

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté du génie de la construction

Département de génie civil



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Spécialité : Génie Civil

Option: Structure

Thème

Comportement en flexion par poinçonnement des dalles de béton composé de granulats en caoutchouc

Réalisé par : REKAI Samira

Membres du Jury

M^{me}. SI AHMED Karima

M.C.B.

Présidente

M. DEHMOUS Hocine

M.C.A.

Examineur

M^{me}. O. HADDAD-MALEK

M.C.B.

Encadreur

Promotion 2017/2018

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté du génie de la construction

Département de génie civil



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Spécialité : Génie Civil

Option: Structure

Thème

Comportement en flexion par poinçonnement des dalles de béton composé de granulats en caoutchouc

Présenté par : REKAI Samira

Membres du Jury

M. BOUDELAL Omar

M.C.A.

Président

M. DEHMOUS Hocine

M.C.A.

Examineur

M^{me}. O. HADDAD-MALEK

M.C.B.

Encadreur

Soutenue publiquement le : 22/09/2018

Remerciements

*Je remercie en premier lieu **Dieu** tout puissant de m'avoir accordé le courage, la patience et la volonté pour achever ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes plus vifs remerciements à ma promotrice : **M^{me}O. MALEK-HADDAD**, qui m'a offert l'opportunité d'effectuer ce thème et m'a dirigé toute au long de l'année et m'a guidée toujours de façon très positive, je l'a remercie pour sa disponibilité, sa compétence, son optimisme et ses nombreux encouragements. Son regard de formatrice et ses connaissances furent très précieux.*

*J'adresse mes sincères remerciements **aux membres du jury** pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Je remercie chaleureusement ma famille et en particulier **mes parents** pour leur soutien quotidien et indéfectible. Qu'ils trouvent dans ce travail le témoignage de ma gratitude.*

Je voudrais également adresser mes sincères remerciements au personnel du laboratoire du département de Génie Civil pour m'avoir facilité le travail au laboratoire, et pour le soutien et encouragement ; qu'ils trouvent ici l'expression de ma plus grande considération.

J'exprime mes vives reconnaissances à tous les enseignants rencontrés durant mon parcours au sein de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Enfin, Je tiens à remercier tous mes amis et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire

A mes chers parents qui m'ont apporté leurs soutiens, leurs amours et leurs encouragements. Puisse dieu tout puissant vous garder et vous procurer santé et bonheur.

A mes chers frères Mourad Rabah et Karim

A mes très chères sœurs Fazia et Noura

A mes beaux frères Chabane et Lamara

A mes nièces Thiziri, Liticia et Elina

A mes neveux Ilyan et Mayas

A ma meilleure et adorable amie Mina

A toute ma promotion en particulier Lounes, Lila, lysa et Yamine

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail

Merci pour tous.

Résumé

L'élimination de certains déchets est un enjeu important dans le monde entier. Une des solutions proposée est d'envisager l'utilisation de ces déchets dans le domaine de la construction, et notamment comme ajouts dans les bétons. Le travail présenté dans ce document porte sur l'étude des potentialités que présentent les granulats en caoutchouc issus de pneus usagés dans le béton par substitution aux granulats naturels. Ces pneus, une fois broyés deviennent des granulés à propriétés spécifiques que l'on peut utiliser pour produire des bétons spéciaux. L'utilisation de ces granulats dans le béton a pour objectif d'améliorer certains aspects du béton notamment sa résistance au poinçonnement par flexion.

A travers les résultats de cette étude, on a constaté que ces nouveaux bétons deviennent de plus en plus légers et moins résistants en compression et que la résistance à la rupture croît légèrement avec l'augmentation du pourcentage en granulats en caoutchouc dans les bétons. Ce dernier point prouve que ces granulats peuvent bien être utilisés pour des applications particulières du génie civil.

Sommaire

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I Etude bibliographique.....	3
Partie 1 Généralités sur les bétons.....	3
I.1 INTRODUCTION	3
I.2 LES CONSTITUANTS D'UN BETON	4
I.2.1 Le ciment.....	4
I.2.2 Les granulats	4
I.2.2.1 Provenance des granulats	5
I.2.2.2 Propriétés des granulats.....	6
I.2.3 Les adjuvants :.....	8
I.2.3.1 Classes des adjuvants	9
I.2.4 Les additions minérales.....	11
I.2.5 L'eau de gâchage du béton.....	12
I.3 CLASSIFICATION DES BETONS	12
I.3.1 Classification selon la consistance (ouvrabilité).....	12
I.3.2 Classification selon la résistance mécanique	13
I.3.3 Classification selon l'exposition et actions dues à l'environnement	14
I.4 COMPOSITION DES BETONS	14
I.4.1 Méthode de Bolomey	15
I.4.2 Méthode de Dreux Gorisse.....	15
I.5 PROPRIETES DES BETONS	16
I.6 DURABILITE DES BETONS.....	17
Partie 2: Le recyclage du béton.....	19
I.7 INTRODUCTION	19
I.8 LES DECHETS DE LA CONSTRUCTION ET L'ENVIRONNEMENT	19
I.9 LES DECHETS ET LE RECYCLAGE.....	21
I.9.1 Définition d'un déchet.....	21
I.9.2 Gestion des déchets	22
I.9.3 Generalites sur le recyclage des dechets	23
I.9.4 Developpement du recyclage	23
I.9.5 Pourquoi le recyclage ?.....	24
I.9.6 Utilisation des matériaux recyclés dans les bétons	24
I.10 DEFINITION DES DECHETS DU CAOUTCHOUC	25

Sommaire

I.11	UTILISATION DES DECHETS DE CAOUTCHOUC DANS LE BATIMENT.....	25
I.12	PROCEDES DE RECYCLAGE	26
I.12.1	Les étapes du recyclage des déchets de caoutchouc	26
I.13	Exemples concrets d'utilisation des déchets de caoutchouc	27
I.14	AVANTAGES D'UTILISATION DU CAOUTCHOUC RECYCLE DANS LES BETONS	28
I.15	QUELQUES CHIFFRES DES DECHETS DU CAOUTCHOUC DANS LE MONDE	29
I.16	PROBLEMATIQUE DES PNEUS USES EN ALGERIE	30
I.17	CONCLUSION	31
	Partie 3 : Comportement des dalles et poinçonnement	32
I.18	INTRODUCTION	32
I.19	POINÇONNEMENT DES DALLES	32
I.20	COMPORTEMENT MECANIQUE DES DALLES	33
I.21	RUPTURE PAR POINÇONNEMENT DES DALLES	35
I.21.1	Mode de rupture	36
I.21.2	Type de poinçonnement	37
	CHAPITRE II Composition des bétons & Procédures Expérimentales.....	40
II.1	INTRODUCTION	40
II.2	CRITERES DE FORMULATION DES BETONS	40
II.3	MATERIAUX ET FORMULATION	41
II.3.1	Matériaux de base utilisés.....	41
II.3.1.1	Granulats	41
II.3.1.2	Ciment	42
II.3.1.3	Eau de gâchage.....	42
II.4	CARACTERISATION DES GRANULATS	42
II.4.1	Echantillonnage	42
II.4.2	Analyse granulométrique.....	43
II.4.3	Absorption et masses volumiques des granulats	44
II.5	FORMULATION DES BETONS	46
II.5.1	Nomenclature des bétons à étudier	46
II.5.2	Composition des bétons à tester	46
II.6	PROCEDURES EXPERIMENTALES ET CONDITIONS DE CONSERVATIONS	47
II.6.1	Fabrication des bétons et confection des éprouvettes.....	47

Sommaire

II.6.2	Caractérisation des éprouvettes de bétons à 28 jours	49
II.7	ESSAI DE POINÇONNEMENT	50
II.8	CONCLUSION	52
	CHAPITRE III : Résultats & Investigations	53
III.1	INTRODUCTION.....	53
III.2	LES PROPRIETES PHYSICO-MECANQUES.....	53
III.2.1	Résultats des masses volumiques des bétons durcis	53
III.2.2	Résultats des résistances à la compression à 28 jours	55
III.2.3	Corrélation entre la Rc à 28 jours et les masses volumiques	57
III.3	Résultats de flexion des dallâtes.....	58
III.3.1	Résultats de flexion par poinçonnement des dalles à différentes épaisseurs	58
III.3.1.1	Résultats de flexion par poinçonnement des dalles d'épaisseur 2cm	58
III.3.1.2	Résultats de flexion par poinçonnement des dalles d'épaisseur 3cm	59
III.3.1.3	Résultats de flexion par poinçonnement des dalles d'épaisseur 4 cm	60
III.3.2	Effet combiné de l'épaisseur et de la teneur en GC sur la résistance à la flexion par poinçonnement	61
III.3.3	Etude des courbes résistances à la flexion & déformations	62
III.3.3.1	Exemples de courbes résistances & déformations.....	63
III.3.3.2	Calcul des pentes Ge.....	64
III.3.4	Mode de ruine des dallâtes	67
III.4	CONCLUSION	69
	Conclusion générale	70
	Références bibliographiques	72
	Annexe 1 : Différents essais de laboratoire.....	75
	Annexe 2 Résultats des différents essais de caractérisation.....	84
	Annexe 3 Résultats de poinçonnement des dalles.....	88

Liste des figures

Figure I.1. Exemples de granulats d'origines différentes.....	5
Figure I.2. Illustration des granulats expansés : a) Argile ; b) Schiste.....	6
Figure I.3. Défloculation du ciment par l'action dispersante des superplastifiants[4].....	9
Figure I.4. Courbes d'évolution du seuil de cisaillement (début de prise) en fonction de la présence d'un accélérateur ou d'un retardateur de prise [11].....	10
Figure I.5. Courbes illustratives de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams.....	13
Figure I.6. Logo universel du recyclage des pneumatiques.....	27
Figure I.7. Etapes du recyclage du caoutchouc.....	27
Figure I.8. Maison de l'architecte Mickael Reynolds réalisée à partir de matériaux recyclés.....	28
Figure I.9. Exemple d'utilisation des caoutchoucs recyclés.....	28
Figure I.10. Stock de pneus usagés en Tarn-et-Garonne en 2007 (France).....	30
Figure I.11. Chantier expérimental Pneusol à Bou-Smail.....	30
Figure I.12. Exemple de bâtiment à plusieurs étages avec type de sollicitation des joints colonnes-dalle à différents étages.....	33
Figure I.13. Exemple d'un Cas d'effondrement de structures par poinçonnement: parking sur plusieurs étages en phase de construction. [24].....	33
Figure I.14. Phases successives du comportement d'une dalle en flexion [25].....	34
Figure I.15. Rupture par poinçonnement d'une dalle en béton [26].....	35
Figure I.16. Joint colonnes-dalle qui a développé une rupture dans le béton de la colonne...36	
Figure I.17. Distribution des efforts de cisaillement près d'une colonne [28].....	36
Figure I.18. Fissuration lors d'une rupture par poinçonnement [25].....	37
Figure I.19. Evolution des fissures sur la face tendue d'une dalle pendant la mise en charge[28].....	37
Figure I.20. Etat de fissuration et fissures de poinçonnement à la rupture (vue en plan de la dalle) [29].....	37
Figure I.21. Différents types de poinçonnement de dalles en béton armé [29].....	39
Figure II.1. Granulats utilisées.....	42
Figure II.2. Courbes granulaires des granulats naturels et des granulats en caoutchoucs.....	44
Figure II.3. Moules utilisés pour la confection des deux sortes d'éprouvettes.....	48
Figure II.4. Eprouvettes conservées dans l'eau.....	49
Figure II.5. Presse de mesure de la compression uni-axiale.....	50
Figure II.6. Les différentes dalles après décoffrage.....	50

Liste des figures

Figure II.7. Machine d'essai IBERTEST.....	51
Figure II.8. Mise en point du dispositif d'essai de poinçonnement.....	52
Figure III.1. Masse volumique des bétons en fonction du pourcentage en GC.....	54
Figure III.2. Pourcentage de baisse des masses volumiques des bétons en fonction du % en GC.....	53
Figure III.3. Effet des G.C. sur la résistance en compression à 28 jours.....	56
Figure III.4. Corrélation entre la baisse de la résistance à 28 jours et le % de GC.....	57
Figure III.5. Résistance moyenne des dalles d'épaisseur 2cm.....	59
Figure III.6. Résistance moyenne des dalles d'épaisseur 3cm.....	60
Figure III.7. Résistance moyenne des dalles d'épaisseur 4cm.....	61
Figure III.8. Effet combiné de l'épaisseur et de la teneur en GC sur la résistance à la flexion par poinçonnement.....	62
Figure III.9. Courbes résistances à la flexion & déformations des dalles du B20GC.....	63
Figure III.10. Courbes résistances à la flexion & déformations des dalles du B10GC.....	63
Figure III.11. Valeurs des pentes des courbes chargements / Flexions (kN/mm) des différents bétons et pour les trois épaisseurs.....	65
Figure III.12. Histogramme des pentes des courbes chargements / Flexions (kN/mm) de toutes les dalles.....	66
Figures III.13. Mode de rupture des dallâtes (une fissure et deux fissures).....	67
Figures III.14. Etat d'endommagement des dallâtes à forte teneur en GC après rupture.....	68
Figures III.15. Etat d'endommagement des dallâtes de bétons à faible teneur en GC après rupture.....	68

Liste des tableaux

Tableau I.1. Classes de consistances des bétons ordinaires.....	13
Tableau II.2. Masses volumiques et coefficients d'absorption des différents granulats.....	45
Tableau II.3. Nomenclature des compositions de bétons testés.....	46
Tableau II.4. Composition en kg de 1m ³ de béton des différentes formulations.....	47
Tableau III.5. Masses des éprouvettes (kg) et masses volumiques des bétons durcis (kg/m ³).....	54
Tableau III.6. Résistances moyennes à la compression des bétons à 28j.....	55
Tableau III.7. Résultats en MPa des dalles de 2cm d'épaisseur.....	58
Tableau III.8. Résultats en MPa des dalles de 3cm d'épaisseur.....	59
Tableau III.9. Résultats en MPa des dalles de 4cm d'épaisseur.....	60
Tableau III.10. Tableau récapitulatif des pentes des courbes Chargement/Flexion.....	64
Tableau III.11. Récapitulatif du mode de ruine des dallâtes.....	67

Introduction générale

Depuis des décennies, l'homme s'est préoccupé de l'exploitation de moyens permettant d'améliorer sa vie et sa protection. Une de ses préoccupations majeures a été la construction, cette dernière était plus pertinente et plus durable avec l'emploi des composites cimentaires. Cependant, la matière première, devient de plus en plus chère et nuisible à l'environnement par son processus de production, extraction, transformation, transport...

Dans le souci de la protection de l'environnement et de la préservation de la nature, le secteur de la construction, grand consommateur de granulats doit s'aligner à démarche du développement durable et de la préservation de la nature. L'emploi des granulats de recyclage semble être une solution qui répond à cette démarche.

En fait, le recyclage de pneus est une solution parfaite pour les problèmes de l'environnement. Composés de mélanges de caoutchoucs, d'acier et de textiles divers, les pneus usagés ne sont pas des déchets dangereux mais ils présentent un danger pour l'environnement et la santé en raison du risque d'incendies non maîtrisables dans les décharges à cause des fumées toxiques dégagées, la stagnation des eaux dans ces endroits, ainsi que les insectes, leur valorisation semble être une obligation plus qu'un choix.

Le recyclage des déchets des pneus d'automobiles semble être une source de matériaux intéressante pour produire des bétons à propriétés spécifiques qu'il y a lieu de caractériser. Le caoutchouc par sa nature présente des propriétés assez différentes de celles des granulats naturels, donc si on souhaite les utiliser dans le secteur de la construction c'est pour produire des bétons spécifiques (bétons légers, bétons à propriétés d'isolations thermique et phonique, etc.). C'est dans cet esprit que s'inscrit l'objectif de cette étude.

Le présent travail a pour but d'étudier les potentialités de l'incorporation des particules de caoutchouc, dans des bétons en vue de l'utilisation du composite élaboré dans le domaine d'application diverses. Pour atteindre cet objectif, nous avons envisagé d'introduire dans le béton des quantités de granulats de caoutchouc suivant des pourcentages de substitutions volumiques différentes. On s'est alors intéressé aux propriétés physico-mécaniques des bétons composés de granulats en caoutchouc.

Les points abordés sont donc :

Introduction Générale

- Masses volumiques, résistances mécaniques à la compression
- Résistance à la rupture à la flexion par poinçonnement des dalles ; effet de la teneur en granulats en caoutchouc et effet de l'épaisseur.
- Pentes des courbes chargements / déformations
- Mode de ruine des dalles composées de ce type de granulats.

Deux types d'éprouvettes sont alors utilisées : cubiques pour la résistance à la compression à 28 jours ; dallâtes pour la partie flexion par poinçonnement.

Les essais sont menés sur plusieurs compositions de bétons formulées avec différents pourcentages de substitutions volumiques des granulats naturels par des granulats en caoutchouc.

Ce présent mémoire est organisé de la manière suivante :

Après l'**introduction générale**, ce document est composé de trois chapitres et d'une **Conclusion générale**.

Le premier chapitre : est composé de trois parties

- Partie1 : rappel sur les généralités des bétons.
- Partie2 : généralités sur la gestion des déchets et l'intérêt de leur recyclage et particulièrement les déchets du caoutchouc issus des pneumatiques.
- Partie 3: comportement des dalles sous la flexion par poinçonnement.

Le deuxième chapitre : dans ce chapitre on a :

- présenté les résultats de caractérisation des matériaux utilisés pour la composition de nos bétons.
- Définis la méthode de composition utilisée pour les bétons.
- présenté les procédures expérimentales suivies pour la réalisation des essais : résistance à la compression et résistance à la flexion par poinçonnement.

Troisième chapitre : ce chapitre est composé de deux parties traitant chacune une partie de l'étude menée. On a alors présenté les résultats et l'interprétation des résultats obtenus.

En dernier, on a récapitulé nos conclusions sur le travail menés et proposé des perspectives.

CHAPITRE I Etude bibliographique

Partie 1 Généralités sur les bétons

I.1 INTRODUCTION

Le béton est un matériau composite constitué de granulats (Filler, sables, graviers...), de ciment, d'eau et le plus souvent d'adjuvants. Ces composants sont très différents, leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants, de 1 t/m³ pour l'eau à 3 t/m³ pour le ciment. Les dimensions de leurs grains s'échelonnent du µm pour les grains les plus fins du ciment à 30 mm pour les grains des gravillons.

La résistance mécanique et la déformation sont des propriétés importantes des bétons, car elles jouent un grand rôle prépondérant sur la stabilité et la durabilité des ouvrages. Les propriétés du béton changent en fonction de la composition du béton de la nature de ces différents composants, notamment de la quantité et nature du ciment et de la quantité d'eau. Les autres paramètres qui influencent les propriétés des bétons peuvent être résumés en plusieurs catégories :

- Nature et dosage de ses composants (ciment, granulats, adjuvants...);
- Conditions de son murissement au jeune âge (climat chaud, climat froid) ;
- Conditions de mise en œuvre (malaxage, vibration, protection ...)
- Conditions d'exposition du béton durci (environnements agressifs ou pas) ;
- Sollicitations auxquelles il sera soumis.

Ainsi, en prêtant une grande importance à ces aspects on peut produire des bétons avec des propriétés très variables : en résistances, isolation thermique, résistance au feu, isolation phonique, durabilité. On peut également se permettre avec le béton des réalisations de formes très complexes, de différentes teintes et textures.

L'association de l'acier au béton augmente très fortement ses propriétés de résistance en traction et de ductilité et permet de réaliser des ouvrages de grande envergure. [1].

I.2 LES CONSTITUANTS D'UN BETON

I.2.1 Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence d'eau. Il forme une pâte faisant prise qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide [1,2].

Le ciment est composé essentiellement de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO), la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃) et l'oxyde de fer (Fe₂O₃). La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. Ces derniers se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne et contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier Na₂O +K₂O et MgO, l'oxyde ferrique. [3]

En fonction des résistances et de la durabilité souhaitées, on peut envisager d'utiliser des ciments à base d'additifs divers, voir les exemples ci dessous [4] :

- CPA-CEM I : Ciment portland (95 à 100 % de clinker)
- CPJ-CEM II : Ciment portland au laitier (65 à 94 % de clinker et 6 à 35 % de laitier de haut fourneau.
- CPJ-CEMII : Ciment portland aux cendres volantes (65 à 79 % de clinker et 21 à 35 % de cendres volantes.
- CHF – CEMIII : Ciment portland au laitier de haut fourneau (5 à 64 % de clinker et 36 à 95 % de laitier de haut fourneau .
- ...

La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours, conformément à la norme NF EN 196 – 1, elle est exprimée en MPa, ces classes sont notées, 32,5, 42,5 et 52,5.

I.2.2 Les granulats

On appelle granulats, tout matériau inerte qui entre dans la composition des bétons. C'est l'ensemble des grains compris entre 0 et 125 mm, les granulats vont des fillers, sables, graviers, aux cailloux (voir figure I.1). La provenance des granulats peut être naturelle, de

transformation (artificielle) et pour ces dernière années de recyclage. Selon leur provenance, on distingue quatre catégories de granulats :

- Les granulats d'origine alluvionnaire; ils sont considérés comme roulés, ou semi concassés;
- Les granulats de roches massives; appelés aussi granulats concassés ;
- Les granulats de transformation ayant subis des transformations physico-chimiques;
- Les granulats de recyclage.

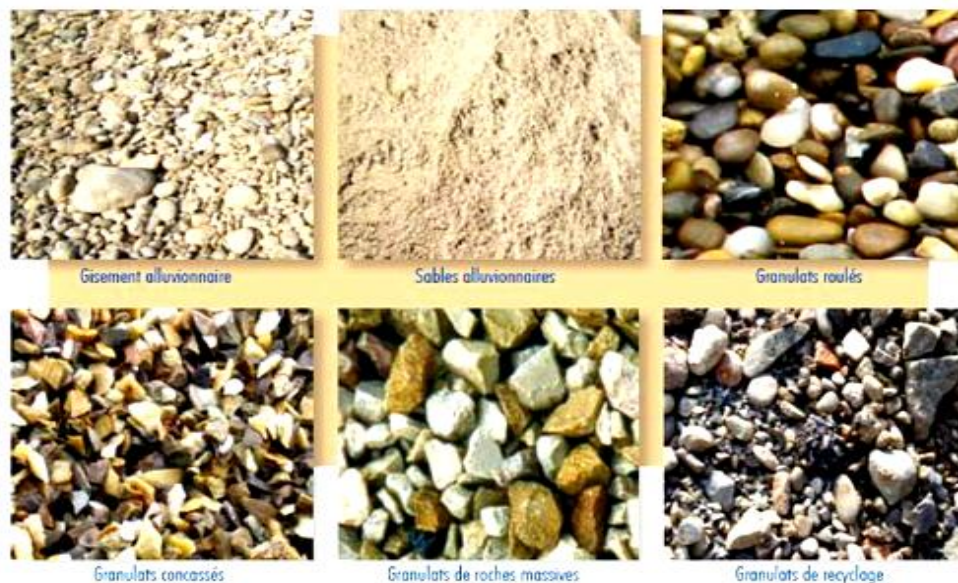


Figure I.1. Exemples de granulats d'origines différentes.

1.2.2.1 Provenance des granulats

Les gisements les plus habituels sont les lits de rivières « Granulats alluvionnaires » déposés par les cours d'eau et les fonds marins. En fonction de la situation du gisement par rapport à la hauteur du cours d'eau ou de la nappe phréatique de l'endroit, l'exploitation a lieu soit à sec ou dans l'eau. La forme de ces granulats est roulée. Cette forme est acquise par l'érosion. Ces granulats sont criblés (séparés) en différentes classes granulaires. Couches de sables ou de sablons, roches sédimentaires non consolidées : déposées il y a des millions d'années.

Les gisements de roches massives « granulats de carrières » correspondent à une multitude de situations géologiques (couches plus ou moins épaisses, filons, épanchements volcaniques, massifs de granite...) et à des localisations géographiques très différentes.

La carrière peut être implantée en plaine sur un plateau ou en montagne au bord d'une falaise. L'exploitation s'effectue à flanc de coteau ou en puits, en fonction de la situation du niveau géologique utile. On peut ainsi extraire et produire des granulats avec des roches éruptives, des roches métamorphiques et des roches sédimentaires consolidées (calcaires...).

Ces granulats sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires.

Les granulats de transformation sont souvent d'origine minérale résultant d'un procédé de transformation industriel comprenant des modifications thermiques (cuisson) ou chimiques. Dans cette catégorie se rangent les granulats légers transformés, comme l'argile expansée (Figure I- 2 a), le schiste expansé (Figure I- 2 b).



Figure I.2. Illustration des granulats expansés : a) Argile ; b) Schiste

La cuisson à des températures allant de 1000 à 1200 °C, dans un four rotatif, de nodules d'argile ou de schiste produit d'une part un dégagement gazeux au sein de chaque nodule sous l'effet de réactions chimiques, ce qui entraîne l'expansion du nodule, d'autre part une vitrification de la couche externe. On obtient alors un granulat plus gros, avec une grande porosité, donc plus léger.

1.2.2.2 Propriétés des granulats

Les propriétés des granulats sont intimement liées aux propriétés du massif rocheux d'origine, c'est à dire la composition chimique et minéralogique, les caractéristiques pétrographiques, la densité, la dureté, la résistance, la stabilité physique et chimique, la structure des pores et la couleur. Par ailleurs, les granulats présentent un certain nombre de propriétés intrinsèque qui ne sont pas reliées à la nature du massif rocheux d'origine, telles la forme et la dimension des grains, la texture de surface et l'absorption, or toutes ces propriétés peuvent avoir une influence considérable sur la qualité du béton, autant à l'état frais qu'à l'état durci[5, 6].

D'après leur nature minéralogique, on distingue trois grandes classes :

- ❖ Les granulats siliceux ;
- ❖ Les granulats calcaires ;
- ❖ Les granulats granitiques (argileux ou schisteux)
- ❖ ...

Les granulats ont des effets sur les propriétés mécaniques et sur la consistance du béton de plusieurs manières [1, 7, 8] :

- ❖ Par leurs propriétés de résistances mécaniques ;
- ❖ Par leur capacité d'adhérence à la pâte liante (pâte de ciment durcie);
- ❖ Par leur forme (roulés, concassés et semi-concassés);
- ❖ Par leur distribution granulaire et donc la compacité du mélange granulaire formé;
- ❖ Par leur diamètre maximal, et leur volume par rapport au volume total du béton.

A- Module de finesse

Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par son module de finesse (MF). Celui-ci correspond à la somme des pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis (0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 ; 5).

La valeur du MF est d'autant plus élevée que le granulat est grossier. Un bon sable à béton doit avoir un MF d'environ 2,2 à 2,8. En dessous de 2,2 le sable a une majorité d'éléments fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau. Au-dessus de 2,8 le sable manque de fines et le béton perd en ouvrabilité [5, 1]

La quantité de pâte de ciment fraîche à introduire dans le béton doit être suffisante pour recouvrir la surface de tous les grains de sorte que, plus la surface spécifique des granulats est faible, moins il faut de pâte et conséquemment, plus la demande en eau est faible.

B- Forme et texture des granulats

La forme et la texture ont des effets sur la compacité du béton à formuler, et donc sur l'ouvrabilité et maniabilité du béton. La texture de la surface des granulats affecte sa liaison avec la pâte de ciment et influence la demande en eau du mélange. La forme en aiguille ou plate, mais aussi les granulats très anguleux sont à éviter, car elle nécessitent une quantité d'eau plus élevée, pour une même maniabilité du béton, ce qui peut nuire à la qualité du béton et peut provoquer des défauts d'aspect. La forme et la texture des granulats influencent :

- ❖ La demande en eau
- ❖ La maniabilité : facilité de mise en œuvre et le compactage du béton.
- ❖ La compacité du mélange, donc le volume des vides à remplir par la pâte de ciment.
- ❖ L'adhérence du granulat à la pâte de ciment.

C- La propreté

Les granulats utilisés dans le béton doivent être propres, débarrassés de tous corps polluants qui peuvent nuire à l'adhérence entre la pâte de ciment et les granulats et provoquer une fissuration précoce du béton [4, 1].

La propreté désigne d'une part, la teneur en fines argileuses ou autres particules adhérentes à la surface des grains, ce qui se vérifie sur le chantier par les traces qu'elles laissent lorsqu'on frotte les granulats entre les mains, traces dues à la présence d'oxyde de fer, pyrite, argile... Un granulats propre ne laisse pas de traces. D'autre part, les impuretés susceptibles de nuire à la qualité du béton, parmi lesquelles on peut citer les scories, le charbon, les particules de bois, les feuilles mortes...

Les granulats ne doivent pas contenir d'hydrocarbures, d'huiles végétales ou de matière organique. Les granulats doivent être exempts de sulfures sous forme de pyrites, de sulfates et de chlorures qui nuisent aux propriétés de durabilité du béton durci.

I.2.3 Les adjuvants :

Les adjuvants sont des produits chimiques ou naturels sous forme liquides ou poudres, ils sont capables d'améliorer certaines propriétés des produits cimentaires tel que les bétons, mortiers et les coulis. Les adjuvants sont incorporés aux bétons à faible dose inférieure à 5% de la masse du ciment, avant ou pendant le malaxage. Les propriétés à améliorer sont visées soit à l'état frais, pendant la prise et le durcissement, ou bien à l'état durci [9,10].

On peut alors énumérer parmi d'autres:

- ❖ La rhéologie;
- ❖ la cinétique d'hydratation (temps de prise et de durcissement);
- ❖ les performances mécaniques ;
- ❖ ...

Chaque adjuvant est défini par une fonction principale, caractérisée par la modification majeure qu'il apporte aux propriétés des bétons. Un adjuvant présente une ou plusieurs fonctions secondaires qui sont plus souvent indépendantes de la fonction principale. L'emploi d'un adjuvant peut aussi entraîner des effets secondaires non recherchés (non souhaités). L'efficacité de la fonction principale de chaque adjuvant peut varier selon son dosage et sa compatibilité avec les matériaux utilisés [1, 9]. Dans leur ensemble, les adjuvants ne doivent pas contenir de chlore.

1.2.3.1 Classe des adjuvants

Selon les objectifs visés, on introduit dans le béton des adjuvants de nature et de fonction différente [10].

A- Les adjuvants modifiant l'ouvrabilité du béton

Ces adjuvants modifient le comportement rhéologique des bétons, à l'état frais, avant le début de prise. Ce sont en général des produits de synthèse, ils sont à base de lignosulfonates, de sels d'acides organiques, de mélamine sulfonate, de naphthalène sulfonate et dérivés de mélamine ou naphthalène.

Ces adjuvants ont des effets sur les valeurs d'affaissement au cône d'Abrams. Plus le dosage en adjuvant est important plus l'affaissement est grand. L'affaissement cesse lorsque l'on atteint le dosage de saturation où l'adjuvant n'a plus d'effet.

Lors du gâchage du béton, sous l'effet des forces attractives de l'eau, les particules de ciment forment des agglomérats piégeant une bonne partie d'eau libre à l'intérieur «floculation ». L'eau disponible pour fluidifier le béton est ainsi limitée, et le béton présente une certaine fermeté. Le plastifiant (superplastifiant) s'adsorbe à la surface des particules de ciment. Une fois adsorbé, il agit par répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres (Figure I.3). L'eau initialement piégée entre les floculats est à nouveau disponible pour fluidifier le béton [4].

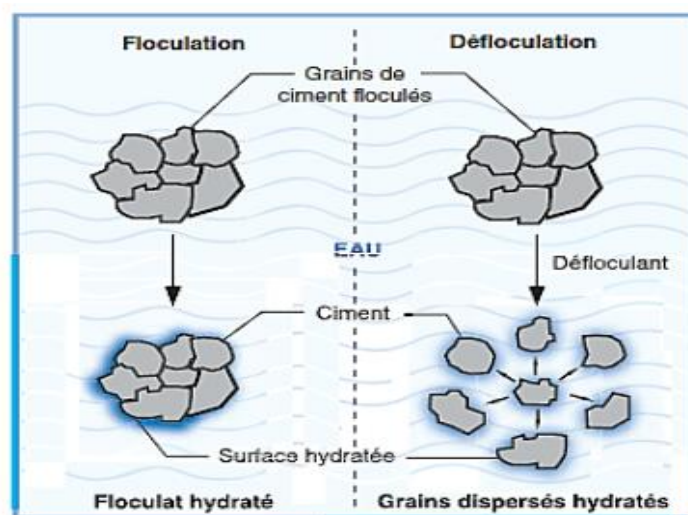


Figure I.3.Défloculation du ciment par l'action dispersante des superplastifiants. [4]

Ce processus permet:

- ❖ D'améliorer la maniabilité sans augmenter le dosage en eau : dans ce cas la quantité d'eau de la formule initiale de béton n'est pas modifiée, mais son ouvrabilité évolue

avec le changement du pourcentage en superplastifiant ; quant à la résistance mécanique, elle reste quasi constante ; cette catégorie d'adjuvants regroupe les fluidifiants appelés aussi plastifiants, les superfluidifiants appelés superplastifiants.

- ❖ D'améliorer les performances mécaniques du béton ; de réduire le rapport E/C, dans ce cas la quantité d'eau du béton est réduite pour une même maniabilité, et la résistance mécanique augmente. Ce sont les réducteurs d'eau.

En réalité, un fluidifiant est aussi un réducteur d'eau; cela dépend de l'objectif visé dans son utilisation.

B- Les adjuvants modifiant la prise et le durcissement

Ce sont des produits chimiques qui modifient la solubilité des constituants du ciment et surtout leur vitesse de dissolution. Physiquement, cette action se traduit par l'évolution de la résistance au jeune âge, en fonction de l'adjuvant utilisé (le graphique ci dessous, illustre ce phénomène).

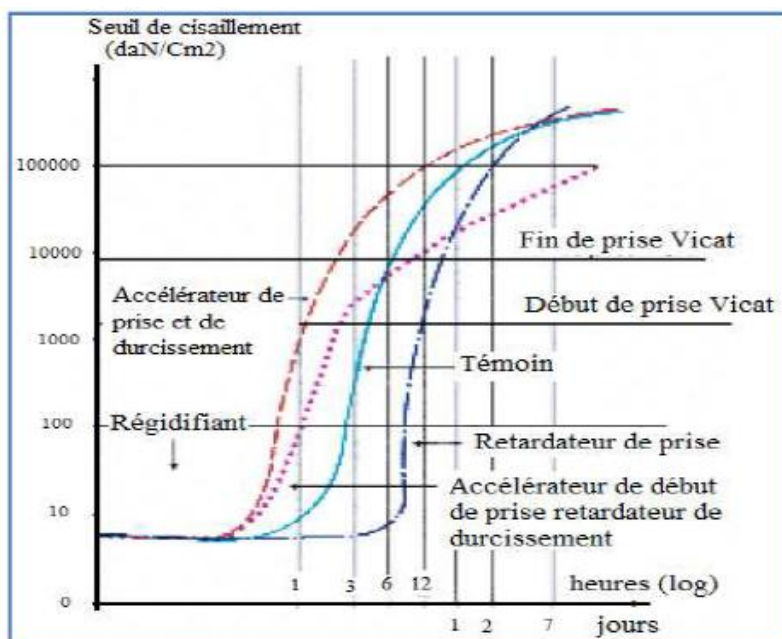


Figure I.4. Courbes d'évolution du seuil de cisaillement (début de prise) en fonction de la présence d'un accélérateur ou d'un retardateur de prise [11].

L'accélérateur de prise a pour fonction principale de diminuer les temps de début et de fin de prise du ciment dans les bétons, il diminue le temps de passage de l'état plastique à l'état solide du béton.

Le retardateur de prise a pour fonction principale d'allonger le temps de début et de fin de prise du ciment dans les bétons, il augmente le temps de passage de l'état plastique à l'état solide du béton.

C- Les adjuvants modifiant certaines propriétés du béton

Les entraîneurs d'air : Ils ont pour fonction la formation de microbulles d'air uniformément réparties dans la masse du béton. Les entraîneurs d'air sont des corps tensio-actifs : lignosulfonates, abiétates de résines, sels d'éthanolamine, que l'on mélange en fonction des propriétés à obtenir.

Les hydrofuges de masse : Les hydrofuges de masse ont pour fonction principale de diminuer la perméabilité et l'absorption capillaire des bétons, des mortiers ou des coulis durcis. Cette diminution de l'absorption capillaire procure une bonne étanchéité au béton. Les hydrofuges sont généralement à base d'acides gras ou de leurs dérivés (stéarates). Ils peuvent également comporter des matières fines (type bentonite) ainsi que des agents fluidifiants.

Les rétenteurs d'eau : leur fonction de réguler l'évaporation de l'eau et d'augmenter ainsi l'homogénéité et la stabilité du mélange. Le ressuage par l'action de ces stabilisants est réduit de 50 %. Ces produits sont utilisés pour l'exécution de mélanges retardés ou de mélanges à couler sous l'eau sans délavage.

Les produits de cure : Leur fonction est protéger le béton frais après sa mise en œuvre, en évitant sa dessiccation par évaporation trop rapide de l'eau. Celle-ci entraînerait une baisse des résistances mécaniques, la formation de fissures de retrait avant prise.

Ils sont recommandés pour les bétonnages des planchers, pistes, dallages et généralement tous les ouvrages pour lesquels le rapport surface d'évaporation/épaisseur est élevé.

I.2.4 Les additions minérales

Les additions minérales sont souvent sous forme d'une poudre fines ou ultra fines de faibles dimensions, elles sont ajoutées en quantités de l'ordre de 10 % du poids de ciment. Elles sont soit actives ou inertes qui, améliorent notablement les performances et la durabilité du béton grâce a leurs propriétés physicochimiques (cendres volantes, laitier, fillers, ...).

Ces poudres permettent dans un premier temps d'améliorer la consistance du béton frais en le rendant plus fluide. A long terme ces poudres procurent aux bétons une meilleure compacité (une porosité réduite) ce qui permet d'améliorer leurs propriétés de durabilité [12].

Les poudres actives à caractères pouzzolanique (fumée de silice et cendres volantes...) permettent d'obtenir des bétons plus résistants et plus compacte et donc plus durables.

I.2.5 L'eau de gâchage du béton

L'eau est un constituant nécessaire pour obtenir un béton ou un mortier. Pratiquement toute eau naturelle potable n'ayant pas une odeur ou un goût prononcé peut être employée pour la fabrication du béton. Les eaux non potables ne doivent pas contenir de composés risquant d'attaquer chimiquement les hydrates de ciment, les granulats ou les armatures (comme le chlorure, environ 0,2 % à 0,4 % de la masse de ciment peut provoquer des risques de corrosion).

L'eau doit être pure de toutes particules en suspension dont la quantité peut modifier les qualités originales. L'eau doit être débarrassée des poussières en suspension, des huiles...

I.3 CLASSIFICATION DES BETONS

Les bétons courants sont les plus utilisés, aussi bien dans le bâtiment qu'en travaux publics. Ils présentent des masses volumiques de 2500 kg/m^3 environ. Ils peuvent être armés ou non. Lorsqu'ils sont très sollicités en flexion, ils sont précontraints.

Les bétons très lourds dont la masse volumique peut atteindre les 6000 kg/m^3 sont utilisés pour les ouvrages hydrauliques là où il faut empêcher la perméabilité de l'eau. On les utilise également dans le cas des centrales nucléaires et tout ouvrage de stockage des produits radioactifs.

Les bétons légers et très légers peuvent répondre aux problèmes d'isolation dans le bâtiment. Ils sont aussi utilisés dans les ouvrages maritimes.

I.3.1 Classification selon la consistance (ouvrabilité)

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité : aptitude d'un béton à remplir les coffrages et à enrober convenablement les armatures. L'ouvrabilité (la consistance) peut être effectuée facilement sur chantier avec la méthode du cône d'Abrams; essai d'affaissement d'un volume de béton de forme tronconique.

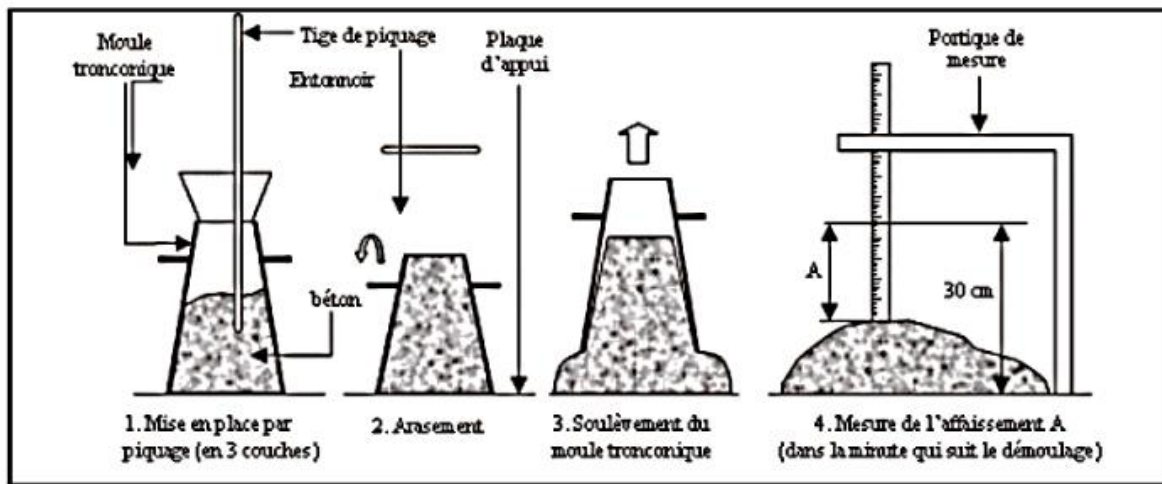


Figure I.5. Courbes illustratives de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams

Selon la valeur de l'affaissement, il existe 5 classes de bétons :

Tableau I.1. Classes de consistances des bétons ordinaires

Classes	Consistance du béton	Affaissement au cône d'Abrams (cm)
S1	Ferme	1 à 4
S2	Plastique	5 à 9
S3	très plastique	10 à 15
S4	Fluide	16 à 21
S5	très fluide	≥ 22

I.3.2 Classification selon la résistance mécanique

La résistance utilisée pour la classification des bétons durcis est souvent la résistance mécanique à la compression à 28 jours (R_{c28j}). Les classes de résistance à la compression des bétons courants de masses volumiques comprises entre 1800 kg/m^3 et 2500 kg/m^3 , selon la norme EN 206-1 peuvent varier de 10 à 100 MPa voire plus. Les bétons sont marqués par deux chiffres Béton X/Y : ou X étant la résistance minimale obtenue sur cylindre et Y résistance minimale obtenue sur cube. Exemple B 25/30. Les cylindres ont pour dimensions de 150 mm de diamètre sur 300 mm de hauteur et les cubes sont de 150 mm de côtés.

I.3.3 Classification selon l'exposition et actions dues à l'environnement

Le béton peut être soumis à plusieurs attaques chimiques liées à l'environnement d'exposition. Ainsi on peut classer les bétons comme suit.

- Classe X0 : Aucun risque de corrosion ni d'attaques
- Classe XC : corrosion induite par carbonatation
- Classe XD : Corrosion induite par les chlorures, ayant une origine autre que marine
- Classe XS : Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer
- Classe XF : Attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage
- Classe XA : Attaque chimique

I.4 COMPOSITION DES BETONS

La formulation d'un béton consiste à définir les proportions de ces différents constituants. La formulation des bétons dépend des propriétés de mise en œuvre, mécaniques et de durabilité souhaitée [5, 7, 13]. Toutes les méthodes de formulation suivent les mêmes grandes lignes résumées comme suit:

- Choix du squelette granulaire (gravillons et sable) et du diamètre maximal des granulats ; le squelette doit être validé par un fuseau granulaire de béton correspondant au type de béton espéré. Un fuseau granulaire est obtenu par rassemblement des courbes granulaires des bétons de qualité, qui ont fait preuves dans des projets antérieurs.
- Choix de la nature du ciment et du rapport eau / ciment ;
- Choix de la quantité de ciment et donc du volume des granulats ;
- Choix des adjuvants ;
- Recherche par le biais d'essais expérimentaux des dosages en adjuvants.

Quant à la nature des granulats, souvent elle est imposée par les carrières qui fournissent la région où le béton doit être produit.

Il existe plusieurs méthodes de formulation des bétons, méthode de Bolomey, méthode d'Abrams, de Faury, de valette, de Joisel... Dans la partie qui suit, on rappelle les grandes lignes de la méthode de Bolomey et de Dreux Gorisse, méthodes les plus utilisées en Algérie.

I.4.1 Méthode de Bolomey

La formulation en termes de résistance à la compression, la méthode est basée sur la relation suivante :

$$R_{cb} = R_{cc} \times G \left[\frac{C}{(E+Air)} - 0,5 \right] \quad [I.1]$$

R_{cb} : résistance à la compression du béton,

R_{cc} : résistance caractéristique à la compression du ciment,

C : quantité ciment;

E : quantité d'eau efficace (≤ 200 litres);

Air : volume d'air (en litre);

G : Coefficient de qualité des granulaire.

La formulation du squelette granulaire du béton, ciment compris, est recherchée de façon à ce qu'elle soit aussi proche que possible de la courbe de référence théorique obtenue par la formule suivante:

$$P = A + (100 - A) \sqrt{d/D}$$

A : varie de 8 à 16, il est d'autant plus élevé que le dosage en ciment est plus fort;

P : est le pourcentage de grains passant au tamis de diamètre d ;

D : est le diamètre du plus gros grain

Cette méthode aboutit théoriquement, plus au moins, à une granularité continue [14].

I.4.2 Méthode de Dreux Gorisse

Cette méthode a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations déjà validées sur chantier et ayant donné satisfaction. Elle est très simple d'utilisation, elle ne demande que la connaissance des courbes granulométriques des granulats [1]. Les étapes de la méthode sont récapitulées dans les paragraphes suivants. Expérimentalement on commence par l'évaluation du rapport C/E en fonction de la résistance moyenne désirée,

$$f_{cb} = K_G \times F_{cim} \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

La relation est nommée formule de Bolomey, où :

f_{cb} : résistance moyenne en compression visée (à 28 jours) en MPa ;

F_{cim} : classe vraie du ciment (à 28 jours) en MPa ;

C : dosage en ciment (kg/m³) ;

E : dosage en eau (kg/m³) ;

K_G : coefficient granulaire.

❖ La résistance visée f_{cb} : elle représente une majoration de 15 % de la résistance désirée.

Ainsi :
$$f_{cb} = f_{c28} + 15\% \times f_{c28}$$

Avec f_{c28} est la résistance à la compression du béton désiré à 28 jours d'âge.

Le coefficient K_G traduit la qualité des granulats (forme, texture, minéralogie, diamètre maximal, dureté,...). La valeur de K_G doit être mentionnée sur la fiche technique des granulats à l'achat.

I.5 PROPRIETES DES BETONS

Les propriétés du béton changent en fonction de la composition du béton de la nature de ces différents composants, notamment de la quantité et la nature du ciment et de la quantité d'eau.

Les propriétés mécaniques d'un béton évoluent avec son âge, notamment au jeune âge. Ainsi au gâchage le béton frais est maniable, il présente des propriétés de résistances nulles. A partir du début de la prise du ciment, le béton commence à acquérir de la résistance en fonction de la nature du ciment et des conditions climatiques (temps chaud, temps froid). Ainsi à 7 jours le béton atteint près de 50 % de sa résistance finale. A 28 jours, le béton atteint près de 85 % de sa résistance finale. A partir de 28 jours l'évolution de la résistance du béton continue d'évoluer lentement et d'une façon asymptotique.

En fonction des conditions d'exposition, le béton est exposé à des attaques chimiques de différentes natures (humidité, sels marins, sulfures, eaux d'égout, CO₂, gel dégel...), le béton va se dégrader soit par carbonatation, soit par lessivage, soit par oxydation.

Par ailleurs, un béton sollicité en traction ou en cisaillement va développer de la fissuration juste après la sollicitation. Un béton sollicité en compression restera intact (pas de fissure liée à la compression).

Résistance à la compression : le béton présente une excellente résistance à la compression; résistance souvent prise égale à la résistance caractéristique du béton mesurée à 28 jours. Cette résistance peut prendre des valeurs entre (20 MPa) pour les bétons ordinaires jusqu'à 120 MPa pour les bétons spéciaux.

Résistance à la traction et au cisaillement : le béton présente une faible résistance au cisaillement et en traction. Sa résistance à la traction est de l'ordre du 10ème de sa résistance à la compression. Ainsi le béton sollicité en traction ou en cisaillement se fissure dès la sollicitation et tombe en ruine. Pour y remédier à cette faiblesse les bétons sont donc armé d'Acier d'où l'appellation Béton Armé.

Résistance aux chocs : on entend par chocs les sollicitations soudaines (de courte durée) et d'une forte intensité comme le séisme, les explosions, les accidents de véhicules contre les ouvrages...

Dans ces cas le béton se comporte comme un matériau fragile, il se brise juste après la sollicitation, il n'est pas ductile. Un matériau ductile se déforme largement avant de rompre. Pour compenser les insuffisances du béton, notamment en terme de résistance à la traction, au cisaillement, aux chocs ; mais aussi aux effets des attaques chimiques qui provoquent de la fissuration dans le béton, on introduit alors dans le béton soit des armatures ou bien des fibres, d'où le béton armé et le béton fibré.

1.6 DURABILITE DES BETONS

La durabilité est un objectif de qualité, elle consiste à maintenir les propriétés des bétons sur des durées de temps assez longues.

La mauvaise durabilité de matériaux cimentaires se manifeste par une dégradation résultant d'une action simultanée des phénomènes internes au matériau (réaction physico-chimique) et des facteurs externes (conditions d'exposition). Ces phénomènes peuvent être subdivisés en plusieurs catégories [1, 15, 16,17] :

- Les effets physiques, actions de la température, cycle de gel dégel, incendie.
- Actions mécaniques dues aux sollicitations dynamiques, à l'abrasion et à la fatigue.
- Les effets chimiques qui sont très nombreux, les environnements agressifs peuvent être liquide (eau de mer, pluies), solides (sols gypseux), gazeux (gaz carbonique)
- Effets biologiques dus principalement à la présence de bactéries (conduites d'égouts).

Il est à noter que la structure interne du ciment est un milieu très alcalin possédant un pH voisin de 13.

Par conséquent, tous les environnements lui sont agressifs. Sa structure poreuse le rend plus vulnérable devant la présence de liquide et de gaz qui le traverse.

En effet, La durabilité du béton s'explique en grande partie, par la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans les réseaux poreux des bétons. Un béton est d'autant plus durable qu'il résiste à la pénétration des agents agressifs. Cette qualité peut être caractérisée au moyen de deux grandeurs physiques : la perméabilité et la diffusivité. La première est relative au déplacement d'un fluide sous l'effet d'une pression motrice, elle dépend de la taille des espaces poreux dans lesquels s'écoule le fluide ainsi que leur interconnexion. La seconde est

relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration.

Les modes de dégradation peuvent être résumés comme suit:

- La lixiviation ou l'hydrolyse (dissolution) des hydrates
- Les échanges ioniques entre les hydrates et le milieu agressif
- Formation de produits expansifs

La cinétique de dégradation est contrôlée par la porosité et la connectivité des pores dans le matériau. Un béton est d'autant plus durable que sa porosité est réduite et donc la pénétration des agents agressifs est limitée.

Partie 2: Le recyclage du béton

I.7 INTRODUCTION

Les granulats recyclés issus de déchets de démolition, de pneumatiques usagés et de déchets divers sont très peu utilisés dans l'industrie du béton voire du Génie Civil. Toutefois, leur perspective d'utilisation dans des produits de résistance mécanique peu élevée est grande moyennant quelques précautions d'emploi. C'est pourquoi le recyclage et la valorisation des déchets sont aujourd'hui considérés comme une solution d'avenir afin de répondre au déficit entre production et consommation et de protéger l'environnement. [18, 19]

Dans notre travail on s'intéresse au recyclage du caoutchouc ainsi que son utilisation dans le domaine du génie civil. Le caoutchouc est utilisé comme substituant des granulats naturels.

I.8 Les déchets de la construction et l'environnement

Contre tous les avantages que procurent le béton à l'humanité, la production du béton a des inconvénients sur l'environnement.

Dans le processus de fabrication du béton, on porte atteinte à l'environnement soit à la phase de production de ses constituants (granulats, ciment, adjuvants...), soit à la phase de sa production lui-même, et éventuellement par l'aspect visuel du béton dans l'environnement.

La production du béton se fait essentiellement avec des granulats d'origines naturelles. Ainsi, le recours à de nouvelles carrières est parfois difficile à réaliser en raison: d'une réglementation rigoureuse (préservation de s paysages, interdiction d'extraction de granulats alluvionnaires...), mais aussi l'épuisement ou éloignement des gisements naturels des centrales de production des bétons.

En effet, l'implantation d'une carrière entraîne une modification du paysage (contrastes de forme, de couleurs...) avec des incidences très variables selon les types d'exploitation (apparition d'un plan d'eau, d'un front de taille minéral, déboisement, etc.).

Sur une autre échelle l'extraction de granulats dans les rivières provoque l'incision verticale du lit de la rivière par érosion en amont et en aval des exploitations.

Ceci se traduit par un abaissement du fond de la rivière qui a plusieurs conséquences :

- L'appauvrissement écologique au niveau du lit mineur car le substratum alluvial est une zone d'habitat pour les poissons, les invertébrés, les végétaux aquatiques alors que le substratum rocheux mis à nu est beaucoup moins favorable pour la faune et la flore;
- L'abaissement de la nappe alluviale, notamment en période d'étiage, provoque l'assèchement des zones humides et la modification des peuplements végétaux. Il s'ensuit une disparition de la diversité de milieux d'intérêt écologique au niveau du lit majeur. La ressource en eau se trouve diminuée, en quantité et en qualité.
- La déstabilisation des ouvrages d'art (ponts...) qu'il est alors nécessaire de conforter par des seuils.

La production du ciment conduit au dégagement de poussières et de gaz qui polluent l'atmosphère et mettent en danger la vie humaine et l'agriculture avoisinantes.

Les principaux polluants rencontrés dans l'industrie du ciment sont :

- Le dioxyde de soufre (SO₂) émis à la combustion au niveau du four se transforme en SO₃ dans l'atmosphère. En présence d'humidité il provoque des pluies acides.
- L'oxyde d'azote (NO₂) produit pendant la combustion, continue à s'oxyder dans l'atmosphère pour former des pluies acides.
- Le monoxyde de carbone (CO) produit au niveau du four à la combustion ou lorsque le four est mal réglé, ce gaz est considéré toxique. Le dioxyde de carbone (CO₂) produit quand la combustion est complète. Le CO₂ n'est pas officiellement un polluant mais son augmentation dans l'atmosphère pose le problème actuel de l'effet de serre.
- Les poussières représentent la forme de pollution la plus importante au niveau des cimenteries. Elles sont plus ressenties par la population pour des raisons physiologiques et psychologiques.

Par la production du béton, le premier impact des déchets des centrales de fabrication du béton près à l'emploi « BPE » est visuel: rejet de laitance de béton qui s'accumule et prend en masse, conduisant à un colmatage de s réseaux et un dépôt dans le milieu naturel. Bruits sonores aux alentours des chantiers.

Densification, voir ralentissement de la circulation dans les centres urbains dû à la présence des camions de transport des matériaux et bétons.

Deux besoins se ressentent actuellement :

- Trouver des ressources alternatives aux granulats naturels et limiter donc l'impacte de leur extraction sur l'environnement;
- Traiter les déchets des constructions en ruine.

Donc l'épuisement des gisements naturels de granulats et les difficultés pour ouvrir de nouvelles carrières imposent de chercher de nouvelles sources d'approvisionnement.

Le recyclage des matériaux de construction est la solution la plus prometteuse. Le recyclage permet non seulement de répondre au déficit de production, mais aussi de mieux protéger l'environnement.

Les déchets de démolition représentent un gisement important suite à la déconstruction des vieux bâtis et aux différentes catastrophes.

I.9 LES DECHETS ET LE RECYCLAGE

Dans le cadre d'une garantie de sécurité environnementale à long terme, la caractérisation des déchets est une phase préalable essentielle dans le choix du stockage ou de valorisation: elle permet de décrire le déchet, de le connaître et d'anticiper sur son comportement à venir.

Le recyclage est le procédé qui permet la fabrication de nouveaux produits à partir de la réutilisation partielle ou totale des matériaux en fin de vie « faire du neuf à partir du vieux » donc les déchets deviennent des matières premières.

I.9.1 Définition d'un déchet

Une définition du déchet se trouve dans la loi du 15 juillet 1975: " On considère que l'on est en présence d'un déchet s'il s'agit d'un résidu d'un processus de fabrication, de production, de transformation ou d'utilisation, ou s'il s'agit d'une substance, d'un matériau, d'un produit ou d'un quelconque bien meuble abandonné ou destiné à l'être". La loi précise aussi que les déchets sont susceptibles de présenter des effets nocifs sur les sols, la faune et la flore, des dégradations aux paysages, des risques d'odeurs, des sources de bruit ou bien encore de porter atteinte à la santé de l'homme ou à l'environnement.

I.9.2 Gestion des déchets

La gestion des déchets est la collecte, le transport, le traitement, la réutilisation ou l'élimination des déchets, habituellement ceux produits par l'activité humaine, afin de réduire leurs effets sur la santé humaine ou l'environnement. L'accent a été mis, ces dernières décennies, sur la réduction de l'effet des déchets sur la nature et l'environnement et sur leur valorisation.

Différentes lois, notamment celles de la directive européenne du 15 juillet 1975 et du 3 juillet 1992 regroupée et inscrite dans le code de l'environnement, fixent les objectifs à respecter pour gérer correctement les déchets :

Prévenir ou réduire la production et la nocivité des déchets.

- Organiser le transport des déchets.
- Valoriser les déchets par réemploi, recyclage ou toute action visant à obtenir des matériaux réutilisables ou de l'énergie.
- Informer le public des effets pour l'environnement et la santé publique.
- Limiter le stockage définitif aux seuls déchets résiduels, ultimes.

L'emploi des déchets industriels dans le secteur du bâtiment reprend simultanément au souci d'économie des ressources naturelles en granulats ainsi qu'à l'obligation de limiter la mise en décharge aux seuls déchets ultimes.

L'accumulation de déchets de caoutchouc, tels que les pneus hors d'usage, constitue une source potentielle de problèmes environnementaux et économiques majeurs.

Les principaux objectifs dans la gestion des déchets sont:

- Prévenir ou réduire la production et la nocivité des déchets, notamment en agissant sur la fabrication et sur la distribution des produits;
- Valoriser les déchets par réemploi, recyclage ou toute action visant à obtenir à partir des déchets des matériaux réutilisables ou de l'énergie;
- Assurer l'information du public sur les effets pour l'environnement et la santé publique, des opérations de production et d'élimination des déchets ainsi que sur les mesures destinées à en prévenir ou à en compenser les effets préjudiciables.
- Organiser le transport des déchets et le limiter en distance et en volume ;
- ...

Les déchets peuvent donc être soit valorisés comme matière première ou énergétique, ou bien stockés.

I.9.3 Généralités sur le recyclage des déchets

Afin de mieux préserver l'environnement, plusieurs actions de valorisation ont été entreprises, notamment dans le domaine des matériaux de construction. Ce qui est l'objectif dans notre étude, qui repose sur l'utilisation des granulats en caoutchoucs issu des pneus usagé dans le béton.

A ce sujet, plusieurs travaux concernant l'emploi de granulats de caoutchouc ont été réalisés. Ces derniers ont montré l'intérêt de l'association ciment/caoutchouc dans l'élaboration de composites cimentaires à haute déformabilité[18, 19]. D'autres travaux sur la durabilité de ces composites ont également montré l'importance du type de caoutchouc sur leur comportement en conditions climatiques sévères, notamment les cycles de gel/dégel. Une étude récente sur l'élaboration de composites cimentaires, à base de particules de caoutchouc, a mis en évidence des propriétés compatibles avec l'utilisation en isolant porteur du matériau.

Toute fois, la plupart des études précédentes se sont intéressées à la valorisation de granulats de caoutchouc, issus de pneus usagés ou de caoutchouc modifié, débarrassés des parties métalliques et textiles et c'est le cas dans notre étude.

I.9.4 Développement du recyclage

Le recyclage est utilisé dès l'âge du bronze. À cette époque, les objets usagés en métal sont fondus afin de récupérer leur métal pour la fabrication de nouveaux objets. Dans toutes les civilisations, l'art et la manière de « faire du neuf avec du vieux » existent. Par exemple, les vieux chiffons, puis le papier et cartons, sont récupérés pour faire de la pâte à papier.

En 1970, le recyclage est mis en avant par des partisans de la défense de l'environnement.

Le recyclage, au sens de l'Arrêté du 16 mars 1995 du gouvernement de Bruxelles, est la transformation des débris en vue de leur utilisation comme matière première secondaire.

Certains débris (à savoir les déchets de construction ou de bâtiments à caractère d'habitation ne contenant pas de matériaux putrescibles ou inflammables) peuvent être utilisés tels quels, comme remblais, de même que les terres non contaminées. D'autres, ne pourront être directement réemployés. Il faudra d'abord en extraire les éventuels contaminants (bois, papiers, métaux, plastiques,...), puis les concasser. Les granulats ainsi obtenus pourront être réutilisés lors de la construction de routes ou de travaux d'infrastructure.

I.9.5 Pourquoi le recyclage ?

Depuis plusieurs dizaines d'années, le volume des déchets dans le monde produit par habitant ne cesse pas d'augmenter. Cela représente une menace pour l'environnement, donc la seule solution était de détruire les déchets par incinération ou enfouissement. Mais depuis peu, la mentalité des hommes a évaluée et, au lieu de nous débarrasser de tous les déchets, nous avons décidé de valoriser une bonne partie d'entre eux, c'est-à-dire de les transformer afin de pouvoir les réutiliser et donc la possibilité d'économisé de la matière. Cela permet de sauvegarder les ressources naturelles de la terre et de limiter également la pollution de l'air et des sols.

Parmi les biens faits environnementaux et économiques et du recyclage, on trouve:

- Protection de l'environnement
- Préservation de ressources naturelles
- Réduction des volumes des décharges et de l'incinération, procédé qui favorisent la pollution des sols et de l'air,
- Limiter la pollution de l'air et des sols
 - Création d'emplois.

Réduction des nuisances liées aux transports des matières premières, limite la consommation du carburant et le dégagement du CO₂, limite la sollicitation du réseau routier etc.

- Offre des ressources d'approvisionnement en matières premières alternatives aux autres sources, exemples :
 - L'acier recyclé permet d'économiser du minerai de fer ;
 - Une tonne de plastique recyclé permet d'économiser 700 kg de pétrole brut ;
 - Le recyclage de 1 kg d'aluminium peut économiser environ 8kg de bauxite, 4 kg de produits chimiques et 14 kWh d'électricité ;
 - Chaque tonne de carton recyclé fait économiser 2,5 tonnes de bois ;
 - Chaque feuille de papier recyclé fait économiser 11 l d'eau et 2,5 d'électricité en plus de 15 g de bois

I.9.6 Utilisation des matériaux recyclés dans les bétons

Les avantages que peut offrir l'incorporation de ce type de granulats dans le béton du point de vue mécanique et durabilité, de contribuer à la réduction de mise en décharges publiques de ces matériaux et de remplacer une proportion de granulats naturels qui sont des ressources épuisables par ces granulats alternatifs.

I.10 Définition des déchets du caoutchouc

Les déchets de caoutchouc industriel issu de fabrication de pneus; de rechapage des pneus, de fabrication de chaussures, de tuyaux, de revêtements de sols...etc. subit des traitements divers afin d'obtenir des granulats de caoutchouc débarrassé des parties métalliques et textiles pour le rendre apte pour l'utilisation [20, 21,22].

Si les pneumatiques ne sont pas considérés comme des déchets dangereux en soi, il n'en va pas de même lorsqu'ils brûlent (émissions de fumées toxiques, libération de résidus huileux toxiques pour l'environnement et les aquifères).

I.11 Utilisation des déchets de caoutchouc dans le bâtiment

Le recyclage des déchets du caoutchouc issus des pneus a une grande importance du point de vue environnemental, car ces derniers produisent chaque année d'important flux de déchet; ils représentent une réelle problématique quand on sait qu'un pneu met 400 ans avant de commencer à se dégrader.

L'emploi de ces déchets et des sous-produits industriels dans le secteur du bâtiment répond simultanément au souci d'économie des ressources naturelles en granulats. Ce sont plusieurs millions de tonnes de pneumatiques usagés et irrécupérables, au moins pour leur usage premier, qui sont abandonnés chaque année. Le moins que l'on puisse dire, c'est que ces objets n'offrent pas vraiment une plus-value esthétique ou artistique aux endroits où ils sont abandonnés (dans les ruisseaux et les fossés), stockés et même réutilisés, par exemple, sur les coques des bateaux pour servir d'amortisseurs ou par les paysans pour maintenir les bâches sur leurs silos d'ensilage. La revalorisation des pneumatiques présente pourtant des avantages évidents :

- Le premier concerne le rechapage qui permet de multiplier la durée de vie d'un pneu par 3 souvent (1 million de kilomètres pour un pneu de camion au lieu de 300 000 km). Il est intéressant de noter que les particuliers semblent peu enclins à utiliser des pneus rechapés, pourtant deux fois moins chers et tout aussi sûrs et durables que des neufs.
- La deuxième utilisation, c'est la transformation des pneumatiques en granulats (poudrette) utilisés pour la réalisation de revêtements à faible émission sonore.

- La troisième utilisation, c'est la transformation en déchiquetât pour la réalisation de murs antibruit aux abords des voies de circulation routières ou ferrées ou encore pour la confection de couches drainantes dans les centres d'enfouissement techniques et divers autres usages de protection.

L'incinération des pneumatiques est pratiquée par les cimentiers, encore à l'essai dans la métallurgie (hauts-fourneaux)

I.12 PROCÉDES DE RECYCLAGE

Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage : chimique, mécanique et organique.

Le recyclage dit « chimique » utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants. Le recyclage dit « mécanique » est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer. Le recyclage dit « organique » consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz.

I.12.1 Les étapes du recyclage des déchets de caoutchouc

Le recyclage consiste à traiter tous types de déchets afin de les réintroduire sur le marché. Il permet de transformer un déchet en matière première prête à l'emploi. Pour pouvoir recycler un matériau On doit d'abord le collecter, le trier puis le stocker en bon état dans un conteneur approprié avant de subir un traitement de recyclage ou d'incinération: le tri sélectif contribue à améliorer le processus.



Figure I.6. Logo universel du recyclage des pneumatiques.

Le recyclage et le traitement du caoutchouc issu des pneus usagés passent par les étapes suivantes :

- ✓ Les matériaux arrivent sur l'installation de recyclage et sont stockés pour traitement.
- ✓ La réduction de volume par l'intermédiaire d'un premier broyage permet d'obtenir les chips de pneu.
- ✓ Deux autres broyages successifs sur la matière obtenue vont produire les granulats et la poudrette.
- ✓ Les matériaux broyés subissent ensuite une désertisation et un retrait des textiles qui seront eux aussi valorisés.
- ✓ La dernière étape consiste en une séparation densimétrique et un tamisage des matériaux obtenus



Figure I.7.Etapes du recyclage du caoutchouc

I.13 Exemples concrets d'utilisation des déchets de caoutchouc

Au désert du Taos aux Etats-Unis, avec des températures extérieures allant de moins 30 à plus 50°C, l'architecte Mickael Reynolds, a eu l'idée de créer une maison réalisée intégralement à partir de matériaux recyclés locaux.



Figure I.8. Maison de l'architecte Mickael Reynolds réalisée à partir de matériaux recyclés.

La maison, dans laquelle il vit depuis plus de 20 ans maintenant, est composée intégralement de pneus et de bouteilles recyclés. Elle est quasi indépendante énergiquement grâce aux solaire et éolien, tout en ayant un système de récupération d'eau chauffé par l'énergie solaire. Les granulats en caoutchoucs sont utilisés pour l'isolation et l'amortissement dans les terrains de tennis par exemple ils sont utilisés aussi comme matière premier des matériaux de construction.



Figure I.9. Exemple d'utilisation des caoutchoucs recyclés

I.14 Avantages d'utilisation du caoutchouc recyclé dans les bétons

Le composite granulat en caoutchoucs dans le béton a des avantage diverses dans le secteur du génie civil ces derniers peuvent être résumés comme suit :

- Recyclage des caoutchoucs et des pneumatiques évite les coûts de mise en décharge ou d'incinération.
- Absorption des vibrations mécaniques.

- destinées au domaine de l'amortissement et de l'isolation.
- Excellents résultats aux tests HIC
- Flexibilité sur le long terme.
- Capacité d'amortissant optimale.
- Capacité calorifique élevée.
- Augmentation de la capacité de déformabilité du béton.
- Limiter le risque de fissuration.

I.15 Quelques chiffres des déchets du caoutchouc dans le monde

Le stockage et l'élimination des pneumatiques usagés sont devenus une des préoccupations pour l'environnement à travers le monde. Des centaines de millions de pneus hors d'usage, sont générés et cumulés chaque année de travers le monde.

Dans le monde entier, s'agissant de l'industrie automobile, l'utilisation des pneus en caoutchouc augmente chaque année. On peut citer quelque cas :

La France, en 2008, plus de 366.000 tonnes de pneumatiques ont été collectés ce qui constitue une progression de 36% par rapport à 2004; la Thaïlande, le bilan de la seule année 2000 indique une consommation d'environ 94.000 tonnes de pneus. Ces chiffres continuent à augmenter chaque année avec le nombre de véhicules dans tous les pays. L'expérience montre que l'incendie des pneumatiques devient rapidement non maîtrisable. Ainsi, les sites de stockage constituent un risque pour l'eau en surface, ainsi que pour l'eau souterraine.

Ils représentent aussi un danger sanitaire car ils constituent un habitat privilégié des insectes. En général, la moins chère et la plus simple des solutions pour décomposer les déchets ou les pneus usagés est de les brûler. Cependant, la pollution et la quantité énorme de fumée produites par cette méthode est inacceptable, et dans certains pays il est interdit par des lois de procéder ainsi. En conséquence, la valorisation de pneus usagés est un sujet important pour la planète entière.



Figure I.10. Stock de pneus usagés en Tarn-et-Garonne en 2007 (France)

I.16 PROBLEMATIQUE DES PNEUS USES EN ALGERIE

Depuis 2004, chaque année, l'Algérie importe en moyenne 49,62 milliers de tonnes de pneumatiques en caoutchouc, selon l'Agence Nationale de Promotion du Commerce Extérieur. Sachant que chaque pneu neuf vendu génère un pneu usagé, et tenant compte de la perte de masse due à l'usure du pneu une fois usé, on se retrouve avec environ 45,65 milliers de tonnes de pneus usagés, chaque année.

Le nombre de pneumatiques consommés progresse régulièrement avec la croissance du parc automobile. Malgré l'amélioration de la longévité des pneumatiques, le gisement de ces déchets reste très important.



Figure I.11. Chantier expérimental PneuSol à Bou-Smail

En Algérie, la valorisation des déchets pneumatiques, en génie civil, semble être la principale filière consommatrice des pneus usagés. Matériaux non biodégradables et non toxiques, une

fois enterrés, les pneus usés associés au sol, peuvent solutionner plusieurs problèmes rencontrés par l'ingénieur en génie civil.

La technique Pneusol peut s'avérer plus rentable que d'autres filières de valorisation, partant du fait qu'elle ne nécessite aucun matériel spécifique ni main d'œuvre qualifiée.

Cette technique est déjà adoptée dans notre pays et son futur semble prometteur.

I.17 CONCLUSION

L'enjeu Du recyclage est donc de contribuer à la diminution de l'épuisement des ressources naturelles pour l'avenir, point fort du Grenelle de l'environnement.

La valorisation de ces granulats issus du recyclage présente un intérêt d'ordre économique, technique et environnemental. Le réemploi de ces matériaux dans la fabrication des bétons contribuerait à la prolongation de la durée de vie des carrières existantes et au même temps à l'élimination des déchets dans les décharges.

Par ailleurs, ces granulats recyclés pouvant se substituer aux granulats naturels, ceci permet de résoudre dans l'avenir le manque de granulats naturels. Néanmoins, il est nécessaire d'approfondir les connaissances sur les propriétés de ces déchets (granulats recyclés) destinés pour bétons ou mortiers en fonction de leur origine, ce qui facilitera leur valorisation.

Partie 3 : Comportement des dalles et poinçonnement

I.18 INTRODUCTION

POINÇONNEMENT : Enfouissement d'une surface, tassement d'un sol, déformation d'un élément de structure (plaque par exemple.) sous l'effet d'une charge localisée.

Résistance au poinçonnement : capacité d'un revêtement, d'une surface ou d'un élément de structure de ne pas se laisser percer ou endommager sous l'effet d'une action ponctuelle.

Les éléments structurels composés d'éléments surfaciques minces comme les dalles doivent être vérifiés au cisaillement par poinçonnement pour les positions où des charges concentrées sont appliquées et selon les exigences du Chapitre 6.4 d'EN 1992-1-1 [23]. La charge concentrée comme pour les poteaux, charges concentrées ou appuis nodaux, extrémités de paroi, les angles de paroi et les fins ou angles de charges linéiques et appuis linéiques.

Le calcul de la résistance au poinçonnement selon EN 1992-1-1 permet de vérifier que l'effort de cisaillement agissant ne dépasse pas l'effort résistant.

I.19 POINÇONNEMENT DES DALLES

La résistance au poinçonnement des dalles en béton armé est un thème très actuel. Des accidents récents ont montré la dangerosité du phénomène, caractérisé par une rupture fragile difficile à prévoir et qui conduit à une propagation rapide de la rupture avec effondrement complet de la dalle si des mesures constructives adéquates ne sont pas prises.

Le poinçonnement des dalles en béton armé ou précontraint est un mode de rupture qui contrôle très souvent le dimensionnement et la vérification de structures de type plancher-dalle ou pont-dalle. Un modèle physique capable de déterminer la résistance au poinçonnement dans des conditions particulières non prévues par les normes et avec une meilleure précision pour les cas usuels est indispensable pour l'évaluation de la capacité portante de structures existantes.

Ce mécanisme de rupture peut se rencontrer essentiellement dans les planchers-dalles (Figure I.17) et dans les semelles et radiers de fondation ou lorsqu'une grande charge est transmise à une dalle par des appuis concentrés. Le plancher-dalle est composé d'une dalle en béton armé

ou en béton précontraint d'épaisseur constante qui est appuyée sur des colonnes, avec ou sans chapiteaux, disposés en général suivant une trame régulière. [25,26]

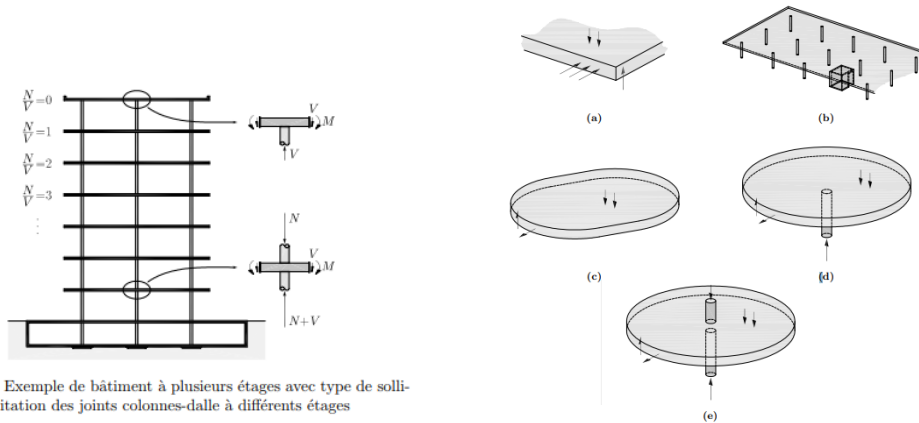


Fig. 1.3: Exemple de bâtiment à plusieurs étages avec type de sollicitation des joints colonnes-dalle à différents étages

Figure I.12.Exemple de bâtiment à plusieurs étages avec type de sollicitation des joints colonnes-dalle à différents étages



Figure I.13.Exemple d'un Cas d'effondrement de structures par poinçonnement: parking sur plusieurs étages en phase de construction. [24]

I.20 COMPORTEMENT MECANIQUE DES DALLES

Le comportement flexionnel des dalles comprend plusieurs phases qu'il est important de distinguer, la figure I.14 montre les phases successives du comportement d'une dalle en béton armé sous une charge qui augmente progressivement. [25].

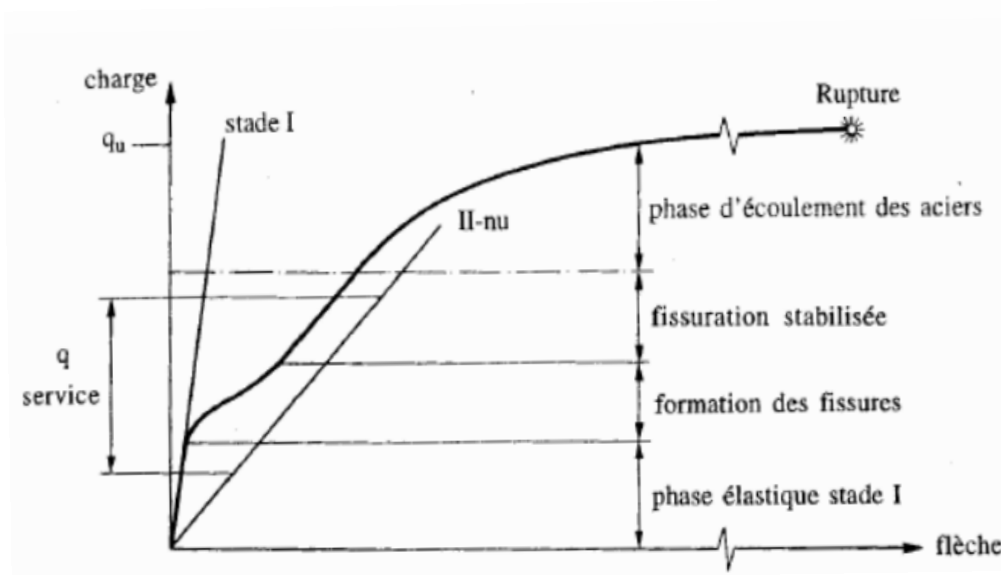


Figure 1.14: Phases successives du comportement d'une dalle en flexion [25]

✚ Phase élastique linéaire

Dans cette première phase de chargement (stade I figure I.14), la dalle se comporte pratiquement comme une structure douée d'un comportement élastique linéaire.

✚ Phase de fissuration

La fissuration du béton apparaît dans les zones les plus sollicitées pour s'étendre sous charge croissante aux autres zones pour lesquelles le moment de fissuration est dépassé. La rigidité des sections fissurées est réduite, ce qui conduit à une modification de la répartition des moments de flexion, les moments dans les zones non fissurées augmentent plus, pour un même accroissement de charge, que dans la phase élastique. Tant que l'écoulement de l'armature ne se produit pas, l'ouverture des fissures est limitée.

✚ Phase d'écoulement

L'armature s'écoule progressivement dans les zones où les moments sont les plus élevés. Les sections où l'acier d'armature atteint sa limite d'écoulement continuent de se déformer, mais le moment de flexion n'y augmente plus, ce qui cause une redistribution des moments, plus importante que dans la phase précédente. Les zones d'écoulement de l'acier s'étendent progressivement et se concentrent le long de bandes étroites où se produisent les fissures les plus ouvertes. Ces fissures se développent suivant un schéma qui dépend notamment de la géométrie de la dalle, des conditions d'appui, de la répartition des armatures et du mode de chargement.

✚ Phase de rupture

Lorsque les lignes d'articulation ont atteint un stade de développement tel que la dalle est transformée en un assemblage de sous-structures, une très légère augmentation des charges conduit à un état d'équilibre instable provoquant l'effondrement de la dalle.

I.21 RUPTURE PAR POINÇONNEMENT DES DALLES

Les dalles (Planchers, radiers et tout élément de surface) constituent un des éléments de structure le plus classique. Du point de vue mécanique, une dalle est un élément bidimensionnel de structure plan, d'épaisseur faible par rapport à ses dimensions dans le plan. Elle résiste aux efforts auxquels elle est soumise par des mécanismes de flexion dans une ou deux directions, suivant sa géométrie et ses conditions aux limites.[25, 26]

La rupture par poinçonnement est caractérisée par une force concentrée agissant perpendiculairement sur une dalle qui crée une rupture locale. La figure I.15 montre le cône tronqué de poinçonnement séparé de la dalle par la fissure de poinçonnement, généralement inclinée par rapport au plan de la dalle d'un angle compris entre 25 et 40°. [26,27]

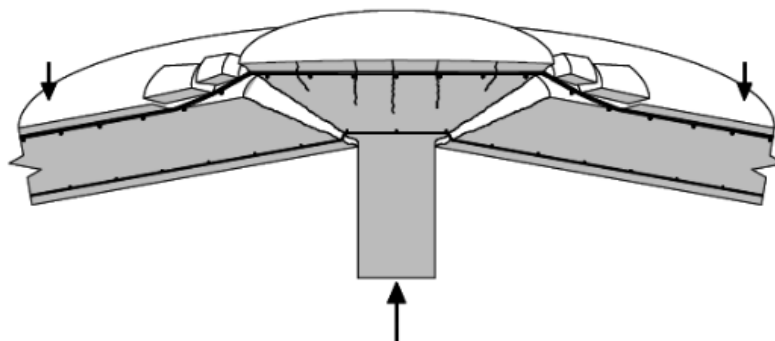


Figure I.15: Rupture par poinçonnement d'une dalle en béton [26]

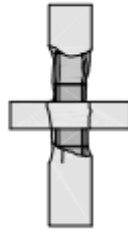


Figure I.16. Joint colonnes-dalle qui a développé une rupture dans le béton de la colonne

I.21.1 Mode de rupture

La résistance au poinçonnement constitue un paramètre important dans la conception des dalles en béton. Sous un chargement d'une charge concentrée (poinçonnement), des efforts tranchants très importants sont développés dans la dalle. La distribution de ces efforts tranchants est de forme hyperbolique est maximale au nu de la colonne (Favre et coll.1997). La figure I.17 présente la distribution des efforts de cisaillement près d'une colonne.

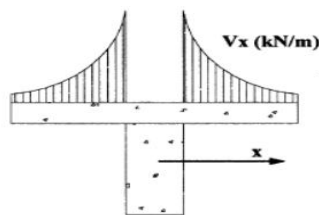


Figure I.17. Distribution des efforts de cisaillement près d'une colonne [28]

Lorsque la dalle est soumise au chargement de poinçonnement, elle commence à se déformer sans que des fissures se forment.

L'évolution des fissures sur la face tendue pendant la mise en charge est illustrée par la Figure.I.18.[25, 27]

Des fissures tangentielles apparaissent très tôt à la face supérieure de la dalle près de la projection du périmètre de la colonne (moment de fissuration radial, figure.I.19.a). Les fissures qui suivent divisent la dalle en secteurs (figure.I.19.b). Les moments radiaux restent limités, ainsi que les courbures dans la direction radiale, dans une zone proche de la colonne. D'autres fissures tangentielles se forment à une distance plus grande de la colonne. Par la suite, des fissures internes en forme de tronc de cône se développent, en partant des fissures tangentielles créées par les moments radiaux, en direction de la tête de la colonne (figure.I.19.c).

A partir d'une certaine charge et jusqu'à la rupture, on n'observe plus de formation de nouvelles fissures, mais seulement une ouverture des fissures existantes.

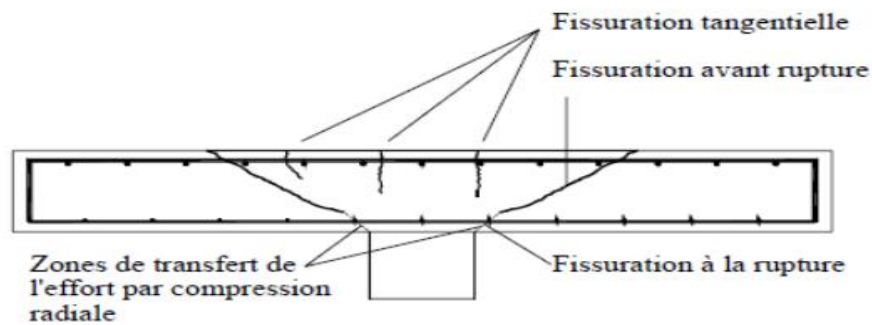


Figure .I.18 : Fissuration lors d'une rupture par poinçonnement [25]

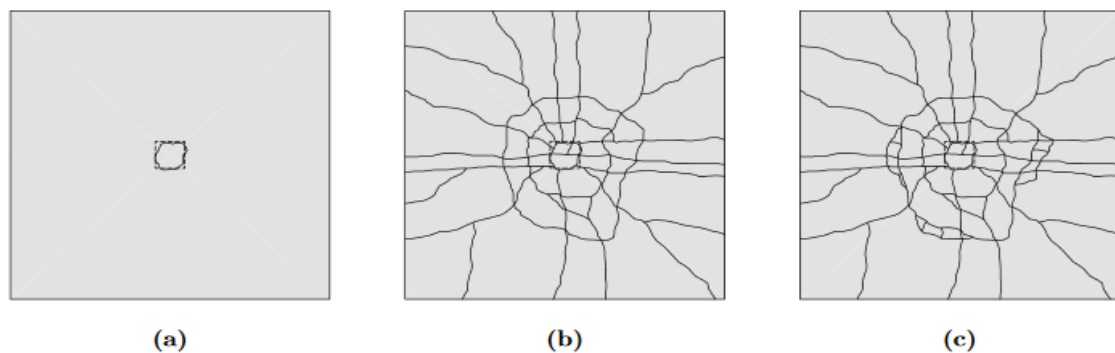


Figure I.19. Evolution des fissures sur la face tendue d'une dalle pendant la mise en charge [28]

I.21.2 Type de poinçonnement

En général, on peut distinguer deux types de poinçonnement : le poinçonnement symétrique et le poinçonnement non symétrique ou asymétrique

A- Poinçonnement symétrique

Si la géométrie, la charge, les conditions d'appuis et la constitution de l'élément structurel sont considérés symétriques par rapport à deux axes de symétrie, on parlera de poinçonnement symétrique. Le mode de rupture est illustré par la figure I.20. Lorsque la symétrie est relative à tous les axes radiaux, on se trouve dans le cas particulier du poinçonnement axisymétrique [29], [30].

B- Poinçonnement non symétrique

La symétrie est marquée par le manque d'une des conditions citées dans le cas du poinçonnement symétrique. Le poinçonnement non symétrique est désigné par deux états différents: Le poinçonnement non symétrique centré et le poinçonnement non symétrique

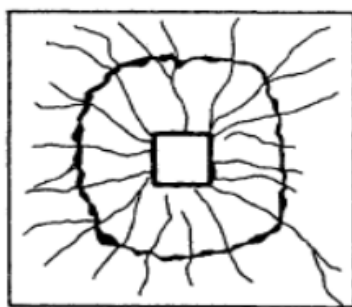
excentré, La différence entre ces deux types de poinçonnement est donnée par l'apparition d'un moment de flexion transféré de la dalle à la colonne dans le cas du poinçonnement excentré.

Les comportements global et local autour de la colonne sont influencés par la non symétrie.

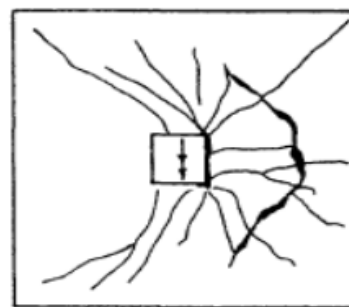
La résistance n'est pas uniformément répartie autour du périmètre de contrôle [29].

- **Non symétrie centrée :** Dans la plus part des cas, tenant compte des exigences fonctionnelles qui imposent souvent des irrégularités géométriques, le dimensionnement de la dalle conduit à une disposition des armatures de flexion différente dans les deux directions perpendiculaires. [26]

- **Poinçonnement excentré:** L'excentricité de la charge verticale induit un moment de flexion additionnel qui va influencé la surface de rupture. En fonction de l'intensité du moment de flexion, la forme peut devenir asymétrique autour de la colonne. L'augmentation des efforts locaux et l'ouverture de la fissure critique diminue la résistance par unité de longueur, par conséquent, la charge de rupture [29], [31].



a) Force verticale uniquement



b) Moment de flexion uniquement

Figure I.20. Etat de fissuration et fissures de poinçonnement à la rupture (vue en plan de la dalle) [29].

La Figure I.20.a montre une rupture par poinçonnement centré résultant uniquement d'une force verticale, tandis que la Figure I.20.b montre une rupture par poinçonnement résultant uniquement d'un moment de flexion.

Dans le cas d'un poinçonnement excentré, les fissures se concentrent plutôt du côté où la force est appliquée. Plus l'excentricité est importante, plus la rupture est ductile.

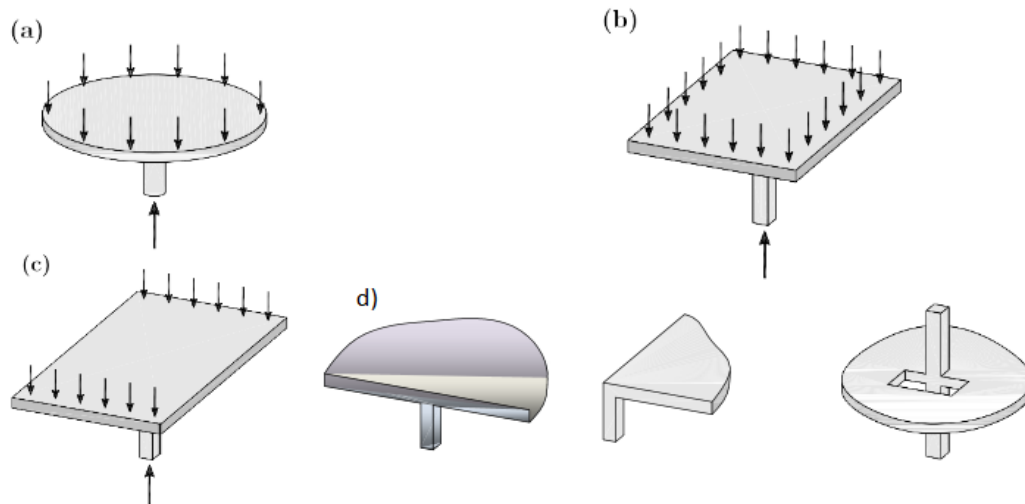


Figure I.21. Différents types de poinçonnement de dalles en béton armé:(a)poinçonnement axisymétrique;(b) poinçonnement symétrique;(c) poinçonnement non symétrique; (d) poinçonnement excentré [29]

CHAPITRE II Composition des bétons & Procédures Expérimentales

II.1 INTRODUCTION

Comme les trois quarts du volume d'un béton sont occupés par les granulats, il n'est pas étonnant que la qualité de ces derniers revête une grande importance. Non seulement les granulats peuvent limiter la résistance du béton mais selon leurs propriétés ils affecteront la durabilité et les performances structurales du béton.

L'utilisation des granulats recyclés est un grand pas franchi dans la construction qui permet de protéger la nature de l'exploitation excessive de la réserve des granulats naturels et donc de l'environnement.

L'objectif de notre travail est d'étudier les effets de substitution d'une partie de granulats naturels par des granulats en caoutchouc « GC » sur les propriétés des bétons. On s'est intéressé à deux aspects :

- Etude de la résistance à 28 jours des bétons ;
- Etude au poinçonnement par flexion des dalles en bétons formulés de granulats en caoutchouc.

Dans ce présent chapitre on a présenté le cahier des charges qui définit les différents paramètres considérés pour la formulation des bétons.

On a également définis toutes les procédures expérimentales nécessaires pour l'élaboration des différentes étapes ; de la préparation des matériaux, confection des bétons et essais de caractérisation et procédures d'essais. Certaines des procédures expérimentales sont plus détaillées en annexes.

II.2 CRITERES DE FORMULATION DES BETONS

La composition des bétons répond à un cahier des charges souvent émis par le maître de l'ouvrage pour répondre à des exigences en termes de compacité du béton, fluidité, pompabilité et bien sûr résistance du béton, mais aussi à la disponibilité des matériaux dans la région etc.

Ainsi, on a choisit pour notre étude de formuler des bétons avec un diamètre maximal de 8 mm, béton appelé couramment micro-béton pour qui le D_{\max} est de l'ordre de 8 à 10 mm.

Le choix de cette taille est lié au fait que dans l'utilisation des GC on vise des critères autre que la résistance caractéristique à la compression des bétons; on vise principalement le comportement des dalles sous chargement de poinçonnement et le mode de rupture et de fissuration de ces béton formulés avec ce genre de granulats.

Pour la formulation de nos bétons, on n'a pas utilisé les méthodes habituellement utilisée pour faire la formulation de nos bétons comme la méthode de Dreux Gorisse, car ces méthodes visent un premier critère de résistance et ont souvent des rapports G/S proche de 1,5. Les critères utilisés sont donc :

- Rapport G/S égale proche de 1, c'est un critère souvent utilisé pour formuler des bétons à facilité de mise en place.
- $D_{\max} = 08 \text{ mm}$, le choix de ce diamètre est dû au fait les GC utilisé sont d'un D_{\max} de moins de 3 mm. On a donc préféré ne pas trop nous éloigner de ce diamètre.
- Ciment = 350 kg pour 1 m³ de béton
- E/C = 0,50

II.3 MATERIAUX ET FORMULATION

II.3.1 Matériaux de base utilisés

On précise que notre étude est basée sur l'utilisation des granulats naturels (GN) ainsi que les granulats de recyclage (granulats en caoutchoucs notés GC).

II.3.1.1 *Granulats*

Les granulats naturels(GN) : nous avons deux classes granulaires : Sable concassé de classe 0/3 et un gravier de classe 3/8

Les granulats en caoutchoucs(GC): Ils ont une taille qui varient entre 2 et 3.5 mm, ils sont fournis prêt à l'emploi.



a) *Granulats en caoutchouc* b) *granulats 3/10* c) *Sable 0/3*

Figure II.1. Granulats utilisées

II.3.1.2 Ciment

Nous avons utilisé un ciment de type CPJ- CEM II/B 42,5 N produit par LAFARGE.

II.3.1.3 Eau de gâchage

L'eau à utiliser doit être propre, exempte d'impuretés, donc on a choisit d'utiliser l'eau du robinet car elle convient toujours.

II.4 CARACTERISATION DES GRANULATS

Les granulats utilisés dans le bâtiment pour qui les performances de service sont inconnues doivent répondre à des impératifs de qualités et des caractéristiques propres à chaque usage, pour cela il est nécessaire de les soumettre à des essais de laboratoire afin d'assurer leur acceptabilité.

II.4.1 Echantillonnage

L'échantillon nous permet de mesurer les paramètres caractéristiques de l'ensemble du matériau dans lequel on a fait le prélèvement. En générale, le prélèvement de l'échantillon se fait en deux temps ;

- Prélèvement sur chantier ou à la carrière d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour l'essai.
- Au laboratoire, prélèvement de la quantité nécessaire à l'essai et qui soit également représentative de l'échantillon de départ.

Lorsqu'il n'est pas possible de prendre tout le tas et de le réduire, on procède à un prélèvement local.

II.4.2 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique sert à déterminer la distribution pondérale des particules d'un matériau suivant leurs dimensions, l'analyse se fait par tamisage (*EN933-1 et EN 933-2*).

Avant de procéder à l'essai l'échantillon doit être séché à l'étuve à une température maximale de 105 °C.

L'essai consiste à classer les différents grains de l'échantillon en utilisant une série de tamis emboîtés les uns sur les autres. Les dimensions des mailles sont décroissantes de haut vers le bas. La séparation des grains s'obtient par vibration de la colonne des tamis (tamisage terminer lorsque le refus ne varie pas de plus de 1%).

La forme de la courbe granulométrique nous apporte les renseignements suivants :

Les limites d (petit diamètre) et D (grand diamètre) des granulats.

- La plus ou la moins grande proportion d'éléments fins.
- La continuité ou la discontinuité de la granularité.

Plus la courbe granulaire est continue et régulière plus on aura une meilleure compacité du squelette du béton. Aussi elle permet d'anticiper les problèmes sur le béton à formuler, et d'avoir des bétons à meilleure fluidité sans problème de ségrégation.

Dans ce qui suit, on a présenté les résultats de l'essai pour les granulats utilisés. Sur la figure II.3 sont représentés les courbes des granulats naturels (Sable 0/3; GN 3/08) et les granulats en caoutchoucs (GC).

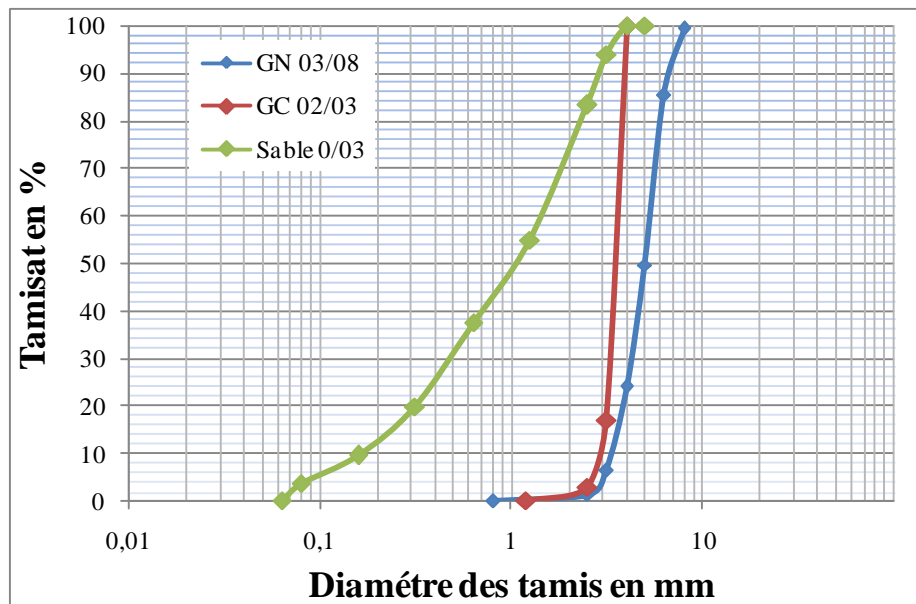


Figure II.2. Courbes granulaires des granulats naturels et des granulats en caoutchoucs.

D'après la figure II.2 On remarque que les granulats en caoutchoucs sont d'une classe granululaire très serrée, soit des granulats de tailles comprise entre 2.00 mm et 3,15 mm

Les détails des résultats des essais de granulométrie sont donnés dans l'annexe2.

- Module de finesse du sable

Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF). D'après la norme [NFP 18-540], le module de finesse d'un granulat est égal au $1/100^{\text{ème}}$ de la somme des refus cumulés, exprimés en % sur les différents tamis de la série suivante : 0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 ; 5 mm.

Le module de finesse du sable 0/3 :

$$MF = \frac{90,42 + 80,12 + 62,47 + 48,90 + 16,77 + 0,00}{100} = 2,986$$

Ce sable a un module de finesse compris entre 2.8 et 3.2 donc on dira qu'il est un peu grossier.

II.4.3 Absorption et masses volumiques des granulats

La mesure d'absorption est essentielle pour la formulation des bétons *NF P 18-555*, elle permet de corriger la quantité d'eau finale à introduire dans la composition du béton. En fonction de l'état d'humidité des granulats avant la gâchée (secs ou saturés ou simplement humides), on doit recalculer la quantité d'eau à introduire dans le béton ; ainsi si les granulats

sont secs ils risquent d'absorber de l'eau efficace prévue pour l'hydratation du ciment, et donc voir le rapport E/C en baisse, à l'inverse, si les granulats sont humides ou saturés ils vont alors fournir au béton plus d'eau, et le rapport E/C varie en hausse.

Les résultats de caractérisation de l'absorption ainsi que ceux des masses volumiques des différents granulats sont récapitulés dans le tableau ci-dessous

Tableau II.1. Masses volumiques et coefficients d'absorption des différents granulats

	Sable 0/3	GN 3/08	GC
Masse volumique absolue (g/cm³)	2,74	2,73	1,04
Masse volumique réelle (g/cm³)	2,68	2,64	1,04
Masse volumique saturée à surface sèche (g/cm³)	2,71	2,67	/
Masse volumique apparente vibrée (g/cm³)	1,945	1,592	0,270
Absorption (%)	0,79	1,25	/

Pour le cas des granulats naturels la procédure de l'essai est décrite dans l'annexe 1.

Les masses volumiques des GC est de 1,04, elle est proche de 1, elle est inférieure de plus de la moitié de celle des granulats naturels pour qui elle vaut 2,60.

Masse volumique apparente vibrée : pour la formulation de nos bétons on a décidé de travailler avec des substitution volumiques des granualts. Or, les volumes dans le cas des granulats ne dépendent pas uniquement des masses volumiques réelles, mais elles dépendent également de la compacité du mélange. En effet, un même échantillon d'un granulat peut occuper des volumes différents en allant d'un simple versement sans vibration à une vibration intense pendant une durée suffisamment longue pour que le volume de l'échantillon se stabilise.

Afin d'obtenir cette masse volumique apparente vibrée des granulats , on a alors utilisé les résultats précédemment réalisés sur ces mêmes granulats dans le cadre d'un mémoire de master 2015. On a alors utilisé ces valeurs de masses volumiques pour le calcul de nos compositions de bétons, soit pour calculer les masses correspondants aux volumes des granulats à la substitution des granulats naturels (sable et gravier) par les granulats en caoutchouc.

II.5 FORMULATION DES BETONS

On a calculé la composition du béton de référence en respectant le cahier des charges que l'on a décrit précédemment. Les autres compositions de bétons testés sont calculées en faisant une substitution volumique du sable et gravier 3/08 par un même volume en granulat en coutchouc, cela en utilisant les masses volumiques apparentes vibrées. On a donc adapté la procédure suivante :

Pour chaque pourcentage de substitution de GN par les GC, on a réduit à la même fraction le sable et le gravier 3/08. Les autres paramètres de la composition de référence BR sont maintenus constants (même volume de ciment, même rapport E/C, même rapport G/S....).

Ainsi on a fixé la quantité du ciment à 350 Kg par m³ de béton et un rapport Eau efficace / Ciment égal à 0,5.

Les granulats sont séchés avant utilisation, la quantité d'eau a donc était corrigée par l'eau d'humidification des granulats pour avoir la quantité d'eau total.

II.5.1 Nomenclature des bétons à étudier

On a dans un premier temps le béton de référence (BR) avec 0 % de GC et 100 % de GN.

Les pourcentages de substitution des granulats utilisés sont (5 %, 10 %, 15 %, 20 %). La nomenclature des bétons testés est donnée dans le tableau II.2 suivant

Tableau II.2. Nomenclature des compositions de bétons testés

	BR	B05 GC	B10GC	B15 GC	B20 GC
% GC	0	5	10	15	20
% GN	100	95	90	85	80

II.5.2 Composition des bétons à tester

Les compositions de 1 m³ de béton des formules testées sont données dans le tableau II.3 suivant. Cinq bétons sont testés. Le premier étant le béton de référence BR.

Tableau II.3. Composition en kg de 1m³ de béton des différentes formulations

	BR	5% GC	10% GC	15% GC	20% GC
Ciment	350	350	350	350	350
Sable	825	784	743	702	661
3/8	825	784	743	702	661
GC	0	25	51	76	102
Eau	195	195	195	195	195

II.6 PROCEDURES EXPERIMENTALES ET CONDITIONS DE CONSERVATIONS

Pour la confection des bétons, nous avons décidé de travailler avec des granulats secs. Il a donc fallu mettre en étuve tous les granulats pour sécher pendant 24 heures à 105°C. Après séchage, faire en sorte que tous les granulats soient ramenés à la température ambiante et les mettre dans un sac en plastique pour éviter qu'ils reprennent de l'humidité.

II.6.1 Fabrication des bétons et confection des éprouvettes

Pour la préparation des bétons on a à chaque fois suivi le protocole suivant:

a. Préparation du matériel et des matériaux

Préparer les moules prévus pour les éprouvettes de béton, les moules sont huilés pour faciliter le décoffrage. Préparer les pesées des matériaux à utiliser (gravillons, ciment, granulats en caoutchoucs...). Séparer l'eau en deux quantités 25 % pour la préhumidification des granulats et 75 % le reste d'eau prévue pour le béton.

Dallâtes : Les moules utilisés pour la confection des dalles sont ceux habituellement utilisés pour la confection des éprouvettes de mortier normalisés. Pour nos dallâtes on a enlevé les deux séparateurs intérieurs ce qui nous a permis d'avoir des moules de base « 16 cm x 13 cm ». Les moules sont remplis à trois hauteurs différentes (2 cm, 3 cm et 4 cm). Voir figure suivante.

Cubes : Pour la caractérisation de la résistance à la compression, nous avons utilisé des moules cubiques de 10 cm de côtés. Voir figure suivante.



Figure II.3. Moules utilisés pour la confection des deux sortes d'éprouvettes.

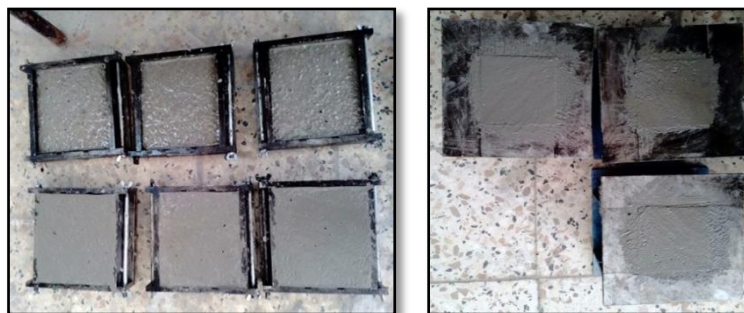
b. Protocole de la confection des éprouvettes :

Après avoir préparé le nécessaire en matériels et en matériaux , la procedure de la confection des béton est le suivant :

- 1- Humidification du malaxeur avec le quel on travaille.



- 2- Introduction des granulats naturels(sable + gravier) dans le malaxeur.
- 3- Mélanger uniformément les constituants cela pour homogéniser le mélange et ajouter progressivement l'eau de pré-humidification.
- 4- Laisser reposer 2 min.
- 5- Ajouter le ciment et les granulats en caoutchouc puis mélanger le tout.
- 6- Verser l'eau restant graduellement et mélanger le tout jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène.
- 7- Remplir les moules des éprouvettes.



8- Vibrer les éprouvettes sur la table vibrante de 10 à 20 sec.



9- Mettre des sacs en plastique sur les éprouvettes pour éviter l'évaporation de l'eau.

10- Après 24 heures les éprouvettes sont démoulées et marquées : on note sur la surface des éprouvettes de béton la date de leur confection et la référence du béton (le pourcentage des granulats en caoutchoucs)

11- Une fois les éprouvettes marquées, elles sont immergées dans un bac rempli d'eau jusqu'à l'âge de 28 jours.



Figure II.4. Eprouvettes conservées dans l'eau

II.6.2 Caractérisation des éprouvettes de bétons à 28 jours

Il est à rappeler que pour chaque composition sont réalisées trois éprouvettes.

Au 28ème jours les éprouvettes cubiques sont systématiquement pesées puis sollicitées en compression jusqu'à la rupture.

Le test de compression est effectué sur une presse hydraulique équipée d'une cellule de force d'une capacité 5000 kN, asservie de manière hydraulique. L'essai s'effectue avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s soit 5 kN/s selon la norme NF 12390-3.

Cette presse dispose d'un capteur de force très précis, elle nous donne la force et la contrainte maximales.



Figure II.5. Presse de mesure de la compression uni-axiale

II.7 ESSAI DE POINÇONNEMENT

Trois séries de dallâtes de différentes épaisseurs (4 cm, 3cm et 2cm) sont considérées pour chaque formulation de béton. Pour chaque épaisseur trois éprouvettes sont confectionnées.



Figure II.6. Les différentes dalles après décoffrage

Les essais de poinçonnement sur les dalles sont réalisées à 28 jours sur une machine de marque IBERTEST (figure II.). C'est une machine universelle qui peut effectuer sans encombre la traction, la compression, la flexion et le poinçonnement. La machine est équipée d'une cellule de force maximale de 200 KN.

Elle est commandée par ordinateur muni d'un logiciel de commande et de traitement des résultats, ce qui permet une bonne acquisition de données, c'est-à-dire les diagrammes (Force/déplacement et force/temps) avec une bonne précision.

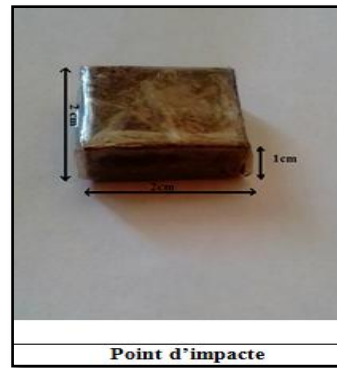


Figure II.7 Machine d'essai IBERTEST

Mode de chargement : La dalle est posée sur un dispositif de poinçonnement fabriqué sur mesure des dalles à expérimentées d'une manière à ce que la dalle en essai soit reposée sur ces quatre cotés à fin de ne pas gêner le fléchissement de la dalles sous le chargement. La dalle est donc simplement appuyée à ces quatre côtés. Les dimensions du dispositif fabriqué sont 13 cm de largeur et 15 cm de longueur.



Le chargement mécanique est appliqué à l'aide d'un vérin hydraulique sur la dalle à travers un petit cube métallique de hauteur de 1 cm et de base $2 \times 2 \text{ cm}^3$ appelé point d'impact ou bien point de poinçonnement.



La valeur de la charge à la rupture et la flèche verticale au milieu de la dalle sont relevées automatiquement pour chaque incrément de charge. La vitesse de chargement est de 0.1 kN/s.

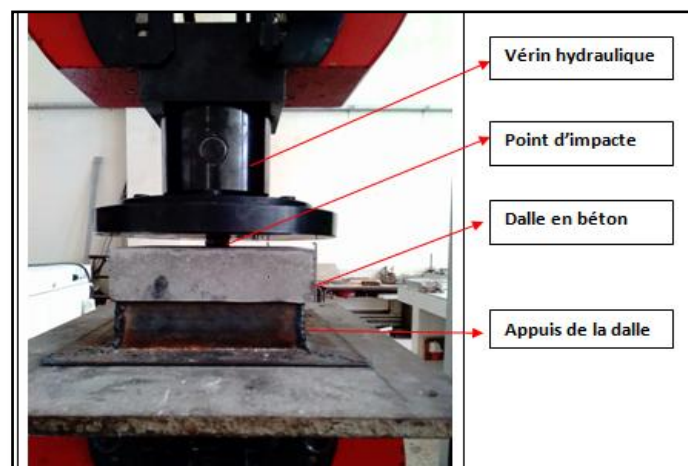


Figure II. 8. Mise en point du dispositif d'essai de poinçonnement.

II.8 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 formulation des bétons, la confection des éprouvettes, le mode opératoire et les différents essais mécaniques considérés dans ce travail. Les différents résultats obtenus sont présentés et illustrés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III : Résultats & Investigations**III.1 INTRODUCTION**

Dans ce chapitre on a présenté les différents résultats obtenus sur le programme expérimental, on a également essayé de donner une interprétation à ces résultats.

Les granulats en caoutchouc présentent des propriétés physico-mécaniques différentes de celles des matériaux cimentaires. On s'est posé alors les questions :

Qu'elle est l'incidence de cette différence sur les propriétés physico-mécanique des bétons à base de GC ?

Qu'elle est l'incidence de cette différence sur les propriétés de flexion par poinçonnement d'un béton composé en partie de ces granulats ?

On rappelle que pour l'étude on a prévu cinq compositions de béton à différents pourcentages de GC. Douze éprouvettes par béton. Trois de forme cubiques pour la partie résistance et neuf (soit 3×3 dalles) d'épaisseurs respectives 2, 3 et 4 cm pour la partie poinçonnement.

Pour chaque partie on a essayé de donner une interprétation à ces résultats.

III.2 LES PROPRIETES PHYSICO-MECANQUES**III.2.1 Résultats des masses volumiques des bétons durcis**

Pour chaque béton sont confectionnés trois éprouvettes de dimensions 10×10×10 cm³. Au 28^{ème} jour, avant écrasement, les éprouvettes sont systématiquement pesées, puis soumises à la compression.

On a calculé la masse volumique des différents bétons en utilisant la moyenne des pesées. Cette dernière est calculée on utilisant la formule suivante :

$$M_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^3 m_i}{3}$$

Avec : m_i correspond à la masse mesurée.

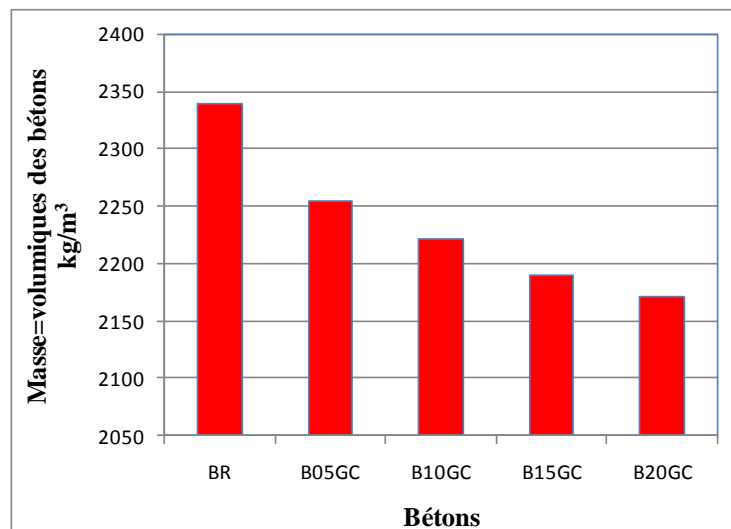
Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau III.1 suivant. Le diamètre maximal de nos granulats est de 8 mm. On a fait une substitution volumique des GN par les GC. Les pourcentages testés sont (0 % ; 05 % ; 10 % ; 15 % et 20 %).

Tableau III.1. Masses des éprouvettes (kg) et masses volumiques des bétons durcis (kg/m^3)

	Cube 1	Cube 2	Cube 3	Moyenne	Masse volumique	% de baisse de Mv
BR	2,331	2,343	2,335	2,336	2336	
B05 GC	2,277	2,281	2,175	2,244	2244	3,9
B10 GC	2,219	2,211	2,223	2,218	2218	5,1
B15 GC	2,175	2,197	2,185	2,186	2186	6,4
B 20 GC	2,173	2,158	2,176	2,169	2169	7,2

Le pourcentage de baisse de la masse volumique est calculé en comparant les masses volumiques des différents bétons par rapport à celle du béton de référence BR.

Pour faciliter l'interprétation de ces résultats, on a représenté sur la figure III.1 suivante les résultats des masses volumiques en fonction du pourcentage de substitution des GN par des GC.

**Figure III.1.** Masse volumique des bétons en fonction du pourcentage en GC

La masse volumique est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume. La figure III.1. montre clairement que lorsque le pourcentage des GC augmente la Mv diminue et le béton devient plus léger.

Tel que représenté sur la figure III.2, on est passé d'un béton de référence BR à 100 % de GN de 2336 kg/m^3 à un béton de B20GC à 20 % du volume en GC à 2169 kg/m^3 , soit une baisse de masse volumique de près de 7,2 % par rapport à BR.

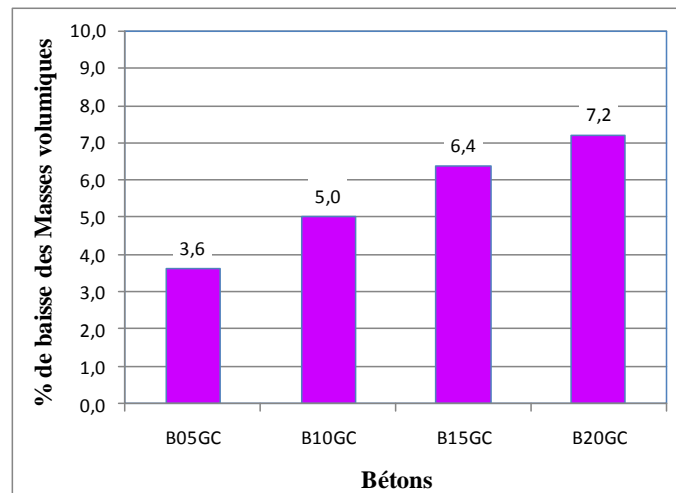


Figure III.2. Pourcentage de baisse des masses volumiques des bétons en fonction du % en GC.

La baisse de masse varie proportionnellement au taux de substitution des GN par les GC.

III.2.2 Résultats des résistances à la compression à 28 jours

Les résistances mécaniques obtenues à 28 jours pour les différentes formules de bétons testées sur trois éprouvettes, sont données dans le tableau III.2. On a donné les résistances moyennes des trois mesures, ainsi que le pourcentage de baisse des résistances calculés par rapport au béton de référence BR.

$$R_{cmoyenne} = \frac{\sum_{i=1}^{i=3} R_{ci}}{3}$$

R_{ci} résistance mesurée sur l'éprouvette *i*.

Tableau III.2. Résistances moyennes à la compression des bétons à 28j

	Cube 1	Cube 2	Cube 3	Rcmoy	écart type	% de baisse
BR	41.86	39.68	41.41	41.0	1.15	/
B 05GC	39.14	39.47	36.72	38.4	1.5	6.50
B 10GC	33.99	33.12	32.07	33.1	0.96	18.80
B 15GC	29	29.98	29.12	29.4	0.53	30.72
B 20GC	25.5	24.77	26.84	25.7	1.04	39.08

Pour une meilleure appréciation des résultats on a représenté sur la figure III.3 les résistances moyennes selon le pourcentage de substitution des GN par les GC. Les résultats sont représentés sous forme de courbe.

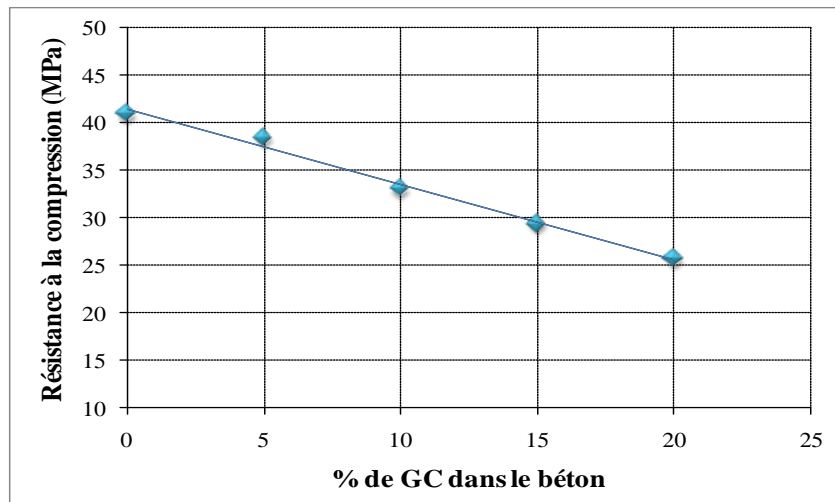


Figure III.3. Effet des G.C. sur la résistance en compression à 28 jours.

La figure III.3 donne les variations de la résistance à la compression des différents composites à l'âge de 28 jours.

On constate que les bétons formulés avec les GC présentent des résistances plus faibles que celle enregistrée sur le béton de référence (sans GC).

La résistance a tendance à baisser avec l'augmentation du taux de substitution de GN par les GC dans les bétons.

On passe d'une résistance à 28 jours de 41 MPa pour le béton de référence (100 % de granulats naturels) à une résistance de 25.7 MPa pour le béton 20% (20 % de GC et 80 % de granulats naturelles), soit une baisse de près de 39% de la résistance à 28 jours.

La tendance de baisse sur cette plage de substitution (soit entre 0 et 20 % de substitution) est de type linéaire, son équation peut être exprimée comme suit:

$$R_c = -79.27 \cdot x + 41.43 \quad \text{MPa}$$

Avec x qui représente le pourcentage de substitution des GN par des GC.

Le coefficient de régression obtenue avec cette approximation est de $R^2 = 0.991$.

III.2.3 Corrélation entre la Rc à 28 jours et les masses volumiques

Pour une meilleure exploitation des résultats on a cherché à établir une corrélation entre la résistance à 28 jours et la masse volumique des bétons. La courbe est représentée sur la figure III.4 suivante :

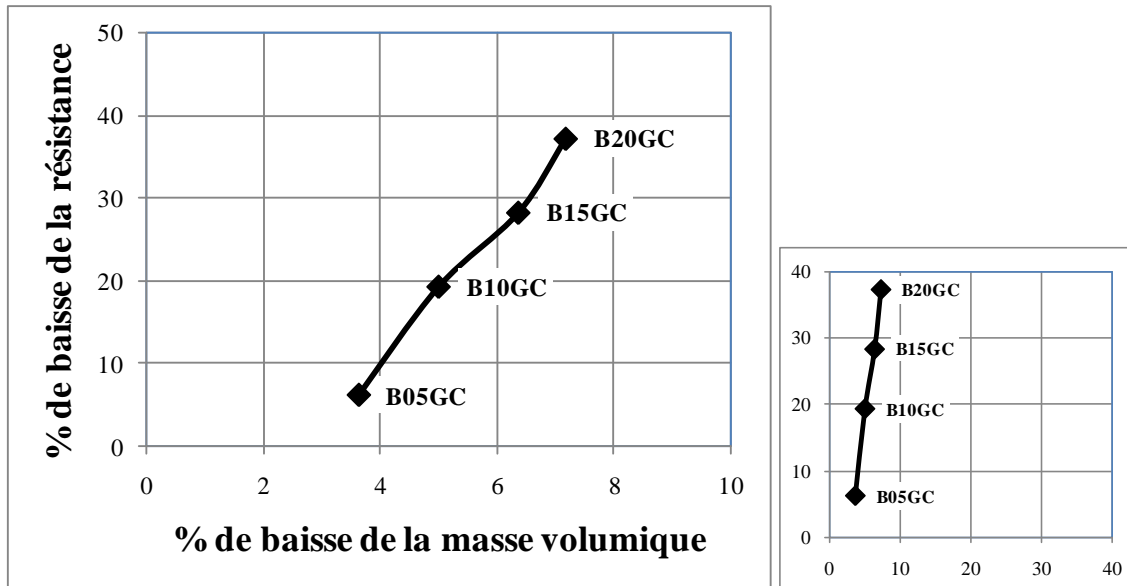


Figure III.4. Corrélation entre la baisse de la résistance à 28 jours et le % de GC

La tendance obtenue est de type linéaire ; les deux paramètres varient proportionnellement. La baisse de la résistance mécanique variée proportionnellement avec la baisse de la masse volumique.

Sur la courbe de droite, on a représenté les deux variables (% de baisse de la résistance et celle de la masse volumique) sur une même échelle. On constate que la baisse de la résistance est beaucoup plus importante devant la baisse de la masse volumique. Ainsi pour le béton à 20 % de substitution des granulats naturels par des GC, on a perdu près de 39 % en résistance contre uniquement 7,2 % en masse volumique.

III.3 Résultats de flexion des dallâtes

Le poinçonnement s'est fait par l'intermédiaire d'un déposé entre les dallâtes et le vérin mobile de la presse. La vitesse de chargement est de 0.1 kN/s.

La surface du point d'impact de poinçonnement est de $2 \times 2 \text{ cm}^2$. Les dallâtes sont posées sur un dispositif de poinçonnement, elles sont donc simplement appuyées sur quatre côtés. Le périmètre de contact est de $2 \times (13 + 15) \text{ cm}$.

Trois épaisseurs de dalles sont testées (2, 3 et 4 cm) et cela pour chaque dosage en GC. Les résultats obtenus sont présentés comme suit :

- Résistance maximale à la flexion par poinçonnement.
- Pente des courbes résistances & déformations
- Et mode de ruine des dalles

Pour chaque partie on a essayé de donner une interprétation à ces résultats.

III.3.1 Résultats de flexion par poinçonnement des dalles à différentes épaisseurs

Pour bien illustrer l'effet des granulats en caoutchouc sur la résistance à la flexion par poinçonnement des dalles de béton, les résultats sont présentés par épaisseurs.

III.3.1.1 Résultats de flexion par poinçonnement des dalles d'épaisseur 2cm

Les moyennes des résistances à la flexion maximales obtenues pour les dalles d'épaisseur 2cm sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.3. Résultats en MPa des dalles de 2cm d'épaisseur

	Dalle 1	Dalle 2	Dalle 3	Rpmoy	écart type
BR	0.588	0.733	0.891	0.74	0.15
B 05GC	0.564	0.571	0.662	0.60	0.05
B 10GC	0.613	/	0.803	0.71	0.13
B 15GC	0.725	0.931	0.616	0.76	0.16
B 20GC	0.839	0.799	1.021	0.89	0.12

Les résultats issus de cet essai nous ont permis de tracer la courbe de corrélation des résistances en fonction du pourcentage de granulats en caoutchouc des dalles d'épaisseur 2cm.

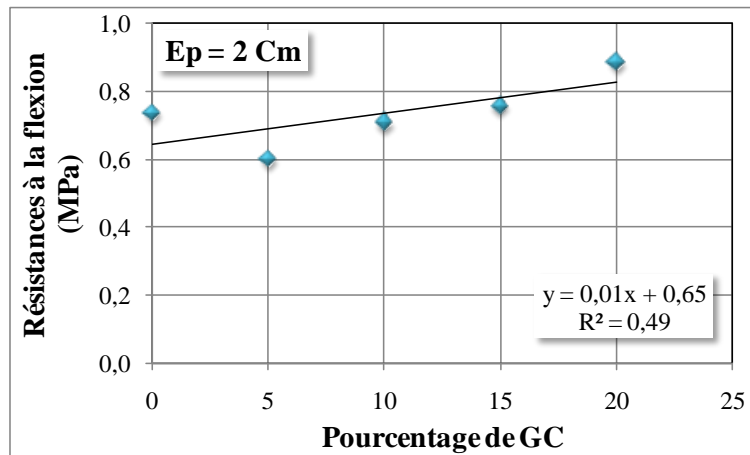


Figure III.5. Résistance moyenne des dalles d'épaisseur 2cm

La courbe de la figure III.5 montre que la résistance au poinçonnement des dalles (2cm) baisse dans un premier temps du passage du BR à B05GC. Mais pour les bétons contenant des GC la tendance est plutôt positive. En effet, de 5 à 20 % de substitution des GC la tendance est en hausse. Le B20GC présente même une légère hausse, soit 20 %) par rapport au BR.

III.3.1.2 Résultats de flexion par poinçonnement des dalles d'épaisseur 3cm

Les moyennes des résistances à la flexion maximales obtenues pour les dalles d'épaisseur 3 cm sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.4. Résultats en MPa des dalles de 3cm d'épaisseur

	Dalle 1	Dalle 2	Dalle 3	Rpmoy	écart type
BR	1.198	0.722	0.893	0.94	0.24
B 05GC	1.041	0.721	0.685	0.82	0.20
B 10GC	1.031	1.065	1.026	1.04	0.02
B 15GC	1.058	0.929	1.13	1.04	0.10
B 20GC	1.331	1.61	1.127	1.36	0.24

Les résultats issus de cet essai nous ont permis de tracer la courbe de corrélation des résistances en fonction du pourcentage de granulats en caoutchouc des dalles d'épaisseur 3cm.

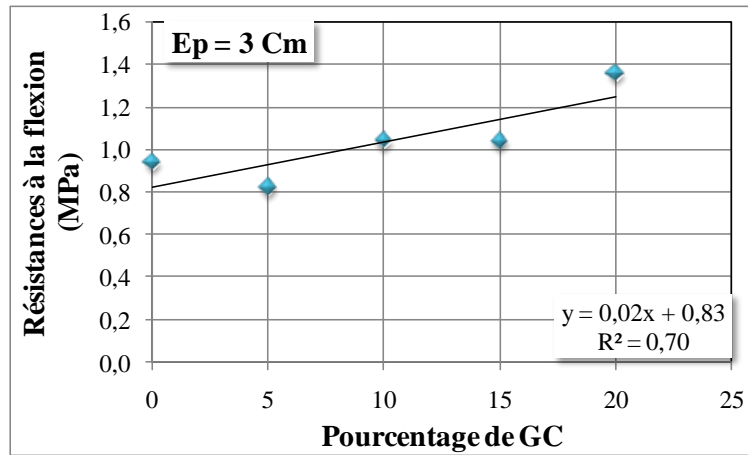


Figure III.6. Résistance moyenne des dalles d'épaisseur 3cm

La courbe de la figure III.6 montre que la résistance au poinçonnement des dalles (3cm) baisse dans un premier temps du passage du BR à B05GC. Mais pour les bétons contenant des GC la tendance est plutôt positive. En effet, de 5 à 20 % de substitution des GC la tendance est en hausse. Les bétons B10GC, B15GC et B20GC présente une légère hausse ; pour le B20GC on a obtenu une résistance de 1,36 MPa alors que pour le BR on a eu 0,94 MPa.

III.3.1.3 Résultats de flexion par poinçonnement des dalles d'épaisseur 4 cm

Les moyennes des résistances à la flexion maximales obtenues pour les dalles d'épaisseur 3 cm sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.5. Résultats en MPa des dalles de 4cm d'épaisseur

	Dalle 1	Dalle 2	Dalle 3	Rpmoy	écart type
BR	1.32	1.345	1.453	1.37	0.07
B 05GC	1.669	1.313	1.337	1.44	0.20
B 10GC	1.243	1.359	1.245	1.28	0.07
B 15GC	1.303	1.385	1.132	1.27	0.13
B 20GC	2.487	2.572	2.621	2.56	0.07

Les résultats issus de cet essai nous ont permis de tracer la courbe de corrélation des résistances en fonction du pourcentage de granulats en caoutchouc des dalles d'épaisseur 4cm.

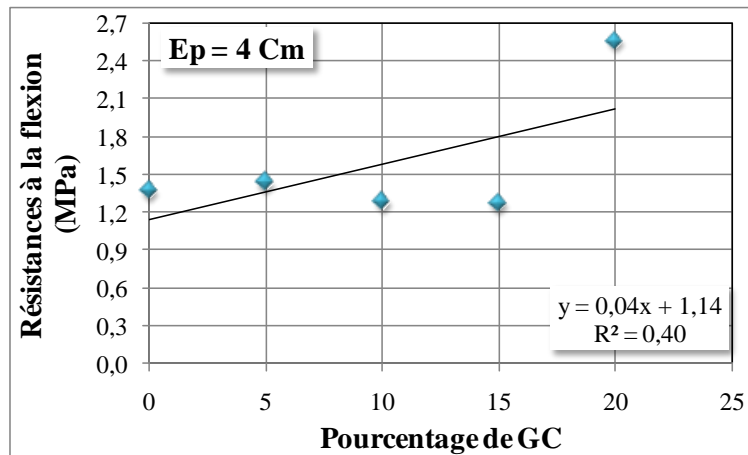


Figure III.7. Résistance moyenne des dalles d'épaisseur 4cm

Pour les dalles d'épaisseur de 4 cm les résultats sont un peu différents de ceux que l'on a eus pour les dalles des deux autres épaisseurs. Les résultats sont plutôt peu concluants. Pour les trois bétons B05GC, B10GC et B15GC on a eu quasiment les mêmes résistances que celle du BR. Pour le B20GC la résistance a quasiment doublé, on est passé d'une résistance de 1,37 MPa à une résistance de 2,56 MPa.

III.3.2 Effet combiné de l'épaisseur et de la teneur en GC sur la résistance à la flexion par poinçonnement

Sur la figure III.8 suivante, on a représenté les résistances moyennes des dallâtes confectionnées à différentes teneurs en GC (0%, 5%, 10%, 15% et 20%) et d'épaisseur différentes (2 cm, 3 cm et 4 cm).

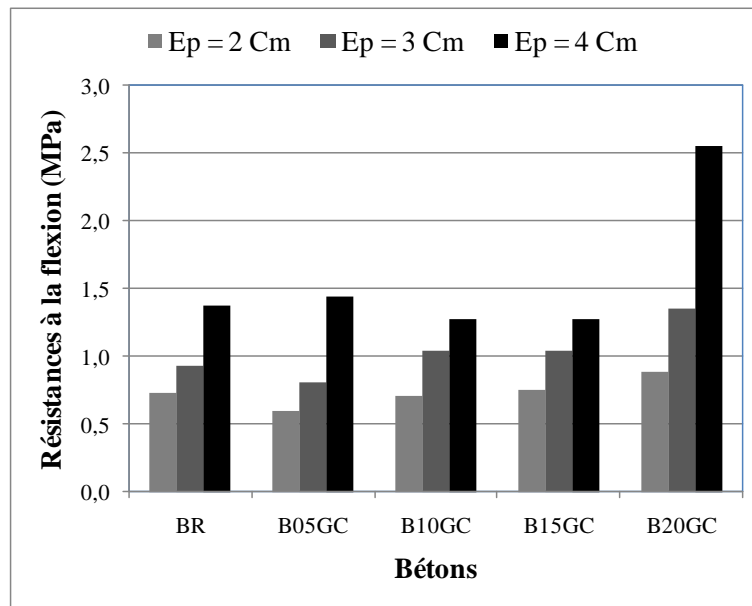


Figure III.8. Effet combiné de l'épaisseur et de la teneur en GC sur la résistance à la flexion par poinçonnement

Selon l'histogramme de la Figure III.8, on remarque que la résistance à la flexion par poinçonnement des bétons étudiés évolue progressivement en fonction de l'épaisseur de la dalle. Ce résultat a été constaté sur les cinq bétons étudiés, plus l'épaisseur est grande plus la résistance développée est importante. Ce qui est tout à fait logique du moment que la section résistante est plus importante.

En fonction du pourcentage des granulats en caoutchouc, la tendance est aussi à la hausse ; plus le pourcentage de granulats est grand plus la résistance est un peu meilleure, comme cela a été expliqué au paragraphe précédent.

Les résultats montrent que l'ajout des granulats en caoutchouc influence positivement sur la résistance à la flexion par poinçonnement des dalles. Ce qui encourage l'introduction de ce matériau dans le béton.

III.3.3 Etude des courbes résistances à la flexion & déformations

Dans cette partie les résultats sont exprimés directement : force de chargements en (KN) en fonction des déplacements enregistrés qui est exprimé comme les pentes des courbes. On rappelle que ces variables peuvent être exprimées sous forme de contraintes-déformations en utilisant les propriétés géométriques des éprouvettes.

III.3.3.1 Exemples de courbes résistances & déformations

Pour ne pas encombrer le document on ne présente dans cette partie que deux cas de courbes, celles obtenus sur le béton B10GC et B20GC les autres courbes sont données en annexe 03. L'exploitation de toutes les courbes est faite dans cette partie. On a présenté sous forme de tableau les calculs de pente des différentes courbes, on a alors essayé de donner une interprétation à ces résultats en fonction du pourcentage en GC et de l'épaisseur.

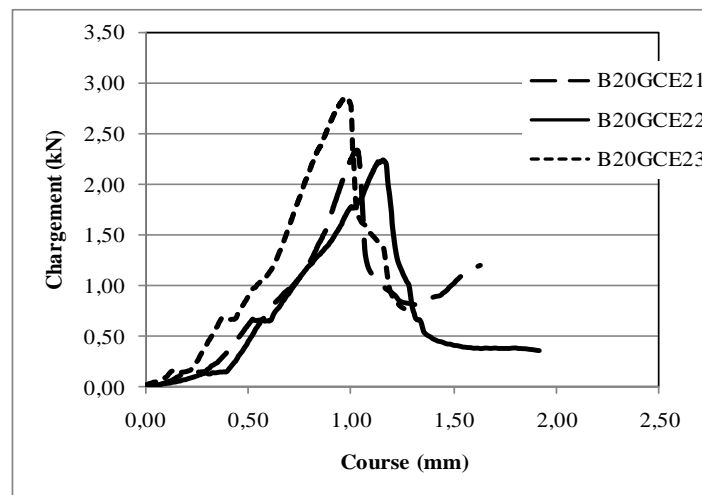


Figure III.9. Courbes résistances à la flexion & déformations des dalles du B20GC

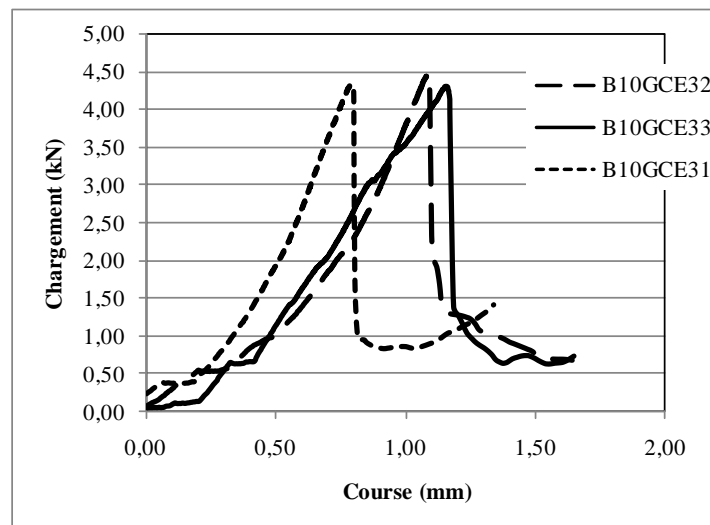


Figure III.10. Courbes résistances à la flexion & déformations des dalles du B10GC

Les courbes sont utilisées pour la comparaison des bétons entre eux. Elles se caractérisent par deux paramètres caractéristiques qui sont :

- La pente de la courbe obtenue à la phase linéaire de la courbe.
- La charge maximale de rupture exploitée précédemment.

Note : On a noté pour la suite de ce document G_e valeur des pentes de la phase élastique.

On remarque sur l'ensemble des courbes se caractérisent par une pente linéaire entre la montée en résistance et la déformation en flexion des dalles. Juste après le pic il y a rupture brutale des dalles.

III.3.3.2 Calcul des pentes G_e

Ainsi pour faciliter la comparaison entre les différents bétons de cette étude, on a calculé pour chacun des bétons sa pente (G_e) calculée avec la relation :

$$G_e = \frac{\Delta F}{\Delta d}$$

ΔF : Différence de forces calculée entre deux points choisis dans la partie linéaire. Δd : déplacements des points choisis pour le calcul de cette pente.

Les valeurs moyennes des pentes des courbes de chargement(kN)/flexion (mm) (G_e) obtenues pour chacun des bétons et en fonction des épaisseurs en cm sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau III.3. Tableau récapitulatif des pentes des courbes Chargement/Flexion

	Epaisseur 2	Epaisseur 3	Epaisseur 4
BR	5,03	5,62	10,39
B05GC	4,63	5,13	8,55
B10GC	3,21	5,63	8,51
B15GC	4,06	5,52	8,03
B20GC	3,92	4,62	6,64

Ces résultats sont exploités dans les figures suivantes.

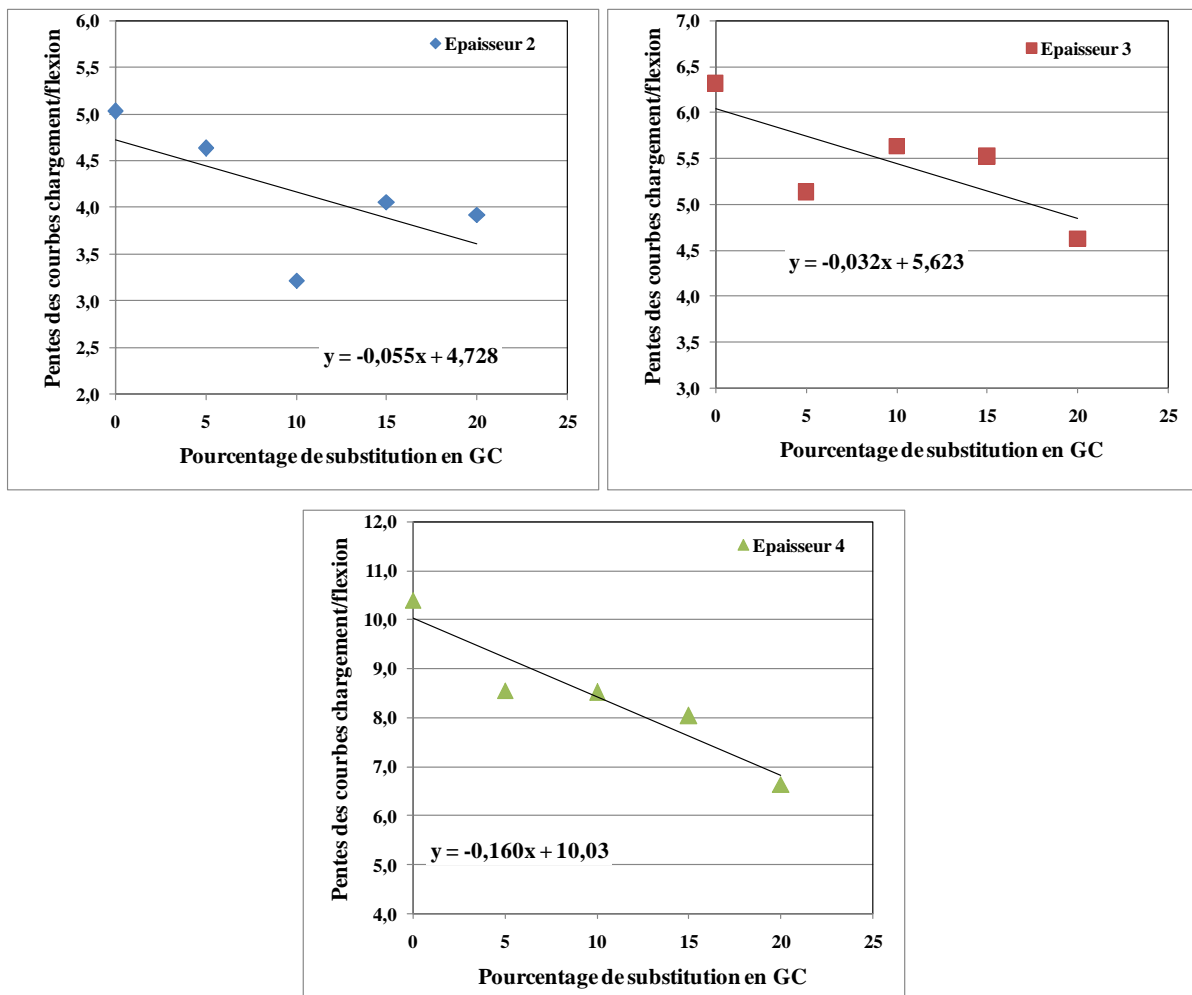


Figure III.11. Valeurs des pentes des courbes chargements / Flexions (KN/mm) des différents bétons et pour les trois épaisseurs

Ainsi, tel que représenté sur la figure précédente, selon les courbes de tendances, les valeurs de G_e (chargement/flexion) des bétons est inversement proportionnel au pourcentage de granulats en caoutchouc dans le béton. Ce résultat est observé sur les différentes épaisseurs de dalles : pour chaque catégorie de dalles la tendance est la baisse en fonction de l'augmentation du pourcentage de GC dans le béton.

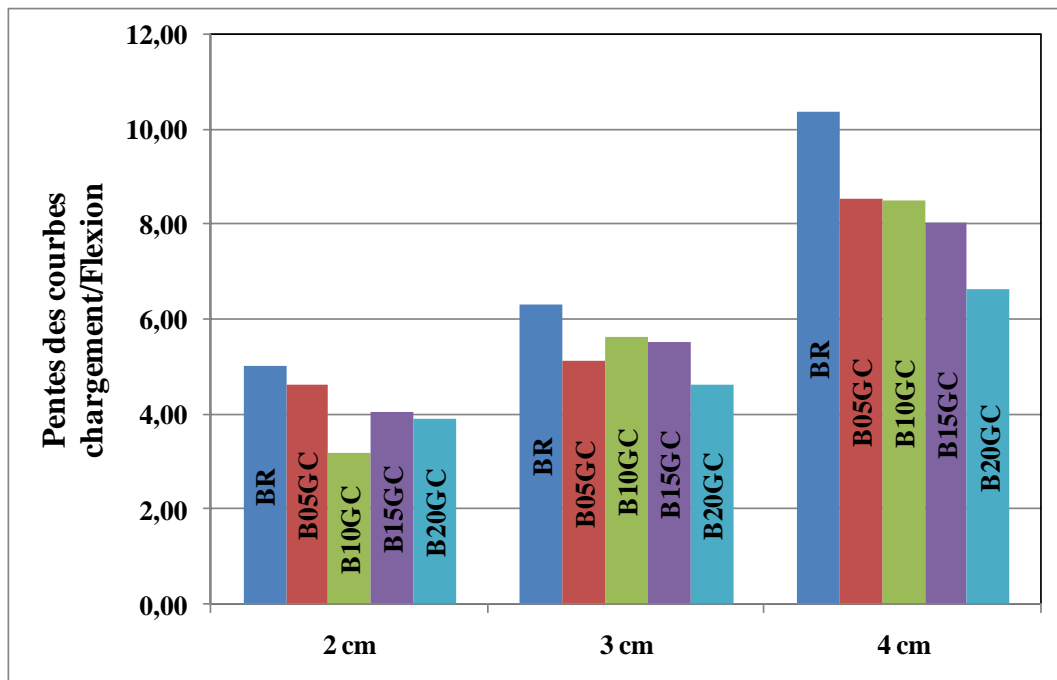


Figure III.12. Histogramme des pentes des courbes chargement / Flexions (kN/mm) de toutes les dalles.

L'historgramme de la figure précédente nous donne la classification de tous les bétons. Ainsi, les pentes obtenues sur les dalles de 4 cm sont les plus grande, puis celles de 3 cm est enfin 2 cm. Donc les pentes chargement/flexion augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la dalle. Ce constat est observé sur les 5 catégories de béton.

Cependant, c'est le béton de référence (BR) qui à chaque fois a eu la valeur la plus grande et pour les trois épaisseurs.

III.3.4 Mode de ruine des dallâtes

Après sollicitation des dallâtes par flexion par poinçonnement, on a essayé d'étudier le mode de ruine des dalles et cela en fonction des épaisseurs et de la teneur en GC dans les bétons.

Sur les 45 dallâtes testées une partie c'est cassé en deux morceaux soit donc une fissure en long ; l'autre partie c'est cassé en trois morceaux, soit donc une fissure qui va en long et la deuxième qui démarre du point d'application de la charge et qui va vers le bord voir la Figures III.13.suivante.



Figures III.13. Mode de rupture des dallâtes (une fissure et deux fissures).

On a alors fait un comptage par épaisseur, on a résumé dans le tableau suivant les résultats. Les photos de toutes les dalles endommagées sont données en annexe3.

Tableau III.4.récapitulatif du mode de ruine des dallâtes

Epaisseurs	une fissure	Deux fissures
15 dalles de 2 Cm	12 dalles	3 dalles
15 dalles de 3 Cm	11 dalles	4 dalles
15 dalles de 4 Cm	4 dalles	11 dalles

Ainsi donc, on peut dire que plus les dallâtes sont fines plus elles se brisent en deux et plus les dallâtes sont épaisses plus elles se brisent en trois.

Par ailleurs, on a constaté également que dallâtes à forte teneur en GC restent unies en un seul morceau, elles ne rompent pas et restent jointes en un seul bloc uni, visuellement on remarque des fissures assez fines. Les blocs ne se détachent pas.



Figures III.14. Etat d'endommagement des dallâtes à forte teneur en GC après rupture.

Contrairement, les dallâtes à faible teneur en GC se rompent en morceaux qui se dissocient (séparent).



Figures III.15. Etat d'endommagement des dallâtes de bétons à faible teneur en GC après rupture.

On pense que ce mode de rupture est influencé par la nature physique des granulats en caoutchouc qui sont moins fragile que le béton. Il se comporte comme un amortisseur, donc emmagasine l'énergie instantanément puis la diffuse en différé. Sur cet aspect de ce matériau il y a donc des interrogations auxquelles il faut répondre.

III.4 Conclusion

A l'issue de cette étude on peut conclure que l'introduction des granulats en caoutchouc dans le béton provoque une baisse des résistances mécanique des bétons. Ainsi pour 20 % de substitution en GC on a observé une baisse des résistances à la compression d'environ 40% .

Toute fois, il est bien de souligner que pour les bétons à moins de 15 % de GC, on a pu avoir des résistances assez bonnes en comparaison au béton de référence. En effet, à 15 % de substitution nous avons des bétons de près de 29 MPa, ce qui n'est pas négligeable, d'autant plus que ces bétons sont plus légers que les bétons de référence de cette étude.

L'introduction des GC dans les bétons provoque une baisse des masses volumiques des bétons, plus le pourcentage en GC et important plus le béton est léger. Cette baisse est liée à la masse volumique des GC qui est plus petite que celle des granulats naturels. La baisse en masse volumique du B20GC est d'environ de 7,2 %.

Par ailleurs, plus les épaisseurs des dalles est grand plus les résistances à la rupture par poinçonnement est importante.

Le pourcentage de baisse des résistances mécanique et celui de baisse des masses volumiques n'évoluent pas de la même manière. La résistance baisse avec une tendance plus prononcée que les masses volumiques (pour le B20GC on a une baisse de 40 % contre une baisse en masse volumique de 7,2 % uniquement).

L'exploitation des courbes de chargement en flexion (kN) en fonction de la déformation (mm) nous a permis de constaté que les pentes de ces courbes sont inversement proportionnelles au taux de substitution des GN par des GC dans le béton. Ce résultat a été constaté sur les dallâtes des différentes épaisseurs (2, 3 et 4) cm.

Conclusion générale

Cette présente recherche a portée sur l'étude de la possibilité du recyclage des granulats en caoutchouc (notés GC) dans les bétons. On a alors essayé de définir les propriétés des bétons formulés en incorporant en partie ces granulats en substitution aux granulats naturels. Pour se faire, on a alors travaillé sur trois parties différentes :

- Résistance à la compression à 28 jours des cubes de cinq bétons composés de 0, 5, 10, 15, et 20 % de GC en substitution aux granulats naturels.
- Etude de ces cinq bétons en flexion par poinçonnement des petites dalles, suivies de courbes chargement /déformation et définition de la charge à la rupture. Trois épaisseurs de dalles sont testées.
- Etude du mode de ruine des dalles soumises à la flexion par poinçonnement.

Pour les trois cas, nous avons cherché l'influence du pourcentage de substitution volumique des GN par des GC sur les paramètres d'étude. Sur l'ensemble des essais menés, nous avons fait une substitution volumique des GN par les GC tout en maintenant les autres paramètres de composition constants (même quantité en ciment, eau...)

Les résultats obtenus nous ont permis de conclure ce qui suit :

Par les essais de compression sur cube, on a conclu que la résistance à 28 jours est inversement proportionnelle au pourcentage de substitution des GN par les GC. A 20 % de substitution en GC on a eu une baisse de près de 39 % de la résistance par rapport au béton de référence formulé sans GC.

De même avec l'introduction des GC dans les bétons, leurs masses volumiques deviennent de plus en plus légères. Le pourcentage de baisse des résistances mécanique et celui de baisse des masses volumiques n'évoluent pas de la même manière. La résistance baisse avec une tendance plus prononcée que les masses volumiques (pour le B20GC on a une baisse de 40 % contre une baisse en masse volumique de 7,2 % uniquement).

A 15 % de substitution, on a eu une résistance de plus de 29 MPa, résistance assez bonne. Ce résultat est prometteur lorsque l'on sait qu'en Algérie, pour la réalisation des bétons dans les bâtiments, la résistance souhaitée est souvent de cet ordre de grandeur, d'autant plus que ces bétons sont plus légers que le béton de référence.

Par ailleurs, Par les résultats de flexion par poinçonnement on a constaté que la résistance à la rupture croît légèrement avec l'augmentation du pourcentage en GC dans les bétons. On a

Conclusion Générale

également constaté que plus l'épaisseur des dalles est grande plus la résistance à la rupture par poinçonnement est importante.

L'exploitation des courbes de chargement en flexion (kN) en fonction de la déformation (mm) nous a permis de constater que les pentes de ces courbes sont inversement proportionnelles au taux de substitution des GN par des GC dans le béton. Ce résultat a été constaté sur les dalles des différentes épaisseurs (2, 3 et 4) cm.

Les résultats obtenus sont prometteurs, notamment si on utilise ce type de granulats à des % inférieurs à 20 %. Cette étude reste restreinte, en perspective, il sera donc intéressant de trouver des possibilités d'associer à ces études expérimentales un aspect modélisation pour d'éventuelles applications structurelles et d'explorer les autres propriétés que peuvent procurer ces granulats aux bétons comme leur apport en terme d'isolation phonique, thermique, etc.

Références bibliographiques

- [1] NEVILLE, A. « *Propriétés des bétons* », Edition Eyrolles, 2000.
- [2] REGOURD, M. « *L'hydratation du ciment portland* », Le béton hydraulique' P.E.N.P.Ch 1982.
- [3] AFN 196-NF EN 196-1, « *Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques* », AFNOR Avril 2006.
- [4] COLLECTION TECHNIQUE CIM-BETON, « *les bétons- constituants, mécanismes, propriétés à l'état frais et durci, comportement mécanique et dimensionnel* » chapitre 3 ; Tom II, Ecole française du béton, pp : 13_14
- [5] DREUX G; FESTA J. « *Nouveau guide du béton et de ses constituants*» 8ème édition Eyrolles 2002.
- [6] DUPAIN R; SAINT ARROMAN J.C. « *granulats, sols, ciments et bétons* », 4^{ème} édition Casteilla 2009.
- [7] F. DE LARRARD. « *Structures granulaires et formulation des bétons* », édition Laboratoire central des ponts et chaussées, 2000.
- [8] F. DE LARRARD, C. FERRARIS. « *Béton frais remanié I et II et III* », BLPC. n° 213 pp 73-89, Jav-fév 1998.
- [9] HADDAD O, « *Contribution au développement d'outils d'aide à la formulation des BAP relatifs à la rhéologie à l'état frais et à la résistance au jeune âge* », thèse de doctorat, France, 2007.
- [10] AITCIN P. C; S. Jiang, B. Kim, P. Nkinamubanzi, N. Pétrou, « *l'interaction ciment /superplastifiant cas des polysulfonates* », B.L.P.C n°233 juillet - août 2001 pp 87-89.
- [11] ACKER P.« *Prise et durcissement des bétons : Les effets thermomécaniques* », Techniques de l'ingénieur. Vol. 3, n° C2235, 1988.

Références bibliographiques

- [12] KARA A.R. « *Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires* », thèse de Doctorat, U Cergy Pontoise, décembre 2002.
- [13] BARON J; OLLIVIER J.P. « *Les bétons - bases et données pour leur formulation*», Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Editions Eyrolles, Paris, 1997
- [14] G. DREUX, J. FESTA, « *Nouveau guide du béton et de ses constituants*» 8^o édition Eyrolles 1998.
- [15] BARON J. ET OLIVIER J. P. « *La durabilité des bétons*», presses de l'école nationale des ponts et chaussées », 1992
- [16] OUAMER.A «*Les bétons à base de GBD résistances et vitesses à ultrason et porosités ouvertes*», mémoire master académique, UMMTO, GC 2014.
- [17] A.KHELIDJ, V.BROGHEL-BOUNY, G. BASTIAN, J. GODIN, G.VILLAIN, « *Transfert dans les bétons et durabilité des ouvrages* », Laboratoire Centrale des ponts et chaussées.
- [18] GARGOURI A; ELLOUZE S; MAKNI M. «Amélioration des caractéristiques mécaniques d'un béton de Caoutchouc» INVACO2 : Séminaire International, INNOVATION & VALORISATION EN GENIE CIVIL & MATERIAUX DE CONSTRUCTION N°:20-063, Sfax, Tunisie
- [19] BENZAOUK A; DOUZANE O;Langlet T;Mezreb K;Labbani F;Roucoult J.M;«*Effet des granulats de caoutchouc sur les propriétés d'un mortier de ciment*», Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux.
- [20] HACID.L. « *Etude des bétons à base de GC Résistance & Rhéologie & Chaleur d'hydratation*», Mémoire de Master Académique 2015.
- [21] TIGHILT FERHAT D.«*Contribution à l'étude des déformations et de la fatigue des bétons à base de granulats en Caoutchouc*», UMMTO, Mémoire de Master Académique 2016.

Références bibliographiques

- [22] FALII. « *Propriétés mécaniques des bétons à base de granulats en caoutchouc* », UMMTO, Mémoire de Master Académique 2016.
- [23] DJELLAD Z.R. « *Contribution à l'étude des dalles renforcées par des composites: Analyse expérimentale et modélisation* » UMMTO, mémoire de magister en génie civil 2015.
- [24] ROCHDI El Houssaini « *Contribution à l'analyse du comportement mécanique de dalles en béton arme renforcées par matériaux composites* »; université Lyon 1, thèse de doctorat 2004 -232p.
- [25] GUANDALINI. S ; « *Poinçonnement symétrique des dalles en béton armé; école polytechnique fédérale de Lausanne* »; France; 2005.
- [26] GUIDOTTI Roberto « *Poinçonnement des planchers dalles avec colonnes superposées fortement sollicité* »; ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE N°4812, thèse de doctorat; 2010 –226p
- [27] DULUDE Christian « *Poinçonnement des dalles bidirectionnelles en béton armé d'armature de polymères renforcés de fibres de verre* »; université de Sherbrooke, mémoire de maitrise en sciences appliquées 2011 –142p
- [28] TASSINARI Luca « *Poinçonnement non symétrique des dalles en béton armé avec armature de poinçonnement* »; ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE N°5030, thèse de doctorat; 2011–197p.
- [29] CLEMENT Thibault « *Influence de la précontrainte sur la résistance au poinçonnement des dalles en béton armé* » ; ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE N°5516, thèse de doctorat; 2012 –250p.
- [30] KRUGER Gaston « *Résistance au poinçonnement excentré des plancher dalles* »; ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE N°2064, thèse de doctorat; 1999–191p.

Annexe 1 : Différents essais de laboratoire

1. ECHANTILLONNAGE (NF P 18- 553)

1.1. But et principe de l'échantillonnage

Les essais effectués en laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites de matériaux, ceux-ci devant permettre de mesurer des paramètres caractéristiques de l'ensemble du matériau dans lequel on a fait le prélèvement. Il faut que l'échantillon utilisé au laboratoire soit représentatif de l'ensemble.

En général le prélèvement d'échantillons se fait en deux temps:

- a) Prélèvement sur le chantier, la carrière ou l'usine d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour l'essai.
- b) Au laboratoire, prélèvement de la quantité nécessaire à l'essai et qui soit également représentative de l'échantillon de départ.

Lorsqu'il n'est pas possible de prendre tout le tas et de le réduire, on procède à un prélèvement local.

Prélèvement sur tas normaux (sables et graviers)

Lorsqu'un matériau granulaire est mis en stock, les gros éléments en tendance à rouler en bas du tas tandis que le haut est plus riche en éléments de faibles diamètres. On prélèvera donc les matériaux en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas de granulats, afin d'avoir un échantillon aussi représentatif que possible de l'ensemble. Ces diverses fractions seront mélangées avec soin.

- a) à la main, à l'aide d'une planche ou d'une plaque métallique.
- b) à la main, sur tas d'éléments grossiers (gravier concassé) par ratissage dans un récipient voir **figure1.1**
- c) au moyen d'une sonde, ouverture 4 ~ 6 cm, longueur 60 ~ 100 cm, extrémité taillée en sifflet.

Pour que l'échantillon soit représentatif de l'ensemble on prélèvera les matériaux en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas de granulat.

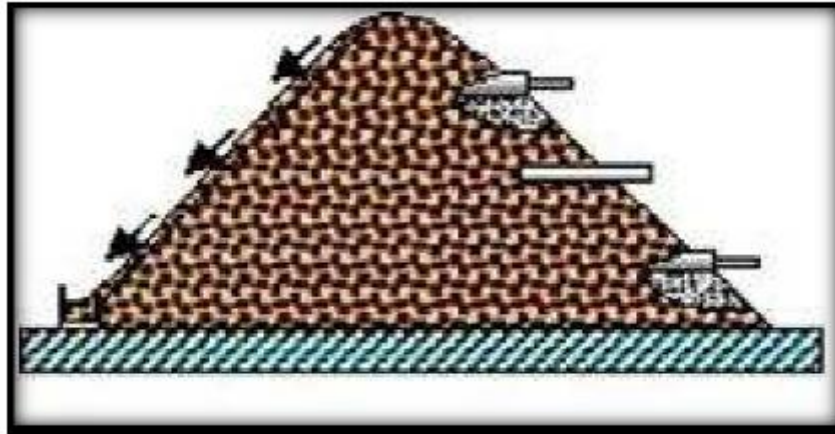


Figure I.1. Le matériau en stock.

b. Prélèvement en laboratoire (échantillonnage en laboratoire)

Le passage de l'échantillon total prélevé sur le tas à l'échantillon réduit, nécessaire à l'essai, peut se faire par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur. L'échantillon doit être séché à l'étuve à 105 °C s'il est exempt de minéraux argileux, ce qui est rare, ou à 60 °C dans le cas contraire.

1.2. Quartage

Il s'agit d'une méthode manuelle qui ne demande que peu de matériel (**figure1.2**): Verser l'échantillon en un cône régulier sur un plateau horizontal ; à l'aide d'une petite pelle, séparer le cône verticalement par son sommet en deux moitiés symétriques et écarter l'une des deux moitiés de quelques centimètres ; scinder ensuite les deux moitiés par un nouveau plan vertical perpendiculaire au premier, puis séparer l'échantillon de sorte que l'on obtienne quatre quarts de cône identiques ; Prélever et rassembler les quarts 1 et 3 (**figure1.2**) avec lesquels l'opération est répétée jusqu'à l'obtention de la quantité désirée.

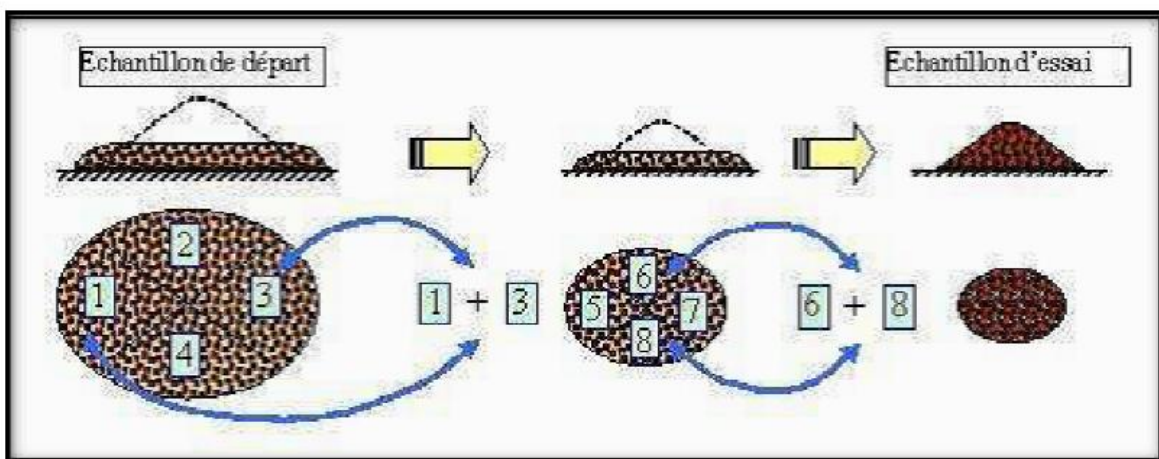


Figure I.2. Opération de quartage

1.3. Echantillonneur (quarter)

Un échantillonneur ou diviseur d'échantillons a comme but de diviser une certaine quantité de matière meuble (exp : un gravier, un sable, ou tout mélange de fragments résultant d'un concassage) en deux portions de poids égaux. L'une des portions peut à son tour être passée dans le quarter (et ainsi de suite), jusqu'à l'obtention de la quantité réduite désirée, qui sera toujours représentative de l'échantillon de départ.



Figure 1.3. Echantillonneur utilisé

Aspects pratiques

Les pièces typiques d'un système de quartage sont (**Figure 1.3**) :

- Le quarter lui-même, caractérisé par un dispositif de rainures (fentes) parallèles à directions de déversement alternativement opposées engendrant la séparation de l'échantillon. La largeur des rainures varie selon le modèle de quarter.
- Trois bacs de tailles adaptées au quarter permettant de verser l'échantillon (bac 1) et de récolter les deux moitiés de l'échantillon (bacs 2 et 3). Le procédé peut être résumé par la (**figure 1.4**) ci-dessous. Celle-ci permet de sélectionner une masse (m) à partir d'un prélèvement de masse $3m$.

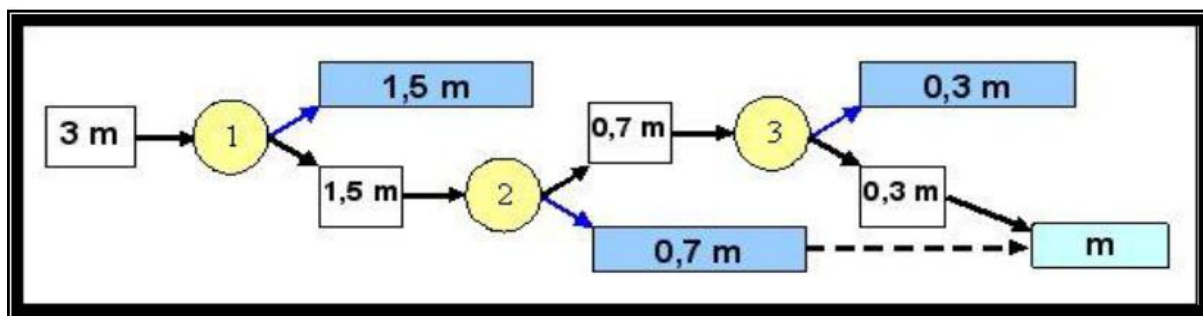


Figure 1.4. Schéma d'une opération de répartition des matériaux en utilisant de l'échantillonneur.

2. ANALYSE GRANULOMETRIQUE (EN 933-1 ET EN 933-2)

2.1. But de l'essai

L'analyse granulométrique permet de déterminer et d'observer les différents diamètres de grains qui constituent un granulat. Pour cela l'analyse consiste à séparer et classer à l'aide de tamis ces grains selon leur diamètre. Les grains ainsi isolés peuvent être pesés pour déterminer la proportion de chacun dans le granulat. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des fillers. A noter qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

2.2. Principe de l'essai

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis emboîtés les uns sur les autres un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes du haut vers le bas.

Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

Avant l'opération de tamisage, l'échantillon est lavé au dessus d'un tamis de 0,063 mm afin d'éliminer les fines et éviter ainsi l'agglomération des grains, ceci pouvant fausser les résultats de l'analyse. L'analyse granulométrique est conduite sur la fraction refusée par le tamis de 0,063 mm. La dimension nominale des tamis est donnée par l'ouverture de la maille, c'est-à-dire par la grandeur de l'ouverture carrée. Ces dimensions sont telles qu'elles se suivent dans une progression géométrique de raison $\sqrt[10]{10}$ (Voir tableau 1.1), depuis le tamis 0,063 mm jusqu'au tamis 125 mm.

Tableau I.1 : Dimensions nominales des tamis selon norme EN 933-2.

Tamis (mm)	0	0.063	0.08	0.1	0.125	0.160	0.2	0.25	0.315	0.4	0.5	0.63
Tamis (mm)	0.8	1	1.25	1.6	2	2.5	3.15	4	5	8	10	12.5
Tamis(mm)	14	16	20	25	31.5	40	50	80	100	125		

2.3. Conduite de l'essai

La prise d'essai est séchée à (110 ± 5) °C jusqu'à masse constante puis pesée (**masse M1**). On réalise ensuite un tamisage par lavage afin de séparer les éléments de dimension inférieure à 0,063 mm du reste de l'échantillon. Le lavage est poursuivi jusqu'à ce que l'eau passant au travers du tamis de 0,063 mm soit claire. L'échantillon ainsi préparé est alors séché à (110 ± 5) °C. Après refroidissement il est pesé jusqu'à masse constante (**masse M2**). Le tamisage à sec peut alors être réalisé.

Dimensions des tamis utilisés

En fonction des dimensions d/D des matériaux analysés, on utilisera la série de tamis préconisée par la norme EN 933-2 (**tableau 1.1**)



Figure.1.5. Colonne de tamis utilisée

Note : Pour des raisons du manque de certains tamis dans notre laboratoire, nous avons adapté notre série de tamis de façon à ce qu'elle soit la plus proche possible de celle définie par la norme (EN 933-1 et EN 933-2).

Préparation de l'échantillon

La quantité à utiliser doit répondre à différents impératifs qui sont contradictoires :

- il faut une quantité assez grande pour que l'échantillon soit représentatif,
- il faut une quantité assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable et que les tamis ne soient pas saturés et donc inopérants.

Dans la pratique, la masse utilisée sera telle que : $M \geq 0,2D$ avec :

M : masse de l'échantillon en kg ;

D : diamètre du plus gros granulat exprimé en mm.

Description de l'essai

Le matériau séché, de masse M2, est versé sur une série de tamis choisis de telle manière que la progression des ouvertures soit croissante du bas de la colonne vers le haut. En partie inférieure, on dispose un tamis de 0,063 mm surmontant un fond étanche afin de récupérer les éléments fins qui n'auraient pas été entraînés par le lavage initial. Un couvercle est également disposé en haut de la colonne afin d'interdire toute perte de matériau pendant le tamisage.

On appellera **tamisât** le poids de matériau passant à travers un tamis donné et **refus** le poids de matériau retenu par ce même tamis.

Le matériau étudié est versé en haut de la **colonne de tamis** et celle-ci est vibrée à l'aide de la **tamiseuse électrique**. Le temps de tamisage varie avec le type de machine utilisé, mais dépend également de la charge de matériau présente sur le tamis et de son ouverture. Un étalonnage de la machine est donc nécessaire.

3. ABSORPTION (NF P 18- 555)

3.1. But de la mesure

Certains matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne qui est préjudiciable, en particulier, à la résistance au gel des bétons. En effet, l'eau incluse dans le granulat provoque l'éclatement du béton lorsque celui-ci est soumis de manière prolongée à des basses températures.

3.2. Principe de la mesure

On détermine un coefficient d'absorption, qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon. Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20 °C. Le coefficient d'absorption (A_b) est défini par la relation :

$$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100$$

M_s = masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105 °C. M_a = masse de l'échantillon imbibé, surface sèche déterminée comme suit.

Détermination de la masse imbibée à surface sèche cas des sables

Après imbibition dans l'eau pendant 24 heures, étaler l'échantillon sur une surface plane non absorbante et le soumettre à un flux d'air chaud, tout en le remuant afin que la surface externe des grains sèche. Ce séchage doit être effectué de manière douce afin de ne pas éliminer l'eau qui pourrait être piégée à l'intérieur du granulat. Veiller également à ne pas perdre de grains de sable au cours de l'opération. Les grains sont alors libres de toutes forces d'attraction capillaire.



Figure I.6. Différents étapes de détermination de l'absorption du sable

On peut vérifier que cet état a été atteint en plaçant le matériau dans un moule tronconique, posé sur une surface plane non absorbante, et en le compactant légèrement. On vérifie que celui-ci s'écoule en démoulant (figure I.6)

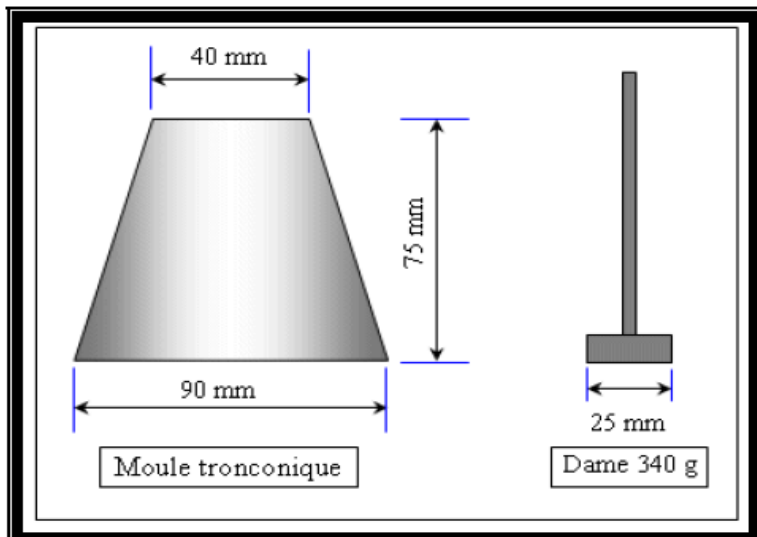


Figure I.7. Moule et dame pour coefficient d'absorption des graviers.

Détermination de la masse imbibée à surface sèche cas des gravillons (NF p 18 554)

Après imbibition, l'échantillon est soigneusement épongé avec un tissu absorbant, les gros éléments étant essuyés individuellement. Il est ensuite pesé.



Figure 1.8 étapes de déterminations de l'absorption des granulats cas de graviers

Annexe 2 Résultats des différents essais de caractérisation*Les différents résultats expérimental des granulats utilisé dans notre étude*

Dans cette annexe nous avons représenté les différents résultats expérimentaux des granulats utilisés dans notre étude

Analyse granulométrique

Matériau : Sable 00/3				
Nature	Gravier semi concassé 00/03			
Provenance	Gravier de Tizi ouzou			
Date d'analyse	02/04/2015			
Masse initial a l'état sec en (g)	M1 =	2000 g		
Masse après le tamisage	M2 =	1995,5 g		
Pert des granulats en (g)	M1 - M2 =	4,5 g		
	P =	4,5 g		
Tamis en (mm)	Refus en (g)	Refus C en (g)	Refus C en (%)	Tamisat C en (%)
5	0	0	0	100
4	2,5	2,5	0,125	99,87
3,15	117,5	120	6	94
2,5	215,5	335,5	16,77	83,23
1,25	642,5	978	48,9	51,1
0,63	271,5	1249,5	62,47	37,53
0,315	353	1602,5	80,125	19,87
0,16	206	1808,5	90,425	9,57
0,08	115,5	1924	96,2	3,8
Fond	71,5	1995,5	99,77	0,23

Annexe2 Résultats des caractérisations des granulats

<i>Matériau : Granulats en caoutchoucs</i>				
Nature	Granulats 03/08			
Provenance	Gravier de Tizi-Ouzou			
Date d'analyse	26/03/2018			
Masse initiale à l'état sec en (g)	M1 =	1500g		
Masse après tamisage (g)	M2 =	1480g		
Pertes des granulats en (g)	M1 - M2	20g		
	P =	20g		
Tamis en (mm)	Refus en (g)	Refus C en (g)	Refus C en (%)	Tamisat C en (%)
8	10	10	0.67	99.33
6,3	210	220	14.67	85.33
5	535	755	50.33	49.67
4	385	1140	76.00	24.00
3,15	265	1405	93.67	6.33
2,5	5	1410	94.00	6.00
0,08	70	1480	98.67	1.33
fond	0	1480	98.67	1.33

<i>Matériau : Granulats en caoutchoucs</i>				
Nature	Granulats de recyclage			
Provenance	Pneus usagé			
Date d'analyse	02/04/2015			
Masse initial a l'état sec en (g)	M1 =	300 g		
Masse après le tamisage	M2 =	291 g		
Perte des granulats en (g)	M1 - M2 =	9 g		
	P =	9 g		
Tamis en (mm)	Refus en (g)	Refus C en (g)	Refus C en (%)	Tamisat C en (%)
4	0	0	0	100
3,15	249	249	83	17
2,5	42	291	97	3
Fond	0	291	97	3

2. Absorption des granulats utilisés

2.1 Sable

Les résultats de l'absorption du sable sont obtenus en passant par le procédé déjà expliqué dans l'annexe 1

Le calcul des différents caractéristiques des granulats a été réalisé en utilisant les formules suivantes :

$$\text{Masse volumique absolue : } \rho_a = \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$$

$$\text{Masse volumique réelle déterminée par séchage à l'étuve : } \rho_{rd} = \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

$$\text{Masse volumique saturée à surface sèche : } \rho_{ssd} = \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

Sable 00/3	
M ₁ (masse après séchage)	705,00
M ₂ (masse de récipient +verre+eau +sable)	4448,50
M ₃ (masse d'eau +récipient+verre)	4004,00
M ₄ (masse après passage à l'étuve)	699,50
M _v absolue	2,74
M _v réelle	2,68
M _v saturée à surface sèches	2,71
Absorption	0,79

2.2 Gravier 03/08

Le procédé de détermination de différente caractéristique des granulats du gravier 03/08 est représenté dans l'annexe 1

Gravier 03/08	
M ₁ (masse après séchage)	1217,00
M ₂ (masse de récipient +verre+eau)	4765,50
M ₃ (masse d'eau +récipient+verre)	4004,00
M ₄ (masse après passage à l'étuve)	1202,00
M _v absolue	2,73
M _v réelle	2,64
M _v saturée à surface sèches	2,67
Absorption	1,25

2.3 Granulats en caoutchoucs

La détermination des différentes caractéristiques des granulats en caoutchoucs a été difficile puisque ces deniers sont très légers, pour cela nous avons déterminé que la masse volumique.

Granulats en caoutchoucs	
M ₁ (masse après séchage)	200,00
M ₂ (masse de récipient +verre+eau +GC)	1154,50
M ₃ (masse d'eau +récipient+verre)	1147,50
M ₄ (masse après passage à l'étuve)	200,00
M _v absolue	2.728
M _v réelle	2.638
M _v saturée à surface sèches	/
Absorption	/

Annexe 3 Résultats de poinçonnement des dalles

Courbes force-déplacement des différentes dalles pour les trois épaisseurs (E2cm, E3cm, E4cm)

Figure a3. 1 Courbes force déplacement BR E2cm ; BR E3cm ; BR E4cm

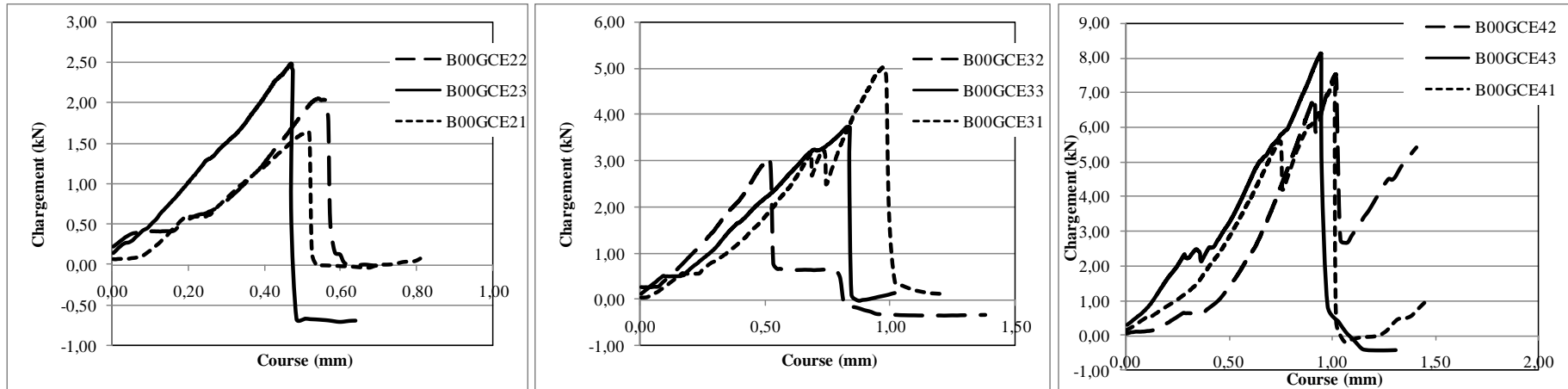


Figure a3. 2 Courbes force déplacement B5%GC E2cm ; E3cm ; 4cm

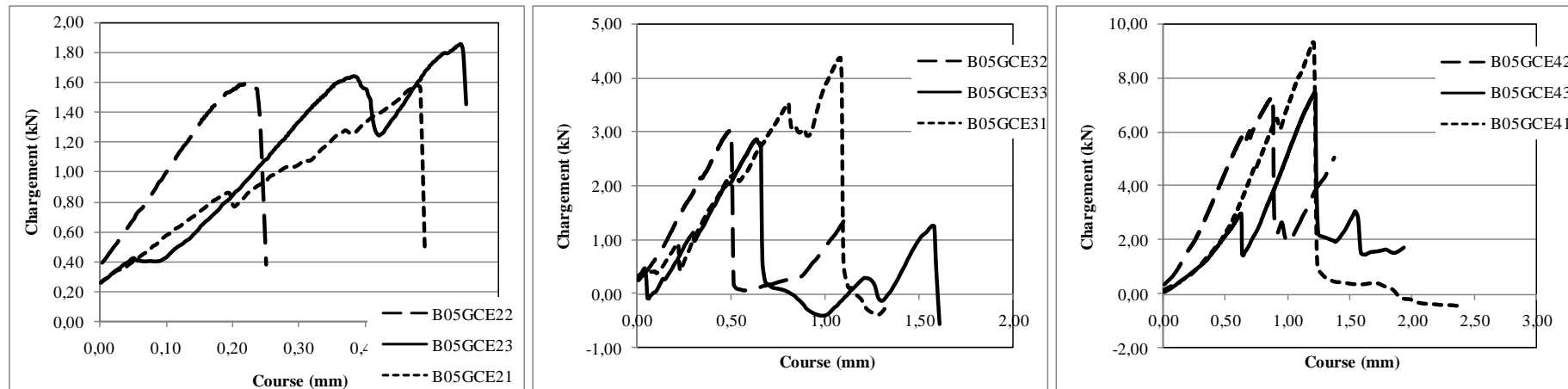


Figure a3. 3 Courbes force déplacement B10%GC E2cm ; E3cm ; E4cm

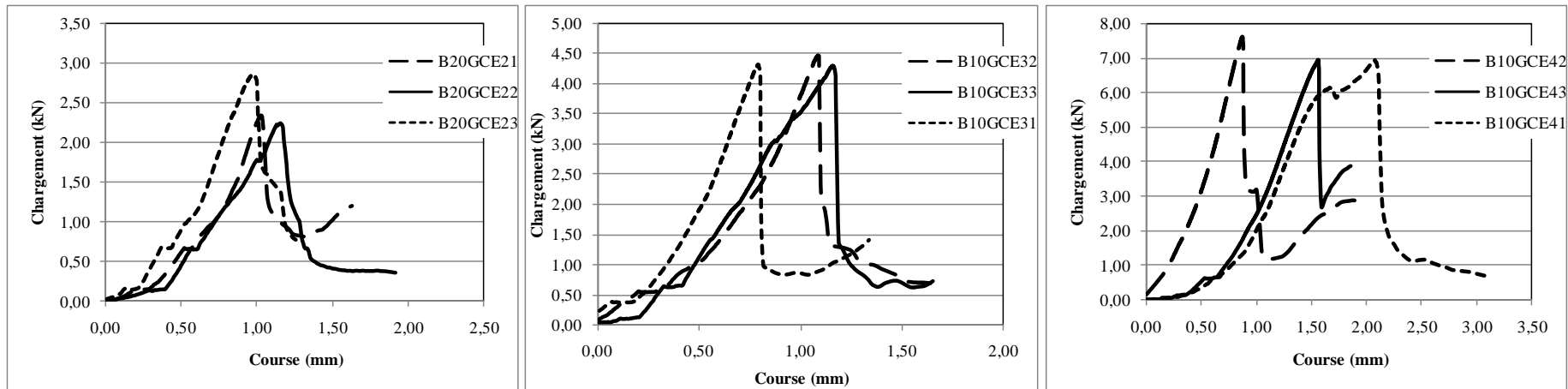


Figure a3. 4 Courbes force déplacement B15%GC E2cm ; E3cm ; E4cm

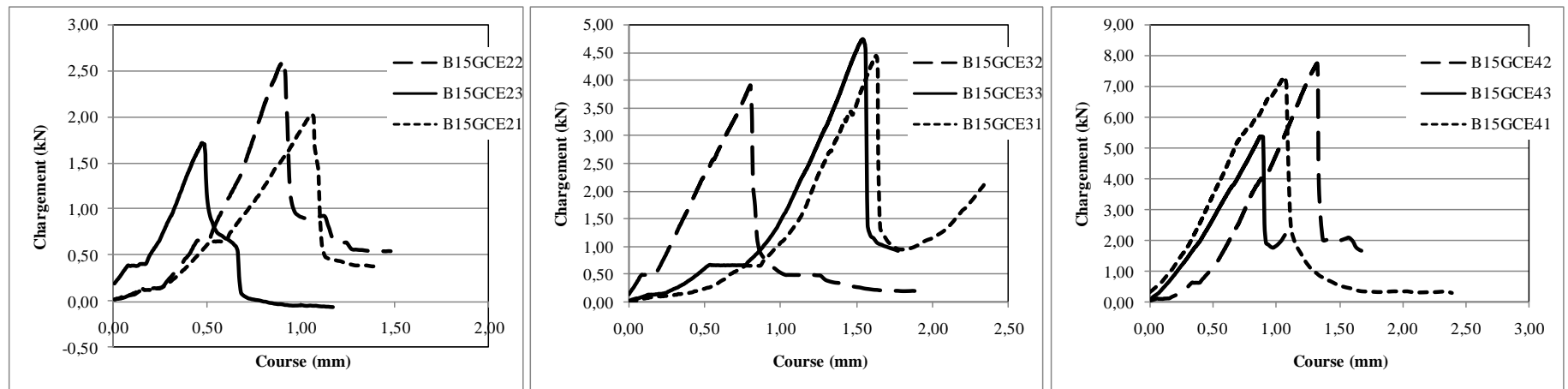
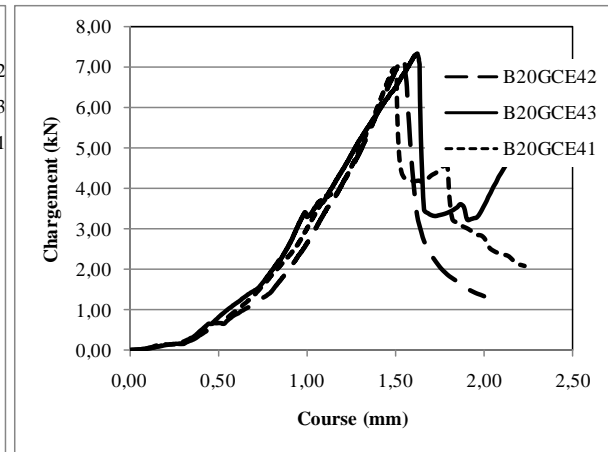
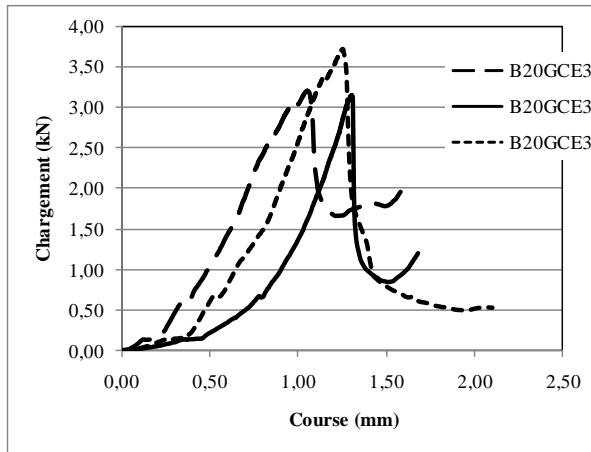
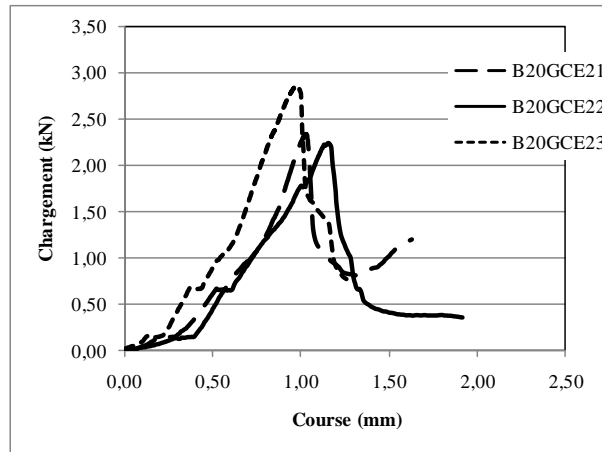


Figure a3. 5. Courbes force déplacement B20%GC E2cm ; E3cm ; E4cm



Masses des dalles avant et après écrasement données en kg

% GC	Epaisseur de dalle	N° de la dalle	Masse avant écrasement	Masse après écrasement
BR	4cm	1	2.053	2.050
		2	2.105	2.101
		3	2.127	2.126
	3cm	1	1.501	1.500
		2	1.470	1.468
		3	1.493	1.492
	2cm	1	1.009	1.008
		2	1.269	1.269
		3	1.094	1.093
5 % GC	4cm	1	2.055	2.052
		2	2.059	2.057
		3	2.021	2.018
	3cm	1	1.535	1.534
		2	1.536	1.533
		3	1.558	1.554
	2cm	1	1.077	1.074
		2	1.092	1.089
		3	1.131	1.128
10% GC	4cm	1	1.991	1.990
		2	2.049	2.047
		3	1.983	1.981
	3cm	1	1.423	1.420
		2	1.500	1.499
		3	1.450	1.440
	2cm	1	1.142	1.141
		2	1.099	1.098
		3	1.077	1.076
15% GC	4cm	1	1.994	1.993
		2	1.990	1.988
		3	1.980	1.979
	3cm	1	1.552	1.552
		2	1.450	1.446
		3	1.571	1.570
	2cm	1	1.057	1.056
		2	1.121	1.120
		3	1.108	1.107
20% GC	4cm	1	1.941	1.940
		2	1.908	1.907
		3	1.936	1.935
	3cm	1	1.417	1.416
		2	1.404	1.403
		3	1.323	1.323
	2cm	1	1.182	1.182
		2	1.040	1.039
		3	1.041	1.041

Mode de rupture des dalles :

Figure a3. 6. Béton de référence (2cm, 3cm, 4cm)

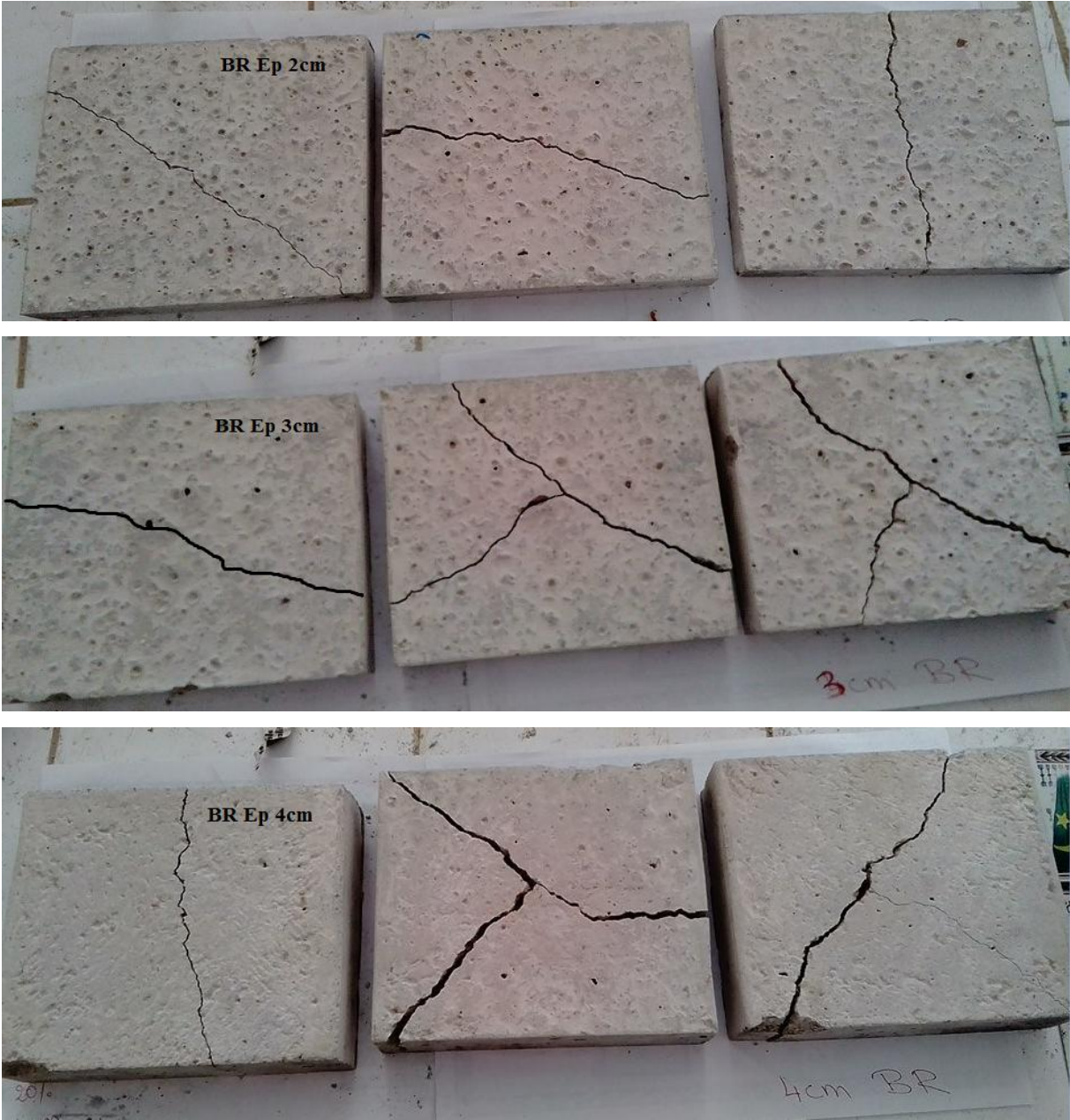


Figure a3. 7.B05GC (2cm, 3cm, 4cm)

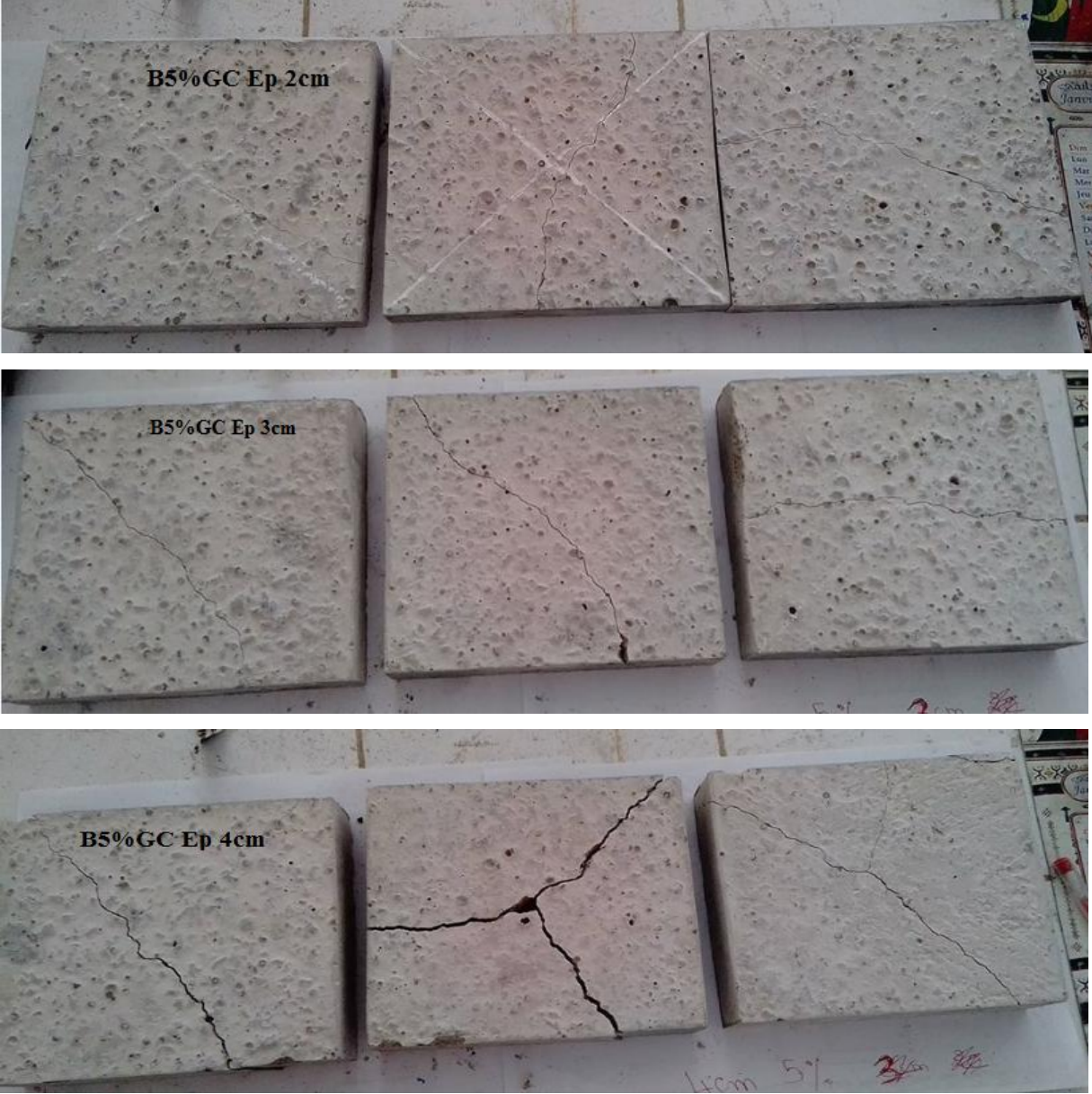


Figure a3. 8. B10GC (2cm, 3cm, 4cm)

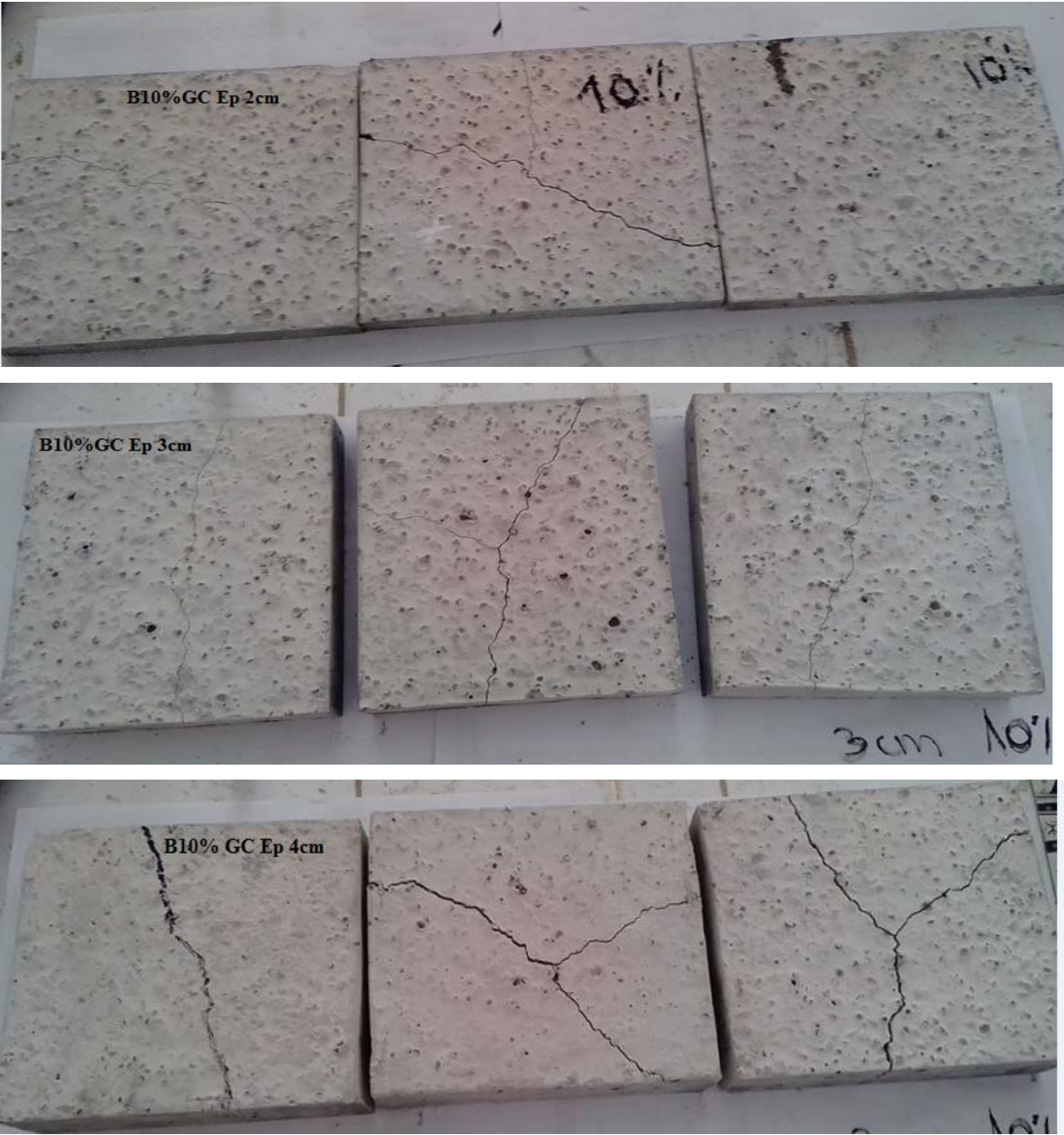


Figure a3. 9. B15GC (2cm, 3cm, 4cm)

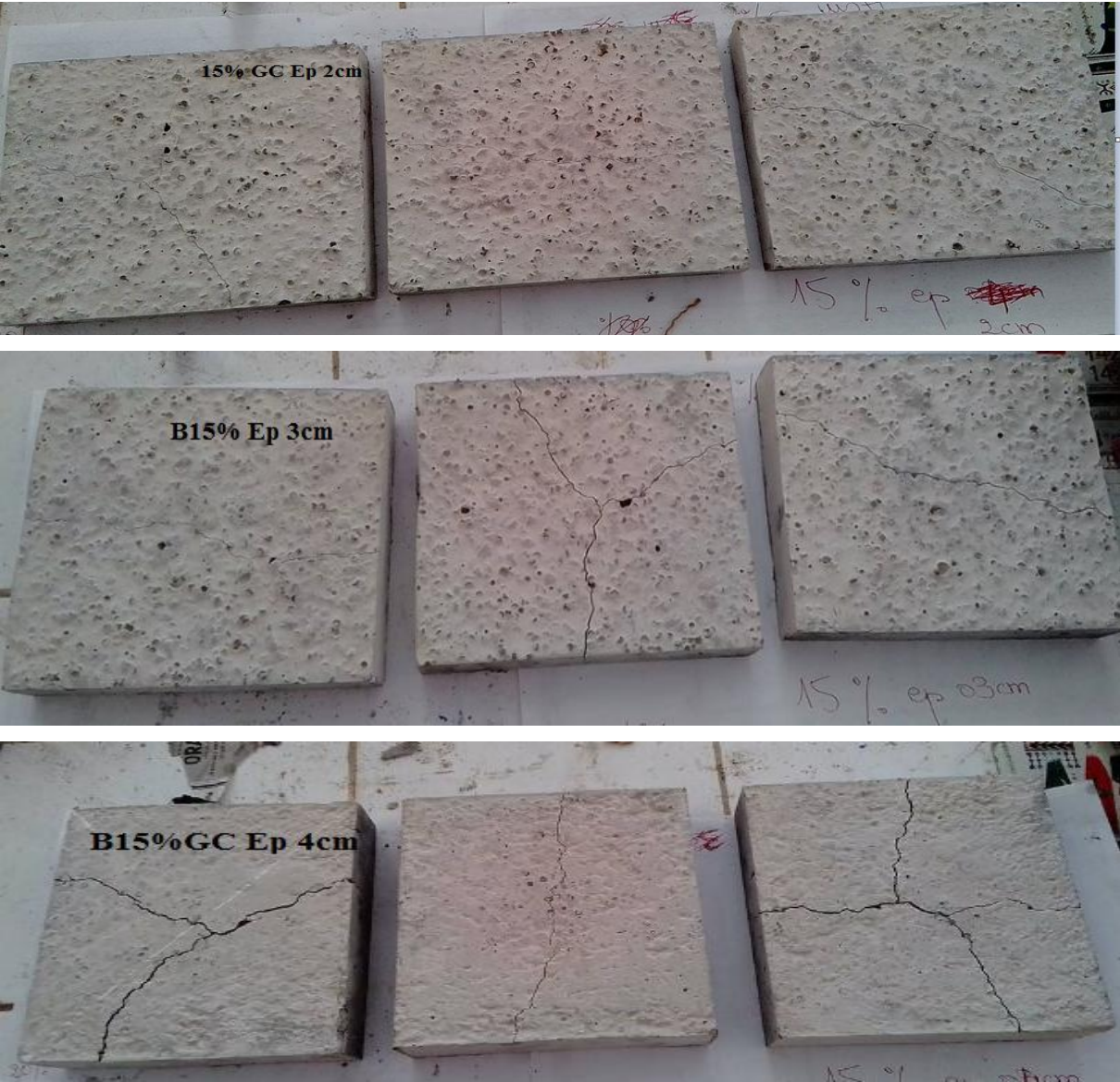


Figure a3. 10. B20GC (2cm, 3cm, 4cm)

