût de traitement des déchets à risque est 10 fois moins cher que le traitement par incinération aux normes internationales. [5]

### **II.6.2. La pyrolyse et la gazéification**

La pyrolyse et la gazéification sont deux méthodes liées de traitements thermiques où les matériaux sont chauffés à très haute température et avec peu d'oxygène.

Ce processus est typiquement réalisé dans une cuve étanche sous haute pression. Transformant les matériaux en énergie. Cette méthode est plus efficace que l'incinération directe, plus d'énergie pouvant être récupérée et utilisée.

- La pyrolyse : La pyrolyse des déchets solides transforme les matériaux en produits solides, liquides ou gazeux. L'huile pyrolytique et les gaz peuvent être brûlés pour produire de l'énergie ou être raffinés en d'autres produits. Les résidus solides (charbon) peuvent être transformés plus tard en produits tels les charbons actifs.
- La gazéification : La gazéification est utilisée pour transformer directement des matières organiques en un gaz de synthèse appelé syngaz composé de monoxyde de carbone et d'hydrogène. Ce gaz est ensuite brûlé pour produire de l'électricité et de la vapeur. La gazéification est utilisée dans les centrales produisant de l'énergie à partir de la biomasse pour produire de l'énergie renouvelable et de la chaleur.[5]

### II.6.3. Le Recyclage

La valorisation matière, appelée communément recyclage ou recyclage matière, est une opération visant à introduire aux fins de leurs fonctions initiales ou à d'autres fins les matériaux provenant de déchets dans un cycle de production en remplacement total ou partiel d'une matière première vierge. Le recyclage se trouve à l'influence de deux considérations :

- La production de matériaux ou de produits finis à partir de matières premières non traditionnelles
- Le mode de traitement d'un déchet

Le premier aspect conduit à intégrer le déchet au même niveau qu'une matière première, et le second aspect conduit à considérer le recyclage comme une opération de traitement de certains déchets. La chaîne du recyclage est comme la suite : Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets. À la suite de la collecte, les déchets, triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri où différentes opérations permettent de les trier de manière à optimiser les opérations de transformation. Une fois triés, les déchets sont pris en charge par les usines de transformation. Ils sont intégrés dans la chaîne de transformation qui leur est spécifique. Ils entrent dans la chaîne sous forme de déchets et en sortent sous forme de matière prête à l'emploi. Une fois transformés, les produits finis issus du recyclage sont utilisés pour la fabrication de produits neufs qui seront à leur tour proposés aux consommateurs et consommés. Pour être, en fin de vie, à nouveau jetés, récupérés et recyclés.

Les déchets constituent un produit qu'il faut utiliser au mieux de nos possibilités du moment. Toute l'activité humaine consiste à créer des richesses en partant d'un produit pour en fabriquer un autre, en transformant les choses pour en créer de nouvelles. Le déchet peut être ce produit qu'il faut savoir utiliser et transformer pour en faire un matériau utile, une véritable " matière première secondaire ". Utiliser un déchet c'est préserver les matières premières naturelles. Les déchets peuvent ainsi se substituer aux importations de matériaux. C'est aussi, bien souvent, réaliser une économie en termes financiers. Il existe de très nombreux cas où utiliser un déchet est moins coûteux pour tout le monde qu'utiliser une matière première naturelle (le verre, l'aluminium, par exemple). Les bénéfices économiques et environnementaux du recyclage sont considérables : il permet de protéger les ressources (il offre une source d'approvisionnement en matières premières alternative aux autres sources), de réduire les déchets, de créer des emplois, de protéger la nature et d'économiser les matières premières. Le recyclage ou la valorisation est non seulement utile, mais aussi souhaitable. C'est une façon de s'engager sur l'avenir. [5]

Le recyclage qui est la « réintroduction directe d'un matériel dans son propre cycle de production en remplacement total ou partiel d'une matière première neuve ». Certains matériaux sont plus aisément recyclables que d'autres. Le recyclage est généralement issu d'un processus de raffinage » débouchant sur une matière première homogène, raffinage induisant lui aussi des déchets et des pollutions [8]. Les avantages du recyclage sont :

- Reprise de matière première : lorsque le produit est principalement composé d'une ou plusieurs matières premières facilement séparables et réutilisables, on peut le collecter à cette fin ;
- Le recyclage permet de réduire l'extraction de matières premières ;
- Conversion en d'autres produits : sans certains cas (matières fermentescibles), les produits ne peuvent être recyclés ni sous la forme initiale ni sous forme de matières premières, on peut tout de même les réutiliser après compostage ou fermentation pour en faire des engrais et/ou du carburant (gaz naturel, biogaz principalement). On parle alors de revalorisation.
- Récupération d'énergie : on peut faire brûler le déchet pour récupérer de l'énergie : c'est l'incinération d'ordures. Cependant, ceci ne consiste pas à proprement parler une opération de recyclage. On parle alors de « valorisation énergétique » par opposition à la « valorisation de matière » qui consiste le recyclage.[9]

## II.7. Le déchet de verre

Pour mon projet de fin d'étude, on s'intéressera à l'étude expérimentale du déchet de verre. Mais avant un survol bibliographique est plus que nécessaire pour connaître l'identité de ce matériau dans tous ses états.

Le verre est l'un des plus anciens matériaux utilisés par l'Homme. Dès l'âge de pierre, un verre naturel d'origine volcanique, l'obsidienne, servait d'instrument tranchant. Les plus anciens objets en verre produits par l'Homme ont été retrouvés en Egypte et datent de 3000 ans avant Jésus-Christ. Leur fabrication reprend un procédé découvert par des marins en Mésopotamie environ 4500 ans avant Jésus-Christ. Pour installer leur feu de camp sur une plage de sable, ils ont utilisé des blocs de soude naturelle qu'ils transportaient et ont remarqué la formation de perles de « verre » dans le foyer.

Tout d'abord utilisé en morceaux taillés comme objets d'ornementation, le verre est destiné à devenir un contenant alimentaire vers 1 500 ans avant Jésus-Christ. La technique de fabrication consistait à mouler les bols, carafes et autres coupes, autour d'une structure de sable ou d'argile. Cette technique est importée en Europe vers 900 avant Jésus-Christ par les empires romain et grec. L'invention de la canne de soufflage, probablement par les Phéniciens vers 200 avant Jésus-Christ, a bouleversé les techniques de façonnage. Cette découverte a favorisé l'art verrier qui s'est répandu de l'Orient vers l'Occident grâce à l'empire romain. L'influence historique de l'église a également stimulé l'art du verre coloré pour la fabrication de vitraux. Dès le XI<sup>ème</sup> siècle, Venise est la capitale européenne de l'art verrier avec « le cristal de Venise ».

En France, le contrôle de l'industrie du verre par les autorités commence au XVI<sup>ème</sup> siècle. A partir de 1665, COLBERT concentre l'industrie verrière en créant l'industrie du verre plat devant fournir les miroirs pour le château de Versailles. Il fonde la « Manufacture Royale des Glaces de France » pour lutter contre le monopole de Venise. A la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle, le développement de l'industrie chimique a révolutionné l'industrie verrière. La soude fabriquée à partir de sel marin remplace la soude naturelle et la chaux contenue dans les cendres naturelles est substituée par celle fabriquée à partir de calcaire. Vers la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, la révolution industrielle a permis l'introduction des processus mécanisés de formage du verre. C'est au XX<sup>ème</sup> siècle que cette industrie devient une industrie de grande production avec la mise en place des fours à feu continu et grâce aux progrès réalisés dans l'automatisation de la production.

Les propriétés du verre et leur amélioration constante en font un matériau presque omniprésent. Incolore ou teinté, à l'état massif ou de fil, en plein jour ou à l'abri des regards, il est l'un des matériaux le plus utilisé par notre société de consommation. [10]

### II.7.1. Définition du verre

L'élément principal du verre est le sable, ou plus exactement la silice fondue. Les ingrédients sont mélangés à de l'eau et du calcin (débris de verre recyclé). Le tout est enfourné dans un four à une moyenne de 1 550°C. Le verre fondu est coulé sur un bain d'étain en fusion. Le verre est ensuite refroidi, lorsqu'il atteint 500°C et devient à peu près solide. Placé sur un équerri, il finit de refroidir à l'air libre. On enlève alors les bords avant de le découper en plaques. A la sortie du four, le verre subit un laminage : il passe entre des rouleaux métalliques qui lui donnent l'épaisseur et le relief désiré.

Les propriétés physiques d'un verre dépendent de sa composition et de la vitesse de refroidissement de la matière liquéfiée. Cependant, indépendamment de ces facteurs, la plupart des verres sont reconnus pour leur transparence, leur résistance chimique et biologique, leur résistance à l'abrasion, leur résistance thermique, leur caractère inerte et leur recyclable virtuellement infinie [11].

#### A. Les propriétés chimiques

Le verre est un matériau minéral auquel plusieurs définitions peuvent être attribuées. Elles sont différentes suivant que l'on considère le verre comme :

- Un solide obtenu par figement d'un liquide qui n'a pas cristallisé (définition opérationnelle)
- Un solide non cristallin ou vitreux (définition structurale).

Ces définitions ne peuvent être dissociées et leur complémentarité permet d'obtenir une définition complète du verre qui est un liquide figé caractérisé par son état vitreux. En plus des propriétés précédentes, la composition chimique du verre, c'est à dire l'ensemble des éléments chimiques qui le constitue, en fait un matériau considéré comme inaltérable (la dégradation s'effectue sur plusieurs milliers d'années).

#### B. Les propriétés physiques

Les propriétés physiques du verre définissent ses caractéristiques propres en tant que matériau. Ces propriétés sont :

- Mécaniques ;
- Thermiques ;
- Optiques.

### *C. Les propriétés mécaniques*

Le verre est un matériau fragile sur le plan mécanique. Il peut être renforcé par des fibres ou de la matière organique pour le rendre très résistant. Afin de décrire les qualités et les défauts du verre en situations de mises sous contrainte, les paramètres suivants sont analysés :

- Le module élastique : déformation du verre avant sa rupture ;
- La contrainte de rupture : force à appliquer sur le verre afin de le casser ;
- La corrosion sous contrainte : vitesse de propagation d'une fissure causée par l'altération due à l'eau ;
- La fatigue du verre : usure du verre fragilisé par modification et augmentation des défauts de surface lors d'un traitement (ex : le verre à vitres piqué au bout de nombreuses années sous l'effet des conditions climatiques) ;
- La dureté : aptitude d'un verre à rayer ou à être rayé par un autre matériau. Sur l'échelle des minéralogistes (échelle de Mohs), le verre a une dureté de 6 alors que le talc a une dureté de 1 et le diamant une dureté de 10. Ainsi le verre est rayé par un diamant.

### *D. Les propriétés thermiques*

Le verre est un matériau dont les propriétés évoluent en fonction des variations de température. Ces propriétés sont :

- La chaleur spécifique : représente la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température d'un degré pour un gramme de matériau (par exemple pour le verre à vitres il faut 0,8 joules pour augmenter la température de 1 degré pour 1 gramme de matière)
- Conductibilité thermique : détermine la vitesse de changement de température que peut subir le verre ;
- Le coefficient de dilatation : permet d'exprimer la variation du volume du verre selon la variation de température.

D'après les propriétés thermiques précédentes, le verre possède une bonne résistance aux chocs thermiques (plus grande différence de température à laquelle le matériau peut être soumis sans

casser). Il peut également être défini comme un isolant thermique, du fait de sa faible diffusion de chaleur.

### *E. Les propriétés optiques*

La connaissance et la maîtrise des propriétés optiques du verre sont nécessaires pour la fabrication de nombreux objets : lunettes, vitres, loupes, miroirs, etc. Les principales propriétés sont les suivantes :

- La réflexion : changement de direction des ondes lumineuses qui rencontrent un corps interposé ;
- La transmission : passage et déviation d'un rayon lumineux au travers d'un matériau ;
- L'absorption : capacité d'un matériau à absorber un faisceau lumineux et à diminuer son intensité (exemple des lunettes de soleil qui absorbent une partie de la lumière) ;
- La diffusion : dissémination des rayons lumineux produits par transmission au travers d'un milieu (exemple de la diffusion d'un rayon lumineux dans l'eau) ;
- La dispersion : décomposition de la lumière en plusieurs faisceaux lumineux (exemple de l'arc-en ciel qui est un phénomène de dispersion de la lumière sur un mur d'eau). De plus, l'ajout de certains métaux dans la fabrication du verre lui confère une coloration. Celle-ci est dépendante de la nature du verre. La coloration du verre permet de modifier les caractéristiques optiques du verre, en filtrant, par exemple, les rayons de la lumière pour protéger un contenu. Le verre est un matériau dont les qualités sont nombreuses. Il est considéré comme inaltérable en raison de ses propriétés chimiques. Ses propriétés physiques en font un matériau à la fois fragile et résistant. En effet, ses propriétés mécaniques le rendent fragile mais ses propriétés thermiques en font un matériau très résistant à la chaleur, ainsi qu'un bon isolant thermique. Enfin, ses propriétés optiques peuvent être utilisées dans de nombreux domaines pour des appareillages de recherche (chimie, physique, biologie, astronomie, etc.), ou pour la fabrication de produits commerciaux (vitrage, en raison de sa transparence, bouteilles colorées, etc.). Toutes ces propriétés expliquent que le verre reste un matériau inégalable qui est utilisé dans de nombreux domaines industriels et présent sous toutes ses formes dans notre société [10].

## **II.7.2. Le recyclage du verre**

Les déchets en verre provenant des ménages se composent de bouteilles, de pots, de flacons, de bocaux, de vitrages, etc. La quasi-totalité de ce gisement est constituée de déchets d'emballages

encore appelés « verres creux ». Les modalités d'élimination des déchets en verre ménagers sont déterminées dans le livre V du code de l'environnement [2].

Le consommateur est le premier maillon de la chaîne du recyclage. A ce titre, il représente un partenaire privilégié dans la recherche de la qualité indispensable pour le développement durable du recyclage du verre. Le verre est 100% recyclable et à l'infini après broyage et refonte du calcin dans un four.

### II.7.2.1. Étape de recyclage de verre

- La collecte du verre usagé : Par exemple à l'heure actuelle, la Suisse compte environ 22000 containers à verre qui sont gérés par les communes et les villes. Le verre usagé y est régulièrement prélevé et transporté d'abord dans un dépôt intermédiaire, puis par train ou par camion dans les installations de traitement.



**Figure II.1** : La collecte du verre en Suisse. [12]

- Collecte - triée selon les couleurs ou mélangée : En Suisse, près de 72 pour cent du verre usagé collecté est trié selon les couleurs (situation 2016). Ce verre usagé est très demandé car il peut être utilisé pour la production de nouveaux emballages en verre blanc, brun ou vert. Un tri impeccable selon les couleurs est très important. Environ 28 pour cent du verre usagé suisse est collecté dans des containers mélangés. Ce verre usagé n'est pas approprié pour la production d'emballages en verre blancs et bruns mais seulement pour ceux de couleur verte. Une part importante de ces tessons est recyclée en matériaux de construction.
- Vidage des containers et transport : Une fois pleins, les containers sont vidés par les transporteurs ils sont directement chargés et remplacés par des containers vides, soit ils sont vidés sur place dans des camions spécialement destinés à cet effet : en cas de collecte triée selon les couleurs, on peut avoir l'impression que les tessons soigneusement triés par couleur sont à nouveau mélangés lors du vidage. Il n'en est rien, car la surface de chargement des camions est subdivisée en trois compartiments pour chaque couleur, ce qui ne se voit pas de

L'extérieur. Le verre usagé trié par couleur a une valeur nettement plus élevée que celui qui a été mélangé. Le mélange des tessons aurait pour conséquence une diminution importante de la valeur du verre.

- Un traitement en différentes phases : Bien trop souvent, on trouve dans les containers destinés au verre usagé des bouteilles en PET, des chaussures, des couches et bien d'autres corps étrangers. La porcelaine, les tessons de terre cuite ou le cristal sont particulièrement problématiques pour le recyclage. Ces corps étrangers font augmenter le prix du recyclage. Car les séparer des tessons de verre usagé requiert diverses étapes de traitement coûteuses : la porcelaine, la céramique et les déchets sont séparés manuellement sur le tapis roulant destiné au tri. Ensuite, les tessons sont réduits dans le broyeur afin qu'ils atteignent la dimension optimale pour le processus de fusion. Le tamisage permet ensuite d'exclure d'autres corps étrangers et les tessons de verre trop gros. Les métaux et la céramique sont triés au cours de trois étapes entièrement automatisées (tambours magnétiques et collecteurs spécifiques). Les matériaux légers tels que le papier sont éliminés par une installation d'aspiration. [12]



Figure II.2 : Le traitement du verre en différentes étapes [12]

### II.7.2.2. Le verre récupéré : le calcin

Le calcin est du verre récupéré à partir de déchets (ménagers et assimilés, etc.) ou directement à partir de chutes de fabrication. Il est d'abord trié et nettoyé pour éliminer toutes les impuretés. Ensuite, avant d'être introduit avec les matières premières afin de former le lit de fusion, il est broyé très finement.



**Figure II.3 :** Le verre récupéré. [10]

L'utilisation du calcin présente de nombreux avantages pour l'environnement, ainsi que pour le verrier. En effet :

- Elle ne nécessite pas l'extraction de matières premières naturelles et évite la consommation de 60 Kg de fuel par tonne de calcin utilisé pour l'extraction des matières premières naturelles ;
- Elle évite le transport de matières premières naturelles sur de longues distances pour transporter le calcin sur de plus courtes distances. Elle limite donc la pollution atmosphérique due au déplacement ;
- Elle limite le rejet dans l'atmosphère de polluants (dioxyde de carbone et dioxyde de soufre) causé par la fabrication du verre à partir de matières premières naturelles, les matières se trouvant déjà sous la forme d'oxyde (moins 200 kg de CO<sub>2</sub> rejeté par tonne de calcin utilisé) ;
- Elle diminue la température de fusion (le calcin doit être chauffé à une température plus basse que les matières premières naturelles pour être fondu). Elle permet donc l'économie de 40 kg de fuel par tonne de calcin utilisé.

Cependant, l'industrie ne peut pas fabriquer de verre uniquement à partir de calcin. Il est nécessaire d'introduire des matières premières naturelles afin de corriger les propriétés du lit de fusion (couleur, propriétés optiques, mécaniques, etc.) et ainsi obtenir une homogénéité dans la qualité du produit fabriqué. De plus, la nature du calcin est très importante car elle détermine son intégration dans la composition de certains verres :

- Le verre d'emballage coloré contient du calcin issu de verre d'emballages coloré, incolore ou mixte ;

- Le verre d'emballage incolore ne peut contenir que du calcin incolore ayant pour origine les emballages ;
- Le verre à vitres ne peut contenir que du calcin incolore essentiellement composé de chutes de découpe de verre à vitres ;
- Le verre pour ampoules électriques et tubes fluorescents, ainsi que celui pour les écrans, ne pourront contenir que du calcin de même nature.

### II.7.2.3. Le lit de fusion

Les proportions d'introduction du calcin et des matières premières naturelles sont différentes pour chaque type de verre. Pour le verre d'emballages on distingue :

#### A- Le verre coloré

Le verre d'emballage coloré est le verre qui admet actuellement la plus grande part de calcin dans sa fabrication. Le système de fabrication du verre en France permet d'introduire jusqu'à 90 % de calcin dans le lit de fusion. La quantité de calcin incorporée dépend de la teinte désirée pour le verre :

- Le verre « vert » (bouteilles de vins, de bières, etc.) peut accepter jusqu'à 90 % de calcin mixte ou de couleur verte ;
- Le verre « feuille morte » (bouteilles d'apéritifs anisés, etc.) peut accepter jusqu'à 50 % de calcin coloré mixte et jusqu'à 25 % de calcin incolore contenant moins de 5 % de verre coloré ;
- Le verre « brun jaune » (bouteilles d'apéritifs, de bières, etc.) peut accepter 20 % de calcin coloré mixte et 30 % de calcin incolore contenant moins de 2 % de verre coloré ; Il est donc indispensable de compléter les 10 %, ou plus, du lit de fusion par des matières naturelles introduites dans les proportions suivantes :

**Tableau II.2.** Proportion des matières premières naturelles du verre d'emballage coloré.

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
73%	1%	15%	10%	0,05%

La composition des matières premières atteint 99,05 % de la masse totale à introduire. Elle devra être complétée par des constituants secondaires afin de rectifier la teinte du verre et d'améliorer les conditions d'élaboration.

*B- Le verre incolore*

Le verre d'emballage incolore peut contenir 10 % de calcin incolore contenant moins de 0,5 % de verre coloré. Le restant du lit de fusion est composé de matières premières naturelles, introduites dans les proportions suivantes :

**Tableau II.3.** Proportion des matières premières naturelles du verre d'emballage incolore

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO
74%	1%	15%	10

Les matières premières utilisées doivent être d'une plus grande pureté que celles utilisées pour la fabrication de verre coloré.[10]

### II.7.3. Transformation du verre usagé en matériau isolant

De plus en plus de tessons de verre mélangés sont transformés en verre cellulaire breveté. Deux usines suisses produisent ce matériau de construction aux multiples possibilités d'utilisation, à la fois léger et doté de hautes propriétés isolantes. [12]

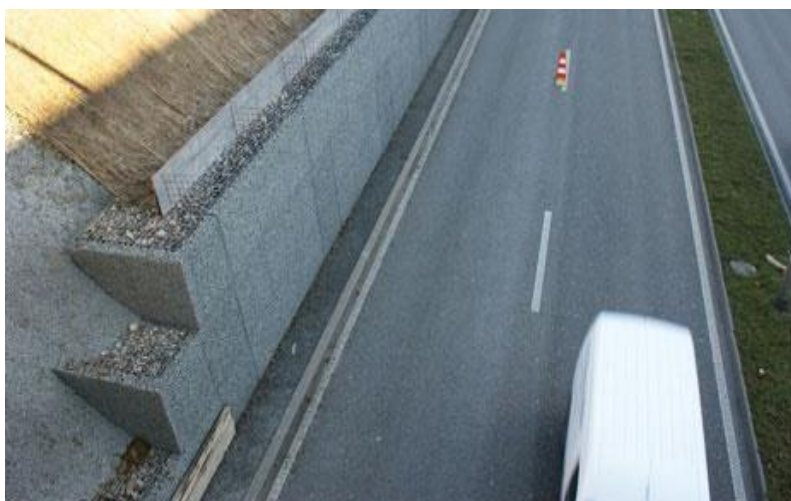


**Figure II.4 :** Maison en béton isolant.[12]

Les domaines d'utilisation du verre cellulaire sont nombreux : dans le bâtiment, ce matériau de construction est surtout utilisé comme isolation thermique contre terre et sur les toits plats. En génie civil, il est utilisé comme couche de drainage et d'isolation thermique ou comme remblayage en cas de conditions géologiques difficiles : En présence d'un sol d'infrastructure mou, ayant

tendance à s'affaisser, le verre cellulaire est utilisé comme matériau plus léger : le déblai lourd est remplacé par du verre cellulaire léger. Même chose avec la construction normale des routes.

Le verre cellulaire permet d'économiser du poids, afin que les poteaux ne soient plus nécessaires pour protéger le sol des abaissements. Le fabricant de verre cellulaire Misapor a récemment développé le béton isolant : si l'on mélange du verre cellulaire avec du ciment, on obtient un béton qui conserve ses propriétés statiques traditionnelles, soit la résistance à la compression et à l'écrasement. Grâce au verre cellulaire, le béton devient considérablement plus léger et atteint de bonnes valeurs d'isolation. Il est ainsi superflu d'ajouter d'autres couches d'isolation thermique, ce qui permet de réaliser des constructions monolithiques en béton apparent. Le béton isolant sert également d'accumulateur de chaleur et assure un climat ambiant agréable. [12]



**Figure II.5 :** Protection contre le bruit + construction des routes.[12]

Le verre cellulaire est fabriqué à partir de pratiquement cent pour cent de verre recyclé. Les tessons de verre usagé sont tout d'abord broyés, puis mélangés à une « poudre de cuisson » purement minérale et enfin cuits au four d'expansion durant une heure à des températures pouvant aller jusqu'à 950 degrés. Il en ressort un matériau léger comme une plume, ressemblant à de la pierre de lave, qui est concassé par un processus de refroidissement rapide pour atteindre la taille d'un gravillon. La grande quantité d'inclusions d'air entraîne une excellente valeur d'isolation avec en même temps une résistance élevée à la compression. Étant donné que les poches d'air sont fermées sur elles-mêmes, les gravillons n'absorbent pas d'eau. Par contre, de l'eau peut s'infiltrer librement entre les gravillons. Le matériau a d'autres qualités qui sont extrêmement précieuses pour la construction : il résiste au feu et à la chaleur et résiste aux sels, acides, bactéries et autres influences de l'environnement. [12]

## II.8. Comportement du verre dans un milieu cimentaire

Le verre incorporé dans les bétons peut manifester plusieurs types de comportement, essentiellement en fonction de sa granularité : une granularité grossière tend à provoquer un phénomène d'alcali-réaction générateur de désordres, alors qu'un verre fin développe une action bénéfique identifiable à une réaction pouzzolanique.[13]

L'activité pouzzolanique du verre peut être évaluée par diverses méthodes : les tests mécaniques sur éprouvettes de mortier et béton à base de ciment ou sur des mortiers à base de chaux, ou encore tests chimiques de consommation de chaux notamment par ; l'essai Chapelle, ATG et DRX. La Figure (II.6) suivante rassemble les résultats de quelques travaux effectués entre les années 2000 et 2006 qui traitent de l'activité pouzzolanique du verre. L'indice d'activité est défini comme étant le rapport de la résistance du mélange avec ajout de verre à la résistance du mélange témoin. Il a été difficile, voire impossible, de rassembler tous les travaux élaborés dans les mêmes conditions. Toutefois les conclusions suivantes peuvent être dégagées :

- La taille des grains de verre joue un rôle prépondérant sur l'activité pouzzolanique : plus les grains de verre sont fins, meilleure est son activité pouzzolanique.
- La résistance des mortiers et bétons diminue à mesure que leur teneur en verre augmente.
- L'activité pouzzolanique varie d'un verre à un autre, selon leurs couleurs, le verre brun est le verre qui possède la plus faible activité, par contre le verre vert et le verre blanc présentent une activité pouzzolanique considérable. [13]

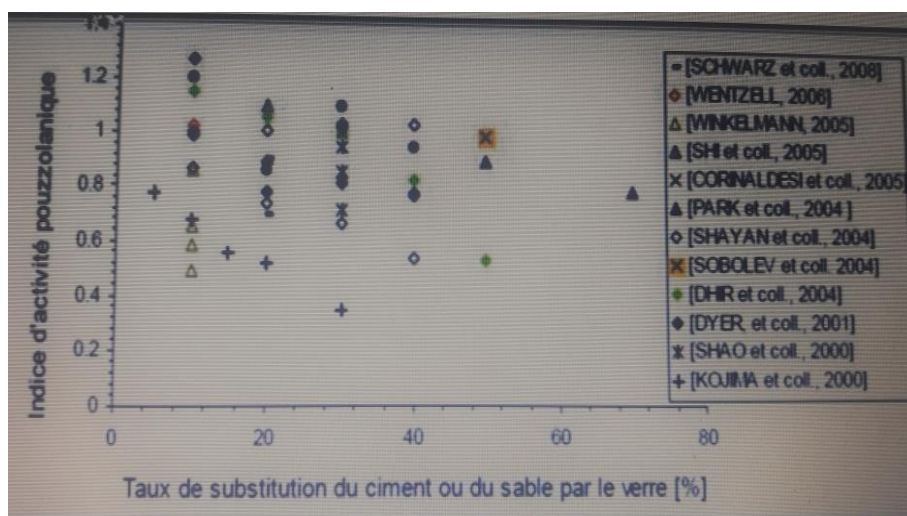


Figure II.6 : Indices d'activité pouzzolanique du verre utilisé dans des conditions différentes [14]

### II.8.1. Comparaison du verre à d'autres pouzzolanes

La cinétique de la réaction du verre est plus rapide que celle des cendres volantes qui ne réagissent qu'après une à plusieurs semaines, lorsque la concentration des alcalins dans la solution interstitielle est devenue suffisante : en effet, dans le cas du verre, celui apporte lui-même les alcalins nécessaire au déclenchement de la réaction. Par exemple, une substitution de 30% du ciment dans les bétons affiche une meilleure résistance en compression que ceux confectionnés avec de la cendre volante.

Ces auteurs ont montré qu'à trois jours de cure, la résistance des mortiers comportant 20% de verre en remplacement de ciment est 70% plus importante que celle de mortiers confectionnés avec de la cendre volante. Cela pourrait s'expliquer notamment par les alcalins qui sont disponibles plus rapidement et en plus grand nombre dans le cas du verre qu'ils ne le sont dans celui de la cendre volante. [13]

Concernant ce point, plusieurs études en laboratoire ont été conduites. L'utilisation simultanée d'un verre et d'une pouzzolane notamment la fumée de silice, la cendre volante ou même le métakaolin en remplacement d'une fraction du ciment pourrait conduire à des synergies intéressantes. Ainsi l'utilisation du verre serait plus intéressante que son emploi individuel.[13]

### II.8.2. Réaction alcali-silice du verre

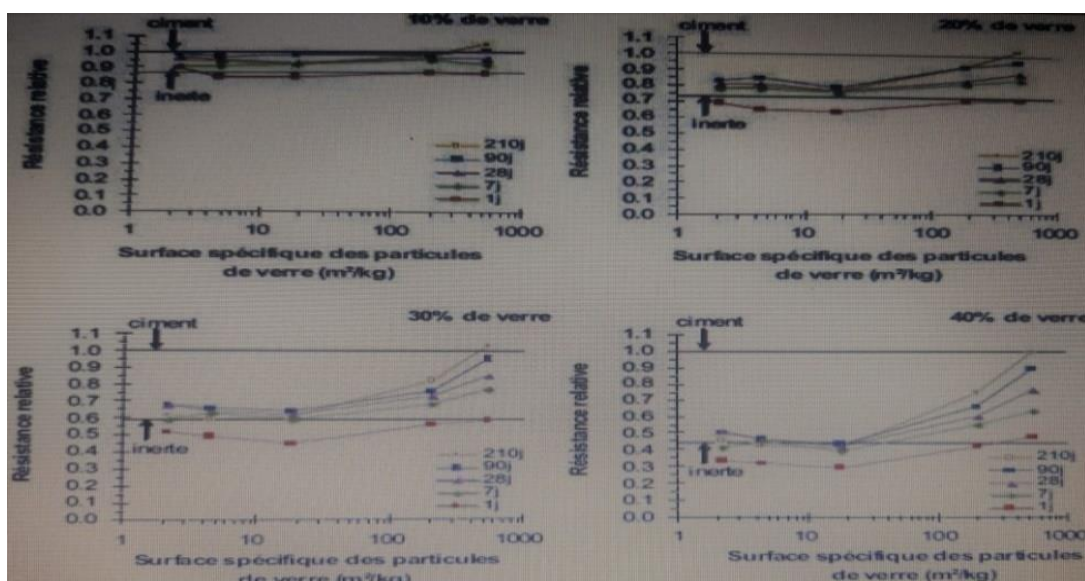
Le remplacement partiel du granulats naturel ou du ciment par le verre dans les bétons, améliore ses propriétés mécaniques notamment les résistances en compression. Toutefois, certains travaux conseillent l'utilisation de ce matériau en prenant certaines précautions. Effectivement, les bétons à base de verre sont confrontés à un problème lié à leur durabilité. La silice du verre en combinaison avec les alcalins du ciment donne naissance à des produits gonflants qui entraînent l'endommagement des bétons. La réaction alcali-silice du verre dépend de différents paramètres, la bibliographie a montré que le processus de la réaction alcali-silice en général et des granulats de verre est un phénomène complexe influencé par plusieurs facteurs. [13]

### II.8.3. L'activité des fines et des granulats de verre

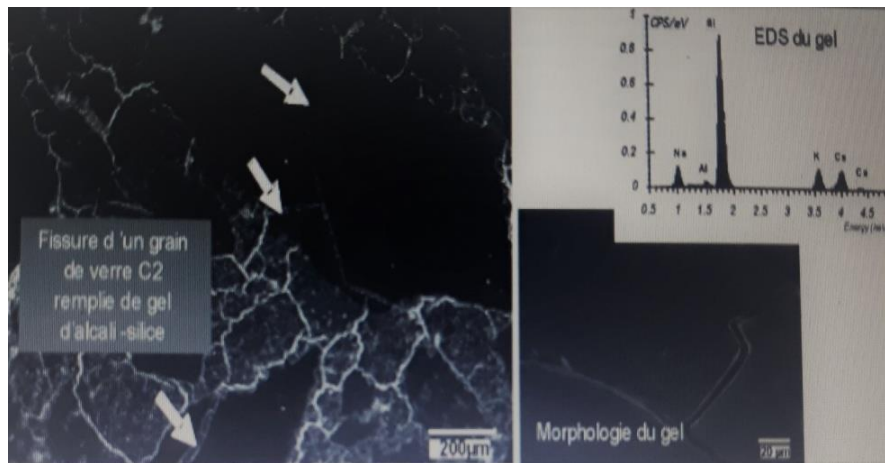
Le verre peut présenter deux types de comportements dans une matrice cimentaire : la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique. La réaction alcali-silice qui est délétère, généralement associée aux grosses particules, est liée à la formation de gels composés principalement de silice et d'alcalins (Na et K) avec de faibles quantités de calcium (qui ont tendance à augmenter avec le temps).

Les résultats des variations dimensionnelles de la première partie ont montré qu'un diamètre critique (ou seuil) autour de 0.9- 1mm (classe C2) a été observé au-dessous duquel aucune expansion n'a eu lieu. Seules les grosses particules (classes C1 > 1.25 mm) conduisent à une expansion significative des éprouvettes. Les particules de taille inférieure à ce seuil n'ont aucun effet sur les variations dimensionnelles. Néanmoins dans ce cas, l'absence de gonflement n'est pas synonyme d'absence d'alcali-réaction. En effet, des signes de RAS sous la forme d'exsudations ont été aperçus la surface les éprouvettes Contenant des particules de verre supérieure sa 315 $\mu$ m. Des observations au microscope électronique balayage figure (II.7) ont confirmé la présence de gels de RAS sur ce type de mélanges.

La classe C4 (160-315 $\mu$ m) est la finesse de transition : aucun gel de RAS n'a été détecté, cependant il est à noter que ce type de gel est difficile à détecter lorsque les particules sont de petites tailles en raison du gel qui se diffuse dans la pâte. Ainsi, la RAS ne peut pas être écarté pour les particules fines, mais la réaction pouzzolanique (avec de plus fortes teneurs en calcium que les gels de RAS) est probablement majoritaire. La coexistence des deux réactions ne peut être exclue, mais l'effet de la réaction pouzzolanique prend le dessus sur la RAS dans le cas des fines particules.[14]



**Figure II.7.** Résistances relatives (%) des mortiers en fonction des finesses du verre. Comparaison, avec les courbes de dilution obtenues par la loi de Bolomey. [14]



**Figure II.8** : Particule de verre fissurée (classe C2) remplie de gel de RAS (cure 60°C- 100%HR) [14].

La réaction pouzzolanique est généralement associée à de fines particules amorphes qui, en réagissant avec le ciment, forment des Silicates de Calcium Hydratés (C-S-H\*) avec de faibles rapports Ca/Si (<1.4). Ces C-S-H sont capables de fixer une quantité importante d'alcalins comparés à des C-S-H classiques (Ca/Si ~1.7) issus de l'hydratation du ciment.

En présence de fortes concentrations en alcalins, ces C-S-H avec de faibles rapports C/S ont tendance à avoir une composition proche de C- (N, K) -S-H, avec des rapports (N+K) /S supérieur à 0.2. D'une part il semblait évident, considérant l'augmentation significative des résistances en compression dans le temps, que les classes les plus fines (C6, C8) présentent une activité chimique. D'autre part, de légères augmentations de résistance en compression ont été également obtenues pour les grosses particules de verre Figure (II.8). Dans ce cas, l'augmentation des résistances ne peut être attribuée à un effet physique, comme la germination associée à de fines particules, étant donné la taille des grains. Ainsi on peut supposer qu'une activité chimique (réaction pouzzolanique) des grosses particules ne peut être négligée. [14]

## II.9. Conclusion

Avec son évolution considérable ces dernières années, le traitement des déchets apporte de nombreux enjeux environnementaux et économiques. En partie de l'environnement est donc écologique, la notion à retenir est "trier" afin de réduire le nombre de déchets et donc l'impact sur l'environnement. Il faut cependant réaliser ce tri en respectant une éthique durable, conformément au développement durable. Par contre aux niveaux économiques, il est nécessaire de valoriser les déchets à leurs avantages. Il ne faut donc pas les détruire sans valorisation mais les utiliser pour fabriquer et créer en les recyclant. Cette démarche permet alors de multiples bénéfices économiques. Le traitement des déchets et aussi ses transformations sont donc un véritable enjeu économique et écologique.

**Référence Biographique**

[1] **Mathieu Duarand, Yamna Djellouliet et Cyrille Naoarine (dir)** « Gestion des déchets »

ISBN 978-2-7535-4181-8 Presse université de Rennes ,2015 ; [www.pur-edition.fr](http://www.pur-edition.fr).

[2] **Les déchets et leur élimination.** « Les déchets en chiffre : Edition 2015 » ADEME. Fiche 25 à 46.

[3] **Djouder Katia et Hamssa Lynda** ; « Gestion des déchets ménage en Algérie : Etat des lieux et perspectives » ; mémoire de fin d'étude Option : Economie Industrielle. Université Adderahmane Mira Béjia ; (Année 2017/2018)

[4] **ADEME** Agence de l'environnement du Maître de l'énergie. Changement climatique- Transition écologique –Energétique. L'article concernant Qu'est –ce qu'un déchet ? Mais à jour le 30/01/2020.

[5] Les déchets : Définition ; Gestion Collecte, Traitement ; Responsabilités police spéciale. SPI Secrétariat Permanent pour la Prévention des Pollution Industrielle en Val de Seine ; Versailles France. [Spi.vds@developpement-durable.gouv.fr](mailto:Spi.vds@developpement-durable.gouv.fr) ; [www.spi-vds.org](http://www.spi-vds.org) .Sur papier PEPC-2014.

[6] **Bensmaol Salem** ; « La problématique de la gestion des déchets solides à travers le mode de traitement des déchets ménages et hospitalier : Cas de la commune de Béjia » ; Magistère en Science Economique. Option : Economie de l'environnement Année 2010 [6].

[7] **Enteformation : Gestion et traitement des déchets.** Rédiger par Anne–France DIDER. Version 2 : Mars 2013.

[8] **HAL : archives-ouverts.fr** ; « Les déchets ». Yvom Pesqueux. Le déchet. Doctorat, Sénégal 2016.Cel -01325113.

[9] **Ait Maamar Chahrazed et Kechout Aghilas** « Contribution à l'étude de l'état de la gestion des déchets ménagers et assimilés dans la commune de Tizi-Ouzou. » mémoire de fin d'étude Spécialité : Gestion des déchets Solides. Département de Science Biologique UMMTO. (Année 2015/2016)

[10] **La Collecte, Le Tri et Le Recyclage du verre Des Déchets ménagers et Assimiles.** Le dossier Thématique réaliser par le Cercle National du Raclage de Lille ; France (2008)

[11] **Nicholes Chévalier** ; Essai présenté au centre université de formation en enveniment et développement durable en vue d'obtenir de garde de Maître en enivrement. Sous la direction de Monsieur François Lafortune Maître en environnement Université de Sherbrooke. (Année Juin 2018).

[12] **Vetroswiss** ; publication sur Pour un recyclage efficace du verre. Vetroswiss est membre de Swiss Recycling et IGSU.

[13] **Zeroub Hamid** « Valorisation du verre dans l'élaboration de béton durable » pour le diplôme Magister Option : Physico-chimie des matériaux minéraux. Université M'Hamed Bougara Boumerdes. (Année 2012)

[14] **Zoubiri Amina** « Comportement du béton à base de la poudre de verre à haute températures Effets de l'âge » projet de fin d'étude Spécialité : Matériaux. Université Mohamed Bouadiaf M'Sila. (Année 2015/2016).



# Chapitre III

## Confinement Du Béton

### III.1. Introduction

Le béton est le matériau manufacturé le plus utilisé dans le monde. Il est notamment utilisé pour la construction des infrastructures les plus sensibles (ouvrage d'art, barrages, centrales nucléaires ...). Pourtant son comportement mécanique reste encore mal connu, en particulier sous sollicitations extrême [1].

Un constat alarmant de par le monde montre qu'un nombre important de constructions en service nécessitent un renforcement de la structure, afin de les mettre en conformité avec les niveaux de sécurité exigés par les différentes réglementations en vigueur, dont les exigences en déformabilité et en résistance.[2]

En Algérie comme ailleurs dans le monde, une grande partie du patrimoine national et des infrastructures de transport ont atteint la fin de leur durée de vie utile. Des études et expertises ont montré l'urgence de développer des techniques de réhabilitation permettant de redonner aux structures telles que les anciens édifices et les ponts, les capacités structurales nécessaires pour résister aux sollicitations auxquelles elles sont soumises. Parmi les techniques envisagées, l'utilisation des matériaux composites est très prometteuse. L'une de ces méthodes consiste à améliorer le comportement mécanique des colonnes en béton armé par l'application d'un confinement réalisé par l'enroulement et le collage externe d'une enveloppe en matériaux composites. [3]

### III.2. Nécessité de confinement

Les causes conduisant à renforcer les structures sont assez nombreuses, parmi les plus fréquentes on peut citer :

#### A. *Accroissement des charges qui sollicitent la structure*

- Changement d'usage de la structure (exemple : bâtiment d'habitation réhabilité en centre commercial).
- Augmentation du niveau d'activité dans la structure (exemple : anciens ponts soumis au trafic actuel).
- Installation de machinerie lourde dans les bâtiments industriels.

#### B. *Défauts dans le projet ou dans l'exécution*

- Armature insuffisante ou mal placée.

- Mauvais matériaux.
- Dimensions insuffisantes des éléments structurels.
- Rénovations des structures anciennes :
- Prise en compte de renforts par des sollicitations non considérées au moment du projet ou de la construction (vibration, actions sismiques et autres)
- Connaissance des insuffisances de la méthode de calcul utilisée lors de la conception, ainsi que des limitations montrées par des structures calculées durant une époque où une période.
- Vieillesse des matériaux avec une perte des caractéristiques initiales.

#### *C. Changements de la forme de la structure*

- Suppression de poteaux, piliers, murs porteurs, élargissement de portées de Calcul.
- Ouverture de passages en dalles pour escaliers ou ascenseurs.

#### *D. Dégâts dans la structure*

- Corrosion et diminution de la section des armatures dans le béton.
- Impacts contre la structure.
- Nécessités d'améliorer les conditions en service :
- Diminuer les déformations et flèches.
- Réduire l'intensité des contraintes sur les armatures.
- Diminuer l'ouverture des fissures.[4]

### **III.3. Démarche expérimentale du collage des composites sur le béton**

Il existe deux procédés de fabrication du composite : le système avec une fabrication in-situ et le système préfabriqué.

#### **III.3.1. Le système avec une fabrication in-situ**

Deux processus différents peuvent être utilisés pour mettre en place un composite sur des surfaces en béton :

- Application de la résine sur la surface du béton suivi de jonction d'un tissu sec qui est appliqué directement sur la résine, finalisé par l'application d'une couche de fermeture.
- Pré-imprégnation du tissu, puis son dépôt avant polymérisation sur la surface de béton.

### III.3.2. Le système préfabriqué (plaque préfabriquée)

Des lamelles sont préfabriquées et qui sont installées, une fois durcies, sur la surface du béton en utilisant un adhésif. La préparation de la surface du béton est obligatoire, puis la plaque est collée sur le béton.[4]

### III.4. Comportement du béton confiné

Donc dans le souci essentiel de déterminer un renforcement dans les structures de béton pour augmenter la capacité portante, la déformabilité (ductilité) ou pour améliorer le comportement de l'ouvrage à l'état de service, des recherches expérimentales ne cessent d'être entreprises par des spécialistes dans ce sens. Des différentes techniques de renforcements sont apparues, celle qui fait l'objet de notre étude est la technique de confinement du béton par des matériaux composites.

Le confinement du béton se réalise à l'aide d'enveloppes en matériaux composites à base de fibres de verre, de carbone et d'aramide et autres. Les composites offrent des modules d'élasticité et des rigidités variés pouvant modifier le comportement axial et radial du béton confiné. Sous l'action d'une charge de compression axiale, le béton présente une déformation latérale, Cette déformation engendre une fissuration qui ne cesse d'augmenter jusqu'à la rupture du béton. Lorsque le béton est retenu latéralement (par collage de composites) de façon à réduire, voire empêcher cette déformation, sa résistance à la compression ainsi que sa ductilité augmentent. La figure (III.1) présente les courbes typiques contraintes déformations pour des bétons confinés et non confinés. Le confinement augmente en général deux caractéristiques du béton : la résistance en compression et la déformation correspondant à la contrainte ultime de compression.[4]

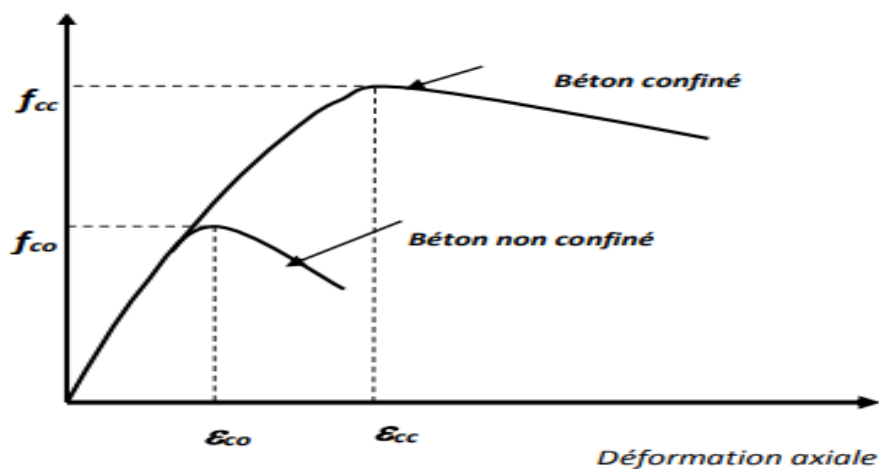


Figure III.1 : Courbes contraintes déformations d'un béton confiné et non confiné.[4]

### III.5. Mode de rupture du béton confiné

Les structures en béton confinés avec des composites FRP présentent un comportement similaire et donc le même mode de rupture, tel que montré sur la figure (III.2). La rupture ainsi produite est brutale à cause de l'énergie emmagasinée par les FRP durant le chargement des spécimens. Cette rupture des cylindres confinés a été caractérisée soit par la rupture la matrice béton, ou bien dans le sens longitudinal, des bandes de FRP.



Figure III.2 : Mode de rupture des cylindres confinés avec le FRP. [4]

Après rupture, le béton fissuré reste retenu à l'intérieur du confinement, jusqu'à la rupture totale des bandes composites. C'est le comportement classique d'un béton confiné sous compression axiale, tel que schématisé sur la figure(III.3).[4]

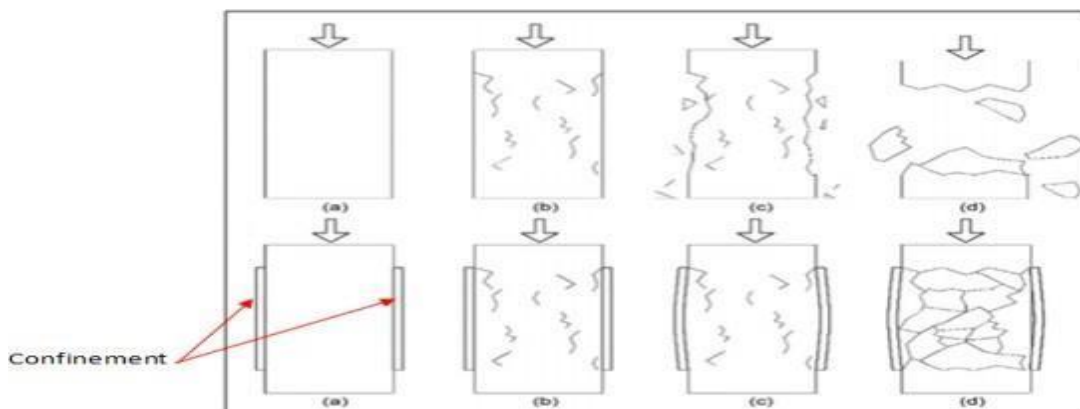


Figure III.3 : Évolution des dommages des colonnes confinées et non confinées pendant le chargement [4].

L'amélioration des résistances des cylindres confinés résulte de la conjugaison des performances mécaniques des matériaux composites. Elle est réalisée grâce au confinement du béton qui se trouve emprisonné à l'intérieur des bandes composites, qui confèrent au cylindre en béton une énergie de rupture très importante. [4]

### III.6. Comportement des mortiers sous fort confinement

Le mortier en tant que tel est rarement utilisé comme matériau de construction, mais est un matériau dont les caractéristiques se rapprochent des bétons, et en outre constitue une partie du béton. L'absence de gros granulats implique que l'on peut considérer des échantillons de mortier comme homogènes dès des dimensions réduites. Cela a longtemps rendu son étude plus aisée que celle du béton, étant donné les limitations techniques imposées par les presses triaxiales à fort confinement. Il concentre en outre les principales variations possibles dans la composition d'un béton : type de ciment, rapport E/C, adjuvants ; ensuite, le taux de saturation du béton dépend pratiquement uniquement de celui du mortier ; enfin les dégradations d'origine chimique agissent aussi sur lui. Cela en fait donc un matériau adapté à des études du comportement mécanique sous l'influence de variations de ces différents paramètres. Plusieurs auteurs ont donc décrit les caractéristiques de son comportement mécanique non confiné ou sous confinement. [5].

#### III.6.1. Phénomène de compaction

Une des propriétés remarquables du mortier à l'état initial est sa forte porosité, qui est parfois supérieure à 30 %. Une étude du comportement sous fort confinement du mortier passe donc par l'étude du comportement volumique, qui met en évidence le phénomène de compaction, phénomène diffus qui modifie les propriétés élastiques du matériau et induit des déformations irréversibles. Deux axes sont possibles pour les essais expérimentaux : un chargement en déformation uniaxiale, ou chargement oedométrique, qui est plus facile à mettre en œuvre, ou un chargement de compression hydrostatique, qui nécessite l'utilisation d'un fluide pour l'application de la pression de confinement.

La première méthode, qui a été utilisée par *Bazant et al.* (1986) et *Burlion* (1997) présente l'avantage de permettre, avec un confinement passif, donc une simple presse, l'obtention de très fortes déformations volumiques. Son principal inconvénient est d'entraîner un état de contraintes non homogène dans l'échantillon, ce qui peut nuire à la bonne compréhension des phénomènes

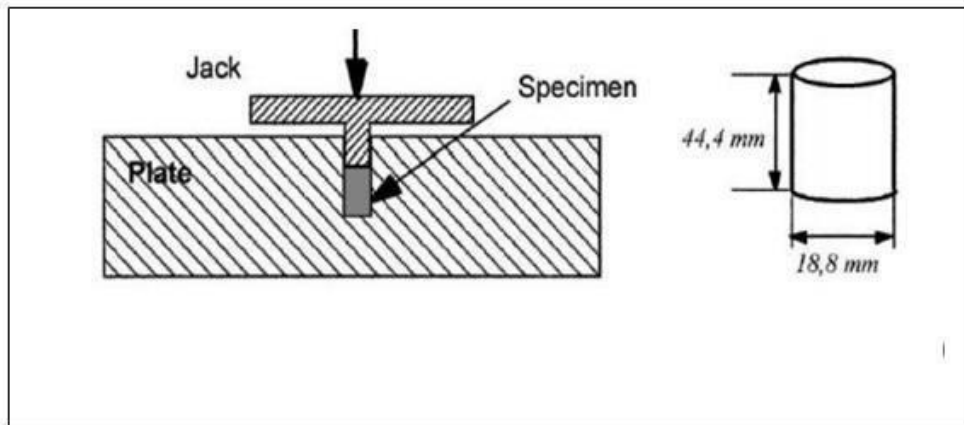
mécaniques s'y déroulant. La seconde méthode a été utilisée par *Burlion et al.* (2001) pour comparaison avec des essais oedométriques, et par *Williams et al.* (2005).

Une revue de ces différents essais laisse apparaître des disparités très nettes à la fois dans les méthodes utilisées et dans les résultats. Les premières méthodes pour réaliser des essais de déformation uniaxiale consistaient à utiliser une chemise métallique relativement mince placée autour de l'échantillon du matériau étudié, supposé de module élastique très inférieur à celui de l'acier. Des jauges de déformations placées sur la chemise permettent d'accéder à la contrainte latérale appliquée à l'échantillon, tandis que des capteurs de force et de déplacement placés axialement renseignent les contraintes et déformations axiales. Ces méthodes ne permettent cependant pas d'aller dans le domaine des très hautes pressions, car l'essai était souvent arrêté par la rupture de la chemise, en particulier avec un matériau comme le béton dont le module d'Young est tout de même de l'ordre de 15 % de celui de l'acier.

Une autre méthode fut celle utilisée par *Bažant et al.* (1986) : au lieu de mesurer les contraintes latérales, les auteurs ont préféré s'assurer que les déformations latérales restaient nulles, et ont donc utilisé une chemise métallique de très grandes dimensions par rapport à celles de l'échantillon, selon le principe montré figure (III.4) ci-dessous. Cette méthode est bien sûr la plus proche de la théorie, mais certaines grandeurs demeurent inaccessibles.

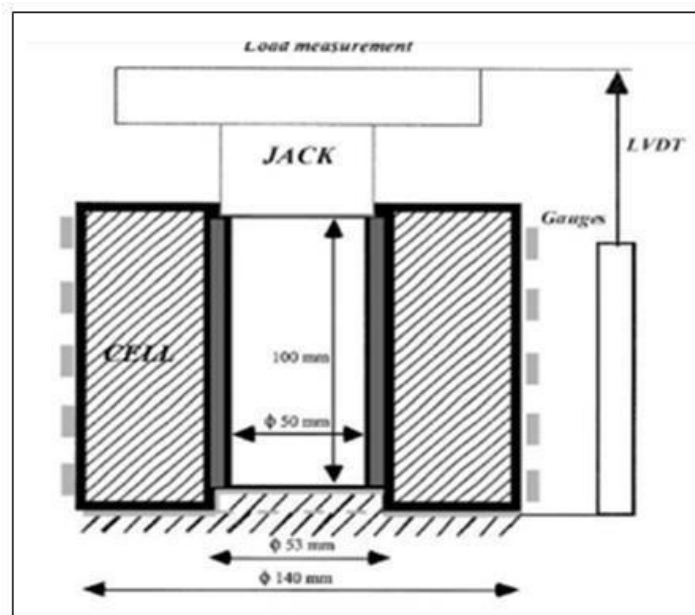
*Burlion* désirant aussi utiliser son dispositif pour l'étude d'un béton, il avait besoin de pouvoir étudier des échantillons de dimensions plus importantes. Il a donc utilisé le premier principe présenté, mais avec une chemise beaucoup plus épaisse et largement instrumentée, ainsi qu'on peut le voir figure (III.4). Ainsi les essais ont pu être menés jusqu'à de fortes contraintes moyennes, en préservant des déformations radiales très faibles et en mesurant la contrainte latérale en plusieurs points.

Son étude approfondie des phénomènes se déroulant lors de cet essai l'ont conduit à adopter des méthodes concernant le remplissage de l'espace initial entre l'échantillon et la chemise, le graissage de la chemise, et la prise en compte de ces biais dans la mesure.



**Figure III.4 :** Évolution Schéma de principe des essais œdométriques de *Bažant et al.* [5]

*Williams, Akers et Reed* ont eu choisi d'utiliser une presse triaxiale de révolution classique, dans laquelle l'échantillon est donc entouré de simples membranes, et où le confinement latéral est contrôlé par un système d'asservissement de la pression de confinement aux déformations latérales. Celles-ci sont mesurées par un capteur LVDT monté sur des bras reliant deux plaques elle-même collées en vis-à-vis sur l'échantillon. Ce dispositif, présenté figure (III.5), présente l'avantage de réduire toute influence liée aux frottements entre l'échantillon et la chemise, mais sa précision dépend entièrement de celle du dispositif de mesure, qui repose sur un LVDT lui-même très sensible à la pression, comme cela a été prouvé par *Gabet (2006) et Vu (2007)*, et qui en outre est localisé au centre de l'échantillon et ne peut donc garantir que l'état de déformations est homogène.[5]



**Figure III.5 :** Schéma de principe des essais œdométriques de *Burlion et al.* [5].

Tous les essais hydrostatiques sont réalisés dans des appareillages similaires à celui présenté figure (III.6), mais sans utilisation du vérin axial. [5]

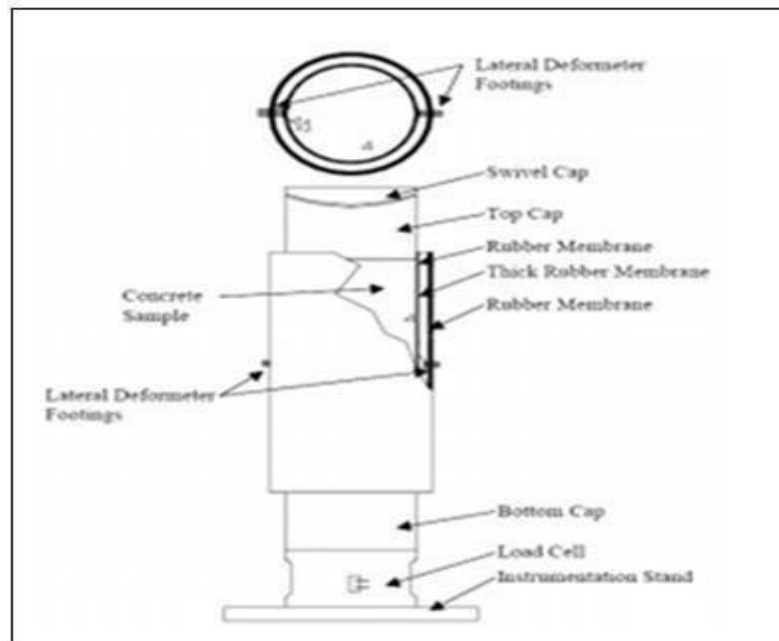


Figure III.6 : Schéma de principe des essais œdométriques et hydrostatiques de Williams *et al.* [5].

### III.7. Béton confiné avec des composites « PRF »

Lorsqu'une colonne en béton confiné avec des composites PRF est soumise à une compression axiale, le béton s'étend latéralement et cette expansion sera empêchée par l'enveloppe en PRF. Pour les sections circulaires figure (III.7) ci-dessous, le béton est soumis à un confinement uniforme, et la pression maximale de confinement fournie par le PRF est en rapport direct avec l'épaisseur et la résistance à la traction du composite PRF ainsi que le diamètre de la section du béton confiné [1-6]. Cette pression de confinement se calcule pour les sections circulaires par la relation suivante

$$f_l = \frac{2 f_{prf} t_{prf}}{d} \quad (1)$$

Avec :

$f_l$  : la pression de confinement latérale due au PRF,

$f_{prf}$  : la résistance à la traction du composite PRF (égale à  $E_{prf} \cdot \epsilon_{fu}$ ),

$t_{prf}$  : l'épaisseur totale du PRF,

$d$  : le diamètre de la section du béton,

$E_{prf}$  : le module d'élasticité du composite PRF,

$\epsilon_{fu}$  : la déformation ultime de traction du composite PRF.

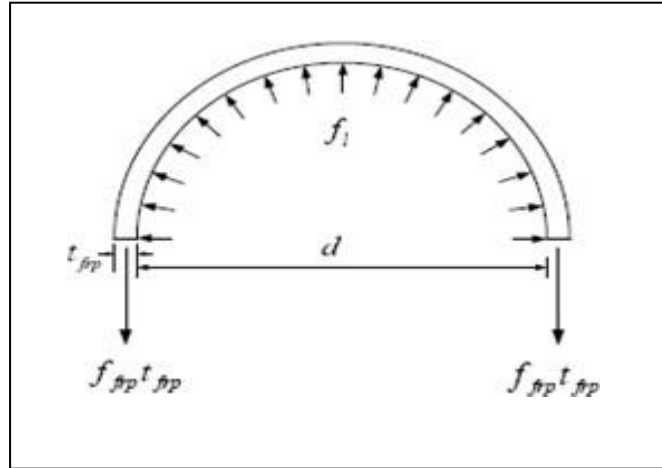


Figure III.7 : Action de confinement d'un composite PRF. [6]

L'utilisation des composites PRF donne une résistance aux déformations dues aux charges axiales qui résultent d'un confinement des contraintes développées dans le béton, ce qui améliore à la fois la contrainte de compression ultime et la ductilité du béton. [3].

Selon les résultats obtenus par les chercheurs, la rupture des spécimens s'est produite prématurément avant que les composites PRFC n'atteignent leurs capacités de déformation ultimes  $\epsilon_{fu}$ . Cette déformation de rupture ( $\epsilon_r$ ) est appelée « la déformation circonférentielle effective du composite ». Ce phénomène affecte considérablement la précision des modèles existants pour le béton confiné avec des matériaux composites. Les rapports entre la déformation radiale de rupture ( $\epsilon_r$ ) et la déformation ultime du composite PRFC ( $\epsilon_{fu}$ ) sont regroupés dans le Tableau (III.1). En se basant sur les résultats expérimentaux, le coefficient de déformation effective du composite PRFC noté «  $\eta$  » représentant le rapport ( $\epsilon_r/\epsilon_{fu}$ ) a une valeur moyenne de 0,73. Cependant, la pression de confinement latérale effective due au composite sera comme suit : [3]

$$f_{l,eff} = \frac{2 t_{prf} E_{prf} \epsilon_r}{d} = \frac{2 t_{prf} E_{prf} \eta \epsilon_{fu}}{d} = \eta f_l \tag{2}$$

**Tableau III.1** : Valeurs du coefficient de déformation effective  $\eta$  des spécimens testés.

Série de béton	Code spécimens	$\epsilon_{fu}$ (‰)	$\epsilon_r$ (‰)	$\epsilon_r/\epsilon_{fu}$
I (26 MPa)	Cy.160-BA26-1P <sub>1</sub>	14	13,15	0,939
	Cy.160-BA26-1P <sub>2</sub>	14	13,16	0,940
	Cy.160-BA26-3P <sub>1</sub>	14	14,06	1,004
	Cy.160-BA26-3P <sub>2</sub>	14	12,42	0,887
	Cy.160-B26-1P <sub>1</sub>	14	13,12	0,937
	Cy.160-B26-3P <sub>1</sub>	14	13,18	0,941
II (50 MPa)	Cy.160-BA26-1P <sub>1</sub>	14	13,17	0,940
	Cy.160-BA26-1P <sub>2</sub>	14	13,16	0,940
	Cy.160-BA26-3P <sub>1</sub>	14	13,20	0,942
	Cy.160-BA26-3P <sub>2</sub>	14	13,17	0,940
	Cy.160-B26-1P <sub>1</sub>	14	2,90	0,207
	Cy.160-B26-3P <sub>1</sub>	14	13,15	0,939
III (62 MPa)	Cy.160-BA26-1P <sub>1</sub>	14	7,79	0,556
	Cy.160-BA26-1P <sub>2</sub>	14	2,61	0,186
	Cy.160-BA26-3P <sub>1</sub>	14	4,10	0,292
	Cy.160-BA26-3P <sub>2</sub>	14	7,15	0,510
	Cy.160-B26-1P <sub>1</sub>	14	2,46	0,175
	Cy.160-B26-3P <sub>1</sub>	14	12,89	0,920

### III.8. Renforcement de colonnes par confinement latéral

Le confinement latéral de colonnes en béton par l'enroulement d'une enveloppe en matériau composite sur la Surface de béton permet d'augmenter la résistance à la compression et la déformation ultime parce qu'il restreint la formation et l'ouverture des fissures dans le béton et limite les déformations transverses dues à la fissuration interne. Il présente également l'avantage d'augmenter la résistance au cisaillement et d'empêcher les barres d'armature longitudinale de flamber *Nanni et al*, (1993) Dans ce type d'élément, le béton résiste à la compression alors que le composite est sollicité par des efforts de tension et de cisaillement.

Le confinement avec une enveloppe composite présente les avantages suivants : il est immédiat ; il est peu sensible aux déformations axiales ; l'enveloppe ne décolle pas ; sa mise en place est simple *Demers* (1994). De plus, les MCA ont d'excellentes résistances à la fatigue et à la corrosion, ainsi qu'une faible poids spécifique, ce qui évite de surcharger la structure. Les composites les plus appropriés sont ceux à base de fibres de carbone, grâce à leurs propriétés mécaniques élevées.[6]

Des travaux de recherche sur des éléments confinés avec une enveloppe composite *Demers*, (1994) ; *Nanni et D*, (1993) ; *Harmon et Al*, (1992) ; *Katsumata et Al*, (1991), ont permis de connaître leur comportement général et de déterminer les paramètres qui ont une influence significative. Selon *Nanni et D* (1993), dans le cas de béton non fissuré (ou de béton avec microfissures) en compression, la déformation transversale peut être déterminée à partir de la déformation axiale due à la charge en utilisant le coefficient de Poisson.

L'effet qu'a le confinement sur le béton est directement relié à sa capacité de restreindre cette déformation transversale. A mesure que la déformation transversale augmente, la pression exercée par le confinement augmente. L'état de contrainte biaxiale résultant augmente la résistance à la fissuration ainsi que la résistance mécanique du béton.

Ces chercheurs ont constaté que peu importe le niveau de confinement, tous les échantillons testés montrent un point d'inflexion à peu près au niveau correspondant à la capacité maximale du béton non confiné. Après ce point, la fissuration se propage et la relation entre les déformations de et transversale ne peut plus être déterminée avec précision en utilisant le coefficient de Poisson. Le confinement supporte alors une partie de plus en plus grande de la charge. Durant cette phase, la courbe contrainte-déformation demeure plane ou à une pente positive, selon le niveau de confinement. La pente de la courbe dépend également de la relation contrainte-déformation du matériau de confinement. Si le confinement est suffisant, la capacité de l'échantillon correspond à la résistance ultime de l'enveloppe composite.

Selon *Harmon et Al* (1992), qui ont testé des cylindres confinés par des fibres de Carbone, l'augmentation du rapport de renforcement a peu d'effet sur la pente de la portion initiale de la relation contrainte-déformation, mais a un effet significatif sur la pente de la seconde portion. Elle augmente de façon significative la contrainte de rupture, mais a peu d'effet sur la l'unité élastique. Des essais réalisés avec deux types de béton (41 MPa et 103 MPa) ont montré que la limite élastique et la contrainte de rupture variant d'un facteur à peu près égal à la différence de résistance du béton. Les courbes contrainte -déformation de cylindres en béton à haute résistance confinés selon différents rapports de renforcement par une enveloppe de fibres d'aramide, chargés en compression axiale, sont présentées à la figure (III.8) ci-dessous. Sur cette figure, le rapport de renforcement, il est défini comme le rapport de la surface des fibres sur la danse du béton. La résistance du béton est de 103 MPa.

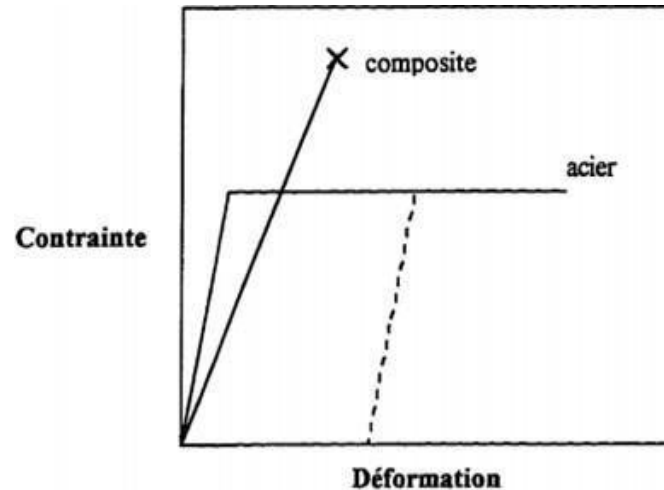


Figure III.8 : Courbe contrainte-déformation idéalisée d'un composite et de l'acier.[6]

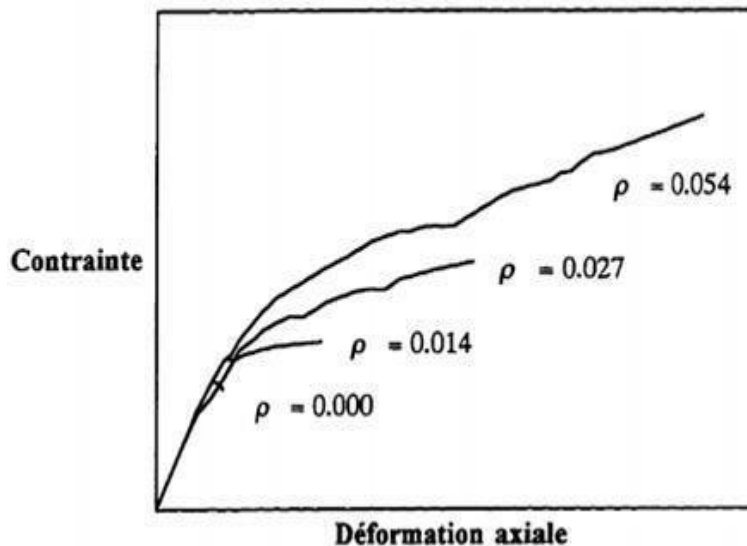


Figure III.9 : Courbe contrainte-déformation de cylindres confinés par  
Une enveloppe de fibres de carbone Harmon et al (1992).[6]

Les travaux de Demers (1994) ont permis de déterminer les paramètres ayant un effet significatif sur la résistance de colonnes en béton armé conventionnelles de section circulaire confinées par des composites à base de fibres de carbone. Ces paramètres sont la résistance à la compression du béton et les caractéristiques de l'enveloppe composite. L'effet du diamètre des barres longitudinales n'est significatif que sur la charge  $M_e$  maximale, et la contribution des étriers en acier au confinement du béton est négligeable, dans les cas des colonnes faiblement armées. Les prochaines études pourront donc être réalisées par des cylindres sans armature.

De plus, des essais réalisés sur des colonnes de section circulaire préalablement fissurées ont démontré que l'endommagement du béton n'affecte ni la capacité ultime, ni la ductilité. Les fibres de carbone étant peu résistantes sous l'action d'un bord coupant, il peut être nécessaire de procéder à certains travaux de préparation des surfaces à être réparées, notamment les coins des colonnes de section carrée. Des essais menés par *Katsumata* et al (1990) ont démontré que la diminution de la résistance en tension des fibres de carbone sur un coin peut être ignorée si le rayon du coin est de 30 mm ou plus.[6]

### III.9 Type de confinement

Actuellement le confinement est la méthode la plus utilisée pour renforcer et augmenter la capacité portante des sections en béton armé ou en béton de fibre. On distingue deux types de confinement :

#### III.9.1 Confinement interne

Le confinement interne se fait par des cerces en aciers ou spires dans le cas des sections circulaires et des cadres ou étriers transversaux dans le cas des sections rectangulaires. Le confinement interne du béton peut se faire aussi avec des fibres de Carbone ou de Verre ainsi que les fibres de Polypropylène ou encore les fibres d'Aramide. Le béton confiné dans ce cas ne pas être considéré comme une structure mais comme matériau multiple ou bien composite.

#### III.9.2 Le confinement externe

La méthode la plus utilisée dans ce type de confinement externe c'est le confinement latéral qui permet d'augmenter la capacité portante des colonnes renforcées et assurer un perfectionnement significatif de la résistance à la compression du béton. Le confinement externe peut être fourni par divers moyens tel que : les jackets, les cercles, l'emballage en aciers de FEP (Fibre renforcé polymère) autour de la colonne ou par tubes en acier (CFST : Concrete filled steel tubes). De nombreux modèles analytique sont proposés sont prédire un tel confinement. [7]

### III.10 Méthodes de confinement

Plusieurs techniques différentes ont été développées pour renforcer des colonnes existantes en béton armé en utilisant des composites «PRF ». Les méthodes de renforcement peuvent être classés dans trois catégories en fonction de la méthode adoptée pour construire le composite «PRF » à savoir :

La stratification au contact, l'enroulement filamentaire et le chemisage par coquille préfabriquée en «PRF »

### III.10.1 Stratification au contact

Sur chantier la stratification au contact (stratification directe) est la technique la plus utilisée pour le renforcement des colonnes en utilisant les composites «PRF » (Figure III .10). Dans cette méthode, les fibres unidirectionnelles ou tissées sont imprégnées par des résines du polymère et enveloppés ensuite autour des colonnes dans un processus de moulage au contact, avec l'orientation des fibres principales dans la direction de confinement.

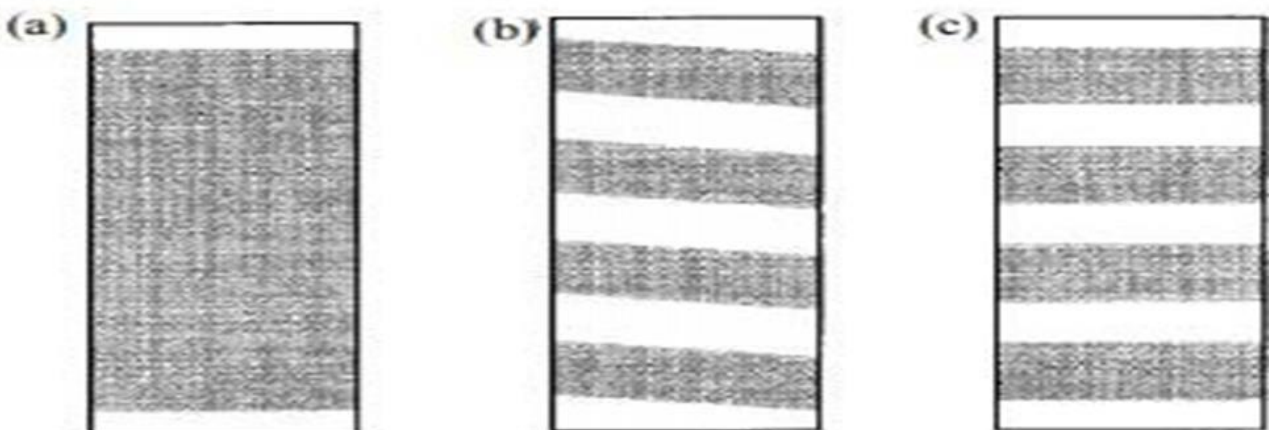


(a)

(b)

(c)

**Figure III.10 :** Stratification au contact (WBAC 2003). Une colonne peut être enveloppée complètement par des tissus «PRF » avec une ou plusieurs couches Figure III 10 (a). Elle peut être aussi partiellement enveloppée en utilisant des lanières «PRF » sous forme d'une spirale continue Figure III.10 (b) ou des anneaux discrets Figure. III. (c).[8]



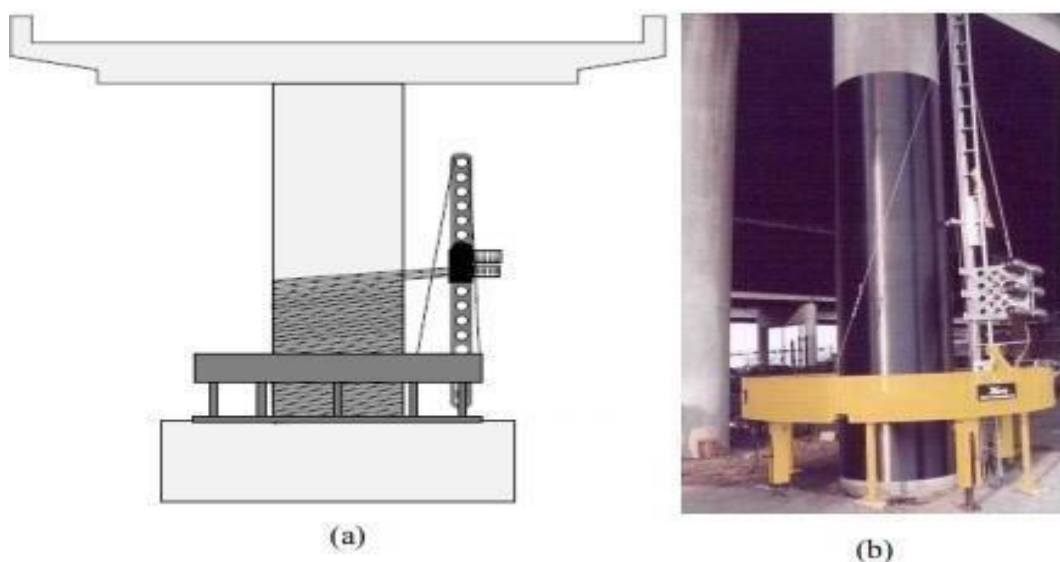
**Figure III.11 :** Méthodes typiques d'enveloppe «PRF » pour les colonnes en B.A: (a) enveloppée totalement avec «PRF » ; (b) partiellement enveloppée par des lanières « FRP » en spirale continue ; (c) partiellement enveloppée par des lanières « FRP » en d'anneaux discrets. [8]

L'amélioration de la force de compression du béton suite au confinement externe de «PRF » a été démontrée en premier par *Fardis et Khalili (1981 et 1982)*. Ce concept a été appliqué pour la première fois au renforcement de vraies colonnes en B.A au Japon au milieu des années 1980 (*ACI1996*). Depuis il y a eu beaucoup des rapports sur l'application de cette technique dans le renforcement des colonnes des ponts ou des constructions civiles (par exemple : *ACI 1996, Neale et Labossiere 1997, Tan 1997*)

### III.10.2 Enroulement filamentaire

Le principe de l'enroulement filamentaire est semblable à celui de la stratification directe, sauf que la technique de l'enroulement filamentaire utilise la fibre continue au lieu des tissus ou des lanières afin que l'enroulement des filaments puisse être traité automatiquement au moyen d'une machine contrôlée par ordinateur (Figure III .12).

Une telle technique permet la précision de l'épaisseur du «PRF », l'orientation de la fibre et le contrôle de la fraction du volume ce qui mène à une meilleure performance. L'idée de confiner le béton par enroulement de fibres continues imprégnées par la résine a été mentionnée pour la première fois par *Fardis et Khalili (1981)*.



**Figure III 12 :** Enroulement filamentaire : (a) Monti 2003, (b) Master Builders, Inc. and Structural Preservation Systems 1998, Balaguru et al. 2009).[8]

### III.10.3 Chemisage par coquille préfabriquée en «PRF »

Les colonnes et poteaux en B.A peuvent aussi être renforcés en utilisant des chemises en «PRF » sous forme de coquilles préfabriquées. Les coquilles sont fabriquées sous conditions contrôlées en utilisant la fibre en voile ou bandes avec l'imprégnation de résine effectuée avant l'installation. Elles peuvent être fabriquées en demi cercles ou demi rectangles (*Nanni et Norris 1995, Ohno et al.1997*), en cercles avec une fente ou en rouleaux continus (*Xiao et Ma 1997*), afin qu'elles puissent être ouvertes et puissent être placés autour des colonnes, Figure (III.13). Pour un confinement efficace, un contact total entre la colonne et la coquille en «PRF » est essentiel. Cela peut être assuré soit en liant la coquille à la colonne par adhésifs (*Xiao et Ma 1997*) ou en injectant un coulis de mortier de ciment dans l'espace entre la coquille et la colonne.



**Figure III .13 :** Chemisage par coquille préfabriquée en «PRF » (*Monti 2003*) [8].

Une application intéressante des coquilles préfabriquées en «PRF » est de les utiliser dans les travaux de modification de forme des colonnes comme partie des mesures de renforcement. Cela a été discuté par *Teng et Lam (2002)*. Ils ont suggéré que les colonnes carrés ou rectangulaires pouvaient être renforcées en les renfermant dans des colonnes circulaires ou elliptiques dans lesquelles une coquille préfabriquée en «PRF » est utilisée. Cela permet de conférer à la fois une forme au béton supplémentaire et le confinement exigé après le durcissement du béton. [8].

## III.11 Renforcement de quelque élément de la structure avec le confinement

### III.11.1 Renforcement des poteaux

Le confinement des poteaux en béton se fait avec des enveloppes en matériaux composites qui peuvent être à base de fibre d'aramide, de verre ou carbone. L'application de ces enveloppes pour les poteaux améliore le confinement du béton, ainsi que sa résistance en compression et sa ductilité. [10].



Figure III.14: renforcement des poteaux. [10].

### III.11.2 Renforcement des poutres

On peut effectuer un renforcement en flexion en collant les bandes sur la surface tendue de la poutre. Le renforcement en cisaillement peut être apporté par le collage des bandes sur les parois de ces mêmes poutres donc son but est d'améliorer leur résistance au cisaillement et leur ductilité.



Figure III.15: Système de renforcement FRP (Poutre renforcée à l'effort tranchant) [11].

### III.11.3 Renforcement des dalles

L'utilisation de composites en bandes peut aussi améliorer la résistance en flexion de dalles en béton armé.



**Figure III.16:** Renforcement des dalles par la fibre de carbone [9].

### III.11.4 Renforcement des murs

Seulement quelques cas d'application de matériaux composites destinés au renforcement de murs ont été publiés. Le plus documenté d'entre eux concerne un immeuble à appartement de six étages à Zurich, en Suisse (*Steiner, 1996*). Étant donné que le bâtiment a été construit en 1930 et converti en bâtiment à bureau avec certaines modifications au niveau de son système de résistance latérale, le système structural a donc été réévalué. Parmi ces changements, des murs en maçonnerie non renforcée conçus pour les charges sismiques ont été enlevés, et ceux restant devaient prendre une charge beaucoup plus grande.

L'utilisation des matériaux composites s'avérait donc très utile. On a collé des plaques de fibres de carbone en forme de X pour chacun des étages. Un système d'ancrage avec des tiges d'acier a servi pour améliorer l'adhésion entre les fibres et le mur. Avec les composites, la ductilité du mur a été augmentée à un coût relativement faible et dans des délais très raisonnables. [11].



Figure III.17: Renforcement des murs [11].

### III.12 Avantages des matériaux composites

Les matériaux composites présentent des avantages tels que :

- Résistance mécanique : pour une même section d'acier, la résistance des fibres de composites est plus élevée.
- Poids : la densité des matériaux composites représente 20% de celle des platines d'acier ; pour une même résistance ultime le poids de PRF (Polymère Renforcé en Fibre) est inférieur de 10% au poids des platines d'aciers.
- Maniabilité : les bandes des matériaux composites présentent une large flexibilité qui facilite la mise en œuvre et son application dans les zones confinées.
- Vu la difficulté d'assemblage et de transport sur site des platines d'acier, les PRF sont beaucoup plus concluants que ces derniers.
- Facilité de préparation de surfaces.
- Le non nécessité d'une fixation mécanique : comparativement aux platines d'acier, cependant le collage des matériaux composites doit être minutieux.
- La durabilité du système de renfort : la bonne tenue des matériaux composites à la corrosion par rapport à celle des platines d'acier, qui peuvent être contaminés par le chlorure ou leurs zones de fixation seront fissurées.

- Tenue au feu : la conductivité thermique des matériaux composites est inférieure à celle des platines d'acier. La dégradation due au feu des matériaux composites est lente comparativement à celle des platines d'aciers.
- Réduction du risque gel- dégel : la mise en œuvre du bandage des matériaux composites favorise une bonne étanchéité vis-à-vis de la formation du phénomène gel- dégel
- La maintenance et entretien : le système de renforcement par matériaux composites n'exige pas un entretien, par contre le renforcement par les platines d'acier demande une maintenance périodique continue.
- Réduction du temps d'exécution et mise en œuvre : la préparation, le transport et la mise en œuvre des platines d'aciers prend un temps considérable par rapport à l'application des matériaux composites.
- L'aptitude de précontrainte dans les matériaux composites : un nouveau champ des bandes plats de précontrainte des composites est appliquée afin de compenser la perte de tension dans l'élément structurel et réduire ainsi les fissures.

### III.13. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes causes qui ont conduit les chercheurs à utiliser des renforts afin de réhabiliter des structures en Génie Civil par confinement avec des matériaux composites ainsi que leurs modes d'application. Le comportement du béton confiné ainsi que son mode de rupture sont aussi présentés.

A travers le renforcement des structures par matériaux composites, le but visé est toujours l'amélioration des caractéristiques mécaniques du béton. Cette amélioration doit se manifester au niveau de la réponse des éléments de la structure sollicitée par différentes charges. Le confinement par collage de matériaux composites permet d'améliorer considérablement la résistance et la ductilité du béton sous chargement de compression.

### Référence biographique

- [1] **Xvan Hong VU**, « Caractéristique expérimentale du béton sous fort confinement : influence du degré de saturation et du rapport eau/ciment ». Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'université Josef Fourier ; spécialité science de la terre, de l'univers et l'environnement, 2007.
- [2] **Youcef Si Youcef**, « Contribution à la compréhension du comportement des poteaux élancés en béton armé confiné et renforcé par la fibre de Carbone ». Européenne thèse de l'université de Bretagne Sud sous sceau de l'université de Bretagne Sud Ecole doctorale [SICMA] 2010.
- [3] **R. Benzaid et H-A Mesbah**, « Modèle de confinement pour les colonnes de section circulaire en béton armé confiné avec les enveloppes en polymère renforcé de fibre de carbone ». MATEC web of conference 2, 202006. Owned by the authors, published by EDP Sciences.
- [4] **Lakhdari Loubna et Maamouri Ghania**, « Optimisation numérique des paramètres de confinement des cylindres en béton par les bandes composites ». Mémoire de fin d'étude option structure, 2017/2018).
- [5] **Fabrice Dupray**, « Comportement du béton sous fort confinement : Etude en compression et en traction en extension triaxiales à l'échelle microscopique ». Université Joseph Fourier Grenoble. [2008 France tel -00365786. V2. HAL archives-ouvertes.fr].
- [6] **Pierre Rochette**, « Confinement de colonne courtes en béton de section carré ou rectangulaire avec les matériaux composite ». Mémoire de maître en science appliquées spécialité génie civil e Université Sherbrooke (Québec) Canada ; 1996.
- [7] **Amrouche fadila**, « Etude de la fiabilité du confinement de cylindres en béton avec des bandes hélicoïdales en Polymère renforcées de fibre de jute ». Mémoire de fin d'étude spécialité génie civil option structures université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Promotion 2018.
- [8] **Riad Benzaid, Habib Abdelhak Mesbah, Nasr-Eddine Chikh**, « Contribution à l'étude des matériaux composites dans renforcement et la réparation des éléments structuraux linéaires en béton », 2013. hal.archives-ouverts.fr /hal-00782103.
- [9] **Temsol**, renforcement par application de carbone.

[9] : **Ould El Hacem Zein El Abidine**, « RENFORCEMENT DU BETON PAR LES MATERIAUX COMPOSITES », Mémoire de fin d'étude spécialité génie civil, option structures, Université de Tébessa Faculté des sciences et de la technologie département de génie civil, 2016.

[11]. **T. Gharib, A. Gabor, E. Ferrier**, « Analyse expérimentale du comportement au cisaillement des murs en maçonnerie de pierre renforcés par matériaux Composites TRC & NSM FRP ». Laboratoire de Génie Civil et Ingénierie Environnementale (LGCIE), Site Bohr, Université Claude Bernard Lyon1, 82, bd Niels Bohr, Campus de la DOUA, 69 622 Villeurbanne Cedex.



Chapitre IV  
Étude Expérimentale

---

***Partie A***

***Matériaux utilisés***

***&***

***Confection du béton.***

---

## IV.1. Introduction

Suite à l'étude bibliographique sur le béton de manière générale ; nous présentons dans cette section toutes les étapes du Protocol expérimental réalisé au sein du laboratoire de Génie Civil de la faculté du Génie de la Construction à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi - Ouzou.

Cette étude concerne l'étude du comportement d'un béton à base de déchets de verre non colorés. On substitue une quantité du sable et du ciment par du sable et la poudre de verre non colorée respectivement par la suite ce même béton est confiné avec un tissu de recyclage. Nous avons utilisé différentes configurations de confinement des spécimens. Le calcul des proportions des différents constituants du mortier, la construction du coffrage, l'incorporation des déchets de verre et le mûrissement des éprouvettes sont soigneusement réalisés.

Enfin, tous les résultats concernant cette partie de notre mémoire sont représentés sous forme de graphes, tableaux et histogrammes pour pouvoir faire une interprétation des différents résultats.

### *Remarque*

*Ce travail fait suite aux travaux réalisés par Mr TOUATI. Mohammed [3] et les travaux de Mr BEN CHABANE. Tarik [1],[2]. La caractérisation expérimentale des différents matériaux, confection des éprouvettes, confinement par tissu de recyclage et fibre de verre ont été réalisées en étroite collaboration avec Mr BEN CHABANE. Tarik. On s'intéressera au comportement en compression de la formulation optimale déterminée à partir des différentes variantes présentées dans ces travaux (Variation du pourcentage de poudre et de sable de verre non coloré).*

*Pour cette variante optimale, nous avons confectionné plusieurs spécimens cylindriques pour étudier le comportement sous l'effet d'un confinement à l'aide de tissu de recyclage et de fibre de verre. Trois types de confinement sont proposés et étudiés.*

## IV.2. Matériaux utilisés

Pour les besoins de cette recherche expérimentale, nous avons privilégié l'utilisation de matériaux locaux de proximité dans le but d'encourager l'économie locale.

### IV.2.1. Granulats

Les granulats que nous avons utilisés sont le sable (0/3) et les graviers (3/8 et 8/15). Ils ont été lavés puis séchés à l'étuve à une température de 105°C pendant 24 heures puis conservés dans des bacs à l'intérieur du laboratoire (granulats sec et propres).



Figure IV. 1 : Les granulats utilisés.



Figure IV. 2 : L'étuve utilisée.

### IV.2.2. Ciment

Le ciment est une matière pulvérulente, à base de silicate aluminé de chaux, obtenue par cuisson, en proportions variables selon les matières premières. Le ciment utilisé pour notre étude est un ciment de type CPJ CEM II /42,5 R provenant de LAFARGE d'Alger.



**Figure IV.3 :** Le ciment.

### **IV.2. 3. L'eau d'hydrations**

L'eau utilisée dans cette expérience est l'eau du robinet, donc propre.



**Figure IV.4 :** L'eau

### **IV.2.4. Déchets de verre**

La poudre de verre provient des déchets de verre de bouteilles non colorées. Elles sont ramassées puis lavées et séchées à l'air libre. Le verre est préconçassé de manière traditionnelle manuellement. Les débris de verre obtenus sont par la suite séchés à 80°C. Une quantité est broyée pour avoir une poudre fine (Figure IV.5) et une autre quantité est concassée pour avoir un sable de verre (Figure IV.6). La classe granulaire de déchets de verre recyclé est comme celle du sable (0/3).



Figure IV.5: Poudre de verre.



Figure IV.6 : Sable de verre.

### IV.3. Équipements utilisés

Dans le programme expérimental on a utilisé :

- Une balance.
- Un malaxeur.
- Table vibrante.
- Les outils de maçonnerie tels que : La règle, récipient, une truelle, la brouette, moule.....
- Le cône d'Abrams pour mesurer l'affaissement.
- Une machine d'essai « une presse de force », de dimension appropriée à l'éprouvette à tester et répondant aux prescriptions des normes NF P 18-411 et NF P 18-412.



Cône d'Abrams



Moules cylindriques



La balance



La table vibrante.



Le malaxeur



La machine de compression

FigureIV.7 : Appareillage de laboratoire.

## IV.4. Caractérisations expérimentales des matériaux

### IV.4.1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat dont les dimensions sont comprises entre 0.063 et 125 mm. Les granulats utilisés pour préparer notre béton sont de diamètre 0/3, 3/8 et 8/15. Une fois les matériaux lavés ils sont séchés à l'étuve à température de 105°C. On emboîte les tamis les uns sur les autres dans un ordre décroissant du haut de la colonne vers le bas. Dans la partie inférieure, on dispose un fond étanche qui permettra de récupérer les fillers. Un couvercle est disposé en haut de la colonne afin d'interdire toute perte de matériau pendant le tamisage. On appelle tamisât le poids de matériau passant à travers un tamis donné et refus le poids de matériau retenu par ce même tamis.

-Les dimensions de mailles et le nombre de tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue. La norme actuelle (EN 933-2) préconise, pour l'analyse granulométrique, la série de tamis suivante en (mm) : 0.063, 0.125, 0.25, 0.50, 1, 2, 4, 8, 16, 31.5, 63, 125.

-Un échantillon de 5000 g pour chaque matériau.

-Une balance pesant au gramme près.

-Une étuve thermostat.

-Un vibro-tamis électrique.



**Figure IV.8 :** Un vibro-tamis électrique.

Les granulométriques pour chaque type de granulats, voir figure ci-dessus : résultats de l'essai pour les granulats utilisés (**Annexe 1**) et nous permettent de tracer les courbes.

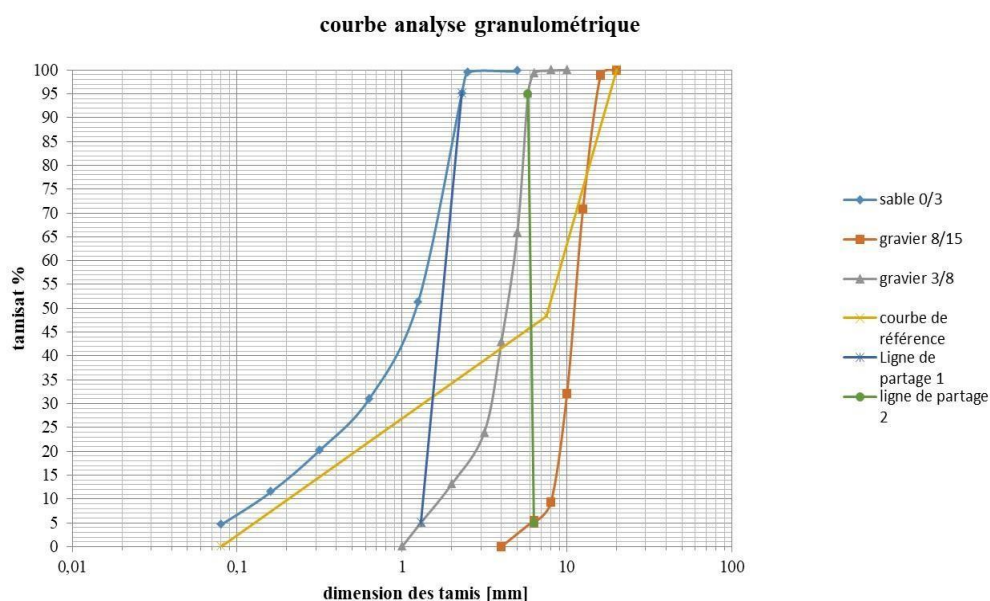


Figure IV 9 : Courbe analyse granulométrique.

### IV.4.2. Module de finesse

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF). Le module de finesse est d'autant plus petit que le granulat est riche en éléments fins, Norme Française [NFP 18-540]. Le module de finesse est égal au 1/100<sup>ème</sup> 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.

Dans une composition s'il y'a trop de gains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF).

La valeur du module de finesse dépend surtout de la teneur en grains finis du sable. Les résultats sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau IV.1 : Module de finesse du sable (0/3).

Granulats	Sable (0/3)	Spécifications
Module de finesse MF	2.8	2.8 < MF < 3.3 Sable grossier. 2.2 < MF < 2.8 Sable moyen. 1.8 < MF < 2.2 Sable fin.

Le sable utilisé dans nos essais est moyen, c'est un sable préférentiel et un bon sable à béton.

### IV.4.3. Masse volumique apparente et absolue

- **Masse volumique apparente**

Par définition la masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules. Elle se mesure conformément à un mode opératoire précis à l'aide d'un récipient de  $1 \text{ dm}^3$  en versant lentement le sable entre les 2 mains à 10 cm au-dessus du récipient puis arasé à la règle. Le contenu est pesé. Elle est comprise entre  $1\,400 \text{ kg/m}^3$  et  $1\,600 \text{ kg/m}^3$  pour les granulats roulés silico-calcaires. Elle est définie par le rapport entre la masse du matériau sec sur son volume total.

- **Masse volumique absolue**

La masse volumique absolue est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. Elle est comprise entre  $2\,500$  à  $2\,600 \text{ kg/m}^3$  pour les granulats roulés silico-calcaires. Elle est définie par le rapport entre la masse du matériau sec sur son volume absolu.



**Figure IV.10** : Mesure de la masse volumique apparente des graviers.



**Figure IV.11** : Mesure de la masse volumique absolue des graviers.

Les résultats sont indiqués dans le tableau suivant :

**Tableau IV.2** : La masse volumique apparente et absolue des granulats.

Granulats	Sable (0/3)	Gravie (3/8)	Gravier (8/15)
Masse volumique absolu ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.63	2.6	2.72
Masse volumique apparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.485	1.46	1.42

#### IV.4.4. Équivalent du sable

L'équivalent de sable permet d'évaluer la propreté du sable. Une solution lavante sépare les éléments fins de sable en provoquant leur floculation dans une éprouvette normalisée. Après 20 min de repos on mesure :

$H_1$  : la hauteur de la partie sableuse sédimentée.

$H_2$  : la hauteur totale de floculat et de la partie sableuse sédimentée.

La valeur de l'équivalent de sable ( $E_s$ ) est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur  $H_1$ , à la hauteur totale  $H_2$ . La hauteur  $H_2$  est prise visuellement ou à l'aide d'un piston comme c'est indiqué sur la figure ci-dessous, on détermine :

$E_{sV}$  : équivalent de sable visuel.

$E_{sp}$  : équivalent de sable au piston.

Un sable pour lequel  $E.S.$  visuel compris entre 65 et 75 est très légèrement argileux pouvant présenter un retrait légèrement plus fort. Les sables dont l' $E_s$  visuel est compris entre 75 et 85 (ou  $E.S.$  piston compris entre 70 et 80) conviennent parfaitement pour du béton de haute qualité. Enfin pour les sables présentant des valeurs supérieures, signe d'un manque presque total de fines argileuses, on peut craindre un défaut de plasticité du béton qui devra

être compensé, sans majoration du rapport E/C. L'essai est effectué suivant la norme française [NF P 18-598]

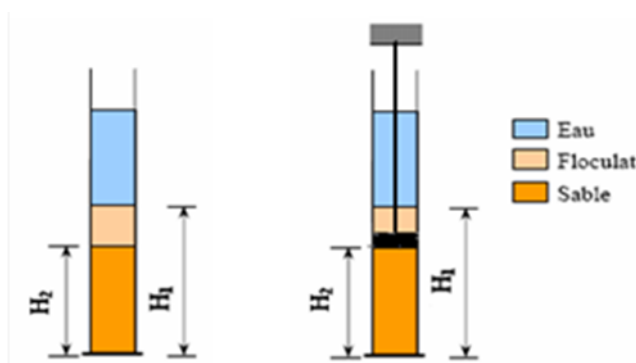


Figure IV.12 : Es Visuel et Es à piston

Cet essai est un essai de propreté, la valeur de l'ES exprimé le pourcentage de fines contenues dans le sable. L'absence de fines ne permet pas d'obtenir un béton compact.

Tableau IV.3 : Valeur d'équivalent du sable.

ES à vue	ES au piston	Nature et qualité du sable
SE < 60	SE < 60	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité.
$65 \leq SE < 70$	$60 \leq SE < 70$	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour béton de qualité quand ou ne craint pas particulièrement de retrait.
$75 \leq SE < 80$	$70 \leq SE < 80$	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses Convenant Parfaitement pour les bétons de haute qualité.
SE > 85	SE > 80	Sable très propre : l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.



Figure IV.13 : L'essai d'équivalent du sable.

L'essai a donné les résultats suivants présentés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.4 :** Equivalent du sable (0/3)

Granulats	Sable (0/3)
Equivalent du sable visuel (ESV) %	86.14
Equivalent du sable sous le poids d'un piston (ES)%	85.15

D'après les résultats obtenus notre sable est très propre.

## IV.6. Essai d'affaissement

Le contrôle de la plasticité au cône d'Abrams permet de déterminer le temps de vibration nécessaire ainsi que la classe de maniabilité de notre béton. C'est une propriété essentielle du béton frais, elle caractérise son aptitude à remplir les coffrages et à enrober convenablement les armatures. Cet essai est réalisé à l'aide d'un tronc de cône en acier galvanisé de 10 et 20 cm de diamètres intérieurs sur une hauteur de 30 cm, d'une plaque en acier à la surface dure et non absorbante et d'une tige d'acier de 16 mm diamètre dont l'extrémité est arrondie.



**Figure IV.14 :** Détermination d'affaissement du béton l'état frais.

Les résultats d'affaissement du béton sont représentés ci-dessous :

**Tableau IV.5:** Les résultats d'affaissement du béton.

Les composants du béton	Affaissement
T (5%PV10%SV)	2 cm
N1	2.5 cm
N2	3 cm
N3	2 cm
N4	3 cm
N5	3.4 cm
N6	3.5 cm

Connaissant sa classe, son ouvrabilité est évaluée à partir du tableau.IV.6 :

**Tableau IV.6 :** Evaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement.NF-EN-206/CN.

Plasticité	Serrage	Affaissement [cm]	Dénomination NF-EN-206/CN
Béton très ferme	Vibration puissante	0 à 2	S1
Béton ferme	Bonne vibration	3 à 5	S1/S2
Béton plastique	Vibration courante	6 à 9	S3
Béton mou	Piquage	10 à 13	S4
Béton liquide	Léger piquage	≥ 14	S3/S4/S5

Selon la valeur de l'affaissement trouvé dans l'essai, la classe de maniabilité du béton est S1/S2 c'est un béton ferme sans serrage, bonne vibration.

#### IV.5. Formulation des bétons avec les déchets de verre non colorés

La composition du béton a été formulée à partir de la méthode de *Dreux Gorisse*. Le tableau suivant répertorie les constituants avec leurs rapports, utilisés pour la formulation d'un m<sup>3</sup>de béton.

**TableauIV.7 :** Formulation du béton

Les composants (kg/m <sup>3</sup> )	Quantité (kg)
Ciment	400
Sable	586
Gravier (3/8)	272
Gravier (8/16)	1003
Eau	200
E/C	0.5

**Tableau IV. 8 :** Composition du béton.

Les composants du béton	Ciment kg	Sable (0/3) kg	Gravier (3/8) kg	Gravier (8/15) kg	Eau kg	Poudre de Verre kg	Sable de verre kg
5%PV10%SV T	7.695	10.675	5.514	20.316	4.050	0.405	1.186
5%PV10%SV N1	7.695	10.675	5.514	20.316	4.050	0.405	1.186
5%PV10%SV N2	7.695	10.675	5.514	20.316	4.050	0.405	1.186
5%PV10%SV N3	7.695	10.675	5.514	20.316	4.050	0.405	1.186
5%PV10%SV N4	7.695	10.675	5.514	20.316	4.050	0.405	1.186
5%PV10%SV N5	7.695	10.675	5.514	20.316	4.050	0.405	1.186
5%PV10%SV N6	7.695	10.675	5.514	20.316	4.050	0.405	1.186

### IV.7. Confection des spécimens d'essai

Pour assurer une bonne répartition des particules de sable et de ciment ainsi qu'une meilleure distribution des ajouts minéraux, nous avons réalisé de petites gâchées, suivant les étapes suivantes :

- Préparation des moules prévus pour les éprouvettes de béton. Les éprouvettes utilisées pour déterminer la résistance mécanique en compression sont de forme cylindrique de diamètre 16 cm et hauteur 32 cm (NF EN 12390-3), les moules devront être huilés pour faciliter le décoffrage
- Préparation des matériaux (gravillons, ciment, poudre de verre, sable de verre...)
- Le malaxeur à axe vertical pour la fabrication du béton
- Humidification de tout le matériel
- Introduction des différents composants dans le malaxeur
- Mise en marche du malaxeur pour homogénéiser le mélange sec pendant 30 s
- Ajout progressif de l'eau de pré-humidification pendant 30 s
- Ajout du ciment et de la poudre de verre
- Malaxage pendant 60 s avec ajout graduel de la quantité d'eau restante
- Réalisation à l'état frais de l'essai au Cône d'Abrams
- Remplissage des moules et vibration pour compacter le béton et éliminer les bulles d'air à l'intérieur
- Démoulage après 24 heures
- Mise en cure des échantillons dans de l'eau.



La pesée du ciment



La pesée du gravier (3/8)



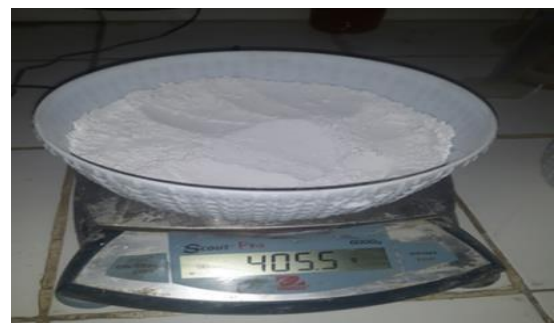
La pesée du sable (0/3)



La pesée du gravier (8/15)



Préparation des constituants



La pesée de la poudre de verre



Préparation des déchets de verre.



La pesée du sable de verre.

**Figure IV.15:** Préparation des constituants.



**Figure IV.16** : Mélange du sable et la poudre de verre non colorée avec le ciment.



**Figure IV.17** : Malaxage du béton.



**Figure IV.18** : Mise en place du béton dans le moule et vibration.



Figure IV.19 : Remplissage et séchage du béton pendant 24 h.



Figure IV.20 : Éprouvettes démoulées.



Figure IV.21 : Conservation des éprouvettes pendant 28 jours dans l'eau.

---

***Partie B***

***Confinement du béton.***

---

## IV.1. Introduction

Dans cette section on présente le protocole expérimental élaboré pour le confinement externe de notre béton. L'objectif du confinement des spécimens d'étude est d'augmenter la capacité en compression des colonnes en béton donc l'amélioration du comportement ductile (empêcher la rupture prématurée) et une élévation en termes de résistance (capacité axiale et latérale des colonnes de béton plus élevée). En partant de cette optique que nous sommes impliqués dans le but de proposer une nouvelle technique de renfort et surtout un renfort issu de l'industrie de récupérations.

La série d'éprouvettes, réalisée à base de déchets de verre non colorés, est confinée à l'aide d'un tissu recyclé et un tissu de fibre de verre en guise de comparaison des performances des deux matériaux. Plusieurs techniques de confinement sont étudiés tels que : confinement total des éprouvettes, confinement partiel en cerces et confinement hélicoïdal en hélices. L'idée est de quantifier l'apport de chaque type de confinement. L'essai de compression réalisé sur les éprouvettes de diamètre Ø16cm et de hauteur 32cm, nous a permis de caractériser de façon satisfaisante la résistance en compression. Tous les résultats obtenus sont fidèlement repris sous forme de courbes, tableaux et histogrammes pour interprétation.

## IV.2. Matériaux utilisés et les techniques de confinement des spécimens

### IV.2.1. La résine

La résine MEDAPOXY STR est une résine époxy destinée à la stratification sur différents supports. Elle est constituée de deux composantes, résine (A) et durcisseur (B). Elle doit être mélangée peu de temps avant application. La proportion en masse du durcisseur représente 40% de la masse de la résine (durcisseur/résine = 60%) conformément aux recommandations du fournisseur. Le malaxage a été réalisé à faible vitesse, afin d'éviter l'inclusion d'air, pendant trois minutes environ jusqu'à obtention d'un mélange homogène. Un mûrissement d'environ 10 jours au laboratoire à température ambiante environ 20°C, est requis pour la cure de la résine. Tous les spécimens ont bénéficié d'un temps de cure nécessaire. La résine MEDAPOXY STR présente de très bonnes qualités telles que :

- Très bonne tenue au produit chimique.
- Très bonne adhérence sur supports béton et aciers.

-Bonne mouillabilité du support et de la fibre de verre.

Pour répondre aux besoins du constructeur, l'application de cette résine est très rigoureuse :

-Appliquer une première couche de MEDAPOXY STR à l'aide d'un pinceau,

-Poser immédiatement après la bande de tissu,

-A l'aide d'un pinceau, bien étaler le tissu,

-La première couche de stratifié ayant durci à l'état poisseux, appliquer une deuxième couche de MEDAPOXY STR,

-Appliquer une couche de finition de MEDAPOXY STR,

-Laisser durcir 10 jours avant la mise en service. (**Voir Annexe 2**)



Figure IV.22 : Mélange des éléments de la résine.

### IV.2.2. Application des composites

Les bandes de tissu de renforcement (fibres de verre ou tissu recyclé) ont été mesurées et ensuite coupées à l'aide de ciseaux et d'une règle (Figure IV.24). La longueur des bandes, correspondait au périmètre du cylindre. La direction principale des fibres a été orientée dans le sens circonférentiel des spécimens.

### IV.2.2.1. Tissu de fibre de verre

Fibres de verre tissées à base de fils rovings, silionnes ou verranne, pour la fabrication de pièces en composites avec les résines polyesters et les résines époxy. C'est la fibre la plus utilisée vu son excellent rapport performances mécaniques/prix, sa place est au premier rang des renforts utilisés dans les matériaux composites. Les fibres de verre sont fabriquées à partir d'un mélange à base de silice ( $\text{SiO}_2$ ), qui est fondu à une température  $1200^\circ\text{C}$  puis passé dans une filière en platine, et les filaments sont étirés avant refroidissement à un diamètre de 5 à 13  $\mu\text{m}$  à une vitesse de 60 m/s. Le verre E est utilisé pour les composites GD, les verres D pour les circuits imprimés (en raison de leur propriétés diélectrique), et le verre R pour les composites HP (à cause de leurs haute résistance mécanique).

Les propriétés de la fibre de verre dépendent du type de verre utilisé (E, D, R) et du mode de filage (continu ou discontinu).



Figure IV. 23 : Fibre de verre.

#### ➤ Les avantages des fibres de verre :

- Rapport performances mécaniques/prix.
- Bonne résistance spécifique (pour verre R).
- Bonne adhérence avec toutes les résines.
- Tenue à température élevée.
- Dilatation et conductivité thermique faibles.

- Bonne propriétés diélectriques filage.
- Résistant aux chocs et indéformable.
- Non irritant.
- Facile à appliquer.

➤ **Les inconvénients de fibres de verre :**

- Vieillissement au contact de l'eau.
- Faible module (par rapport à la fibre de carbone ou d'aramide). (Voir Annexe 3)

➤ **Préparation du renfort :**

On procède à la confection des différentes bandes de renfort avec le tissu de verre et tissu recyclé :

- Découpe du rouleau en bandes tenant compte d'une sur-longueur de 5-10 cm.
- Application d'une colle sur le support de la bande à l'aide d'un pinceau.
- Exercer une pression sur la fibre de Verre pour une bonne adhérence et évacuation des bulles d'air.



**Figure IV.24:** Découpage de la fibre de verre.

### IV.2.3. Tissu recyclé

C'est un tissu recyclé récupéré dans les centres de recyclages industriels. Ils sont nettoyés et enroulés sur eux-mêmes.



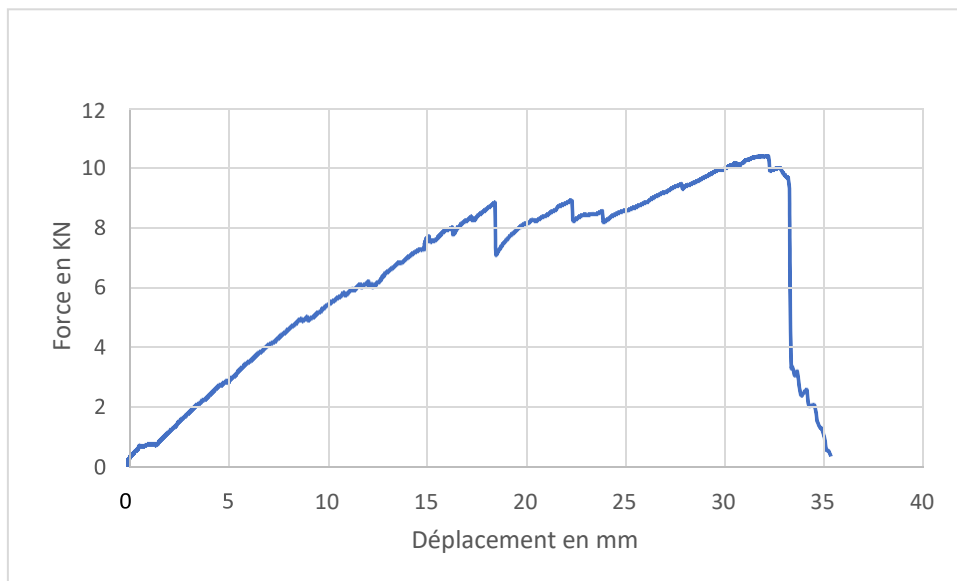
Figure IV 25 : Le tissu recyclé.

#### IV.2.3.1 Essai de traction du tissu recyclé

Afin de déterminer les propriétés physiques et mécaniques en traction du tissu recyclé utilisé des essais de traction simple ont été réalisés au sein du laboratoire.

Tableau IV. 9 : Les Caractéristiques de l'essai

Les propriétés du l'essai de traction	Les valeurs
Vitesse	0.1 kN/s
Température	20
Cellule	200 kN
Echantillon	2/3
Section	Rectangulaire
Largeur	55 mm
Epaisseur	1.5 mm
Longueur	200 mm
Aire	82.5 mm <sup>2</sup>
Résistance projet	200 MPa
Aire minimale de la section	0.1 mm <sup>2</sup>



**Figure IV.26** : Courbe de la résistance de traction du tissu recyclé.

**Tableau VI.10** : Résultat de l'essai de traction.

Résultats	Les valeurs
Force maximale	10.43 kN
Temps	172 s
Déplacement	36.66 mm
Résistance maximale de traction	126.4 MPa

Cet essai montre le comportement du tissu recyclé qui est subdivisé en trois parties essentielles :

- Une première qui correspond à un début de compression du tissu recyclé, cet effort génère un déplacement progressif linéaire. Le tissu sous tension subit un mouvement proportionnel.
- Dans la seconde phase, le tissu déjà sujette à un certain pourcentage de chargement et un déplacement qui engendre sans modification de sa forme.
- Finalement, une perte raide est constatée dans la troisième et dernière phase ce qui entraîne la rupture totale du tissu recyclé.

### IV.3. Procédés de confinement des spécimens

Avant de procéder au confinement des différents spécimens, un protocole de mise en place des bandes de tissus est nécessaire, selon le type de configuration de confinement (Voir tableau IV.11). Les surfaces des échantillons destinées au collage du composite sont d'abord séchées, brossées et nettoyées, ce qui permis d'obtenir une surface de béton légèrement rugueuse et propre. La préparation de la surface du béton a pour objectif d'éliminer toute trace superficielle d'huile, de graisse, de laitance, de produit de décoffrage et autres salissures afin d'atteindre une surface propre permettant de recevoir la résine.

**Tableau IV.11** : Le type de configuration de confinement pour chaque éprouvette de béton.

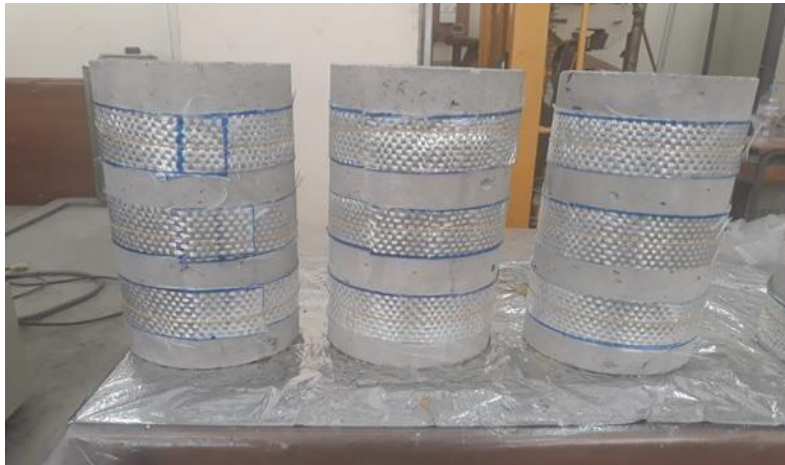
Désignation	Nomenclature	Type de renfort	Nombre de bande	Longueur de bande en (m)	Type de confinement
Témoin	T	Non confiné	Non confiné	Non confiné	Non confiné
5BTR	N1	Tissu recyclé	5	2.75	Totale
5BFV	N4	Fibre de verre	5	2.75	Totale
3BTR	N2	Tissu recyclé	3	1.65	Partielle
3BFV	N6	Fibre de verre	3	1.65	Partielle
HTR	N5	Tissu recyclé	1	1.65	Hélicoïdal
HFV	N3	Fibre de verre	1	1.65	Hélicoïdal

#### IV.3.1. Confinement partiel

Nous avons utilisé 3 bandes de largeur 6 cm et de longueur de 55 cm espacées de 3 cm. Les bandes sont appliquées, à l'aide d'une résine, sur le pourtour externe de l'éprouvette suivant un schéma bien spécifique. Elles sont soumises par la suite, à un essai de compression axial après 10 jours, le temps nécessaire pour assurer une bonne adhésion du tissu sur notre béton.



**Figure IV.27** : Méthode de confinement partiel avec des bandes de tissu recyclé.



FigureIV.28 : Éprouvettes confinées avec des bandes de tissu de fibre verre.

### IV.3.2. Confinement total

Dans ce cas de figure, nous avons utilisé 5 bandes de largeur 6 cm et de longueur 55cm collées à l'aide de la même résine sur la surface des spécimens.



Figure IV.29: Confinement total des éprouvettes avec le tissu recyclé.



FigureIV.30 : Confinement total des éprouvettes avec la fibre de verre.

### IV.3.2. Confinement Hélicoïdal

Dans ce type de confinement le même processus de collage des bandes de tissu est adopté. Nous avons utilisé une bande de longueur 1,65 m et d'une largeur 6 cm avec un espacées de 3,15 cm.



**Figure IV.31** : Confinement hélicoïdal des éprouvettes avec le tissu recyclé.



**FigureIV.32** : Confinement hélicoïdal des éprouvettes avec le tissu de fibre de verre.

#### IV.4. Chargement et acquisition (NF EN 12390-3)

Les éprouvettes sont maintenant utilisées pour évaluer la performance mécanique en compression des différents bétons étudiés. Une presse de type 3R (RP 3000) d'une capacité maximale de 3000 kN et une vitesse de chargements de 0.5 kN /s est utilisée (**voir Annexe 4**).



**Figure IV.33** : La machine de l'essai de compression.

#### IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté en détails tous les éléments de l'analyse expérimentale, en commençant par la caractérisation des différents constituants, la confection des éprouvettes, le mode opératoire et les différents essais considérés dans ce travail.

Nous avons présenté les différentes étapes suivies pour la détermination des proportions des différents constituants ainsi que les propriétés physiques et mécaniques du béton à base de déchets de verre non colorée.


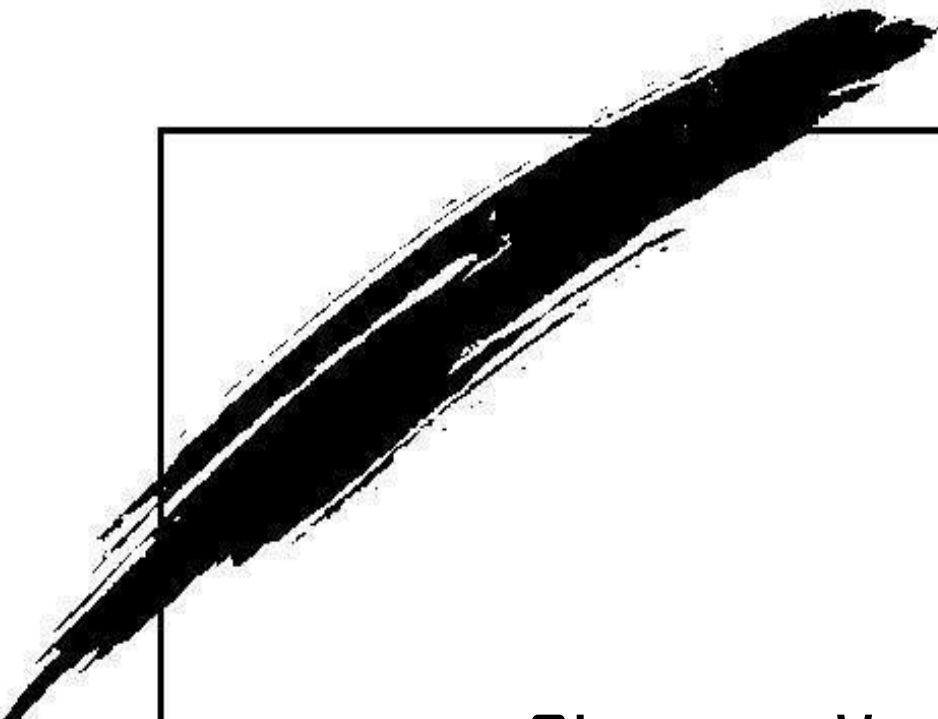
Des variantes dans la composition de notre béton ont été formulées dans le but d'optimiser notre composition.

Après durcissement de toutes les éprouvettes, ces dernières ont été confinées à l'aide d'une résine avec un tissu en fibre de verre et un tissu issu de l'industrie de récupération.

Les performances mécaniques en compression sont mesurées pour en déduire la meilleure variante d'étude.

**Référence bibliographique**

- [1] **Tarik.Ben Chabane** et al, « L'effet D'ajout de Poudre et de Sable de Verre sur le Comportement d'un Béton », International Symposium On Materials And Sustainable Development, Ismsd 2019, Boumerdes-Algeria,2019, <https://ismsd2019.sciencesconf.org/>.
- [2] **Tarik Benchabane** et al, "Experimental analysis of concrete specimens based on powder and glass sand", XV International Conference on Durability of Building Materials and Components, (DBMC), 20-23 October 2020, Barcelona Spain.
- [3] **Tarik Benchabane** et al, "Numerical simulation of concrete cylinders based on confined glass waste". 4th International Conference on Structural Integrity and Durability, (ICSID) 2020, Dubrovnik, Croatia.
- [4] **Touati Mohamed Ameziane**, « Comportement mécanique d'un béton à base de déchets de verre non colorés » Projet de fin d'études de Master académique, option structures, UMMTO, 2019.



Chapitre V  
Résultats et  
Interprétations

## V.1 Introduction

La résistance à la compression du béton est l'un des paramètres le plus fiable pour déterminer la qualité du béton et la capacité d'un matériau ou d'une structure à supporter les charges. Ces dernières tendent à réduire sa taille par compression (écrasement), par opposition à la résistance à la traction qui est une résistance à l'allongement (éclatement) et à la résistance au cisaillement qui est principalement une résistance à la torsion. C'est une valeur clé pour la conception des structures, elle se mesure sur des matériaux ainsi que sur des composants ou des structures.

La résistance à la compression d'un matériau est l'effort de compression uniaxial atteint à la rupture complète du matériau. Si le matériau est ductile cette rupture n'aura pas lieu mais le matériau se déformera de manière irréversible, de sorte que la résistance à la compression est assimilée à l'effort atteint à la limite de la déformation.

Ce chapitre concerne la présentation et interprétation des résultats expérimentaux relatifs aux différents bétons confectionnés. Tous les essais de compression ont été effectués sur des éprouvettes cylindriques, permettant de traiter l'influence de la substitution des déchets de verre et aussi de déterminer la meilleure méthode de confinement (Partiel, Total, Hélicoïdal). Les résultats obtenus ont été comparés à ceux d'un béton témoin (sans ajouts et sans confinement). Pour une appréciation de l'apport du tissu de recyclage proposé, une comparaison du comportement en compression avec la fibre de verre a été réalisée. Tous les résultats sont reportés sous forme d'histogrammes, des graphes et des tableaux.

Les bétons ont été élaborés avec les mêmes granulats :

-Gravier concassé de classe : 3/8 et 8/15.

-Sable de classe : 0/3.

-Ciment CPJ CEMII 42.5 R.

### Les ajouts utilisés :

-La poudre de verre non coloré.

-Le sable de verre non coloré.

### Les renforts utilisés :

-La fibre de verre.

-Un tissu issu de l'industrie de récupération.

### **Nomenclature des différents bétons élaborés :**

-T : Béton témoin, béton ordinaire + substitutions massiques (ciment et Sable) + 5% de poudre de verre + 10% sable de verre

-N1 : Béton + 5% de poudre de verre + 10% sable de verre + confinement total :5 bandes de tissu recyclé (5BTR)

-N4 : Béton + 5% de poudre de verre + 10% sable de verre + confinement total :5 bandes de fibre de verre (5BFV).

-N2 : Béton + 5% de poudre de verre + 10% sable de verre + confinement partiel :3 bandes de tissu recyclé (3BTR).

-N6 : Béton + 5% de poudre de verre + 10% sable de verre + confinement partiel :3 bandes de fibre de verre (3BFV).

-N5 : Béton + 5% de poudre de verre+ 10% sable de verre + confinement hélicoïdal : bande de tissu recyclé (HTR).

-N3 : Béton + 5% de poudre de verre + 10% sable de verre + confinement hélicoïdal : bande de fibre de verre (HTR).

Au total 21 éprouvettes cylindriques (16X32) cm<sup>2</sup> ont été confectionnées tenant des variantes proposées. Soit 03 éprouvettes pour chaque configuration.

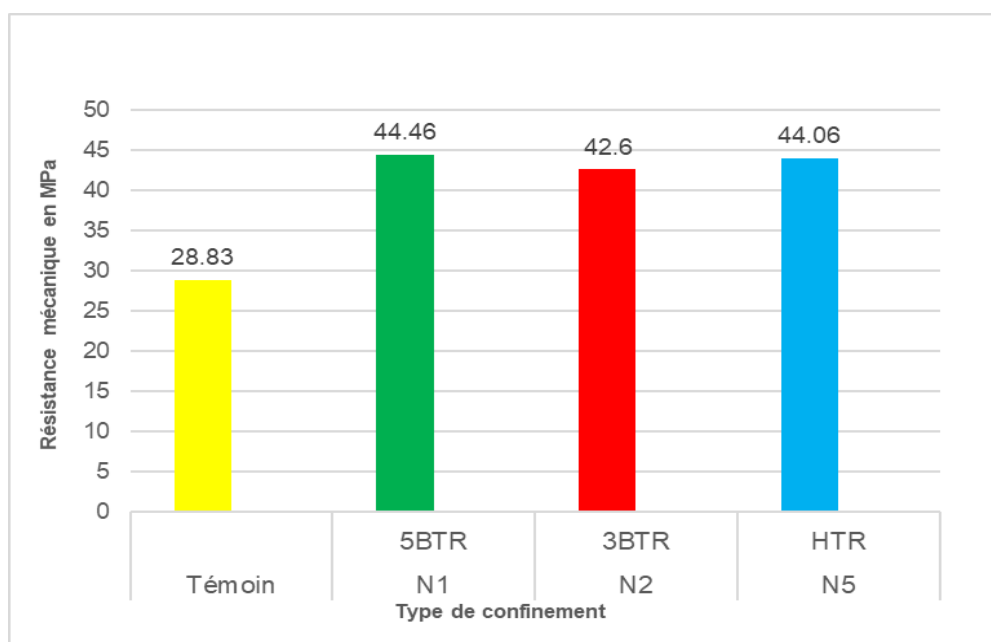
## **V .2. Comportement du béton en compression**

Comme préciser précédemment des cylindres (16x32) cm<sup>2</sup> ont été confinés selon 03 types de configurations aux vues de connaître l'apport du confinement sur la résistance en compression du béton. L'essai de compression réalisé nous a permis de caractériser de façon satisfaisante la résistance en compression de ces bétons. Les essais d'écrasements ont été effectués après le 10<sup>ème</sup> jour de la pose du tissu recyclé et du tissu de fibre de verre sur les différents échantillons. Tous les résultats sont illustrés sous forme de tableaux, histogrammes et courbes.

**Tableau V.1** : Résultats d'essai de compression sur les bétons étudiés.

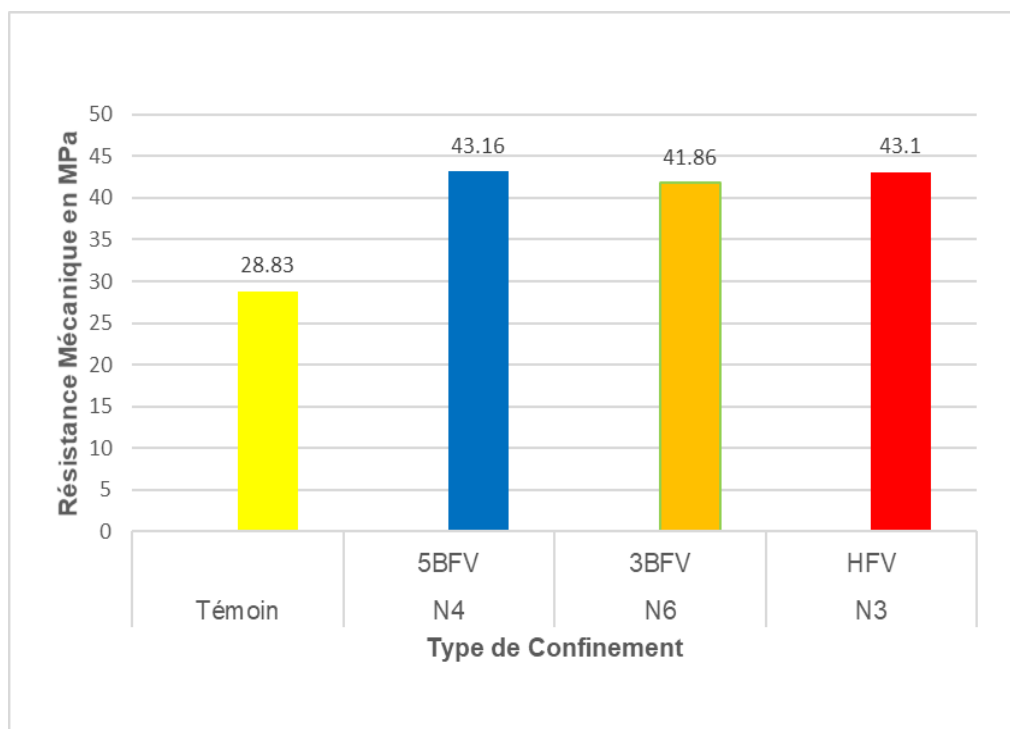
Désignation	Nomenclature	Type de renfort	Nombre de bande	Longueur de bande en (m)	Contrainte en compression MPa
Témoïn	T	/	/	/	28.83
5BTR	N1	Tissu recyclé	5	2.75	44.46
5BFV	N4	Fibre de verre	5	2.75	43.16
3BTR	N2	Tissu recyclé	3	1.65	42.6
3BFV	N6	Fibre de verre	3	1.65	41.86
HTR	N5	Tissu recyclé	1	1.65	44.06
HFV	N3	Fibre de verre	1	1.65	43.1

D'après les résultats illustrés sur le tableau ci-dessus, on constate que toutes les configurations de confinement des bétons à base de verre non coloré ont développé une augmentation de résistance par rapport à celle de l'échantillon témoin. À 28 jours résistance mécanique en compression du béton confinés dépasse les 40 MPa contre une contrainte du béton témoins d'une valeur de 28.83 MPa.

**Figure V.1** : Histogramme des résistances en compression des bétons avec tissu recyclé.

Il ressort de la figure (V.1) que la résistance du béton confiné avec le tissu recyclé dépasse largement celle du béton non confiné et ce quelle que soit le type de confinement. La plus grande résistance est enregistrée pour la variante bétons totalement confinés d'une valeur de 44.46 MPa. En effet la résistance augmente avec l'accroissement du nombre de tours de la bande. La plus petite résistance est récence pour la variante confinement partiel (3bandes) avec une valeur de 42.06 MPa. La comparaison entre les différents types de confinement montre que le confinement

total présente une augmentation par rapport au confinement partiel et hélicoïdal de l'ordre de 5.4 % et 0.89 % respectivement.



**Figure V.2 :** Histogramme des résistances en compression des bétons avec fibre de verre.

En comparant les résistances à la compression de béton témoin avec les trois autres bétons confinés (voir figure V.2), nous constatons que la formulation N4 (béton confiné avec la fibre de verre par la méthode totale) présente une meilleure résistance en compression de 43.16 MPa contre des résistances de 41.86 MPa et 43.1 MPa pour les formulations N6 et N3 respectivement.

### V .2.1. Confinement partiel du béton

La figure (V.3) représente les résistances en compression des bétons avec confinement partiel pour le tissu issu de l'industrie de récupération et tissu en fibre de verre. La présence du tissu recyclé confère au béton une résistance légèrement supérieur à celle du tissu en fibre de verre. Elle est de l'ordre de 42.6 MPa pour un béton confiné par un tissu recyclé et 41.86 MPa pour un béton confiné par un tissu en fibre de verre soit une différence de 1.73 %. Pour une même configuration le tissu recyclé est disponible sur place et à moindre coût par rapport à la fibre de verre qui reste cher. Nous restons optimistes par rapport au choix du tissu recyclé mais avec prudence puisque cette première approche nécessite d'autres essais pour confirmer le comportement de ce tissu issu de l'industrie de récupération.

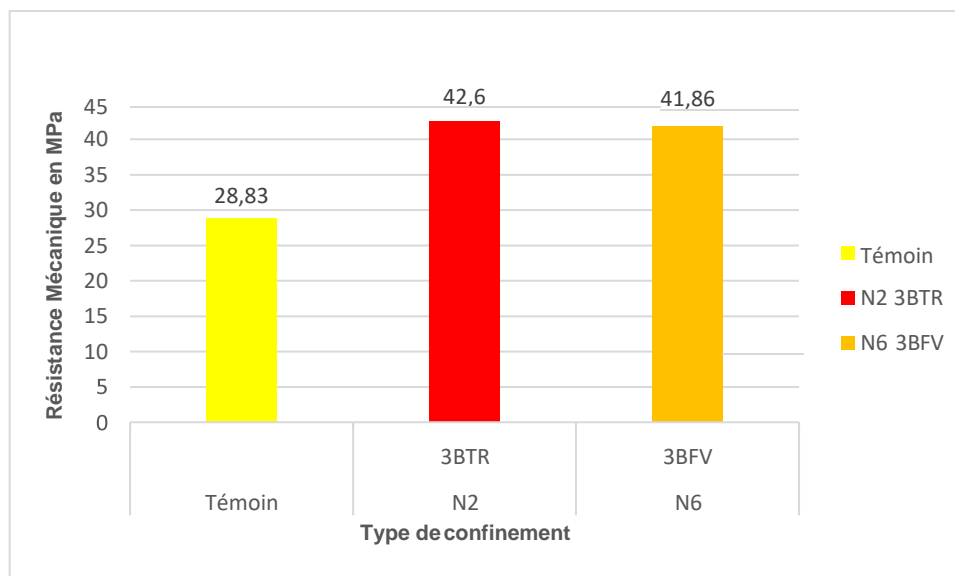


Figure V.3 : Histogramme des résistances en compression des bétons avec tissu recyclé.

## V .2.2. Confinement total du béton

La figure (V.4) montre clairement que le béton témoin non confiné est caractérisé par une contrainte de compression de 28.83 MPa. À la différence les bétons confinés à l'aide tissu recyclé et tissu en fibre de verre donne de meilleurs résultats soit 44.46 MPa pour un béton confiné par tissu de recyclage et 43.16 MPa pour un béton de fibre de verre.

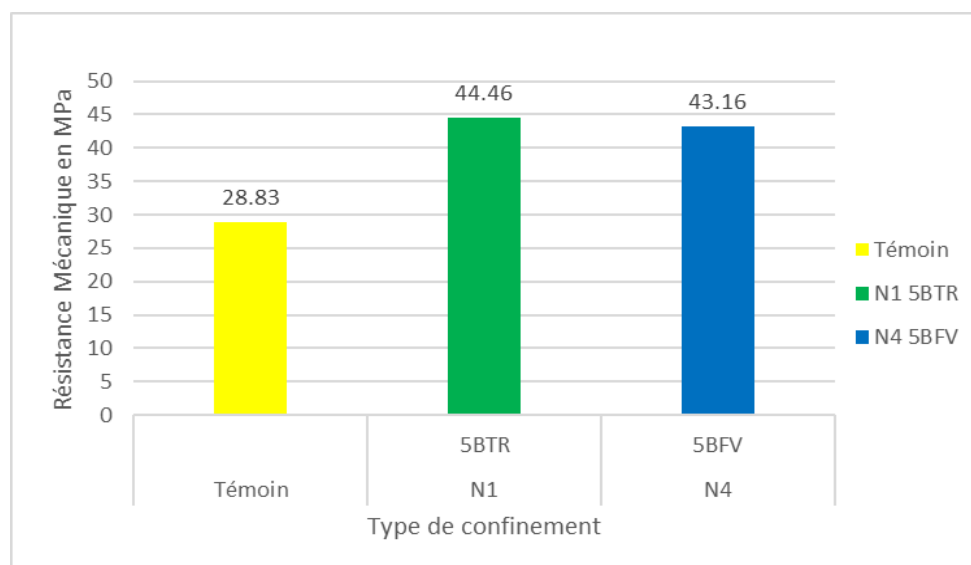


Figure V.4 : Histogramme des résistances en compression des bétons par la méthode totale.

## V .2. 3. Confinement hélicoïdal du béton

On remarque comme reporté sur la figure (V.5) ci-dessous que la résistance à la compression des configurations N5 et N3 sont supérieures à celle du béton témoin. En comparant les résultats des deux bétons confinés par la méthode hélicoïdale on constate que le béton confiné

par le tissu recyclé donne une meilleure résistance de 44.06 MPa que la fibre de verre 43.1 MPa mais cette différence est très faible, elle est de l'ordre 0.96 MPa.

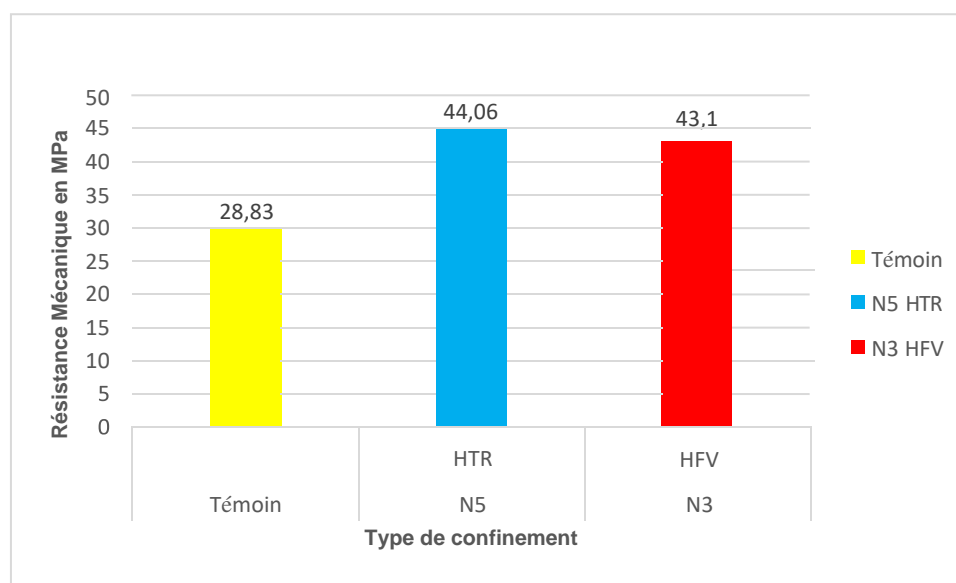


Figure V.5 : Histogramme des résistances en compression des bétons par la méthode hélicoïdale.

#### V .2. 4. Comparaison entre les différents types de confinement.

Dans la figure (V.6) ci-dessous nous avons représenté la superposition des différents types de confinement pour une meilleure appréciation des contraintes de compression dans les bétons. On constate que l'évolution de la résistance à la compression varie en fonction de type de confinement réalisé. Le confinement par collage de matériaux composites permet d'améliorer considérablement la résistance du béton à base des déchets de verre sous chargement de compression. En termes de résistance la meilleure configuration entre le confinement total, confinement partiel circulaire et le confinement hélicoïdal en hélices est le confinement total.

À noter que le béton confiné avec le tissu recyclé donne des valeurs de résistances légèrement supérieures au béton confiné avec la fibre de verre. On peut remarquer aussi que la méthode partielle et la méthode hélicoïdale donne presque les mêmes résistances en compression. Ceci peut être expliqué par la même longueur de bande utilisée dans confinement réalisé.

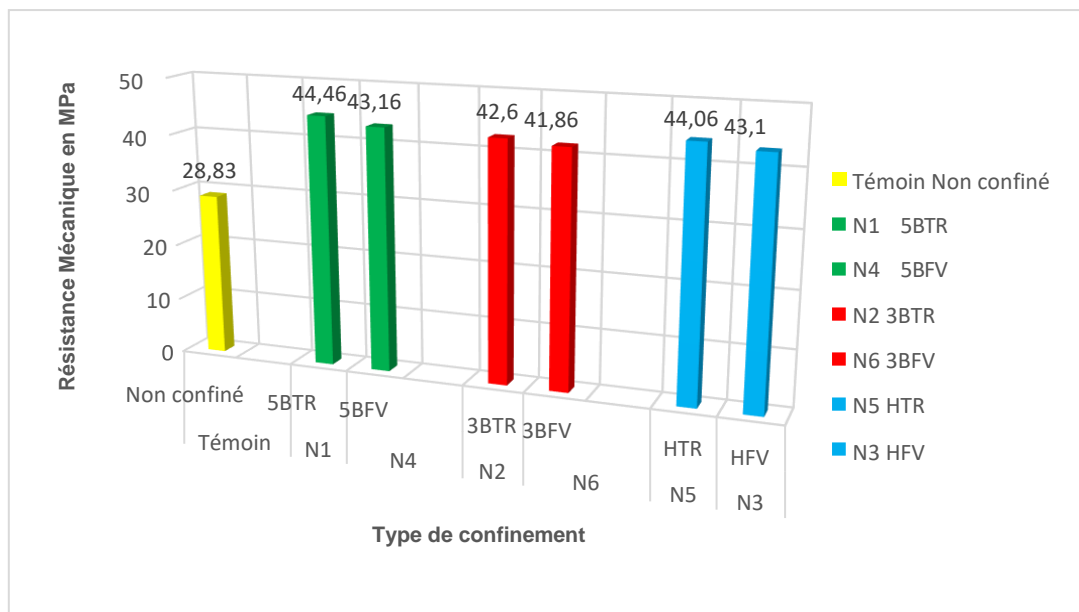


Figure V.6 : Les différents types de confinement du béton à base de tissu recyclé et de fibre de verre.

Dans ce qui suit, nous avons représenté les résultats des essais de compressions sous forme de courbes contraintes -déformations axiale. L'objectif visé par la présentation des courbes selon le type de confinement est de mesurer l'incidence du collage de ces tissus sur la ductilité en tenant compte des valeurs des résistances. Les figures suivantes présentent le comportement en compression simple des différents bétons étudiés :

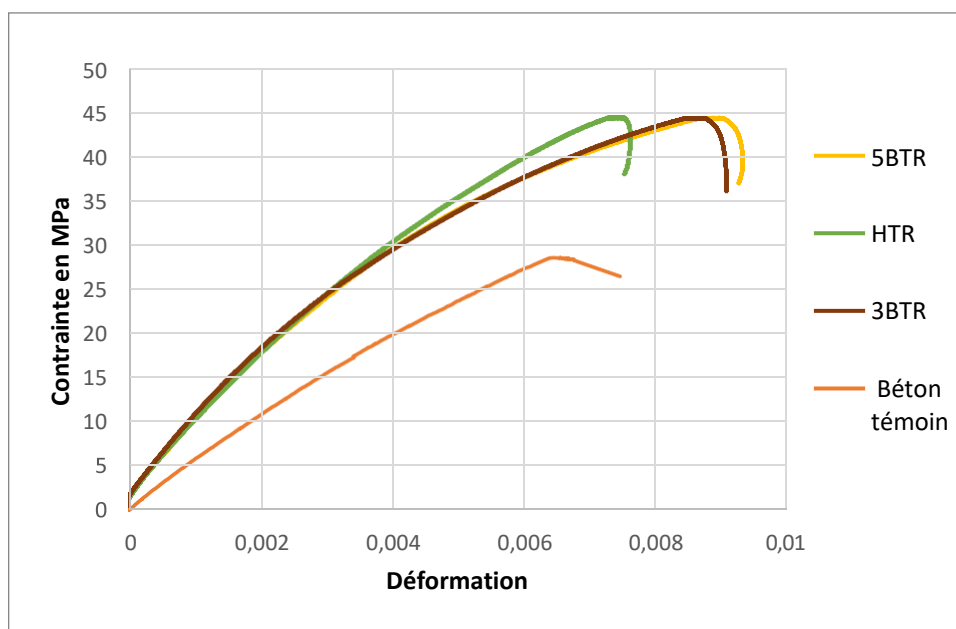
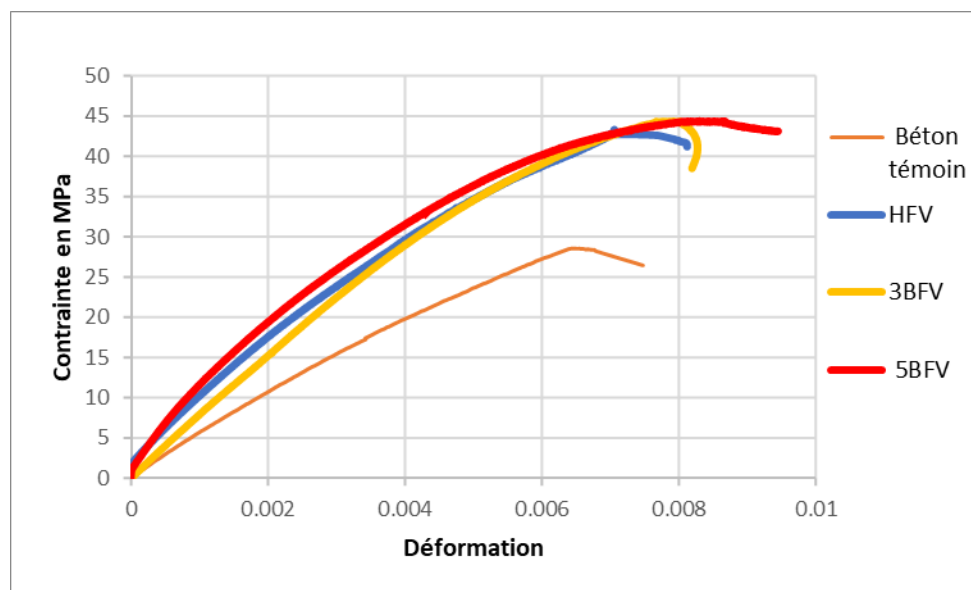


Figure V.7 : Courbe contrainte-déformation des bétons confinés avec le tissu recyclé.

La confrontation des courbes contraintes déformations obtenues montre :

- Une phase de comportement identique à celle d'un matériau homogène et élastique, celle-ci se traduit par une relation linéaire entre la contrainte  $\sigma$  et la déformation  $\varepsilon$ . Les courbes de confinement sont confondues dans cette zone par contre celle du béton témoin présente une droite légèrement inférieure. A la fin de la zone linéaire, il se produit un point de transition qui indique que les micros-fissures dans béton prennent place. À ce stade, les bandes de composites commencent à développer un effet de confinement pour resserrer ces fissures et ainsi leur élargissement pour devenir des macros-fissures.
- Le béton non confiné atteint une contrainte maximale de 28.83 MPa correspondante à une déformation de 0.007 au-delà de cette valeur on remarque une chute de la contrainte jusqu'à la rupture par contre les contraintes des cylindres confinés par le tissu recyclé avec les différentes méthodes de confinement continuent à augmenter au-delà de la valeur maximale du béton non confiné pour atteindre des valeurs de l'ordre de 40MPa.
- Dans la deuxième phase le béton pour la configuration confinement total avec le tissu recyclé développe une résistance de 44.46 MPa et aussi pour le béton confiné par la méthode hélicoïdale atteint une résistance de 44.06 MPa par contre le confinement partiellement avec des cerces atteint une résistance de 42.5 MPa.
- Quand-à la troisième phase celle-ci se traduit par une légère décroissante avec une courbure plus étendue pour le béton confiné avec le tissu recyclé, le tissu dans ce cas réagit, de plus en plus pour pouvoir s'opposer efficacement à l'ouverture des fissures et à leur propagation dans le béton, en reprenant le maximum d'effort possible pour éviter l'endommagement des éprouvettes de bétons. Cette phase se termine par la « ruine » des spécimens, cette ruine est prématurée dans le cas du béton non confiné comparée au béton confiné.

En termes de ductilité les trois types de confinement ont présenté une amélioration comparativement au béton non confiné. Les courbes dans le cas des bétons confinés sont étalées par rapport à celle du béton de référence. Un effet de ductilité plus important est ressenti ce qui représente un apport significatif et représentatif.



**Figure V.8 :** Courbe contrainte- déformation des bétons confinés avec la fibre de verre.

- Les allures des courbes contraintes -déformations en compression des bétons avec tissu en fibre de verre sont similaires à celles des bétons confinés avec un tissu issu de l'industrie de récupération. Une première phase distingue un comportement presque qui dénote une relation linéaire entre la contrainte  $\sigma$  et la déformation  $\varepsilon$ . À ce stade, le béton seul reprend les efforts, aucune forme de fissure n'est apparue.
- Une deuxième phase où les bétons confinés avec la fibre de verre atteignent le maximum de la contrainte de 43.16 MPa pour confinement total et 43.10 MPa pour le béton avec confinement hélicoïdal. Le confinement partiel présente une contrainte de 41.86 MPa.
- La troisième phase se traduit par une courbe décroissante avec une courbure plus étendue pour le béton confiné, le tissu assure une bonne reprise des efforts de plus en plus pour pouvoir s'opposer efficacement à l'ouverture des fissures et à leur propagation dans le béton. Cette phase se termine par éclatement sur périphérie du béton. On observe ce phénomène prématurément dans le béton non confiné.

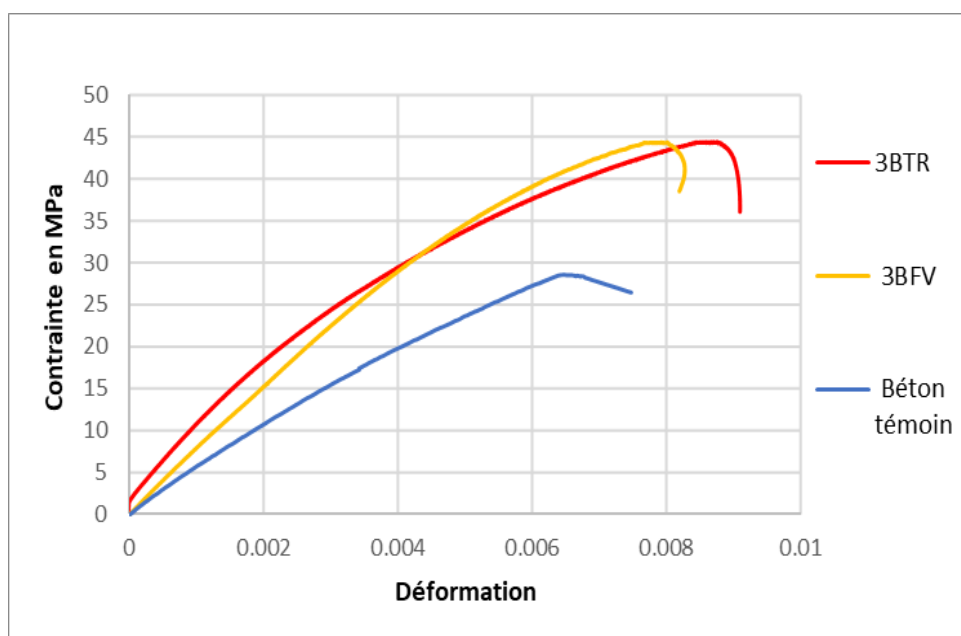
### V .3. Effet du type de confinement sur la résistance du béton

A la suite de tous les résultats obtenus, nous allons mesurer l'effet du type de confinement sur le comportement en compression du béton à base de déchets de verre.

Pour tous les types de confinement, les courbes contraintes-déformations des spécimens testés présentent une allure bilinéaire qui se divise en deux formes : des diagrammes de type ascendant et des diagrammes de type descendant (voir Figures ci-dessus). L'effet du type de confinement et

son efficacité s'est fait ressentir vis-à-vis des gains en résistance, en ductilité et le mode de rupture.

Quel que soit le type de confinement adopté l'allure des différentes courbes est la même. Au début du chargement ces courbes se caractérisent par une phase telle que les petites valeurs de la charge n'entraînent pas la fissuration du béton tendu, ainsi le comportement est élastique. Cette phase s'achève par la suite lorsque l'effort atteint la valeur où la fissuration apparaît dans les sections les plus sollicitées et se développe le long des cylindres. Pour s'opposer efficacement à l'ouverture des fissures encore à l'état microfissures le confinement intervient pour ralentir la rupture prématurée des spécimens confinés. Contrairement au béton témoin où l'augmentation de la charge continue à l'endommager plus rapidement jusqu'à atteindre sa valeur limite de rupture.



**Figure V.9** : Courbe contrainte-déformation des bétons par la méthode partielle.

La figure (V.9) illustre le comportement du béton confiné partiellement avec le tissu recyclé et la fibre de verre. Le confinement avec le tissu recyclé procure au béton une contrainte de 42.6 MPa avec une déformation de 0.009. Par rapport au béton confiné avec la fibre de verre avec une résistance 41.86 MPa et une déformation de 0.008. Le béton témoin subit une rupture fragile comparativement au béton confiné avec une contrainte de 28.83 MPa et une déformation de 0.007.

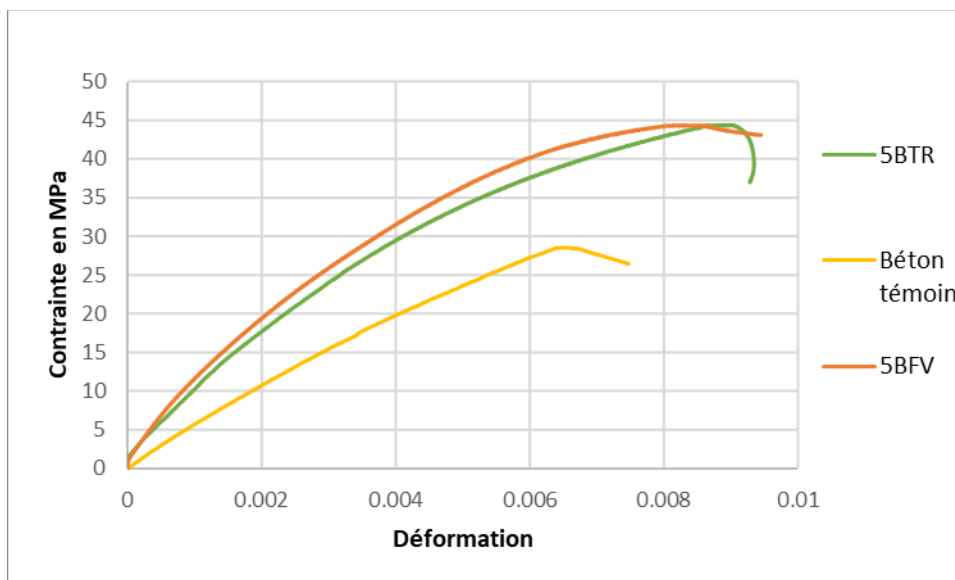


Figure V.10 : Courbe contrainte-déformation des bétons confinés par la méthode totale.

Pour un confinement total on voit clairement l'amélioration en termes de résistance à la compression et de ductilité des bétons confinés comparativement au béton non confiné et cela pour les deux types de renfort. En effet une résistance en compression dans le cas du béton confiné avec le tissu recyclé de 44.46 MPa est observée et 43.16 MPa pour le béton confiné avec la fibre de verre.

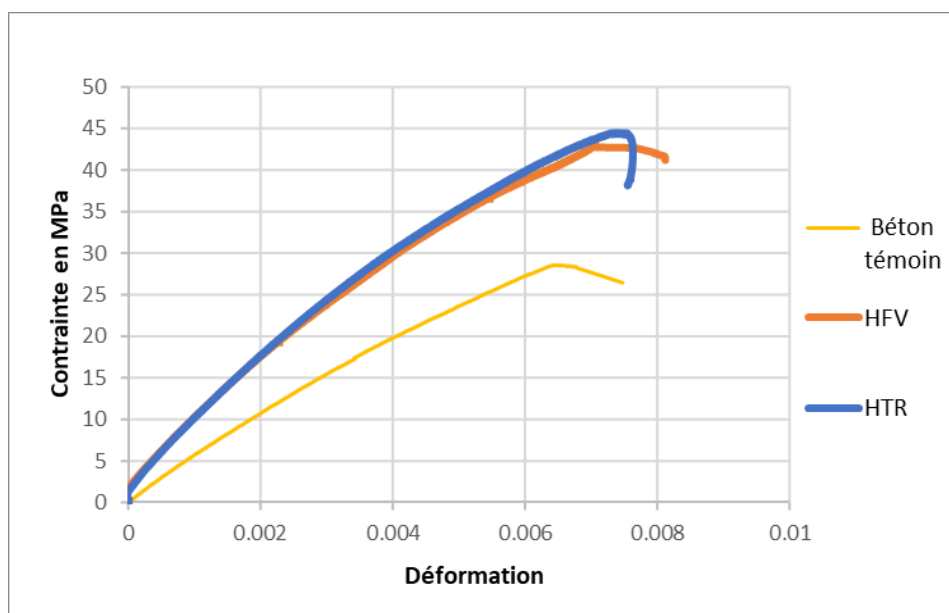


Figure V.11 : Courbe contrainte-déformation des bétons confinés par la méthode hélicoïdale.

La figure (V.11) montre que la contrainte du béton confiné dépasse celle du béton non confiné et cela quel que soit le type de renfort réalisé. En comparant les contraintes des deux bétons,

le béton confiné avec un tissu recyclé qui induit une résistance 44.06 MPa et 43.1 MPa pour un confinement avec la fibre de verre. La différence des résistances entre les deux types de renfort est de 0.96 MPa.

**V .4. Mode de rupture sous l’essai de la comparaison :**

Après avoir déterminé la résistance mécanique de la compression après 10 jours de confinement (résine + tissus recyclés ou bien fibre de verre) sur les éprouvettes cylindriques ; ses tableaux ci- dessous on résume une analyse et interprétations de chaque spécimen avec des photos pour bien constate le type de mode rupture après encrassement pour chaque essai étudier.



**Tableau V.2 :** Mode de rupture du béton témoin.

Type de confinement	Béton témoin	
Les composants du béton	Béton (Ciment, gravier, Sable, eau) + déchets de verre (5%PV+10%SV)	
Pourcentage de rupture	15%	
Résistance mécanique (MPa)	28.83	
Mode de rupture	-Eclatement du béton. -Fissure secondaire (verticale et horizontale) -Présence de microfissure.	


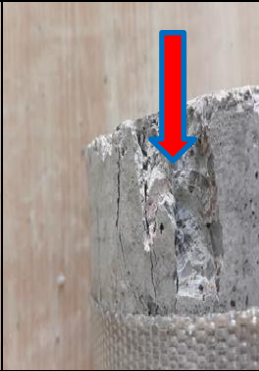


**Tableau V.3 :** Mode de rupture du béton confiné à base de tissu recyclé avec la méthode totale

Type de confinement	Totale		
Les composants du béton	Béton ordinaire + déchets de verre (5%PV+10%SV)		
Les composants de confinement	Résine MEDAPOXY STR +tissu recyclé		
Pourcentage de rupture	15%		
Résistance mécanique en MPa	44.46		
Mode de rupture	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Les éprouvettes non endommagées.</li> <li>-Apparition des microfissures.</li> <li>-Non décollement du renfort.</li> </ul>		





**Tableau V.4 :** Mode de rupture du béton confiné à base de fibre de verre avec la méthode totale

Type de confinement	Totale		
Les composants du béton	Béton ordinaire + ajouts des déchets de verre (5%PV+10%SV)		
Les composants de confinement	Résine MEDAPOXY STR + la fibre de verre		
Pourcentage de rupture	15%		
Résistance mécanique en MPa	43.16		
Mode de rupture	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Éclatement du béton à la partie supérieure de l'éprouvette.</li> <li>-Présence de fissure secondaire.</li> <li>-Apparition de microfissures.</li> </ul>		

**Tableau V.5 :** Mode de rupture du béton confiné à base de tissu recyclé avec la méthode partielle.

Type de confinement	Partielle		
Les composants du béton	Béton ordinaire + ajouts des déchets de verre (5%PV+10%SV)		
Les composants de confinement	Résine MEDAPOXY STR + tissu recyclé		
Pourcentage de rupture	15%		
Résistance mécanique en MPa	42.6		
Mode de rupture	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Léger endommagement de la partie supérieure.</li> <li>-Eclatement du béton dans la partie non renforcée</li> <li>-Apparition des fissures secondaires.</li> <li>-Présence de microfissures.</li> </ul>		

**Tableau V.6 :** Mode de rupture du béton confiné à base de fibre de verre avec la méthode partielle.

Type de confinement	Partielle		
Les composants du béton	Béton ordinaire + déchets de verre (5%PV+10%SV)		
Les composants de confinement	Résine MEDAPOXY STR+ fibre de verre.		
Pourcentage de rupture	15%		
Résistance mécanique (MPa)	41.86		
Mode de rupture	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Endommagement superficiel de la partie supérieure de l'éprouvette.</li> <li>-Apparition des fissures et microfissures.</li> <li>-Eclatement de béton.</li> <li>-Fissure entre le renfort (bandes).</li> </ul>		

**Tableau V.7 :** Mode de rupture du béton confiné à base de tissu recyclé avec la méthode hélicoïdale

Type de confinement	Hélicoïdale		
Les composants du béton	Béton ordinaire + déchets de verre (5%PV+10%SV)		
Les composants du confinement	Résine MEDAPOXY STR + tissu recyclé		
Pourcentage de rupture	15%		
Résistance mécanique en MPa	42.56		
Mode de rupture	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Éclatement superficiel du béton.</li> <li>-Présence des fissures secondaires (verticale et horizontale) et microfissure.</li> <li>-fissure entre bandes.</li> </ul>		

**Tableau V.8 :** Mode de rupture du béton confiné à base de fibre de verre avec la méthode hélicoïdale.

Type de confinement	Hélicoïdale		
Les composants du béton	Béton ordinaire + ajouts des déchets de verre (5%PV+10%SV)		
Les composants de confinement	Résine MEDAPOXY STR + fibre de verre.		
Pourcentage de rupture	15%		
Résistance mécanique en MPa	43.1		
Mode de rupture	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Détachement léger du renfort.</li> <li>-Éclatement superficiel de béton.</li> <li>-Présence des fissures (verticale et horizontale).</li> <li>-Apparition de microfissures.</li> </ul>		

## Conclusion

Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence du type de confinement considérés dans cette étude à savoir confinement partiel, total et hélicoïdal. Deux types de renfort ont été utilisés pour mettre aussi en évidence l'influence du type de renfort (un tissu recyclé et un tissu en fibre de verre).

Les résultats préliminaires confirment l'intérêt de ce procédé de confinement non seulement en termes de gains en résistances et en ductilité, mais également en économie de tissu composite. L'amélioration des résistances des cylindres confinés résulte de la conjugaison des performances mécaniques du renfort composite utilisé. Elle est réalisée grâce au confinement du béton qui se trouve emprisonné à l'intérieur des bandes composites. Le tissu composite confère au cylindre en béton une énergie de rupture très importante. L'utilisation de tissu recyclé permet d'économiser le coût d'utilisation vu que la fibre de verre reste chère.

Le tissu recyclé induit un gain en matière de résistance à la compression et de ductilité du spécimen. L'analyse des résultats nous renseigne sur l'efficacité du nouveau procédé de confinement par un tissu issu de l'industrie de récupération, en termes d'apport positif en résistance ultime et de déformation au pic correspondante.

Pour toutes les configurations de confinement, le confinement total reste le procédé qui produit une résistance la plus élevée suivi du confinement hélicoïdal pour finir avec des résistances légèrement plus petites dans le cas du confinement partiel. À noter que la différence entre toutes ces valeurs de résistances reste très faible. À titre indicatif une différence de 0.89 % entre le confinement total et hélicoïdal est constatée. Le confinement total présente par rapport au confinement partiel un gain plus grand d'une valeur de 4.18%. Pour finir le confinement hélicoïdal présente un gain supérieur au confinement partiel de 3.31%.

Aussi, le mode de rupture est directement affecté par le procédé de confinement appliqué. Le tissu composite confère au cylindre en béton une énergie de rupture très importante. Après rupture, nous avons remarqué que le béton fissuré sous l'action de la charge de compression reste retenu à l'intérieur du confinement.



# Conclusion générale

### Conclusion générale

Le but de notre démarche est l'étude du comportement mécanique (compression) d'un béton écologique à base de déchets de verres non colorés. Ces déchets sont utilisés sous de poudre et de granulats. L'accent est porté essentiellement sur la variation du taux de déchets (pourcentages) à incorporés dans la matrice granulaire pour assurer un bon comportement mécanique. Par la suite on a étudié le confinement du béton à base de déchets de verre en prenant en compte le pourcentage qui présentait de bonnes performances mécaniques. Trois types de confinement sont étudiés telles que le confinement total, confinement partiel par des cerces et un confinement hélicoïdal en hélices. Les spécimens ont été confinés avec un tissu de polypropylène issu de l'industrie de récupération.

Les résultats des essais de compression effectués sur les différentes éprouvettes nous ont permis de faire les conclusions suivantes :

- La résistance du béton avec les déchets de verre confinés augmente jusqu'à dépasser celle du béton témoin.
- Le béton avec les déchets de verre présente un très bon comportement à la compression.
- Pour toutes les configurations de confinement, le confinement total reste le procédé qui produit une résistance la plus élevée. Suivi du confinement hélicoïdal pour finir avec des résistances légèrement plus petites dans le cas du confinement partiel. Ce phénomène est observé quel que soit le type de renfort.
- La méthode de confinement total avec le tissu recyclé offre une résistance de 44.46 MPa contre une résistance de 44.06 MPa pour un confinement hélicoïdal. La résistance dans le cas d'un confinement partiel est de 42.6 MPa.
- Dans le cas du béton confiné par la fibre de verre des résistances légèrement inférieures par rapport au tissu de recyclage sont enregistrées. La résistance pour le confinement total est de 43.16 MPa, la méthode hélicoïdale de 43.1 MPa et celle de la méthode partielle 41.86 MPa.

- La méthode de confinement total proposée offre des prédictions satisfaisantes en ce qui concernent la contrainte et la déformation du béton confiné avec des composites du tissu recyclé.
- La rupture des cylindres confinés est marquée par une rupture de fibre de verre. Elle se produit prématurément, pour un niveau de contrainte inférieur à la résistance ultime du composite du tissu recyclé, le même constat est remarqué pour le béton témoin qui présente une rupture très fragile et très prématurée.
- Le tissu composite confère au cylindre en béton une énergie de rupture très importante. Après rupture, nous avons remarqué que le béton fissuré sous l'action de la charge de compression reste retenu à l'intérieur du confinement.
- La valorisation des déchets de verre présente une voie prometteuse pour fabriquer de nouveaux bétons.



# Les annexes

---

# Annexe 1

## Résultats des essais de caractérisation

---

## Annexe 1 : Résultats des essais de caractérisation

### 1- Analyse granulométrique (résultats de caractérisation expérimentale des granulats) :

Dans cette annexe sont présentés les résultats de caractérisation des granulats utilisés pour notre étude.

#### Matériau : Sable 0/3

<b>Nature</b>		Gravier concassé 0/3		
<b>Provenance</b>		Carrière Dedjel Sétif		
Caractérisation faite selon EN 933-1				
<b>Analyse granulométrique</b>				
Procédé utilisé : Lavage par tamisage.				
Masse sèche totale		M1	2000 g	
Masse sèche après lavage		M2	1500 g	
Masse sèche des fines retirées après lavage		M1-M2	5000 g	
Ouverture de tamis [mm]	Refus en [g]	Refus cumulés en [g]	Refus cumulés en [%]	Tamisât cumulés [%]
5	5,9	5,5	0,298	99,705
2,5	2,2	8,1	0,175	99,505
1,25	967	975,1	48,75	51,25
0,63	406,5	1381,6	69,08	30,92
0,315	215,8	1597,4	79,87	20,13
0,16	174,2	1771,6	88,58	11,42
0,08	136,5	1908,1	95,405	4,595
Fond	87,7	1995,8	99,79	0,21

### Matériau : Gravier 3/8

<b>Nature</b>		Gravier concassé 3/8		
<b>Provenance</b>		Carrière de Tizi Ouzou		
Caractérisation faite selon EN 933-1				
<b>Analyse granulométrique</b>				
Procédé utilisé : Lavage par tamisage.				
Masse séché totale		M1	2000 g	
Masse sèche après lavage		M2	1500 g	
Masse sèche des fines retirées après lavage		M1-M2	5000 g	
Ouverture de tamis [mm]	Refus en [g]	Refus cumulés en [g]	Refus cumulés en [%]	Tamisât cumulés [%]
10	0	0	0	100
8	5	5	0,1	99,9
6,3	30	35	0,7	99,3
5	1675	1710	34,2	65,8
4	1145	2855	57,1	42,9
3,15	950	3805	76,1	29,9
2	540	4345	86,9	13,1
Fond	655	5000	100	0

### Matériau : Gravier 8/15

<b>Nature</b>		Gravier concassé 8/15		
<b>Provenance</b>		Carrière de Tizi Ouzou		
Caractérisation faite selon EN 933-1				
<b>Analyse granulométrique</b>				
Procédé utilisé : Lavage par tamisage.				
Masse séché totale		M1	2000 g	
Masse sèche après lavage		M2	1500 g	
Masse sèche des fines retirées après lavage		M1-M2	5000 g	
Ouverture de tamis [mm]	Refus en [g]	Refus cumulés en [g]	Refus cumulés en [%]	Tamisât cumulés [%]
20	0	0	0	100
16	56	56	1,12	98,88
12,5	1401	1457	29,14	70,86
10	1936,7	3393,7	67,874	32,126
8	1138,4	4532,1	90,642	9,358
6,3	195,1	4727,2	94,544	5,456
Fond	287,5	5000	100	0

---

# Annexe 2

## Fiche technique de la résine MEDAPOXY – STR

---

# MEDAPOXY STR

Classification selon la norme AFNOR NFT36 005 :  
Famille 1 : Classe 6b

## Revêtement époxydique par stratification

### Description

Le **MEDAPOXY STR** est une résine époxy destinée à la stratification sur différents supports.

Le **MEDAPOXY STR** se présente sous forme de kit pré-dosé de 2 composants :

**Élément A** : Résine

**Élément B** : Durcisseur

### Domaines D'application

- Stratification à la fibre de verre des réservoirs ou bassins contenant des produits chimiques (acides, bases, solvants, pétrole, etc.)
- Vitrification (sans fibre de verre) des bassins et réservoirs en béton et en acier.

### Propriétés

- Très bonne tenue aux produits chimiques (nous consulter)
- Très bonne adhérence sur supports béton et acier
- Bonne mouillabilité du support et de la fibre de verre

### Caractéristiques

- Rapport pondéral :  
**Élément A** : 1kg  
**Élément B** : 0,666 kg
- Densité (ISO758) : ..... 1,1 ± 0,05
- Viscosité (NF T76-102) : ..... 11000 Mpa.S à 25 °C
- DPU (NFP18 810) : ..... 1h 15mn à 20 °C et 65% HR
- Temps de durcissement à 20 ° C et 65% HR  
Hors poisse : ..... 6 h  
Dur : ..... 16 h
- Rc (NA 427) ..... >70 MPA
- Rf (NA 234) : ..... >25 MPA
- Adhérence sur béton (NFP18 858) : ..... >3 MPA
- Durée de mise en service ..... 10 j 20° C

### Mode D'emploi

#### Conditions d'utilisation :

- Ne pas appliquer lorsque la température ambiante ou celle du support est inférieure à 10°C ou supérieure à 30°C.
- L'humidité relative de l'air doit être inférieure à 80%.

#### Préparation du support (NF P 74-203/DTU 59-3):

Support béton ou mortier :

- Les bétons ou mortiers "supports" doivent avoir au moins 28 jours d'âge.
- Le support doit être sec, propre et débarrassé des parties non adhérentes. Toutes traces d'huiles, graisses, peintures, laitance ou autres souillures doivent être éliminées. Nettoyer soigneusement et dépoussiérer avant l'application du primaire **MEDAIMPREGNATION**

#### Supports métalliques :

- Décaper (mécaniquement ou chimiquement)
- Dépoussiérer les surfaces avant l'application d'une résine anticorrosion **MEDAPOXY PRIMAIRE AC**

#### Mélange :

- Procéder au mélange des deux composants une fois que la préparation des supports soit terminée.
- Préparer la quantité de mélange pouvant être utilisée durant ce temps.
- Il est très important de bien remuer les deux éléments constituant le **MEDAPOXY STR** jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène.
- Verser l'élément B (durcisseur) dans l'élément A (résine).
- Vider complètement les récipients afin de respecter le rapport du mélange.
- Remuer pendant 3 minutes avec un agitateur électrique à faible vitesse de rotation. Raclez plusieurs fois les parois du récipient afin d'assurer une dispersion totale.

#### Application

#### Stratification :

- 1- Appliquer une première couche de **MEDAPOXY STR** à l'aide d'un rouleau à raison de 1 kg/m<sup>2</sup> environ.
- 2- Poser immédiatement après une couche de mat de verre non tissé (**MEDISOL**).  
- à l'aide d'un rouleau, bien étaler la mat de verre. Il est impératif d'éviter la formation de poches d'air.
- 3- Un chevauchement de 3 à 5 cm des bandes de mat de verre est indispensable.
- 4- La première couche de stratifié ayant durci à l'état poisseux, appliquer une deuxième couche de **MEDAPOXY STR** (environ 1 kg/m<sup>2</sup>)
- 5- Procéder à la deuxième stratification (idem que 2)

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandée de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz



# MEDAPOXY STR

Classification selon la norme AFNOR NFT36 005 :  
Famille 1 : Classe 6b

## Revêtement époxydique par stratification

6- Après durcissement de la 2ème stratification, appliquer une couche de finition de **MEDAPOXY STR** à raison de **0,7 à 1 kg/m<sup>2</sup>** environ.

Laisser durcir 10 jours avant la mise en service.

### Conditionnement Et Stockage

Le **MEDAPOXY STR** est Livré en kit de 20 kg :

Élément A : 12 kg

Élément B : 08 kg

### Durée de conservation :

Le produit se conserve une année à l'abri de la chaleur et de l'humidité dans son emballage d'origine fermé hermétiquement.

### TEMPS DE SÉCHAGE ET DE MISE EN SERVICE :

	10° C	20° C	30° C
Hors toucher	10 h	5 h	3 h
Trafic piéton	4 jours	3 jours	1 jour
Trafic lourd	8 jours	5 jours	2 jours
Durcissement complet	24 jours	17 jours	10 jours

**Attention :** La résistance aux produits agressifs ne s'obtient qu'après le durcissement complet.

### Précautions D'emploi

Les résines époxydiques peuvent irriter la peau et les muqueuses. En conséquence, il est conseillé de porter des gants, des lunettes et un masque de protection lors de l'utilisation.

En cas de contact avec les yeux, laver à grande eau et consulter un médecin.

Nettoyer les outils après l'application à l'aide d'un diluant époxy (**MEDILUPOX**).

Se référer à la Fiche de Données Sécurité, disponible sur [www.granitex-dz.com](http://www.granitex-dz.com)

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandée de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



**Granitex**  
فرانيتكس

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

[www.granitex.dz](http://www.granitex.dz) - E-mail: [granitex@granitex.dz](mailto:granitex@granitex.dz)



---

# Annexe 3

## Fiche technique de la fibre de verre GEBSOFER TISSU ROVING

---

## GEBSOFER TISSU ROVING

### FONCTIONNALITE

Tissu de fils de verre tissés à utiliser avec GEBSOFER RESINE pour la réparation ou le renfort des matériaux (métaux, béton, certains plastiques, ...). Il permet d'effectuer des renforts ou des réparations de trous et fissures de grande importance, même débouchants sur des surfaces complexes.

- Bricolage : bouchage, colmatage, collage et réparations de trous ou fissures importantes. Carrosseries automobiles, caravanes, bateaux (utilisation au dessus de la ligne de flottaison), ...
- En tôlerie : réparation de tôles endommagées, ...
- En mécanique : réparation de carters, colmatage des fissures.
- Dans le bâtiment : réparation du matériel de chantier, canalisations.
- Réalisation de stratifications

Ne convient pas pour des réparations en contact avec l'eau potable, ni en contact permanent avec l'eau.

Conformément à la Directive 2004-42/CE, le couple GEBSOFER RESINE + GEBSOFER TISSU ROVING n'est pas utilisable pour la retouche de véhicules.

### Caractéristiques techniques

Spécifications	Caractéristiques
Nature	Tissu de fils de verre tissés
Couleur	Blanc
Format	1 m <sup>2</sup>
Masse surfacique	270 g/m <sup>2</sup>
Propriétés	Très souple et déformable, idéal pour des formes complexes. Grande facilité de manipulation et de découpe. Bonne mouillabilité, compatibilité avec les résines polyesters et époxydes.

### Mise en œuvre

#### Préparation

- Nettoyer et poncer la surface à réparer pour une meilleure accroche.
- Préparer le renfort tissu roving en coupant un morceau de 5 cm plus grand que la partie à réparer.
- Estimer la quantité de résine nécessaire et la quantité de durcisseur nécessaire (2% en masse par rapport à la masse de résine à 20°C). Le cas échéant, un tableau indicatif sur l'emballage donne une approximation en longueur de cordons de durcisseur par rapport au volume de produit utilisé.

#### Mode d'emploi

- La température doit être au minimum de +5°C.
- A la résine, ajouter la quantité nécessaire de durcisseur. Bien mélanger jusqu'à l'obtention d'une couleur uniforme. Le mélange peut s'utiliser pendant environ 12 minutes.
- Déposer le renfort de verre sur la surface déjà imbibée de résine et la faire pénétrer avec un pinceau.
- Il est conseillé de déposer une feuille de polyéthylène sur la réparation et de laisser durcir.
- Après 2 heures de séchage et après avoir enlevé la feuille polyéthylène, une nouvelle enduction est possible.

- Pour une réparation devant être peinte, il est nécessaire de poncer et de dépolir, puis recouvrir la surface avec GEBSOFER FIN.

### Consommation

500 ml de GEBSOFER RESINE correspond à l'utilisation de 1m<sup>2</sup> de tissu roving.

### Nettoyage du matériel

Avant durcissement, nettoyer les outils au solvant (acétate d'éthyle ou solvant cétonique).

### Astuce

Par temps froid (en dessous de +15 °C), la vitesse de durcissement ralentit considérablement, nous vous conseillons donc de travailler à des températures supérieures à +15 °C (ambiance et support à réparer). En cas de nécessité, augmenter la dose de durcisseur (3 à 4% au lieu de 2%) sans dépasser cette limite. En effet, un excès de durcisseur diminue les caractéristiques mécaniques du produit.

### Stockage

Stocker à une température comprise entre +5°C et +35°C.

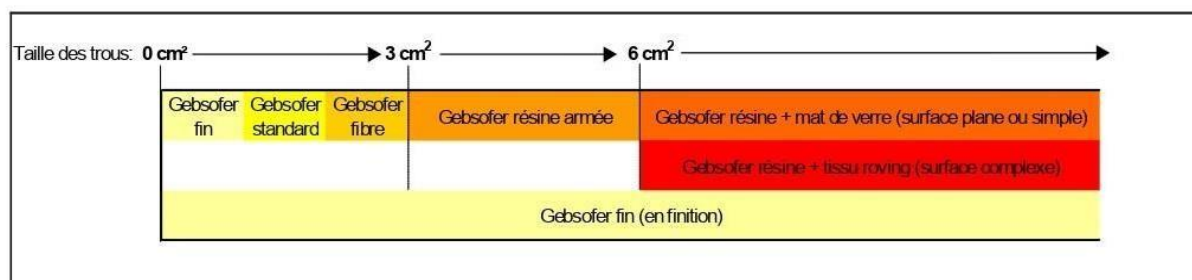
La date d'expiration notée sur l'emballage est mesurée sur produit non entamé, conservé à 20°C dans des conditions normales d'hygrométrie.

### Observations

Respecter un temps de durcissement de 2 heures à 20°C entre chaque couche de produit afin de réaliser des liaisons homogènes.

Ne pas stratifier plus de deux couches à la fois.

Polyester à utiliser de préférence en fonction de la surface à réparer



La Fiche de données de sécurité disponible par Internet sur [www.quickfds.com](http://www.quickfds.com). Les informations présentes sur cette fiche technique sont données de bonne foi et sont les résultats des mesures effectuées dans notre laboratoire. Etant donné le nombre de matériaux, les différences de qualité et la diversité des méthodes de travail, nous recommandons aux utilisateurs d'effectuer des essais préalables dans les conditions effectives d'emploi.

Ce présent document peut être modifié en fonction des évolutions des produits ou de l'état de nos connaissances sans préavis aussi nous vous recommandons de vérifier avant toute mise en œuvre, qu'il s'agit de la dernière version

GEB SAS – CS 62062 – Tremblay en France  
95972 Roissy Charles de Gaulle Cédex - France  
Tél. (33) 01 48 17 99 99 - Fax (33) 01 48 17 98 00  
N°SIREN : 500 674 056

[www.geb.fr](http://www.geb.fr)

p : 2 sur 2

---

# Annexe 4

## Machine de l'essai de la compression

---

## MACHINES D'ESSAIS DE COMPRESSION

### RP 2000 QC/LC - RP 3000 QC/LC & RP 4000QC/LC

Norme : EN 12390-4



Au final, la presse de compression série QC/LC est vraiment la machine idéale pour les laboratoires ayant des essais variés à réaliser : cylindres, cubes, blocs, pavés etc... Le soin tout particulier que nous apportons à l'ergonomie lors de la conception de nos machines offre un retour sur investissement réel pour l'utilisateur : gain de temps grâce à la longue course (pas de cales), gain de temps au nettoyage de la machine (débris confinés), moins de problèmes de dos (hauteur de travail ergonomique).

Grâce à ces avantages techniques, et à la robustesse exceptionnelle de ces châssis, c'est bien la productivité du laborantin qui sera garantie, pendant de très longues années !!!

	RP 2000 QC/LC	RP 3000 QC/LC	RP 4000 QC/LC
<b>Force</b> (en kN)	2 000	3 000	4 000
<b>Plateaux</b> (en mm)	315 x 510	310 x 510 ou 410 x 610	410 x 610
<b>Chambre</b> (en mm)	340	340	340
<b>Course</b> (en mm)	200	200	200
<b>Hauteur</b> (en mm)	1 670	1 760	2 100
<b>Poids</b> (en kg)	1 350	2 315	4 110

#### MACHINE D'ESSAIS 4 COLONNES POUR BLOCS ET CYLINDRES

Le châssis QC/LC (Quatre Colonnes / Longue Course) a été conçu pour les laboratoires ayant besoin d'effectuer des essais aussi bien sur les cylindres que sur les blocs, dont la différence de hauteur nécessite généralement l'utilisation de cales, lourdes et souvent délicates à centrer. Nos châssis QC/LC disposent d'un vérin avec course 200 mm, permettant de faire l'essai aussi bien sur les blocs que sur les cylindres, sans avoir recours à la manipulation des cales, et donc sans aucun réglage ni perte de temps pour passer d'un essai à un autre.

De même, ce châssis particulièrement rigide, dont la structure à 4 colonnes permet le passage de plateaux de grande dimension (310 mm de large sur la 2000 kN et jusqu'à 410 mm sur la 3000 kN), offre une ergonomie de travail remarquable : ainsi la hauteur du plateau inférieur (980 mm sur la 2000 et 1050 mm sur la 3000 kN) offre à l'utilisateur un confort de travail parfait, limitant les problèmes de dos.

L'ergonomie du poste a également été soignée en confinant la chambre d'essai au moyen de joues de protection en inox, d'une cartérisation transparente épousant la zone d'essai, et même d'un toboggan rotatif permettant de guider les débris vers un seau placé au pied de la machine.



#### Caractéristiques :

- Châssis haute rigidité Classe 0,5
- Conçue conformément aux normes européennes
- Châssis entièrement usiné à 4 colonnes, contrôlé au footmètre
- Rotule à bain d'huile en acier traité revêtu de Téflon pour une meilleure répartition de la charge
- Plateaux en acier traités – Dureté  $\geq$  600 HV30
- Hauteur de la chambre d'essais : 340 mm
- Hauteur de travail ergonomique :  $>$  980 mm
- Cartérisation transparente et souple de la zone d'essais
- Toboggan rotatif de guidage des débris en Inox
- Vérin : Joints composites à faible friction et guidage bronze, course 200 mm
- Centreur mécanique pour le positionnement rapide et précis de l'éprouvette
- Grille de protection inox avec détecteur électrique de sécurité
- Pied conçu pour une manipulation aisée au chariot élévateur

## Résumé

Le recyclage des déchets garantit la durabilité des agrégats naturels conventionnels, réduit les coûts des matériaux et les émissions de gaz à effet de serre. La valorisation des déchets urbains, en particulier le verre, réduit les volumes de stockage et permet la conservation des espaces de décharge. L'utilisation du verre sous forme de poudres légères et de granulats assure l'allègement des éléments de construction, un meilleur développement économique et la promotion de nouveaux matériaux de terrain.

Pour améliorer les performances de résistance du béton à base de déchets de verre, un renforcement par des textiles est proposé. En effet, la technologie de renforcement du béton par les TRC n'en demeure pas moins une solution potentiellement intéressante. Aussi, dans la perspective de performances améliorées, on utilise ce matériau pour améliorer la rigidité, s'opposer au développement des déformations et diminuer la vitesse de propagation des fissures. Ce nouveau composite permet de nouvelles applications, car il est utilisable en faible épaisseur, ce qui permet d'obtenir des éléments de poids réduit, résistant et fortement ductile.

Plusieurs variantes ont été proposées pour mesurer la résistance à la compression d'un béton à base de poudre et de sable de verre recyclé (non coloré), en substitution du ciment et du sable par des fractions massiques allant de 0% à 15% avec un pas de 5%. Les éprouvettes réalisées sont des cylindres (16 cm x 32 cm) écrasés avec une presse hydraulique à 28 jours d'âge et comparés à un béton témoin.

La variante présentant les meilleures performances est ensuite confinée à l'aide d'un tissu issu aussi de l'industrie de récupération. Dans cette partie, on a étudié le confinement du béton à base de déchets de verre en prenant en compte le type de confinement. Trois variantes de confinement sont traitées telles que le confinement total, confinement partiel par des cerces et un confinement hélicoïdal en hélices. Les résultats de tous les essais sont fidèlement reportés sur notre manuscrit sous forme de tableaux, histogrammes et courbes (contraintes- déformations).

## Abstract

Waste recycling ensures the sustainability of conventional natural aggregates, reduces material costs and greenhouse gas emissions. The recovery of urban waste, in particular glass, reduces storage volumes and allows the conservation of landfill spaces. The use of glass in light powders and aggregates form ensures lightening of building elements, better economic development and promotion of new field materials.

To improve the strength performance of concrete based on waste glass, reinforcement with textiles is proposed. Indeed, the technology of concrete reinforcement by TRC remains a potentially interesting solution. Also, in perspective to improved performance, this material is used to improve rigidity, oppose the development of deformations and reduce the rate of crack propagation. This new composite allows new applications because it can be used in low thickness, which allows to obtain elements of low weight and highly ductile.

Several variants have been used to measure the compressive strength of concrete containing not colored waste glass, replacing cement and sand by mass fractions ranging from 0 % to 15 % with a step of 5% . The mechanical characterization is carried out after 28 days on cylindrical specimens of 16x32cm using a hydraulic press. The results obtained were compared with those of a control concrete without addition.

The variant with the best performance is confined using fabric also from the salvage industry. In this part, we studied the confinement of concrete based on waste glass, taking into account the type of confinement. Three variants of confinement are treated such as total containment, partial confinement by hoops and helical confinement by helices. The results of all tests are faithfully reported in our manuscript in form of tables, histograms and curves (stress-strain).