

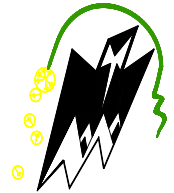
**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

*Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche*

*Université Mouloud Mammeri de Tizi ousou*

*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 et matériaux.*



### ***Propriétés mécaniques des bétons à base de granulats en caoutchouc***

*Proposé et dirigé par :*

**M<sup>me</sup> O. MALEK-HADDAD**

*Présenté par :*

**M<sup>lle</sup> FALI Imane**

**Année universitaire 2015/2016**

## *Remerciements*

*Au terme de ce travail, je remercie **DIEU** tout puissant pour m'avoir accordé le courage, la patience et la volonté qui ma permis d'arrivée a ce jour.*

*Je tiens à remercier ma famille pour leur soutien et leurs encouragements et surtout mes **parents** auxquels je dois tous mes succès et que je ne remercierai jamais assez.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à ma promotrice Mme **O.MALEK-HADDAD** pour tout le temps qu'elle m'a consacrée, et la confiance qu'elle m'a accordée en acceptant de m'encadrée. Son soutien constant, et ces précieux conseils, m'ont permis de mener à bien ce travail. Et que je ne la remercierai jamais assez. Que **DIEU** lui accorde santé et longue vie heureuse.*

*J'adresse mes sincères remerciements **aux membres du jury**, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail.*

*Mes remerciements vont aussi à toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

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

*Enfin, Je tiens à remercier mes amis pour leur soutien, aide et encouragement.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes chers parents, qui ont participé à ma réussite, par leurs amour, leurs soutien, et aussi leurs éducations, tous les sacrifices et ses précieux conseils, pour toute leurs assistance et leurs présences dans ma vie, à travers ce travail aussi modeste soit-il, je leurs expriment mes sentiments et mon éternelle gratitude ; que DIEU les gardent pour moi.*

*A mon frère Farouk dit Youcef et mes sœurs surtout ma petite sœur Ryma auxquels je souhaite une grande réussite dans leurs études et vie*

*A mes adorables nièces Racha et Melina que j'adore énormément et que je leurs souhaite une longue vie pleine de joie, bonheur et la réussite dans les études.*

## **Résumé :**

L'Homme a toujours cherché à développer et choisir les matériaux en fonction de ses besoins. Aujourd'hui aussi, dans le souci de la préservation de l'environnement il s'intéresse au recyclage, c'est le cas pour les pneus usagés qui présentent plusieurs potentialités. Ces pneus, une fois broyés deviennent des granulés à propriétés spécifiques que l'on peut utiliser dans le domaine du génie civil pour produire des bétons spéciaux. Par les résultats de cette étude, nous avons démontré que l'introduction de ces granulats en substitution à une quantité de granulats naturels engendre une baisse des propriétés mécaniques des nouveaux bétons. Les nouveaux bétons deviennent de plus en plus légers. Mais ces bétons présentent des comportements plus ductiles et des ruptures moins fragiles. Ces deux derniers points prouvent que ces granulats peuvent bien être utilisés pour des applications particulières du génie civil.

Au final, on peut dire que le recyclage semble être le meilleur compromis entre le coût, la qualité et la préservation de l'environnement.

Résumé .....	1
Sommaire .....	2
Liste des figures .....	8
Liste des tableaux .....	10
Introduction générale .....	12
<b>CHAPITRE 1 : DEFINITIONS ET BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>15</b>
Partie 1 : Généralités sur les bétons .....	15
I.1. INTRODUCTION .....	15
I.2. LES CONSTITUANTS D'UN BETON .....	16
I.2.1. Le ciment .....	16
I.2.2. Les granulats .....	18
I.2.2.1. Provenance des granulats .....	18
I.2.2.2. Propriétés des granulats .....	19
I.2.3. Les adjuvants .....	23
I.2.3.1. Classes des adjuvants .....	24
I.2.3.2. Les adjuvants modifiant l'ouvrabilité du béton .....	24
I.2.3.3. Les adjuvants modifiant la prise et le durcissement .....	25
I.2.3.4. Les adjuvants modifiant certaines propriétés du béton .....	27
I.2.4. Les additions minérales .....	28
I.2.5. L'eau de gâchage du béton .....	28
I.3. CLASSIFICATION DES BETONS .....	29
I.3.1. Classification selon les masses volumiques .....	29
I.3.2. Classification selon la consistance (ouvrabilité) .....	29
I.3.3. Classification selon la résistance mécanique .....	30
I.3.4. Classification selon l'exposition et actions dues à l'environnement .....	31
I.4. COMPOSITION DES BETONS .....	31
I.4.1. Méthode de Bolomey .....	32
I.4.2. Méthode de Dreux Gorisse .....	32
I.4.2.1. Calcul du dosage en ciment .....	33
I.4.2.2. Calcul du dosage en eau .....	34
I.4.2.3. Calcul du dosage en granulats .....	34
Partie 2 : Déformations des bétons durcis .....	38

I.5. Introduction.....	38
I.5.1. Le béton armé.....	38
I.5.2 Propriétés de déformation des matériaux.....	39
I.5.2.1 Déformation.....	39
I.5.2.2 Déformation élastique linéaire et non linéaire.....	39
I.5.2.3 Déformation plastique.....	40
I.5.3 Comportement de résistance des bétons.....	41
I.5.3.1 Comportement en compression.....	41
I.5.3.2 Compression uni-axiale.....	41
I.5.3.3 Modélisation du comportement du béton en compression.....	42
I.5.3.4 Modèles réglementaires.....	43
I.5.3.5 Modèles non linéaires.....	45
I.6. Conclusion.....	47
Partie 3 : Contrôle de qualité des bétons & essais non destructifs.....	49
I.7. Contrôle de qualité des bétons.....	49
I.7.1. Contrôle de la qualité au laboratoire.....	49
I.7.2. Contrôle de la qualité Sur chantier.....	50
I.7.3. Contrôle de la qualité du béton dans le vieux bâti.....	50
I.8. Définition et but des essais non destructifs.....	51
I.9. Avantages et inconvénient des essais non destructifs.....	52
I.10. Domaine d'application des essais non destructifs.....	52
I.11-Les différents types d'essais non destructifs.....	52
I.11.1. Essais au scléromètre (norme P18-417).....	53
I.12-1-1-Généralités.....	54
I.12-1-2-Définition et description.....	54
I.12-1-3-But et principe d'utilisation.....	54
I.11.2. Essai à l'ultrason.....	55
I.11.2.1. But de l'essai.....	55
I.11.2.2. Description de l'appareil.....	56
I.11.2.3. Principe d'utilisation des ultrasons.....	58
I.11.2.4. Les différents types d'ondes.....	59
I.11.2.5. Facteurs ayant de l'influence sur la valeur de la vitesse du son.....	61
I.11.2.5. Avantages et inconvénients de cet appareil.....	62
I.12-conclusion.....	62

Partie 4 : Généralités sur le recyclage des déchets .....	64
I.13. INTRODUCTION.....	64
I.14. LES DECHETS DE LA CONSTRUCTION ET L'ENVIRONNEMENT.....	64
I.15. LES DECHETS ET LE RECYCLAGE.....	66
I.15.1. Définition d'un déchet.....	66
I.15.2. Différents type de déchets.....	66
I.15.2.1. Les déchets ménagers et assimilés .....	67
I.15.2.2. Les déchets des collectivités locales.....	67
I.15.2.3. Les déchets industriels .....	67
I.15.2.4. Les déchets inertes .....	67
I.15.2.5. Les déchets fermentescibles.....	68
I.15.2.6. Les déchets ultimes.....	68
I.15.2.7. Les déchets radioactifs.....	68
I.15.3. Gestion des déchets.....	68
I.15.3.1. Valorisation des déchets.....	69
I.15.3.2. Valorisation énergétique.....	69
I.15.3.3. Le stockage.....	69
I.16. DEVELOPPEMENT DU RECYCLAGE.....	69
I.16.1. Pourquoi le recyclage ?.....	70
I.16.2. Les déchets dans le secteur du bâtiment.....	71
I.16.3. Utilisation des matériaux recyclés dans les bétons .....	71
I.17. UTILISATION DES DECHETS DE CAOUTCHOUC DANS LE BATIMENT.....	72
I.17.1. Définition des déchets du caoutchouc.....	73
I.17.2. Les étapes du recyclage des déchets de caoutchouc .....	73
I.17.3. Exemples concrets d'utilisation des déchets de caoutchouc .....	74
I.17.4. Avantages d'utilisation du caoutchouc recyclé dans les bétons.....	75
I.17.5. Quelques chiffres des déchets du caoutchouc dans le monde.....	76
I.17.6. Les déchets du caoutchouc en Algérie.....	76

## **CHAPITRE II : Composition des bétons & Procédures expérimentales**

II.1 Introduction.....	79
II.2 Cahier des charges pour la formulation des bétons .....	79
II.3 Matériaux et formulation .....	80

II.3.1 Matériaux utilisés .....	80
II.3.1.1 Ciment .....	80
II.3.1.2 Granulats .....	80
II.3.2 Eau de gâchage .....	81
II.3.2. Caractérisation des granulats .....	81
II.3.2.1 Echantillonnage .....	81
II.3.2.2 Analyse granulométrique .....	82
II.3.2.3 Module de finesse du sable .....	83
II.3.2.4. Absorption et masses volumiques des granulats .....	83
II.4 Formulation des bétons a étudié .....	84
II.4.1 Application des conditions du cahier des charges .....	84
II.4.2 Nomenclature des bétons à étudier .....	85
II.4.3 Compositions des bétons à tester .....	85
II.5 Procédures expérimentales et condions de conservation .....	86
II.5.1 Fabrication des bétons et confection des éprouvettes .....	86
II.5.2 Caractérisation des éprouvettes de bétons à 28 jours .....	87
II.5.2.1 Essai à l’ultrason .....	87
II.5.2.2 Mesure des déformations des éprouvettes .....	89
II.5.2.3 Mesure des déformations à 28 jours .....	89
II.5.2.4 Résistance à la compression à 28 jours .....	91

### **CHAPITRE III : Résultats & Interprétations**

III.1. INTRODUCTION .....	93
Partie 1 : Résultats de résistances mécaniques à la compression .....	94
III.2. RESULTATS DES ESSAIS MENES SUR LES BETONS .....	94
III.2.1. Résultats des masses volumiques des bétons durcis .....	94
III.2.2. Résultats des résistances à 28 jours .....	96
III.2.3. Corrélation entre la Rc à 28 jours et le pourcentage en CG .....	97
Partie 2 : Résultats des vitesses à l’Ultrason .....	98
III.3. RESULTATS DES ESSAIS MENES SUR LES BETONS .....	98
III.3.1 Calcul de la vitesse de propagation et exploitation .....	98
III.3.2 Corrélation des vitesses de propagation des ondes ultrasoniques .....	100
Partie 3 : Résultats des déformations .....	101

III.4. INTRODUCTION.....	101
III.5 Résultats des essais de déformations longitudinales.....	101
III.5.1. Exemples de courbes de déplacements obtenus.....	101
III.5.2. Interprétation des courbes.....	102
III.5.3. méthode de calcul des caractéristiques des courbes Forces-Déplacements.....	103
III.5.3.1 Calcul du module de déplacement.....	103
III.5.3.2 Calcul du déplacement ductile (DI).....	104
III.5.4. Caractéristiques des résultats de forces-déplacement des différents bétons.....	104
III.5.4.1 module de déplacement des bétons.....	104
III.5.4.2 déplacement ductile des bétons.....	105
III.5.5. Etat de dégradation des éprouvettes.....	106
III.6 Conclusion.....	107
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>109</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>111</b>
Annexe 1 : Différents essais de laboratoire.....	114
Annexe 2 : Résultats des caractérisations des granulats.....	122



## Liste des Figures

Figure I.1. Exemples de granulats d'origines différentes.....	18
Figure I.2. Illustration des granulats expansés : a, b l'argile ; c schiste.....	20
Figure I.3. Éventail de grosseurs de granulats utilisés dans le béton.....	21
Figure I.4. Défloculation du ciment par l'action dispersante des superplastifiants.....	24
Figure I.5. Courbes d'évolution du seuil de cisaillement (début de prise) en fonction de la présence d'un accélérateur ou d'un retardateur de prise .....	26
Figure I.6. Courbes illustratives de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams.....	30
Figure I.7. Dosage en ciment en fonction de rapport E/C et de l'affaissement au cône d'Abrams .....	34
Figure I.8. Fuseaux préférentiels pour la granularité des sables pour béton selon la méthode de Dreux Gorisse.....	35
Figure I.9. Courbe du mélange optimum selon la méthode de Dreux Gorisse.....	36
Figure I.10: Diagramme de déformation élastique non linéaire.....	40
Figure I.11: diagramme de déformation de type élastique linéaire.....	40
Figure I.12: diagramme de déformation plastique.....	40
Figure I.13: comportement du béton en compression.....	41
Figure I.14: Comportement cyclique du béton en compression simple.....	42
Figure I.15 : Loi parabole-Rectangle du béton en compression.....	43
Figure I.16: Diagramme parabole-rectangle du béton en compression.....	45
Figure I.17 : Diagramme non linéaire du béton en compression .....	46
Figure I.18 : Abaque déterminant la dureté du béton.....	54
Figure I.19 : Appareil d'auscultation sonore punditLab.....	56
Figure I.20 Types de propagation d'ondes.....	57
Figure I.15 Ondes longitudinales.....	60
Figure I.16 Ondes transversales.....	60
Figure I.17. Logo universel du recyclage des pneumatiques.....	73
Figure I.18 : Etapes du recyclage du caoutchouc.....	74
Figure I.19. Exemple d'utilisation des caoutchoucs recyclés.....	75
Figure I.20. Stock de pneus usagés en Tarn-et-Garonne en 2007 (France).....	76
Figure I.15. Chantier expérimental Pneusol à Bou-Smail.....	77
Figure II.1 Granulats naturels utilisés pour notre étude.....	81
Figure II-2 Granulats en caoutchoucs.....	81

Figure II.3 Courbe granulométriques du sable 0/3, gravier 3/8 et des GC.....	82
Figure II.4 confection des éprouvettes, protection, marquage et immersion dans l'eau.....	86
Figure II.5. : Appareil de test ultrasonique Pundit-Lab.....	88
Figure II.6.: calibrage de l'appareil, marquage des points d'essai.....	88
Figure II.7. Essai à ultrason transmission directe.....	89
Figure II.8. : Essai de déformation.....	90
Figure III.1. Masse volumique des bétons en fonction du pourcentage en GC.....	95
Figure III.2. Pourcentage de baisse des masses volumiques des bétons en fonction du % en GC.....	95
Figure III.3. Histogramme des résistances à la compression à 28 jours des bétons.....	96
Figure III.4. % de baisse de la Rc à 28 jours en fonction du % de baisse de la masse volumique.....	97
Figure III.5 : Histogramme des vitesses à l'ultrason au 28ème jour.....	99
Figure III.6 : Corrélation entre les résistances à la compression et les vitesses à l'ultrason (à 28 jours).....	100
Figure III.7 : Exemples de courbes de force (kN) fonction des déplacements (mm) enregistrés.....	102
Figure III.8 : superposition des courbes de force fonction des déplacements enregistrés.....	103
Figure III.9 : histogramme représentatif des modules de déplacements (kN/mm).....	104
Figure III.10 : histogramme représentatif des déplacements ductiles ( $\times 10^{-2}$ mm).....	105
Figures III.11 Etat d'endommagement des éprouvettes de bétons après rupture.....	106

## Liste des Tableaux

Tableau I.1. Liste des différents types de ciments courants normalisés.....	17
Tableau I.2. Casses de consistances des bétons ordinaires.....	30
Tableau I.3. Classes de résistances des bétons.....	31
Tableau I.4. Coefficients d'appréciation de la qualité KG des granulats.....	32
Tableau-I.5 : Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation des ondes .....	58
Tableau II.1. Masses volumiques et coefficients d'absorption des différents granulats .....	84
Tableau II.2. Nomenclature des compositions de bétons testés.....	85
Tableau II.3. Composition en kg pour 1m3 de béton des différentes formulations .....	85
Tableau III.1. Masses des éprouvettes et masses volumiques des bétons durcis .....	94
Tableau III.2. Résistance moyenne à la compression à 28 jours .....	96
Tableau III.3. Vitesse de propagation des ondes ultrasoniques dans les bétons.....	99
Tableau III.4 : Tableau récapitulatif des modules de déplacements.....	104
Tableau III.5 : Tableau récapitulatif des déplacements ductiles.....	105

# *Introduction générale*

## Introduction générale

Le béton est aujourd'hui le matériau de construction par excellence. Il est irremplaçable dans le domaine de la construction pour des raisons économiques et techniques. Le compromis trouvé entre la résistance mécanique, économique, esthétique et sa facilité de mise en œuvre offre à ce matériau la première place dans la construction au niveau mondial.

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 cette démarche, et trouver des ressources alternatives aux granulats de carrière et de rivière qui par leur extraction on nuit à la nature. L'emploi des granulats de recyclage semble être une solution qui répond à ces soucis.

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 à trois aspects des bétons :

Résistance à la compression à 28 jours sur des bétons;

Vitesse de propagation des ondes ultrasoniques dans les bétons composés de granulats en caoutchouc

Etude de déformations des bétons sous des sollicitations de compression pure.

Les essais sont menés sur plusieurs compositions 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 quatre parties

- Partie 1 : nous avons fait un rappel sur les généralités des bétons ainsi que les méthodes fondamentales de formulation des bétons.
- Partie 2 : Rappel sur les déformations des bétons durcis et les lois réglementaires de comportement des bétons
- Partie 3 : Contrôle de qualité des bétons et essais non destructifs
- Partie 4 : nous avons donné quelques généralités sur la gestion des déchets et l'intérêt de leur recyclage et particulièrement les déchets du caoutchouc issus des pneumatiques. Nous avons également donné quelques possibilités d'utilisation de ce matériau dans le secteur de la construction.

**Le deuxième chapitre** : dans ce chapitre nous avons :

- Présenté les résultats de caractérisation des matériaux utilisés pour la composition de nos bétons.
- Définis la méthode de composition des bétons et présenté les différentes procédures expérimentales utilisées pour cette étude.

**Troisième chapitre** : ce chapitre est composé de trois parties traitant chacune une partie de l'étude menée. Nous avons alors présenté les résultats et l'interprétation des résultats obtenus.

En dernier, nous avons récapitulés nos conclusions sur le travail menés et proposé des perspectives.

# *Définitions et Bibliographie*

## CHAPITRE 1 : *DEFINITIONS ET BIBLIOGRAPHIE*

### Partie 1 : *Généralités sur les bétons*

#### I.1. INTRODUCTION

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 des 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.

*Qu'est ce qu'un béton ?*

Le béton est un matériau composite constitué de granulats (Filler, sables, graviers...), 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/m<sup>3</sup> pour l'eau à 3 t/m<sup>3</sup> pour le ciment. Les dimensions de leurs grains s'échelonnent du  $\mu$ m pour les grains les plus fins du ciment à 30 mm pour les grains des gravillons.

Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés : à l'état frais, alors qu'il est plastique on peut le travailler ; à l'état durci, alors que sa forme ne peut plus être modifiée mais que ses propriétés continuent d'évoluer durant de nombreux mois.

Au cas par cas, en fonction de la disponibilité des matières premières, de la nature de l'ouvrage, des moyens de mise en œuvre, on rédige un cahier des charges qui englobera la liste des critères auxquels doit répondre le béton à fabriquer.

## 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), de silice (SiO<sub>2</sub>), d'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et d'oxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). La chaux nécessaire à la fabrication du ciment est extraite de la roche calcaire ; l'alumine, la silice et l'oxyde de fer sont extraits de l'argile. Le calcaire et l'argile contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O et MgO, l'oxyde ferrique.

#### *Les différents types de ciments courants*

Les ciments courants ont pour constituant principal le clinker (norme ENV. 197-1). Au clinker sont ajoutées, suivant la nature du ciment voulu, les additions minérales de différentes natures.

- Laitier granulé de haut fourneau (S)
- Pouzzolanes naturelles (Z)
- Cendres volantes (V et W)
- Fumées de silice (D)
- Calcaire (L)
- Schistes calcinés (T)
- Constituants secondaires.

Les ciments courants normalisés sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne, l'ancienne appellation est indiquée entre parenthèse (voir tableau suivant). Pour

chaque ciment sont indiqués les désignations propres et les pourcentages respectifs de leurs constituants.

**Tableau I.1. Liste des différents types de ciments courants normalisés [3].**

Désignations	Types de Ciment	Teneur en clinker	Teneur en % de l'un des constituants (laitier, cendres, fumées de silice, pouzzolanes, calcaire, schistes)	Teneur en constituants secondaires
CEM I(CPA)	Ciment portland	95 à 100%	/	0 à 5%
CEM II/A (CPJ)	Ciment portland compose	80 à 94%	de 6 à 20 % de l'un quelconque des constituants, sauf dans les cas où le constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10 % (*) ;	0 à 5%
CEM II/B (CPJ)		65 à 79%	de 21 à 35 % avec les mêmes restrictions que ci-dessus.	
CEM III/A (CHF) CEM III/B (CHF) CEM III/C (CLK)	Ciment de haut-fourneau	35 à 64 % 20 à 34 % 5 à 19 %	36 à 65 % de laitier de haut-fourneau 66 à 80 % de laitier de haut-fourneau 81 à 95 % de laitier de haut-fourneau	/
CEM IV/A (CPZ)	Ciment pouzzolanique	65 à 90 %	10 à 35 % de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à 10 %.	0 à 5 %
CEM IV/B (CPZ)		45 à 64 %	36 à 55 % comme si dessus	
CEM V/A (CLC)	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 %	18 à 30 % de laitier de haut-fourneau et 18 à 30 % de cendres siliceuses ou de pouzzolanes.	0 à 5 %
CEM V/A (CLC)		20 à 39 %	31 à 50 % de chacun des constituants comme ci-dessus	

Il existe d'autres ciments, spéciaux, décrits par d'autres normes, généralement utilisés pour des ouvrages spéciaux ou dans des conditions spéciales. Parmi d'autres, nous avons :

- Ciment prompt naturel (**CNP**).
- Ciment alumineux fondu (**CA**)
- Ciment de laitier à la chaux (**CLX**)
- Ciment à maçonner (**CM**)

### ***Classes de résistance des ciments courants***

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. Pour chaque type de ciment, trois classes de résistance sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours, ces classes sont notées, 32,5, 42,5 et 52,5.

Pour chaque classe de résistance normale, deux classes de résistance au jeune âge sont définies, une classe avec une résistance au jeune âge ordinaire et une classe avec une résistance au jeune âge élevée (indiquée par la lettre R).

### 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 1). La provenance des granulats peut être naturelle, de transformation (artificielle) et pour ces dernières années de recyclage. On distingue quatre catégories de granulats en fonction de leur provenance :

- 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.

#### I.2.2.1. Provenance des granulats

A-Granulats alluvionnaires : Les gisements les plus habituels sont les lits de rivières 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. On peut distinguer :

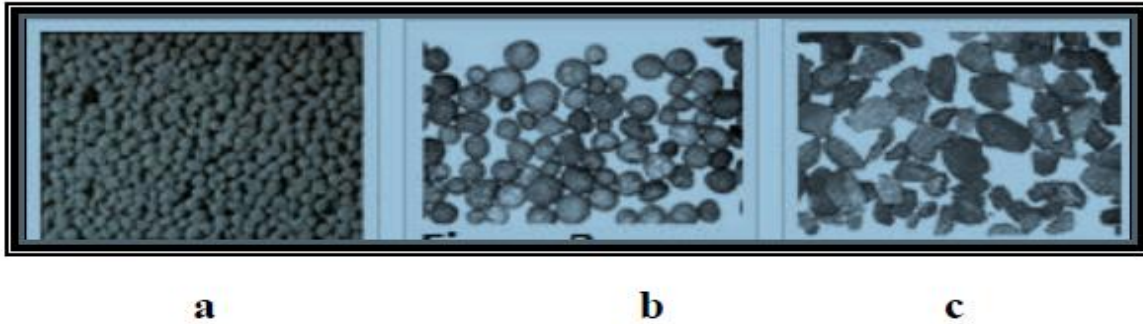
- Sables et graviers alluvionnaires fluviaux : siliceux ou silico-calcaires déposés par les cours d'eau pendant l'ère quaternaire. Ils sont exploités tout au long du réseau hydrographique.
  - Alluvions marines : exploitées entre 10 et 30 mètres de profondeur sur le plateau continental. Ces granulats ne sont immergés que depuis quelques milliers d'années par suite de la remontée du niveau marin après la dernière glaciation (époque actuelle). En réalité, il s'agit d'anciennes alluvions fluviales et littorales.
  - Couches de sables ou de sablons, roches sédimentaires non consolidées : déposées il y a des millions d'années.

**B- Granulats de roches massives** : Les gisements de roches massives (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. Une phase de pré-criblage est indispensable à l'obtention de granulats propres. Différentes phases de concassage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent de l'origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage... On peut distinguer :

- Roches sédimentaires consolidées telles que les calcaires ou les grès. On les exploite dans les bassins sédimentaires et dans les régions montagneuses.
- Roches métamorphiques dures telles que les quartzites ou les gneiss. Elles affleurent plus particulièrement dans les massifs montagneux anciens.
- Roches éruptives anciennes. Il s'agit de roches plutoniques à cristaux plus ou moins développés (granites, diorites, micro-diorites, gabbros...) ou de roches volcaniques (rhyolites...), exploitées dans les massifs montagneux anciens avec une répartition géographique analogue à celle des roches.
- Roches volcaniques récentes telles que le basalte, le trachyte ou l'andésite ; roches épanchées par le volcanisme récent du massif Central.

**C-Granulats de transformation** : 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 et b), le schiste expansé (Figure I- 2 c).



*Figure 1.2. Illustration des granulats expansés : a, b l'argile ; c 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 granulats plus gros, avec une grande porosité, donc plus léger.

D- Granulats de recyclage : L'emploi des déchets et des sous-produits industriels dans le secteur du bâtiment répond simultanément au souci d'économie des ressources naturelles en granulats. Dans la partie 2 de ce présent chapitre nous avons définis d'une manière plus approfondie le recyclage dans la construction et les différentes possibilités de granulats de recyclages et les inconvénients et les intérêts de chacun dans la construction.

### ***1.2.2.2. Propriétés des granulats***

Les propriétés des granulats sont intimement liées aux propriétés du massif rocheux d'origine, c.-à-d. 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 [4, 5].

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, 6, 7] :

- 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.

Dans une composition de béton, la dimension des granulats à utiliser passe des micromètres à quelques centimètres. La dimension maximale est variable, elle dépend du confinement des armatures et des dimensions des coffrages. On trie les granulats par dimension au moyen de tamis (mailles carrées) et de passoirs (trous circulaires). Les principales classes granulaires caractérisées par les dimensions extrêmes  $d$  et  $D$  des granulats sont (Norme XP P 18-540):

- Fillers 0/D  $\Rightarrow$  pour  $D < 2$  mm et ayant au moins 70 % de grains passant au tamis de 0,63 mm.
- Sablon 0/D  $\Rightarrow$  pour  $D < 1$  mm et avec moins de 70 % de grains passant au tamis de 0,63 mm
- Sable 0/D  $\Rightarrow$  Pour  $1 \text{ mm} < D \leq 6,3$  mm ;
- Gravies 0/D  $\Rightarrow$  Pour  $D > 6,3$  mm
- Gravillons d/D  $\Rightarrow$  Pour  $d \geq 1$  mm et  $D \leq 125$  mm
- Ballast d/D  $\Rightarrow$  Pour  $d \geq 25$  mm et  $D \leq 50$  mm



*Figure 1.3. Éventail de grosseurs de granulats utilisés dans le béton.*

A-Module de finesse : Pour confectionner un béton de qualité, on utilise au moins deux classes de granulats différentes. Les principales divisions comprennent le sable et le gros granulat, dont les éléments mesurent au moins 5 mm de diamètre.

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion.

- S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton ;
- Si le sable est grossier, la plasticité du béton sera réduite et sa mise en place sera difficile.

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 [4, 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 granulat 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.

Il existe plusieurs essais de laboratoire pour le contrôle de la propreté des granulats :

- Essai de la perte au feu
- Essai d'équivalent de sable « ES »
- Tests chimiques ; les composants chimiques à utiliser dépendent du produit recherché.

Exemple de l'essai au bleu de méthylène qui permet de déterminer la teneur en argile du Sable : les fines d'origine argileuse retiennent le bleu de méthylène.

Les fines selon la norme NF P 18-540 désignent les particules passant au tamis de 0,08 mm. Les fines peuvent provenir du sable, des gravillons et d'additifs divers. Dans le sable et gravillon concassé, leur pourcentage peut être élevé. Un excès de fines nécessite un dosage en eau plus élevé, mais un manque de fines conduit à des bétons peu maniables et de faible compacité. Leur nocivité est grande lorsqu'elles contiennent des matières argileuses, c'est pourquoi il faut les tester au bleu de méthylène.

D- Propriétés mécaniques des granulats : En plus des propriétés de résistance à la compression, cisaillement, traction..., les granulats sont testés vis-à-vis de la résistance à l'usure et au choc donc à l'écrasement. Pour certains usages les granulats peuvent également être caractérisés vis-à-vis de l'action du gel dégel et des températures d'usages très élevées.

### **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 [8,9]. 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, 8]. Dans leur ensemble, les adjuvants ne doivent pas contenir de chlore.

### ***1.2.3.1. Classes des adjuvants***

Selon les objectifs visés, on introduit dans le béton des adjuvants de nature et de fonction différente. Dans cette section on présente les différentes classes d'adjuvants [9].

### ***1.2.3.2. Les adjuvants modifiant l'ouvrabilité du béton***

Ces adjuvants modifient le comportement rhéologique des bétons, à l'état frais, avant le début de prise. Ils abaissent le seuil de cisaillement de la pâte tout en modifiant la viscosité.

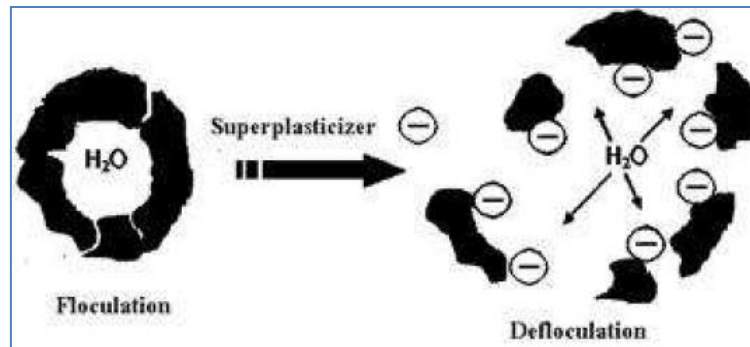
Ce sont en général des produits de synthèse, ils sont à base de lignosulfonates, de sels d'acides organiques, de mélamine sulfonate, de naphthalène sulfonate et dérivés de mélamine ou naphthalène.

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. La viscosité peut être caractérisée par le temps d'écoulement dans un entonnoir : le temps d'écoulement baisse avec l'augmentation de l'adjuvant, cela se traduit par une viscosité faible.

### ***Mode d'action***

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. L'introduction du plastifiant a pour rôle d'empêcher ce phénomène de floculation.

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-4**). L'eau initialement piégée entre les floculats est à nouveau disponible pour fluidifier le béton [8].



*Figure I.4. Défloculation du ciment par l'action dispersante des superplastifiants.*

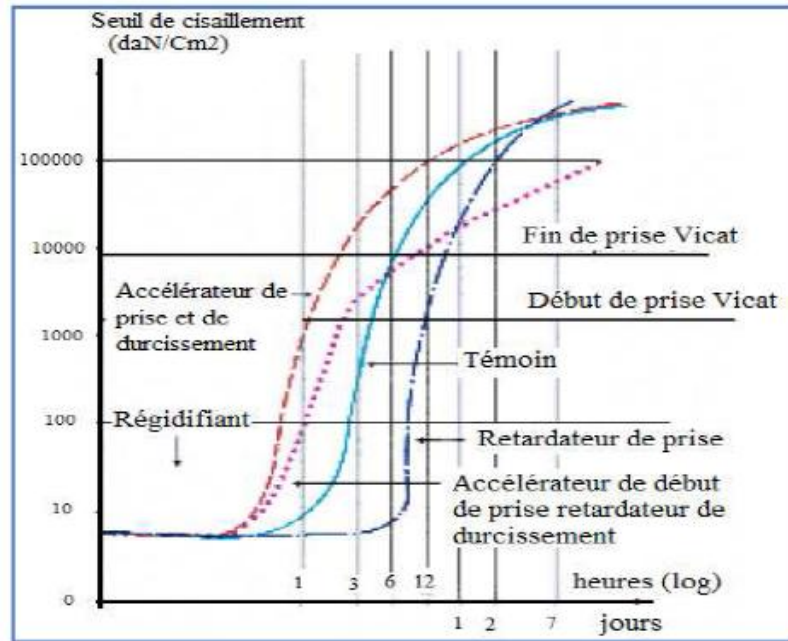
Ce processus permet:

- 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.

### ***1.2.3.3. 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 1.5. Courbes d'évolution du seuil de cisaillement (début de prise) en fonction de la présence d'un accélérateur ou d'un retardateur de prise [10].*

### Les accélérateurs de prise et les accélérateurs de durcissement

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. L'accélérateur de durcissement a pour fonction principale d'accélérer le développement des résistances initiales des bétons.

Les constituants de ces adjuvants sont généralement des dérivés de la soude, de la potasse ou de l'ammoniaque.

Ils sont à recommander pour les bétonnages par temps froid, les décoffrages rapides, les scellements, les travaux en galerie, les travaux sous l'eau, etc.

Il est à noter qu'un béton fortement accéléré, au moyen d'adjuvants, risque d'avoir une résistance mécanique finale légèrement diminuée.

### Les retardateurs de prise

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. Le retardateur de durcissement a pour fonction de retarder le développement des résistances initiales des bétons. Ils sont à base de lignosulfonates, d'hydrates de carbone ou d'oxydes de zinc ou de plomb. Par rapport au témoin, l'augmentation du temps de début de prise est comprise entre une à deux heures. A l'état durci, la résistance du béton est en général augmentée par rapport à celle du témoin.

Les retardateurs de prise sont particulièrement recommandés pour les bétonnages par temps chaud et les bétonnages en grande masse. Ils permettent aussi de faciliter les reprises de bétonnage.

#### ***1.2.3.4. Les adjuvants modifiant certaines propriétés du béton***

##### **Les entraîneurs d'air**

Le béton durci contient naturellement une certaine quantité d'air provenant, soit d'un entraînement lors du malaxage, soit de l'évaporation de l'eau de gâchage non fixée. Cet air (2 % du volume) est réparti de manière aléatoire. En revanche, l'entraîneur d'air permet d'en entraîner un volume supérieur et de le répartir uniformément.

L'objectif d'introduire l'entraîneur d'air est d'améliorer la résistance au gel du béton durci, ainsi que sa résistance aux sels de déverglaçage. Les microbulles qui coupent les réseaux des capillaires limitent le développement des contraintes dues au gel de l'eau interstitielle. L'entraîneur d'air permet également d'améliorer la résistance aux incendies des bétons. En revanche, la présence de bulles peut entraîner une chute des résistances mécaniques.

##### **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.

L'efficacité dépend de la nature du ciment. Cependant, il est à préciser que ces adjuvants ne peuvent pas rendre étanche un mauvais béton, présentant des vides importants ou des hétérogénéités.

Ils sont utilisés pour les bétons d'ouvrages hydrauliques (canaux, murs de fondation, retenues d'eau...) et les mortiers d'étanchéité (chapes, joints de maçonnerie, galeries de tunnels).

##### **Les rétenteurs d'eau**

Ces produits ont pour 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 %.

La rhéologie du béton frais est améliorée même dans le cas d'une diminution du volume des fines. La diminution des résistances à 28 jours par rapport à un béton témoin est de l'ordre de 20 %.

Ces produits sont des agents colloïdaux ou des dérivés de la cellulose, ils sont utilisés pour l'exécution de mélanges retardés ou de mélanges à couler sous l'eau sans délavage.

### **Les produits de cure**

Les produits de cure ont pour fonction de 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.

Ces produits sont à base de résines, cires ou paraffines en émulsion aqueuse, de résines naturelles ou synthétiques, de cires ou de paraffines dissoutes dans un solvant pétrolier, de caoutchouc chloré. Ce sont des produits que l'on peut pulvériser sur le béton frais. Il se forme alors un film continu imperméable protecteur qu'il faut ensuite éliminer par brossage une fois le béton durci.

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 fine ou ultra fine de faibles dimensions, elles sont ajoutées en quantité de l'ordre de 10 % du poids de ciment. Les additions minérales sont soit actives ou inertes, elles améliorent notablement les performances et la durabilité du béton grâce à 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 [11].

Par ailleurs pour les poudres actives à caractère pouzzolanique (fumée de silice et cendres volantes...), ils permettent d'obtenir des bétons plus résistants et plus compacts et donc plus durables. Ces poudres sont souvent utilisées pour produire des bétons à hautes résistances et des bétons à ultra hautes performances.

### **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 peuvent être classés en plusieurs catégories de plusieurs manières.

#### I.3.1. Classification selon les masses volumiques

Il existe quatre grandes classes

- |                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| - Bétons très lourds              | $Mv > 2500 \text{ kg/m}^3$                             |
| - Bétons lourds (bétons courants) | $1800 \text{ kg/m}^3 \leq Mv \leq 2500 \text{ kg/m}^3$ |
| - Bétons légers                   | $500 \text{ kg/m}^3 \leq Mv < 1800 \text{ kg/m}^3$     |
| - Bétons très légers              | $Mv < 500 \text{ kg/m}^3$                              |

Les bétons courants sont les plus utilisés, aussi bien dans le bâtiment qu'en travaux publics. Ils présentent des masses volumiques de  $2500 \text{ kg/m}^3$  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  $6000 \text{ kg/m}^3$  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.3.2. 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.

De nombreux facteurs influent sur l'ouvrabilité du béton : type et dosage en ciment, forme des granulats, emploi des adjuvants et dosage en eau. Un excès d'eau se traduit par plusieurs inconvénients :

- Ressuage du béton : création à la surface d'une pièce en béton, d'un film d'eau, générateur de fissures après évaporation.
- Diminution de la compacité et donc de la résistance du béton.
- Porosité accrue du béton ;
- Augmentation des risques de ségrégation des constituants du béton ;
- Retrait du béton...

La grandeur qui caractérise l'ouvrabilité est la consistance ; sa mesure peut être effectuée facilement sur chantier avec la méthode du cône d'Abrams, qui est un essai d'affaissement d'un volume de béton de forme tronconique.

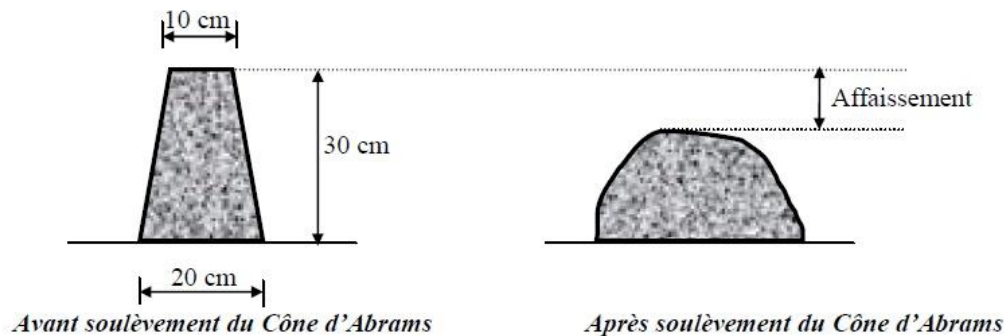


Figure I.6. Courbes illustratives de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams.

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

Tableau I.2. 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

Il existe plusieurs autres essais de laboratoire pour la caractérisation de la consistance du béton :

- Essai d'affaissement à la table à secousse ;
- Essai d'écoulement dans un cône d'écoulement ;
- Maniabilimètre à béton
- ...

### I.3.3. 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  $1800 \text{ kg/m}^3$  et  $2500 \text{ kg/m}^3$ , selon la norme EN 206-1 sont données dans le tableau suivant.

**Tableau I.3. Classes de résistances des bétons**

Classes de résistance	Rc minimale sur cylindre N/mm <sup>2</sup>	Rc minimale sur cube N/mm <sup>2</sup>
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
...	...	...
C100/115	100	115

Les valeurs données dans le tableau (I.3) sont mesurées sur des cylindres de 150 mm de diamètre sur 300 mm de hauteur et des cubes de 150 mm de côtés.

#### I.3.4. 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 [4, 6, 12]. 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 :

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

$R_{cb}$  : résistance à la compression du béton,  $R_{cc}$  : résistance caractéristique à la compression du ciment, C : quantité ciment ; E : quantité d'eau efficace ( $\leq 200$  litres) ; Air : volume d'air (en litre) ; G : coefficient de qualité des granulaire.

La formulation du squelette granulaire du béton, ciment compris, est cherchée 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 entre 8 et 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 [13].

#### 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 [13]. 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,

$$f_{cb} = K_G \times F_{cim} \left( \frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad \text{[I- 2]}$$

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/m<sup>3</sup>) ;  $E$  : dosage en eau (kg/m<sup>3</sup>) ;  $K_G$  : 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. Le tableau suivant donne quelques valeurs de  $K_G$  en fonction de leurs diamètres et de leurs qualités.

**Tableau I.4. Coefficients d'appréciation de la qualité  $K_G$  des granulats.**

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	D ≤ 12.5 (granulats <b> fins</b> )	20 ≤ D ≤ 31.5 (granulats <b> moyens</b> )	D ≤ 50 ( <b> gros</b> granulats)
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

$F_{cim}$  **classe vraie du ciment** : la classe vraie du ciment est en fonction de la classe du ciment, la valeur est indiquée sur la fiche technique du produit à l'achat.

#### ***1.4.2.1. Calcul du dosage en ciment***

Le dosage définitif en ciment (C) dépend du rapport C/E, mais aussi de la quantité d'eau, soit donc de la consistance (affaissement) du béton visée.

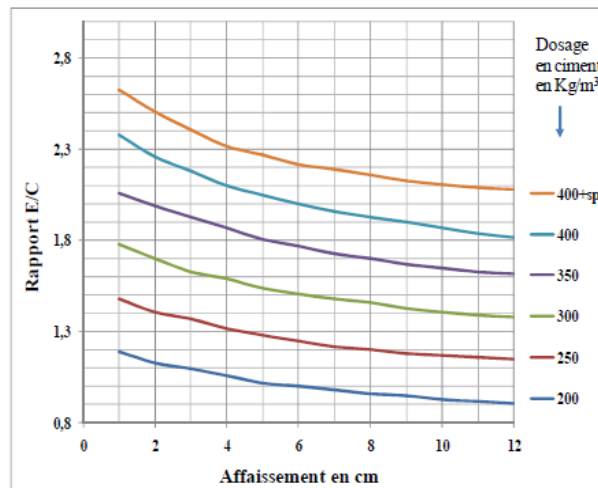


Figure I.7. Dosage en ciment en fonction de rapport E/C et de l'affaissement au cône d'Abrams [4]

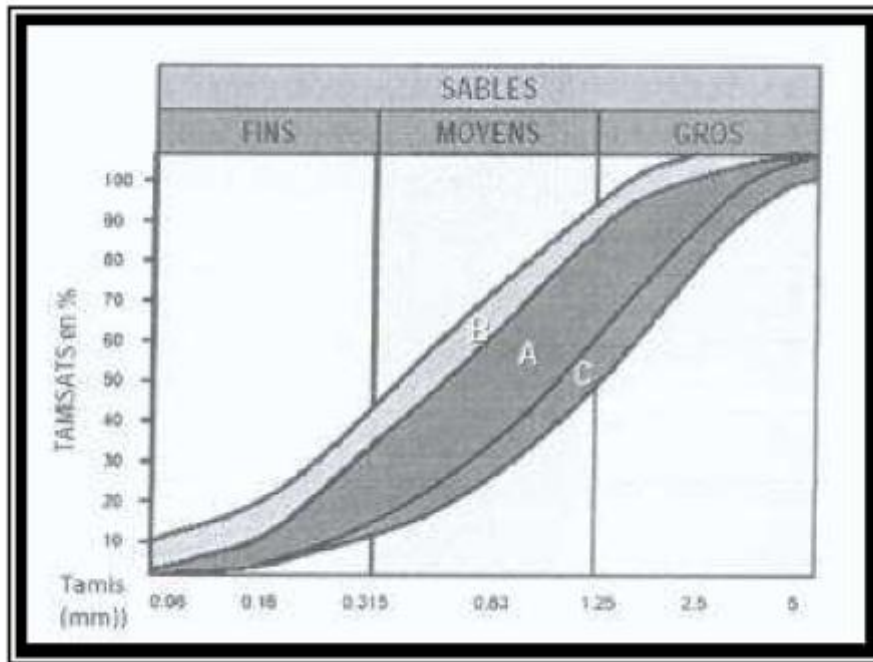
Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment en fonction du rapport E/C et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône d'Abrams).

#### I.4.2.2. Calcul du dosage en eau

Ayant fait le choix du dosage en eau, on déduit alors le dosage approximatif en eau totale à prévoir (provisoirement) et qu'il conviendra bien entendu d'ajuster ultérieurement par quelques essais de laboratoire en fonction du diamètre maximale des granulats mais aussi de l'état d'humidité des granulats...

#### I.4.2.3. Calcul du dosage en granulats

Le choix du sable à utiliser est d'une grande importance. Par cette méthode, il est conseillé d'utiliser des sables roulés car ils conduisent aux meilleurs résultats du point de vue maniabilité.



*Figure 1.8. Fuseaux préférentiels pour la granularité des sables pour béton selon la méthode de Dreux Gorisse [4].*

- Le fuseau A correspond au sable préférentiel, MF de 2,20 à 2,80.
- Le fuseau B correspond au sable trop fin, MF de 1,80 à 2,20 (induit à l'augmentation du dosage en eau).
- Le fuseau C correspond au sable trop grossier, MF de 2,80 à 3,20.

Il est à noter : qu'un sable grossier (fuseau C) risque d'entraîner une moins bonne maniabilité et une possible ségrégation et qu'un sable fin (fuseau B) nécessite une grande quantité d'eau pour humidifiée le sable donc améliorer la maniabilité ce qui peut pénaliser la résistance mécanique du béton. Il est toujours possible de modifier le module de finesse d'un sable par l'adjonction d'un deuxième sable de module de finesse différent.

#### *Tracé de la courbe granulatoire de référence*

La composition granulométrique optimale est représenté par une ligne brisée OAB voir figure suivante:

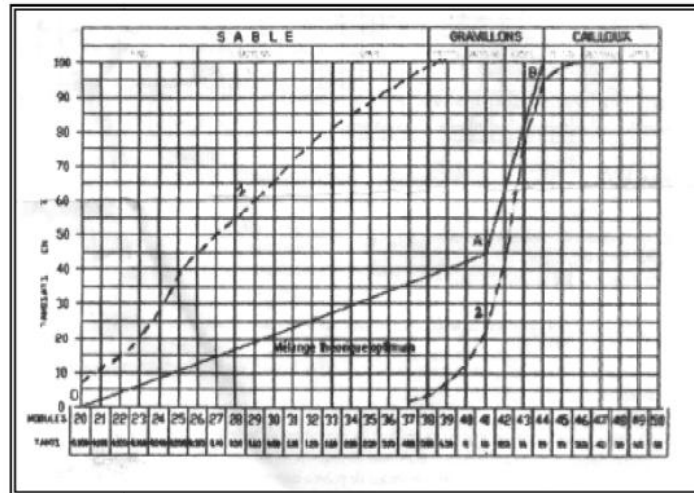


Figure 1.9. Courbe du mélange optimum selon la méthode de Dreux-Gorisse [4]

Le point (B) (à l'ordonnée 100%) est confondu avec le point d'ordonnée 100% de la courbe granulométrique du plus gros granulat. Le point de brisure (A) a les coordonnées ainsi définies : En abscisse :

- Si  $D \leq 20$  mm, l'abscisse est  $D/2$
- Si  $D \geq 20$  mm, l'abscisse est située au milieu du segment délimité par  $D$  et par le tamis de 5mm.

$D$  : dimension des plus gros grains du squelette granulaire retenu par la méthode de Dreux-Gorisse, est telle que le refus sur le tamis correspondant soit le plus proche possible de 8%.

En ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K$$

$K$  : terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité de serrage à la mise en place (vibration); de la forme des granulats et du module de finesse MF du sable.

Dans le cas d'une vibration normale du béton et des dosages habituellement utilisés en ciment.

$$K = 6 MF - 15 \quad \text{Si le sable est roulé}$$

$$K = 6 MF - 13 \quad \text{Si le sable est concassé.}$$

Une fois la courbe granulaire de référence est définie, reste à définir les proportions du gravier et du sable qui vont permettre d'approcher au plus près cette courbe.

***Compacité du béton et dosage des granulats***

Pour le calcul du dosage en granulats nous avons besoin d'une appréciation de la compacité du béton. La compacité du béton étant le rapport à 1 m<sup>3</sup> du volume absolu des matières solides (ciment + granulats) réellement obtenues dans 1 m<sup>3</sup> de béton frais mis en œuvre après vibration.

La compacité du béton dépend principalement de trois paramètres qui sont :

- Consistance désirée pour le béton ;
- De l'intensité de la vibration ;
- Du diamètre maximal des granulats.

## CHAPITRE 1 : *DEFINITIONS ET BIBLIOGRAPHIE*

### *Partie 2 : Déformations des bétons durcis*

#### **I.5. Introduction**

Les propriétés mécaniques d'un béton évoluent avec son 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). À 7 jours, le béton atteint environ 50 % de sa résistance finale ; à 28 jours, il atteint environ 85 %. Au-delà, 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, CO<sub>2</sub>, gel dégel...), le béton va se dégrader soit par carbonatation, soit par lessivage, soit par oxydation.

Par ailleurs, les sollicitations extérieures dans la construction vont induire sur le béton des dommages. Un béton sollicité en traction ou en cisaillement va développer de la fissuration juste après la sollicitation. Un béton sollicité en compression restera intact tant que la sollicitation reste inférieure à limite de résistance en compression du béton (pas de fissure liée à la compression).

#### **I.5.1 Le béton armé**

Le béton armé est utilisé dans tous les éléments d'ouvrages (poteaux, poutres, dalles, fondations, voiles...) soumis à des sollicitations importantes. Dans ce cas, les bétons sont dosés à près de 350 à 450 kg de ciment par m<sup>3</sup>. Les armatures sont souvent en Acier, elles sont introduites pour compenser

les défauts du béton en résistance à la traction, au cisaillement et aux chocs. Ces bétons présentent, dans le cas courant, des masses volumiques de l'ordre de  $2500 \text{ kg/m}^3$ . La masse volumique de ces bétons peut être adaptée en fonction des objectifs : bétons légers et bétons lourds.

Il existe trois sortes de béton armé :

Bétons ordinaires (BO) : les bétons ordinaires sont caractérisés par une résistance à la compression de l'ordre de 20 à 45 MPa. Ces bétons sont utilisés pour la réalisation d'ouvrages à usage d'habitations, commerces, scolaires, administratifs, culturels...

Bétons à hautes performances (BHP) : Ils sont caractérisés par une résistance à la compression de l'ordre de 45 à 80 MPa.

Bétons à ultra hautes performances (BUHP) : Ils sont caractérisés par une résistance à la compression de l'ordre de 80 à 120 MPa.

Le BHP et le BUHP se caractérisent souvent par des propriétés de durabilité excellentes, soit donc une faible porosité. Ils sont obtenus par l'introduction d'un pourcentage en fumée de silice ou de cendres volantes dans la composition du béton, mais aussi de forts réducteurs d'eau pour pouvoir formuler des bétons compacts à faible rapport E/C.

Ces bétons sont utilisés pour la réalisation des ouvrages d'une grande importance où la durée de vie longue est un critère essentiel à obtenir, exemple: ponts, tunnels, centrales nucléaires, barrages d'eau, certains murs de soutènement...

## I.5.2 Propriétés de déformation des matériaux

### I.5.2.1 Déformation

En plus de la contrainte de rupture, le but des essais de laboratoire est d'obtenir les courbes qui lient le tenseur de contraintes  $\sigma_{ij}$  au tenseur de déformation  $\varepsilon_{ij}$  ; soit donc les lois de comportement des matériaux

$$\sigma = f(\varepsilon)$$

Avec 
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

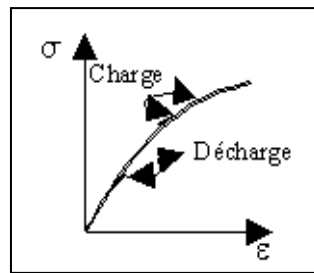
$\Delta L$  : Allongement de l'éprouvette ;  $L$  : longueur initiale de l'éprouvette

### I.5.2.2 Déformation élastique linéaire et non linéaire

En physique, l'élasticité est la propriété qu'a un matériau solide à retrouver sa forme d'origine après avoir été déformé. La déformation élastique est une déformation réversible. Un matériau solide se déforme lorsque des forces lui sont appliquées. Un matériau élastique retrouve sa forme et sa taille initiales quand ces forces ne s'exercent plus, jusqu'à une certaine limite de la valeur de ces forces.

### Déformation élastique non linéaire

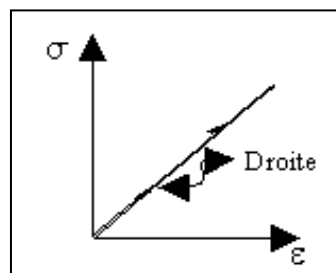
La figure 1.10 représente une courbe de déformation élastique non linéaire, c-à-d que les déformations ne sont pas proportionnelles aux contraintes appliquées, et cela à partir de la première contrainte appliquée sur le matériau.



**Figure I.10:** diagramme de déformation élastique non linéaire.

### Déformation élastique linéaire

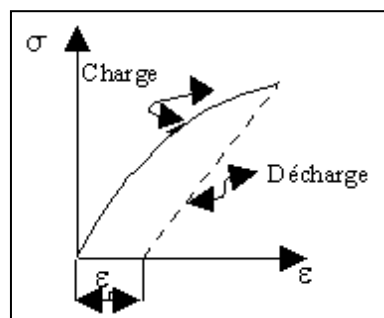
L'élasticité linéaire concerne souvent la plage des petites déformations, dans ce cas les déformations varient proportionnellement aux contraintes. Dans ce cas, l'allongement est proportionnel à la force (cas d'un étirement), selon le module de Young, et l'angle est proportionnel au couple dans le cas d'une torsion, selon le module de Coulomb.



**Figure I.11:** diagramme de déformation de type élastique linéaire.

### I.5.2.3 Déformation plastique

La déformation plastique est la déformation irréversible d'un objet ; elle se produit par un réarrangement de la position relative des atomes, ou plus généralement des éléments constitutifs du matériau.



**Figure I.12:** diagramme de déformation plastique.

### I.5.3 Comportement de résistance des bétons

#### I.5.3.1 Comportement en compression

La résistance du béton à la compression est le facteur primordial qui donne une image globale sur la qualité du béton. Elle est la propriété fondamentale et l'élément clé souvent employé lors de la conception des structures en béton.

Ainsi, le béton est défini par sa résistance à la compression. Cette résistance se mesure par des essais de compression simple, uni-axiale sur des éprouvettes cylindriques normalisées, ou de type cubique.

#### I.5.4.2 Compression uni-axiale

En raison de sa facilité de réalisation, l'essai de résistance en compression uniaxial sur des éprouvettes de béton normalisées est l'expérience la plus répandue pour estimer les caractéristiques générales de résistance d'un béton.

Bien que le béton soit constitué de matériaux élastiques et fragiles (granulats, pâte de ciment), son comportement en compression, que l'on traduit principalement par une relation, contrainte-déformation, est non linéaire et présente une certaine pseudo-ductilité reliée à la microfissuration du matériau. En effet, lorsque le béton est soumis à des contraintes supérieures à 30 % de sa résistance en compression, la microfissuration s'initie et tend à se propager parallèlement au chargement lors de son augmentation [McGregor, (1997)]. La relation contrainte-déformation tend alors à se courber graduellement, traduisant une perte de rigidité, jusqu'à une augmentation plus rapide des déformations au-delà d'une contrainte de 70 % à 80 % de la résistance en compression qui mène à la rupture par fissuration parallèle à l'axe de chargement. La figure (I.13) illustre la relation contrainte-déformation ( $\sigma - \epsilon$ ) du béton en compression.

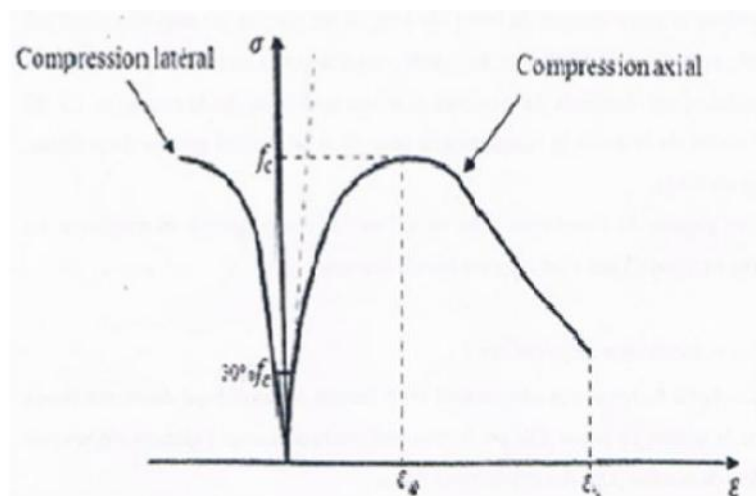
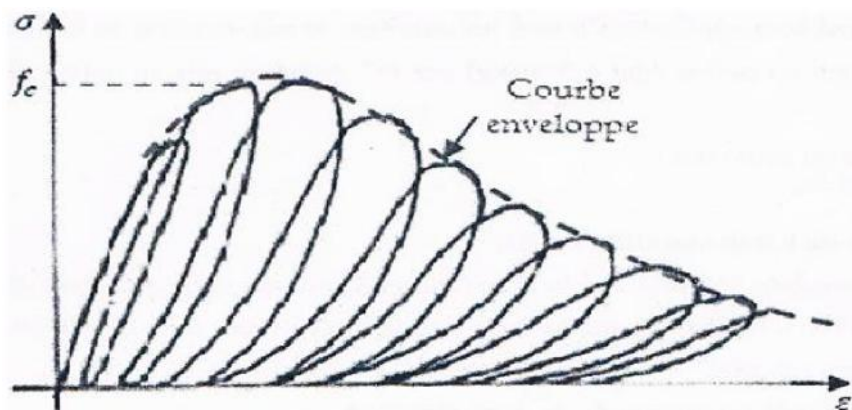


Figure I.13: comportement du béton en compression [14]

Une certaine résistance subsiste après la rupture et se traduit par branche descendante dont l'allure dépend des conditions et procédures de l'essai, jusqu'à la déformation ultime du matériau, généralement admise à 0.0035. Cette valeur n'est en réalité pas constante, elle tend à diminuer avec l'augmentation de la résistance ultime.

Les essais de compression du béton sous charge cyclique ont montré la présence de boucles d'hystérésis assez importantes durant le processus de chargement – déchargement **figure (III.14)**. L'amplitude de ces hystérésis influence considérablement le comportement à la rupture du béton. Cette dissipation d'énergie peut être expliquée par l'importante friction existant entre les fissures lors de leurs ouvertures – fermetures. Cette friction produit des effets viscoplastiques.



**Figure I.14:**Comportement cyclique du béton en compression simple, [15]

### I.5.3.3 Modélisation du comportement du béton en compression

Le béton présente des caractéristiques variables de déformation sous diverses conditions et niveaux de chargement. Une grande part de la connaissance des mécanismes de son comportement résulte d'observations expérimentales réalisées sur des essais. L'accumulation des connaissances empiriques et l'expérience acquise sont des éléments très importants à prendre en considération lors de la modélisation analytique du comportement du béton.

En général le comportement mécanique du béton décrit dans la littérature présente ce matériau comme élastique, fragile et endommageable [16]. La partie élastique est modélisée de manière linéaire ou non linéaire selon les besoins auxquels doivent répondre ces modèles. Le comportement élastique en compression est non linéaire et la diversité de formulation des bétons conduit à un large éventail de matériaux ayant des caractéristiques mécanique très variées.

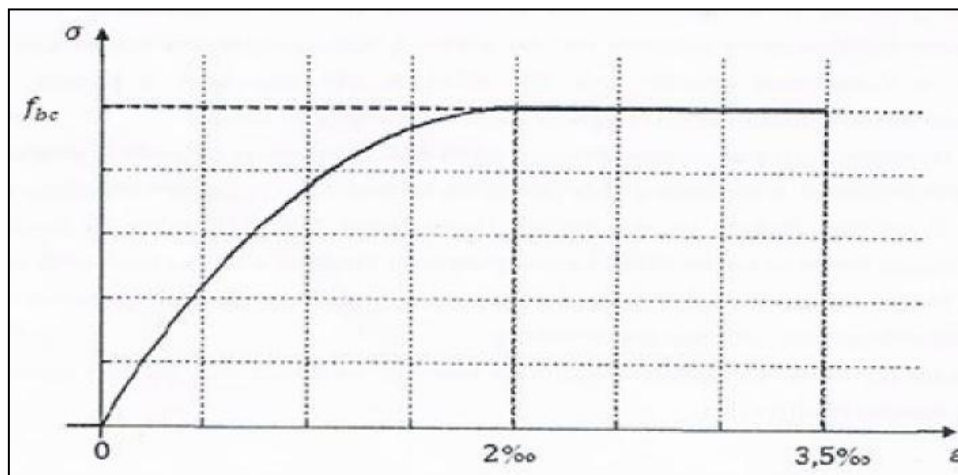
### I.5.3.4 Les modèles réglementaires

Les modèles réglementaires servent de base aux calculs simplifiés aux états limites. Ces règlements de calcul sont applicables à tous les ouvrages et construction en béton armé, avec un

dosage en ciment au moins égal à 300 [Kg] par m<sup>3</sup> de béton mis en œuvre [17, 18]. Parmi ces modèles on peut citer:

Le modèle de béton simplifié BAEL 99 : Le diagramme contrainte-déformation du béton reprend le diagramme de calcul dit: parabole Rectangle **figure (I.15)**. Il peut être utilisé dans tous les calculs aux états limites ultimes dans le but de simplifier ces calculs. La loi parabole rectangle est composée de deux branches:

- Une branche de parabole de second degré d'axe parallèle à l'axe des contraintes de compression, qui s'étend de l'origine jusqu'à son sommet.
- Une branche d'un segment de droite parallèle à l'axe des déformations, et tangent à la parabole en son sommet. Ce segment s'étend entre les valeurs 2 ‰ à 3,5 ‰ de la déformation  $\varepsilon_{bc}$ ,



**Figure I.15 : Loi parabole-Rectangle du béton en compression [17].**

Les relations entre les contraintes et les déformations sont les suivantes :

$$\sigma_{bc} = 0,25f_{bc}10^3\varepsilon_{bc}(4 - 10^3 \cdot \varepsilon_{bc}) \quad 0 \leq \varepsilon_{bc} \leq 2‰$$

$$\sigma_{bc} = f_{bc} \quad 2‰ \leq \varepsilon_{bc} \leq 3,5‰$$

Avec

$$f_{bc} = \frac{0,85 \cdot f_{cj}}{\gamma_b}$$

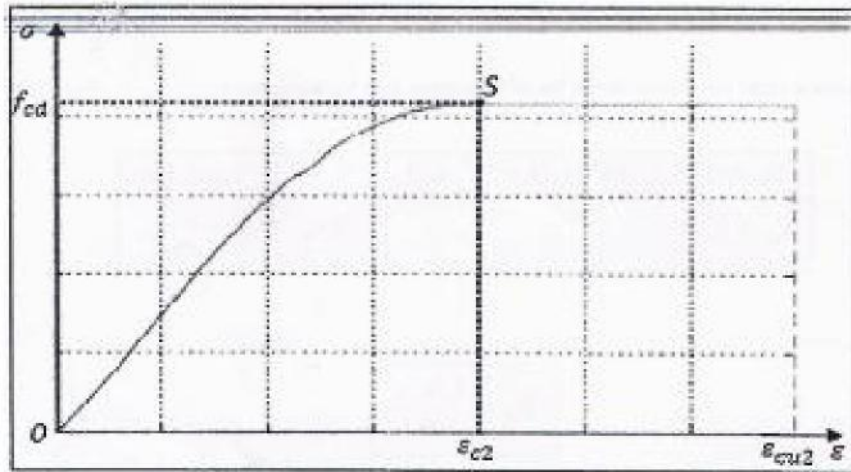
Les coefficients  $\gamma_b$  et 0,85 ont pour objet de tenir compte de ce que la résistance du béton est fonction décroissante de la durée d'application de la charge.

$\gamma_b$ : vaut 1,5 pour les combinaisons fondamentales et 1,15 pour les combinaisons accidentelles.

$\gamma_b$  : est fixé à 1 lorsque la durée probable d'application de la combinaison d'actions considérée est supérieure à 24 heures, à 0,9 lorsque cette durée est comprise entre 1 h à 24 heures, et à 0,85 lorsqu'elle est inférieure à 1 heures.

Le modèle de béton simplifié Eurocode 2 : Les **Eurocode** structuraux constituent des normes européennes transposables en norme nationales dans de nombreux pays de l'Europe. En France l'Eurocode 2 a remplacé définitivement les règles **BAEL 91** pour le béton armé depuis **2010**.

Pour le calcul des sections, on utilise le diagramme idéalisé dit «parabole-rectangle », constitué par un arc de parabole du second degré prolongé par un segment de droite **figure(I.16)**.



**Figure I.16:** Diagramme parabolique-rectangle du béton en compression [18].

$$\sigma_c = f_{cd} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] \quad 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}$$

$$\sigma_c = f_{cd} \varepsilon_c \geq \varepsilon_{c2}$$

Avec :  $f_{cd}$  : Contrainte de compression du béton correspondant à la partie rectiligne du diagramme ;  
 $\varepsilon_{c2}$  : déformation de pic correspondant à  $f_{cd}$  ;  $n$  : exposant.

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

$\gamma_c$  : coefficient de sécurité égale à :

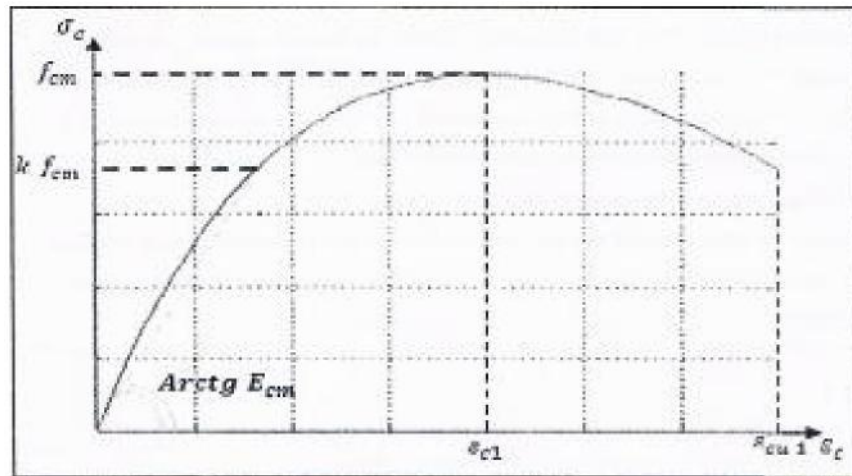
- 1,2 Pour des situations accidentelles
- 1,5 dans les autres cas

$f_{ck}$  : Résistance caractéristique du béton à 28 jours.

- Pour les bâtiments:  $\alpha_{cc} = 1$  valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française.
- Pour les ponts:  $\alpha_{cc} = 0,85$  valeur recommandée. L'Annexe nationale française préconise  $\alpha_{cc} = 1$ .

Le coefficient  $0,85 \leq \alpha_{cc} \leq 1$  tient en compte l'effet défavorable de la durée de l'application des charges, vis-à-vis de l'essai de courte durée utilisé pour définir  $f_{ck}$ . Pour l'analyse non linéaire telle

que pour le calcul des effets de second ordre et pour des charges de courte durée d'application, on utilise le diagramme de calcul défini de la manière suivante:



**Figure I.16 :** Diagramme non linéaire du béton en compression **EUROCODE2**.

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k \cdot n - n^2}{1 + k - 2n}$$

Avec

$$n = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}$$

Où  $\varepsilon_c$  et  $\varepsilon_{c1}$  sont pris en valeur absolue.

$$\varepsilon_{c1} = 0,7 f_{cm}^{0,31}$$

Déformation correspondant au pic de la courbe ( $\sigma$ - $\varepsilon$ )

$$k = 1,05 \frac{E_{cm} \cdot \varepsilon_{c1}}{f_{cm}}$$

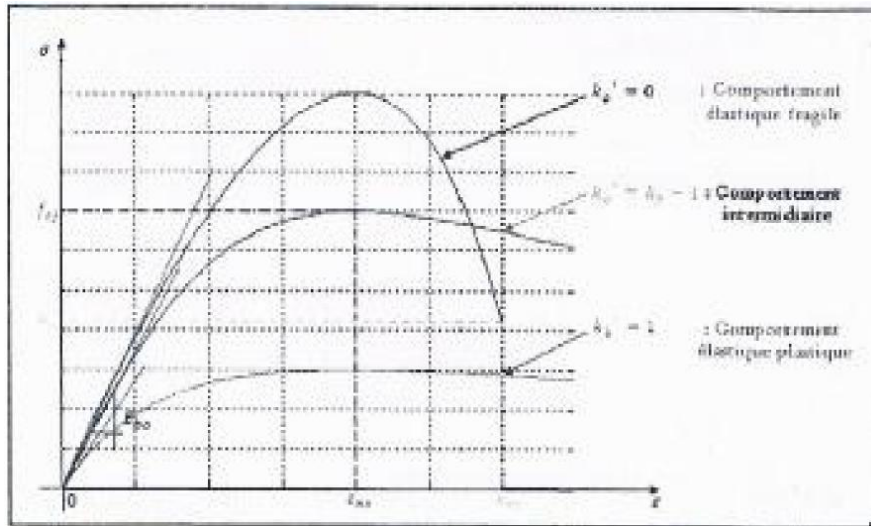
$f_{cm}$  : Résistance moyenne à la compression du béton à 28 jours.

$E_{cm}$  : Module de déformation instantanée du béton.

### I.5.3.5 Les modèles non linéaires

L'utilisation des modèles de comportement non linéaire pour le béton est encore relativement difficile. C'est qu'il faut pouvoir disposer des modèles adéquats, des paramètres qui caractérisent ce matériau considéré tel que l'élasticité, plasticité et l'endommagement..., dans des codes de calculs des structures pour mieux l'appliquer aux ouvrages de génie civil. On se limitera au modèle de comportement de Sargin 1971[19].

Ce modèle est essentiellement employé dans le calcul des structures en béton armé. Il présente l'avantage de faciliter la détermination des paramètres du modèle à partir des essais en laboratoire.



**Figure I.17:** Comportement du béton en compression selon **Sargin(1971)**.

Ce modèle présente deux branches:

-Branche ascendante, à concavité vers le bas admettant un module tangent initial, et un maximum de contrainte qui correspond à la compression  $f_{cj}$

-Branche descendante, commençant par le maximum de la branche ascendante et se terminant par le point définissant la déformation ultime correspondante à la contrainte ultime du béton.

Pour décrire le comportement non linéaire du béton en compression, Sargin a proposé la relation suivante :

$$\sigma = f_{cj} \frac{k_b * \bar{\varepsilon} + (k_b - 1)^2 \bar{\varepsilon}}{1 + k_b - 2\bar{\varepsilon} + k'_b \bar{\varepsilon}^2}$$

Tel que

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

$$k_b = \frac{E_b}{f_{cj}} \varepsilon_0$$

$$E_{b0} = 11000 \sqrt[3]{f_{c0}}$$

Avec :  $E_{b0}$  : Module d'élasticité longitudinal du béton.

$\varepsilon_0$  : Déformation du pic correspondant à  $f_{cj}$ .

$f_{cj}$  : Résistance à la compression du béton à l'âge j.

$k_b, k'_b$  : sont des paramètres adimensionnels, ajustent la branche ascendante et descendante, respectivement, de la loi de Sargin.

Le paramètre  $k'_b$  influe essentiellement sur l'allure de la branche descendante.

$K_b' = 0$  : correspond à un béton ayant un comportement élastique fragile, avec une branche qui descend brutalement.

$K_b' = 1$  : Correspond à un béton ayant un comportement élastique ductile, plastique, avec une branche descendante assez plat.

Pour un béton normal, on prend généralement:  $K_b' = K_b - 1$ .

Le BPEL propose de prendre:

$$k'_b = k_b - 1 \quad \text{pour} \quad f_{cj} \leq 30[\text{MPa}]$$

$$k'_b = 0 \quad \text{pour} \quad f_{cj} \geq 55[\text{MPa}]$$

$$k'_b = (k_b - 1) \left( \frac{55 - f_{cj}}{25} \right) \quad \text{pour} \quad 30 \leq f_{cj} \leq 55[\text{MPa}]$$

La déformation  $\varepsilon_0$  correspondant au pic de contrainte peut être estimée par la formule donnée par le BPEL:

$$\varepsilon_0 = 0,62 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[3]{f_{cj}}$$

Et le module à l'origine par:

$$E_{ij} = 11000 \sqrt[3]{f_{c0}}$$

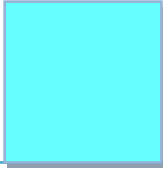
Le béton non armé possède une capacité de déformation à la rupture  $\varepsilon_{cu}$  très limitée, de l'ordre de  $3,5 \cdot 10^{-3}$ . Cette valeur est de l'ordre de 2 fois le raccourcissement maximum élastique  $\varepsilon_{b0}$ .

## I.6. Conclusion

A l'issue de cette partie nous avons répertorié quelques lois de comportement les plus connues qui lient les contraintes développées sous les sollicitations mécaniques extérieures aux déformations développées dans le béton. Toute fois il est intéressant de noter que le béton subi deux autres catégories de déformations qui sont liées aux propriétés physiques au chimiques tel que le Fluage et le retrait.

Le fluage est le phénomène physique qui provoque la déformation différée (non instantanée) d'un matériau soumis à une contrainte constante (notée  $\sigma$ ), inférieure à la limite d'élasticité du matériau, pendant une durée suffisante.

Le retrait du béton est une contraction dimensionnelle du béton due à des phénomènes chimiques et physiques. Le retrait du béton est indépendant de tout chargement du matériau. Ce phénomène se produit dès la mise en œuvre du béton, pendant sa prise et son durcissement et se développe au cours du temps



## CHAPITRE 1 : *DEFINITIONS ET BIBLIOGRAPHIE*

### Partie 3 : *Contrôle de qualité des bétons & essais non destructifs*

#### I.7. Contrôle de qualité des bétons

La formulation des bétons devient de plus en plus compliquée pour deux raisons principales qui sont :

- Les exigences sur les propriétés de béton souhaitées (ouvrabilité, résistance, ductilité, durabilité, rapidité de maturité, pompabilité...);
- Par le nombre de produit à introduire dans les bétons et leur variété dans le marché, notamment les adjuvants. En effet, les bétons traditionnels étaient composés de quatre matériaux à savoir : les granulats (gravillons et sable), le ciment et l'eau. Ces dernières années, les bétons sont composés systématiquement de ces quatre produits de base, mais aussi : d'adjuvants, d'additions minérales pour améliorer les performances mécaniques et de durabilité ; parfois de pigments pour la coloration ; fibres pour améliorer le comportement en traction et en ductilité des bétons, etc.

##### I.7.1. Contrôle de la qualité au laboratoire

La composition d'un béton est dans un premier temps calculée par un professionnel des bétons en se servant de l'expérience déjà acquis, la composition doit être validée au laboratoire par des essais de convenance. Ces essais vont permettre de vérifier si les critères souhaités (dictés dans le cahier des charges) sont conformes aux propriétés du béton finalement formulé. Souvent des réajustements sont nécessaires pour satisfaire tous ces critères et validée la composition définitivement.

Dans le cahier des charges souvent sont dictés la classe de consistance du béton éventuellement sont mode de mise en place (pompable ou pas), durée et intensité de sa vibration ; sa classe de résistance à 28 jours ou à des âges avancés au besoin, sa cinétique de murissement sous des conditions de référence en humidité (souvent voisine de 80 HR) et à la température de 20°C . Parfois, des consignes sur l'ordre d'introduction des composants des bétons et la durée de malaxage sont donnés. Et aussi, les traitements possibles au jeune âge du béton pour éviter la fissuration précoce.

### **I.7.2. Contrôle de la qualité Sur chantier**

À la confection du béton sur chantier, des échantillons sont extraits de chaque gâchée lors du coulage des éléments de la structure. Deux critères sont systématiquement contrôlés : la consistance (plasticité) en effectuant l'essai au cône d'Abrams sur place au chantier ; parallèlement des moules d'éprouvettes sont remplis pour le contrôle de la résistance à 28 jours par un laboratoire de contrôle des bétons.

Au besoin, lorsqu'on souhaite de réaliser un décoffrage précoce il est alors demandé des essais d'écrasement d'éprouvettes de béton à l'âge prévu pour le décoffrage, cela néanmoins pour garantir l'auto-portance du béton à l'âge du décoffrage, notamment pour le cas des dalles pleines.

**En cas de défauts** : dans les cas où des défauts de réalisation apparaissent lors du décoffrage, notamment en présence de ségrégations profondes des bétons (présence de nids de cailloux) des essais supplémentaires seront alors nécessaires. Ces essais sont réalisés sur place, par extraction de carottes de béton (échantillons de petites tailles) dans les éléments atteints. Dans ce cas on peut également tester les bétons par des essais non destructifs comme le scléromètre ou l'appareil de propagation d'ondes ultrasoniques (ultrasons).

### **I.7.3. Contrôle de la qualité du béton dans le vieux bâti**

Ces dernières années, plusieurs constructions présentent des pathologies (défauts liés à la dégradation du béton) qui remettent en cause la capacité portante de ces structures, et mettent en danger la sécurité des usagers.

La dégradation des propriétés physiques et chimiques des bétons sont d'origines nombreuses et différentes (retrait excessif, gel-dégel, corrosion des armatures, carbonatation des bétons, réaction alcali-granulats, etc...). Ces dégradations font que la construction est vieillie à des âges très précoces par rapport à ce qui est souhaité. Ainsi, pour prolonger la durée de vie de cet ouvrage (le garder en service) par réhabilitation ou par confortement, il est demandé de faire une auscultation pour connaître l'état de vieillissement du béton et calculer ces propriétés résiduelles. Dans tous les cas, avant toute intervention, même de démolition, notamment lorsqu'il s'agit d'un ouvrage d'Art ou d'un ouvrage important qui rentre dans le patrimoine d'un pays, on demande toujours de faire des essais de contrôle de qualité de ces bétons.

L'auscultation des ces bétons se fait alors en utilisant, en fonction de l'état de dégradation des bétons, des essais in-situ par carottage ou par des essais non destructifs.

Les méthodes d'essais par carottage présentent un intérêt majeur pour déterminer les caractéristiques mécaniques du béton, car ces essais sont menés sur un béton de l'élément de la structure. Par contre il est localisé sur un endroit précis, ne représente pas le béton en tout point de la structure. Pour y remédier plusieurs carottes sont alors extraites à des endroits différents pour avoir une idée sur l'ensemble du béton de la structure. Cette méthode présente l'inconvénient de créer des défauts (trous) dans la structure ce qui donc porte atteinte à l'intégrité de la structure malgré que ces trous sont dans un deuxième temps remplis de mortiers pour les fermer.

Les méthodes d'essais non destructives permettent de déterminer les propriétés physique et mécanique d'un élément son le détruire. L'application des méthodes non destructives se fait à l'aide des appareils comme l'ultrason et le scléromètre.

### **I.8. Définition et but des essais non destructifs**

Une définition des contrôles non destructifs plus proche de la réalité industrielle consiste donc à dire qu'il s'agit de « qualifier, sans nécessairement quantifier, l'état d'un produit, sans altération de ses caractéristiques par rapport à des normes » autrement dit c'est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, soit au court de la production, soit en court d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances.

Le contrôle non destructif du béton peut être défini comme la méthode d'essai utilisée pour examiner les propriétés du béton utilisé dans la structure réelle.

Ces essais sont réalisés in situ, sur des structures qui existent. Une caractéristique importante de test non-destructif, c'est que l'endroit où l'essai est fait peut être utilisé pour ré-analysé.

Les méthodes non destructives sont basées sur le fait que certaines propriétés physiques du béton peuvent être reliées à la résistance. Ces propriétés physiques comprennent la porosité, la dureté, la résistance à la pénétration des projectiles, la capacité de rebondissement et de transmettre les impulsions ultrasoniques.

Les dégradations des bétons peuvent être d'origines diverses (retrait excessif, gel-dégel, corrosion, réaction alcali-granulats, etc....) éventuellement combinées, ont pour conséquences la fissuration et l'altération de ces matériaux. La dégradation des structures est un problème général qui affecte tous les types d'ouvrages.

Les méthodes d'essai non destructives des ouvrages en béton sont particulièrement intéressantes tant par suite de la proportion élevée de ces constructions dans l'ensemble des ouvrages, que par suite de l'importance que présente le contrôle de la qualité directement sur la construction.

### **I.9. Avantages et inconvénient des essais non destructifs**

Les avantages de ces essais par rapport aux autres peuvent être résumés dans le caractère non destructif. On peut obtenir des informations dans les domaines inaccessibles aux méthodes classiques, économiser des matériaux, du temps et des outils d'essai, par la possibilité de faire les essais sur le matériau dans l'ouvrage même ou sur une seule éprouvette un nombre pratiquement infini de fois, due à la rapidité de l'exécution de ce type d'essais [20, 21, 22, 23, 24].

Le principal désavantage des méthodes d'essais non destructives réside dans le fait que dans le stade actuel, elles ne peuvent pas fournir au constructeur des données suffisamment précises pour remplacer totalement les méthodes destructives ou, au moins, dans les principaux domaines d'application. Le rythme auquel elles progressent nous donne cependant la certitude que le moment de leur substitution aux méthodes destructives n'est pas très lointain [24]. L'application des méthodes non destructives se fait à l'aide des appareils comme l'ultrason et le scléromètre.

### **I.10. Domaine d'application des essais non destructifs**

Le besoin d'explorer ou d'ausculter un ouvrage par des méthodes non destructives se résume comme suit :

- Vérifier les hypothèses et les confirmer
- Détecter les défauts et les endommagements
- Caractériser les défauts et les endommagements trouvés

L'objectif principal des méthodes non destructives appliquées au béton est de fournir une évaluation correcte de la qualité du matériau dans sa structure même, quels que soit son âge et son état de dégradation, sans avoir à s'en rapporter uniquement aux résultats d'éprouvettes qui ne représentent pas forcément la structure exacte du béton d'ouvrage ou bien dans le cas des petites structures dont le carottage est quasiment impossible. En revanche, l'utilisation de ces méthodes se fait pour éviter l'atteinte à l'intégrité des structures causées par les méthodes destructives et afin d'obtenir des informations dans des domaines inaccessibles aux méthodes classiques.

### **I.11-Les différents types d'essais non destructifs**

De nombreux tests et études portent sur la durabilité des bétons. En particulier, la caractérisation des matériaux par des méthodes non destructives qui permettent de détecter des changements structuraux du matériau. On distingue plusieurs types d'essais non destructifs, les plus

fréquemment utilisés pour le béton sont la capacité de rebondissement et la transmission des impulsions ultrasoniques.

### **I.11.1. Essais au scléromètre (norme P18-417)**

#### **I.12-1-1-Généralités**

L'utilisation d'essais sclérométriques sur les matériaux de construction, en particulier sur béton, date de plusieurs décennies. Le scléromètre est utilisé pour déterminer la dureté de surface du béton et il est l'un des instruments les plus répandus dans le domaine des contrôles non destructifs (CND) de la force de compression du béton. C'est la méthode la plus rapide et la plus économique pour évaluer la qualité et la résistance du béton.

#### **I.12-1-2-Définition et description**

Le scléromètre à béton a été introduit au début des années 1950. Il s'agit de l'appareil de mesures non destructives couramment utilisé pour évaluer rapidement l'état d'une structure.

Au fil des années, son application s'est étendue aux tests de roche et aux tests de dureté de bobine de papier.

Il se présente sous forme d'un manchon cylindrique à l'intérieur duquel coulisse une tige de 10 à 20 mm de diamètre. Sur la face cylindrique du scléromètre il y a :

- Une règle de mesure avec index.
- Un bouton poussoir à l'opposé de la règle de mesure.
- Un abaque permettant le calcul de la résistance du béton en fonction du rebond de la bille.

Sur une des extrémités du scléromètre il y a une sonde.

#### **I.12-1-3-But et principe d'utilisation**

La mesure de dureté au choc permet d'évaluer la résistance d'un béton de manière non destructive. Cette méthode est intéressante en raison de sa simplicité, elle permet de faire rapidement des contrôles de régularité du béton d'un ouvrage, tester l'homogénéité du béton in situ pour déterminer des zones de faible qualité, et d'obtenir une estimation rapide de la résistance du béton d'un ouvrage sans procéder à des prélèvements de béton durcit par carottage.

Le principe de cet appareil est basé sur le principe de Schmidt qui consiste à placer la tige contre la surface à tester, en appuyant fortement sur le manchon, on fait pénétrer la tige dans l'ouvrage, jusqu'au moment où un déclic se produit, libérant une masse qui frappe la tige contre la surface.

Un index donne alors la mesure de l'essai sur une règle graduée placée sur le manchon extérieur, ces valeurs sont appelées indices sclérométriques. Faire l'essai plusieurs fois sur la même surface.



On remarque que les abaques donnés ci-dessus indiquent les valeurs de résistance pour un cube. Pour déterminer les résistances d'un cylindre, il suffit de multiplier ces résistances par un coefficient de corrélation qui vaut 0,85.

#### **Avantages et inconvénients de la méthode :**

- méthode non destructive ;
- méthode la plus rapide et la plus économique pour évaluer la qualité et la résistance du béton.
- Nécessite un étalonnage précis en vue d'estimer une résistance du béton ;
- Nécessite de nombreux points de mesure pour obtenir une valeur moyenne (12 mesures par point selon la norme) ;
- Utilisable seulement sur les surfaces lisses et sans trace ni porosité élevée ;
- Mesure superficielle.

#### **I.11.2. Essai à l'ultrason**

L'auscultation par ultrason est une méthode non destructive destinée pour tester l'homogénéité du béton ; elle consiste à mesurer la vitesse de propagation des impulsions ultrasoniques et permet d'effectuer des essais de résistance sur le béton coulé sur place.

Cette méthode permet de mesurer le temps de propagation d'une impulsion ultrasonique traversant le béton. Les principales caractéristiques de tous les appareils disponibles sur le marché sont très semblables. Ces appareils comprennent un générateur d'impulsions et un récepteur d'impulsions.

Comme toutes les techniques de contrôle non destructif, le contrôle par ultrasons permet, sans nuire à l'intégrité d'une structure, de caractériser les défauts qu'elle contient et de porter ainsi un jugement sur l'acceptation des pièces réalisées. Cette méthode peut être employée à différents stades du développement de la structure considérée (fabrication, mise en service, réparation). Elle ne quantifie pas un défaut mais nécessite une comparaison avec un étalon. De plus, les limites et les probabilités de détection sont variables selon l'appareil, le matériau, la surface à inspecter et l'opérateur.

##### **I.11.2.1. But de l'essai**

L'appareil d'auscultation dynamique est utilisé pour mesurer la vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques à travers le béton. Par cette méthode, il est possible d'obtenir, de manière non destructive, des informations sur :

- L'uniformité et l'homogénéité du béton.
- Présence des fissures ou des cavités.

- La détérioration due au feu.
- La détermination du module d'élasticité dynamique.
- L'évaluation de la résistance du béton.

### I.11.2.2. Description de l'appareil

L'appareil d'auscultation dynamique génère des impulsions ultrasoniques qui sont transmises en contact avec la zone à évaluer, le temps de propagation à travers le béton est visualisé sur un afficheur digital [25].



*Figure I.19 : Appareil d'auscultation sonore punditLab [25]*

### Les articles composants l'appareil

- Un testeur ultrasonique
- Une tête de transmission et une tête de réception
- Deux câbles de connexion
- Deux piles alcalines

### Fonctionnement de l'appareil

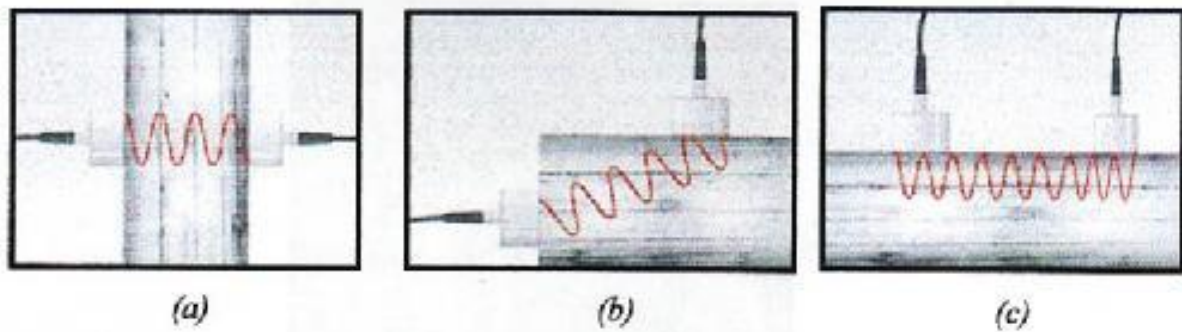
Pour la mise en route de l'appareil il faut :

- S'assurer que les piles est bien mises en place
- Connecter les deux transducteurs, qui peuvent être indifféremment émetteur et récepteur, avec deux câbles.
- Mettre l'appareil en route à l'aide de l'interrupteur.

A prés que l'appareil prêt à l'essai, on doit :

- Choisir la surface à tester, de préférence lisse et sans crevasse. Le mode d'auscultation pourra être direct, semis directe ou indirecte de surface.
- Étendre une fine couche de produit couplant sur chaque transducteur.
- Placer et appuyer les transducteurs sur la surface. L'opérateur déplacera légèrement les sondes en maintenant la pression pour obtenir la valeur stable la plus faible, qui sera considérée comme valeur à retenir.
- Relever les valeurs affichées et répéter l'essai en d'autres places.

**Positionnement des transducteurs :** Il est possible de faire des mesures de vitesse de propagation en plaçant les deux transducteurs en opposition (transmission directe), adjacentes (transmission semi directe) ou sur le même plan (transmission indirect ou de surface).



*Figure 1.20 Types de propagation d'ondes*

#### **a-Transmission directe**

Dans ce cas, l'émetteur est placé face au capteur, ce qui fait la distance entre les centres des ondes (ou bien la distance parcourue par les ondes) est égale à l'épaisseur de l'élément ausculté.

#### **b-Transmission semi-directe**

Ici l'émetteur et le récepteur sont placés sur deux faces adjacentes. C'est la méthode d'auscultation la moins utilisée, mais dans certains cas (élément de construction présentant uniquement deux faces adjacentes accessibles (une fondation par exemple) elle est la seule méthode possible à appliquer.

#### **c-Transmission indirecte**

L'émetteur et le récepteur sont placés sur la même face de l'élément à ausculter. On utilise ce type de mesure sur toutes les parties de structures, mais plus particulièrement sur les dalles et les éléments en longueur.

Avec cette méthode, la vitesse obtenue correspond aux qualités des couches superficielles ; la méthode ne donne aucune indication quant à la présence d'un défaut en profondeur dans l'élément à examiner.

**I.11.2.3. Principe d'utilisation des ultrasons**

Cet essai non destructif permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) la quelle est d'autant plus élevée que le béton est plus dense donc plus résistant. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance connue. L'appareil comprend des capteurs mis en contact avec le béton, un générateur d'ondes dont la fréquence est comprise entre 10 et 150 Hz, un amplificateur, un circuit de mesure du temps et un affichage digitale du temps mis par les ondes longitudinales pour traverser le béton entre les transducteurs.

La vitesse d'onde,  $V$ , dans un milieu homogène, isotrope et élastique, est reliée au module d'élasticité dynamique,  $Ed$ , par l'expression suivante [21]:

$$V^2 = \frac{Ed(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}$$

$V$  : vitesse du son ;  $\rho$  : masse volumique ;  $Ed$  : module d'élasticité;  $\mu$  est le coefficient de poisson qui n'est généralement pas connu par exactitude, cependant il est souvent compris entre 0.15 et 0.28 selon le manuel appartenant à l'ultrason utilisé ; dans le cas où on ne l'a pas, pour déterminer le coefficient de poisson dynamique, il est nécessaire de connaître au moins deux vitesses de propagation de types différents, ondes longitudinales et ondes transversales [22] :

$$V_T = \sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)}} * V_L$$

Quant à l'utilisation de la valeur de la vitesse de propagation d'une onde sonore pour déterminer la résistance du béton, il faut mentionner qu'il n'y pas de relation physique entre les deux. On peut rappeler que le module d'élasticité est relié à la résistance par l'équation suivante [21, 26] :

$$\sigma = 16.7 \exp (Ed/122500)$$

La vitesse des ondes ultrasoniques à travers le béton résulte du temps mis par les ondes pour traverser la pâte du ciment durci et les granulats lorsqu'une onde rencontre une interface béton air, il y a une diffraction et une réflexion qui atténue la vitesse et allonge donc le temps de propagation. En utilisant ce phénomène il est donc possible de localiser les défauts, vides, zones dégradées et fissures. Une vitesse élevée de propagation des impulsions indique généralement un béton de bonne qualité. Une relation générale entre la qualité du béton et la vitesse de diffusion des impulsions est décrite au tableau suivant :

**Tableau-I.5 : Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation des ondes ultrasonique [22]**

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

Le tableau ci-dessus indique la relation existante entre la qualité du béton et la vitesse de propagation des ondes ultrasonique. A l'utilisation d'ultrason, la variation de la vitesse des impulsions dépend de la qualité du béton fabriqué.

#### **I.11.2.4. Les différents types d'ondes**

Les ondes ultrasonores sont des vibrations mécaniques. Elles se propagent à l'intérieur des matériaux avec des vitesses qui dépendent du milieu lui-même et de types d'ondes, on peut distinguer plusieurs types, des ondes les plus utilisés dans le domaine de génie civil sont : les ondes longitudinales et les ondes transversales

#### **Les ondes longitudinales et transversales**

Les deux modes principaux utilisés en contrôle industriel concernent les ondes longitudinales, appelées ondes de compression ou ondes de dilatation dans la théorie de l'élasticité, et les ondes transversales appelées également ondes de cisaillement. La longueur d'onde «  $l$  » est liée à la vitesse de propagation «  $V$  » par la relation :

$$L = V/f$$

Avec  $f$  : fréquence de la vibration.

– Les ondes longitudinales sont caractérisées par le fait que la direction de la vibration (direction du déplacement des particules ou encore polarisation de l'onde) est la même que celle de la propagation. On démontre en théorie des milieux élastiques que la vitesse de propagation de ces ondes  $V_L$  est liée aux caractéristiques élastiques du matériau, par exemple module de Young et coefficient de Poisson, par la relation :

$$V_L = \left( \frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \right)^{1/2}$$

Avec :  $E$  : (Pa) module de Young,  $\nu$  : (sans dimension) coefficient de Poisson,  $\rho$  : (kg/m<sup>3</sup>) masse volumique.

Cette vitesse de propagation est indépendante de la fréquence de l'onde ultrasonore dans le cas des solides homogènes et isotropes et qu'elle est uniquement liée aux caractéristiques du matériau traversé.

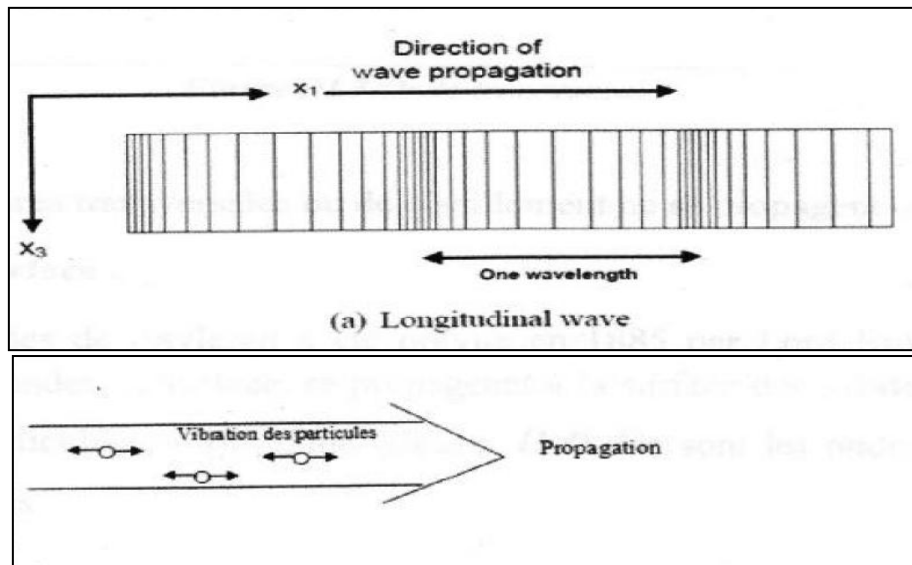


Figure I.15 Ondes longitudinales

– Les ondes transversales se propagent dans une direction perpendiculaire à celle de la vibration. Ces ondes ne peuvent exister que dans les solides car leur existence est liée à une résistance au cisaillement que ne possèdent ni les liquides ni les gaz. De la même façon, on montre que la vitesse des ondes ultrasonores transversales VT est liée aux caractéristiques du matériau par la relation :

$$V_T = \left( \frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \right)^{1/2}$$

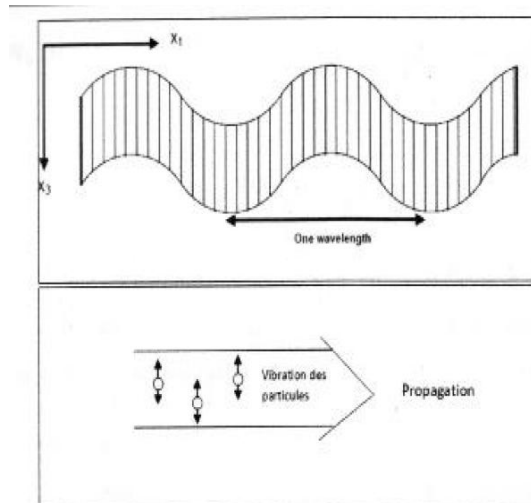


Figure I.17 Ondes transversales

**I.11.2.5. Facteurs ayant de l'influence sur la valeur de la vitesse du son**

En appliquant la méthode d'auscultation dynamique, il faut savoir qu'il y a certains facteurs pouvant influencer sur la valeur de la vitesse du son. Ces facteurs sont :

- L'état de surface du béton : Il est préférable, chaque fois que c'est possible, que les sondes soient en contact avec les surfaces de béton
- Température du béton : les expériences ont montré que lorsque la température du béton varie entre 5°C et 30°C, il n'y a pas de changement significatif de la vitesse de propagation des ultrasons. Donc, exception faite pour des températures extrêmes, l'influence de la température est négligeable.
- Longueur de la trajectoire : en générale, la distance minimale doit être toujours 5 fois plus grande que la dimension du plus gros granulats utilisés.
- Dimension de l'élément testé : la vitesse de propagation des ondes n'est pas influencée par la taille et la forme de l'échantillon ou de l'élément testé si sa plus petite dimension latérale (dimension perpendiculaire à la trajectoire de l'impulsion) est supérieure à la longueur d'onde des vibrations.
- Si la fréquence de l'impulsion est de 50 kHz, la longueur d'onde des vibrations est de 80 mm (en vertu de la relation  $\lambda=v/f$ ) ; tel que :

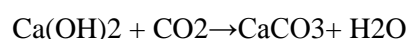
$\lambda$ =longueur d'onde (m) ; V= vitesse de propagation (m/s) ; f=fréquence de vibration (kHz).

- Si on teste des éprouvettes de hauteur inférieure à 80 mm, la vitesse de propagation des ultrasons est réduite ; donc les résultats obtenus doivent être utilisés avec attention.
- Humidité du béton : elle exerce une petite mais significative influence sur la vitesse de propagation des ondes dans le béton. La vitesse augmente avec l'humidité du béton (car les pores sont remplis d'eau et non d'air qui amortit le son).

En pratique pour une bonne détermination de la résistance du béton, il est recommandé d'éviter les zones imbibées d'eau.

- L'âge du béton : il influe sur les résultats de façon indirecte. Il y a un phénomène de carbonatation provoqué par l'action de l'oxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) de l'atmosphère sur les chaux libres, Ca(OH)<sub>2</sub> qui existe dans le béton (dans le ciment et parfois aussi dans les granulats). De ce fait la couche extérieure de l'élément se transforme. Dans sa structure interne, il existe beaucoup de cristaux de carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>).

La transformation ayant lieu est la suivante :



La dureté du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) étant très élevée et en raison de sa formation sur la partie superficielle de l'élément testé, le béton de la couche extérieure est plus dure que celui des structures interne de l'élément. Donc la couche extérieure se caractérisera par une vitesse de propagation des ondes plus grandes que celles traversant les structures internes du béton (en raison du fait que la vitesse est en fonction de la compacité du matériau testé).

Donc la couche supérieure n'est plus représentative.

Alors pour les bétons âgés, travaillant dans un milieu très riche en  $\text{CO}_2$ , il est recommandé d'éviter la méthode d'auscultation en surface. Pour les autres méthodes (la meilleure étant la mesure en transparence), il faut que l'épaisseur de l'élément ausculté soit assez grande pour qu'on ait une valeur représentative de la vitesse des ultrasons.

#### I.11.2.5. Avantages et inconvénients de cet appareil

L'ultrason est un appareil:

- De très bonne précision de la détection (localisation et longueur du défaut),
- Sans danger,
- A privilégier si accessibilité d'un seul côté,
- Associé aux fortes épaisseurs,
- Meilleure sensibilité de contrôle pour les défauts filiformes (fissures, tapures, criques,...) d'orientation aléatoire,
- Résultat du contrôle en temps.

Mais il à aussi des inconvénients comme :

- L'identification incertaine des défauts : classement en défauts volumiques ou défauts non volumiques (ou plans),
- Pas adapté aux faibles épaisseurs,
- Phase d'étalonnage importante,
- Pas de trace du contrôle.

En résumé, les essais d'auscultation dynamique à l'ultrason sont très efficaces pour contrôler la qualité du béton, et particulièrement pour évaluer l'homogénéité et détecter les fissures et les imperfections. Ces essais ne sont toutefois pas aussi efficaces pour évaluer la résistance de ce dernier à cause du grand nombre de variables influençant la relation entre la résistance et la vitesse de propagation des impulsions.

#### I.12-conclusion

L'évaluation non destructive du béton nécessite d'appréhender les paramètres qui influencent les procédures et mesures de contrôle. Ces essais sont excellents pour permettre d'estimer la résistance relative du béton dans les différentes parties d'un même ouvrage. L'utilisation de méthodes « non

destructives » s'avèrent indispensable lorsqu'il s'agit d'ouvrages existants et en fonctionnement et permet de suivre leurs évolutions au cours du temps. Leur utilisation a augmenté le niveau de sécurité de la construction et contribue également à améliorer sa planification. Tout cela, garde son économie dans les limites considérables. En plus, Ils sont aussi utilisés pour répondre à diverses autres questions telles que la détection des fissures, la caractérisation de l'état de corrosion des armatures dans le béton armé, la détermination de l'épaisseur des dalles de béton.

## **CHAPITRE 1 : DEFINITIONS ET BIBLIOGRAPHIE**

### **Partie 4 : Généralités sur le recyclage des déchets**

#### **I.13. INTRODUCTION**

Aussitôt que les hommes se sont sédentarisés, ils ont vite été confrontés au problème de leurs déchets. Le plus souvent, ils les ont abandonnés à la nature, parfois brûlés, rarement enfouis ou jetés à l'eau. Cette accumulation de déchets n'est pas conséquences sur l'environnement. En effet les déchets représentent une des origines des pollutions diverses, pollution des rivières, des nappes phréatiques, des espaces verts, de l'air.... En conséquence à la pollution, des perturbations des chaînes alimentaires et des maladies sont apparues, ce qui a poussé l'homme à se préoccuper de la qualité de son environnement et de penser au recyclage. Ces dernières années, on intègre à tous les projets de recherches et développement le critère du développement durable.

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.14. LES DECHETS DE LA CONSTRUCTION ET L'ENVIRONNEMENT**

Contre tous les avantages que procure 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 des 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 ( $\text{SO}_2$ ) émis à la combustion au niveau du four se transforme en  $\text{SO}_3$  dans l'atmosphère. En présence d'humidité il provoque des pluies acides.
- L'oxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ) produit pendant la combustion, continue à s'oxyder dans l'atmosphère pour former des pluies acides.
- Le monoxyde de carbone ( $\text{CO}$ ) produit au niveau du four à la combustion ou lorsque le four est mal réglé, ce gaz est considéré toxique. Le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) produit quand la combustion est complète. Le  $\text{CO}_2$  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 des 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.15. 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.15.1. 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.15.2. Différents type de déchets**

On distingue généralement diverses sortes de déchets dont :

**I.15.2.1. Les déchets ménagers et assimilés**

Constitués essentiellement des ordures ménagères, de déchets urbains (nettoisement), de déchets verts et d'encombrants auxquels il faut ajouter les déchets des commerces, des artisans et entrepreneurs, des écoles et autres établissements d'enseignement et des hôpitaux et autres établissements de soins.

**I.15.2.2. Les déchets des collectivités locales**

Qui comprennent surtout les boues des stations d'épuration, les déchets verts, les résidus du nettoyage des rues et des marchés, les déchets des administrations publiques (papiers et autres documents).

**I.15.2.3. Les déchets industriels**

On distingue généralement les déchets industriels banals (DIB), encore appelés non dangereux et les déchets industriels spéciaux (DIS) ou dangereux.

Déchets industriels non dangereux : Ces déchets apparentent beaucoup aux déchets ménagers puisqu'ils sont essentiellement constitués de cartons, de papiers, de plastiques, des bois, de métaux, de verre, de textiles, etc.

Déchets industriels dangereux : Ces derniers ne peuvent être éliminés ou stockés que dans des conditions particulières tous les déchets dangereux ne soient pas nécessairement récoltés, éliminés ou entreposés dans des conditions optimales.

On peut, par exemple, parler des déchets toxiques en quantités dispersées (DTQD). Ce sont des déchets générés par des activités de petites unités industrielles, artisanales et par les ménages dans lesquels on retrouve mêlés à des déchets banals, des restes de peintures, un thermomètre à mercure, un fond de flacon de White-Spirit, des gravats avec de l'amiante et toutes sortes d'autres substances toxiques, mais qui seront traitées avec des ordures ménagères.

Parmi les déchets dangereux, il faut bien entendu signaler les déchets hospitaliers, les déchets d'activité de soins et les déchets infectieux.

**I.15.2.4. Les déchets inertes**

Comme leur nom l'indique est une catégorie de déchets évidemment non biodégradables, mais surtout non susceptibles de brûler ou de produire quelque réaction chimique que ce soit seuls ou avec d'autres composés. Les gravats, les déchets de démolition entrent dans cette catégorie de déchets qui peuvent être mis en décharge ou servir de remblais ou de sous-couche pour des voies de circulation. Dans la réalité, ces matériaux ne sont pas anodins et en particulier, les eaux de pluie qui percolent au travers donnent lieu à des lixiviats pouvant polluer durablement des aquifères.

### **I.15.2.5. Les déchets fermentescibles**

Sont des déchets biodégradables, c'est-à-dire se décomposant plus ou moins rapidement sous l'action de micro-organismes aérobies ou anaérobies (bactéries, moisissures). Les ordures ménagères contiennent une part importante de matières fermentescibles que l'on nomme la fraction fermentescible des ordures ménagères. Cette part peut être extrêmement réduite par le tri sélectif dès lors que l'on procède, quand on le peut, au compostage chez soi de cette fraction.

### **I.15.2.6. Les déchets ultimes**

Est un déchet, résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans des conditions techniques et économiques du moment, notamment par de la part valorisable ou part extraction de son caractère polluant ou dangereux (loi du 15 juillet 1975). Cette définition est plutôt ambiguë dans la mesure, par exemple, où on pourrait considérer qu'un déchet pour lequel on faisait des efforts pour le rendre moins nocif, on ne les fasse plus du jour, par exemple, où pour des motifs de rentabilité économique, on estime plus intéressant de s'en débarrasser à Abidjan.

### **I.15.2.7. Les déchets radioactifs**

Les hôpitaux et les autres établissements de soins sont à l'origine de nombreux déchets. Certains de ces déchets sont banals et s'apparentent le plus souvent à des ordures ménagères (déchets de bureaux, de cuisines, restes de repas, déchets liés à l'entretien des locaux. D'autres déchets sont particuliers. Il s'agit principalement de déchets radioactifs, de déchets à risques infectieux et de médicaments

## **I.15.3. Gestion des déchets**

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.15.3.1. valorisation des déchets**

La valorisation de la matière issue du déchet regroupe les procédés suivants :

Le recyclage : réintroduction d'un déchet dans un cycle de production en remplacement total ou partiel d'une matière première vierge.

Le Réemploi : nouvel emploi du déchet pour un usage analogue à celui de sa première utilisation.

La régénération : procédé physique ou chimique qui redonne au déchet les caractéristiques permettant de l'utiliser en remplacement d'une manière première vierge.

La réutilisation : utilisation du déchet pour un dosage différent de son premier emploi, ou introduction de ce matériau dans un autre cycle de production que celui dont il est issu.

#### **I.15.3.2. valorisation énergétique**

Elle consiste à récupérer l'énergie du déchet en l'incinérant. L'incinération c'est la réalisation d'une combustion complète du déchet dans un four, adapté aux caractéristiques de ces déchets, à une température de 700 à 900 C°

#### **I.15.3.3. le stockage**

Si le déchet ne peut être valorisé, il est alors stocké dans des centres adaptés en fonction de leurs natures (dangerosité) : les centres de stockage des déchets ultimes (CSDU), anciennement centre d'enlèvement technique (CET).

### **I.16. DEVELOPPEMENT 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.

Les débris, avant d'être réutilisés, nécessitent de passer par une installation de recyclage (tri, concassage, criblage...) et de faire l'objet d'une identification préalable puis d'une étude de formulation permettant ainsi, d'en valider le réemploi envisagé (assises traitées, béton routier, remblais..).

### **I.16.1. Pourquoi le recyclage ?**

Depuis plusieurs dizaines d'années, le volume des déchets dans le monde produite 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'économiser 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 CO<sub>2</sub>, 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 1 l d'eau et 2,5 W d'électricité en plus de 15 g de bois

□.....

### **I.16.2. Les déchets dans le secteur du bâtiment**

Les secteurs des travaux publics et du bâtiment génèrent une masse importante de déchets. Les travaux publics génèrent surtout des déchets inertes (terre végétale, remblais, déblais...) le plus souvent réemployés sur ou près des chantiers qui les produisent.

Un point intéressant à noter, c'est que les travaux publics offrent une large palette de moyens de recyclage pour un certain nombre de déchets comme les pneumatiques, certains plastiques, des scories et des mâchefers, des MIOM, des sables de fonderie..etc.

Le bâtiment génère des déchets inertes, surtout en terrassement et en démolition. Il est très rare que l'entrepreneur puisse réutiliser ces déblais - remblais sur le chantier qui les produit.

Les autres types de déchets du bâtiment se classent en deux catégories : valorisables ou non.

Les déchets valorisables sont constitués de bois (traité ou non), des cloisons sèches, de métaux, de plastiques, de cartons et papiers.

Divers problèmes se posent sur les chantiers de démolition, et plus généralement sur les chantiers BTP, dans la mesure où la présence de produits dangereux peut être à la source de difficultés importantes quant au traitement ou recyclage des matériaux récupérés. C'est vrai pour l'amiante évidemment, mais aussi de certaines peintures, de goudrons dans le bitume, de traitements fongicides ou insecticides des bois de charpente, du plâtre s'il est stocké dans de mauvaises conditions, etc.

### **I.16.3. 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.

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 [27,28]. 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. Toutefois, 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.17. UTILISATION DES DECHETS DE CAOUTCHOUC DANS LE BATIMENT**

Le recyclage des déchets du caoutchouc issus des pneus ont 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.17.1. 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 débarrassés des parties métalliques et textiles pour le rendre apte pour l'utilisation. 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.17.2. 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.17. 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.18 : étapes du recyclage du caoutchouc*

### **I.17.3. 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.



La maison, dans laquelle il vit depuis 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.19. Exemple d'utilisation des caoutchoucs recyclés*

#### **I.17.4. Avantages d'utilisation du caoutchouc recyclé dans les bétons**

Le composite granulat en caoutchoucs dans le béton a des avantages 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.
- Destiné 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.17.5. 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.20. Stock de pneus usagés en Tarn-et-Garonne en 2007 (France)*

### **I.17.6. Les déchets du caoutchouc en Algérie**

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.



***Figure I.21. Chantier expérimental Pneusol à Bou-Smail***

Le nombre de pneus usés est en augmentation, chaque année, par le simple fait de l'augmentation du parc automobile. Par l'instauration de la loi relative à la gestion des déchets, l'élimination écologique des déchets spéciaux est devenue obligatoire.

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

*Chapitre II*

*Composition des bétons*

*&*

*Procédures expérimentales*

## **CHAPITRE II : *Composition des bétons***

### **&**

## **Procédures expérimentales**

### **II.1 Introduction**

Notre étude porte sur l'étude des propriétés d'un béton composé de granulats en caoutchouc à des pourcentages variables. Les GC sont introduits comme substituants des granulats naturels. On s'est fixé alors comme objectif d'étudier l'effet de cette substitution sur les propriétés des bétons. Deux paramètres sont alors étudiés.

Résistances à la compression à 28 jours

Suivie des déformations (longitudinales et transversales) des éprouvettes sous le chargement de compression

Mesure des vitesses à l'ultrason

Dans ce chapitre, nous avons présenté les critères de formulation de nos bétons « cahier des charges à respecter ». Nous avons également défini 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, conditions de fabrication et de conservation. Certaines des procédures expérimentales sont plus détaillées en annexes.

### **II.2 Cahier des charges pour la formulation des bétons**

La composition des bétons réponds à un cahier des charges souvent émis par le maître de l'ouvrage pour répondre à des exigences en terme 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 10 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 les propriétés d'isolation (thermiques et phonique) et l'absorption des chocs des bétons formulés avec ce genre de granulats.

Pour la formulation de nos bétons, on 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 égal à 1, c'est un critère souvent utilisé pour formuler des bétons à facilité de mise en place.

$D_{max} = 10$  mm, le choix de ce diamètre est dû au fait les GC utilisés 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

E/C = 0,50

## II.3 Matériaux et formulation

### II.3.1 Matériaux utilisés

Dans notre étude, nous avons utilisé des matériaux naturels locaux et ceux du recyclage, soit les granulats en caoutchoucs.

#### II.3.1.1 Ciment

Nous avons utilisé un seul type de ciment, soit le ciment type CPJ-CEMII/B 42,5N produit par LAFARGE.

#### II.3.1.2 Granulats

Dans cette étude nous avons utilisés deux types de granulats :

Granulats naturels : ils ont une forme semi-concassée, ils sont de deux classes granulaires.

- Sable 0/3
- Gravier 3/10.

Le gravier 3/10 utilisé est préparé au sein de notre laboratoire par le concassage de gros granulats à l'aide d'un concasseur électrique, puis écrété aux tamis 3 mm et 10 mm pour l'obtention de la classe 3/10.



**Figure II.1 granulats naturels utilisés pour notre étude.**

Granulats en caoutchoucs : ils sont de taille 2 à 3,5 mm, ils sont fournis prêt à l'emploi



**Figure II-2 Granulats en caoutchoucs**

### **II.3.2 Eau de gâchage**

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

### **II.3.2. Caractérisation des granulats**

Tous granulat dont on ne connaît pas de façon précise les performances en service doit être soumis à des essais au laboratoire afin de s'assurer de son acceptabilité.

#### **II.3.2.1 Echantillonnage**

L'échantillonnage permet de mesurer les 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 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 utilisé 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.3.2.2 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution proportionnelle de grains de différents diamètres, l'analyse se fait par tamisage.

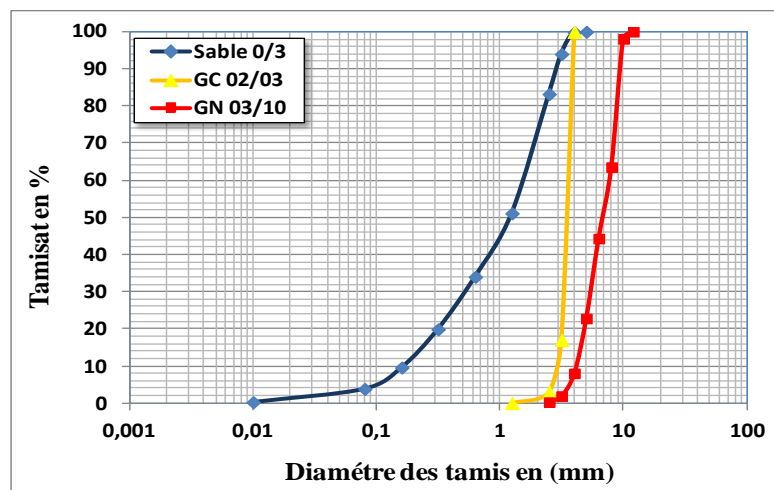
Pour cela, on procède au classement des grains sur une série de tamis emboîtés les uns sur les autres. Les dimensions des mailles des tamis sont décroissantes du haut vers le bas, le granulat est placé sur le tamis le plus haut et par vibrations, on répartit les grains sur les différents tamis selon grosseur.

La courbe granulométrique traduit la distribution pondérale élémentaire, c'est-à-dire les différents pourcentages des tamisât et refus des granulats élémentaire qui composent les matériaux étudié.

Elle est déterminée par l'essai de l'analyse granulométrique ; elle permet de diagnostiquer les paramètres des bétons à formuler.

Lorsqu'une courbe est régulière et continue, le squelette du béton formé va être compacte (meilleure compacité du squelette du béton), aussi la continuité de la courbe permet d'avoir des bétons à meilleurs fluidité avec aucun problème de ségrégation.

Dans ce qui suit, nous avons 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 3/10) et les granulats en caoutchoucs (GC).



**Figure II.3** Courbe granulométriques du sable 0/3, gravier 3/8 et des granulats en caoutchouc

D'après la figure II.3 en remarque que les granulats en caoutchoucs sont d'une classe granulaire 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'annexe 2.

### II.3.2.3 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). Le module de finesse est d'autant plus petit que le granulat est riche en éléments fins. 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.

Ce paramètre est important pour la détermination des caractéristiques des sables utilisée dans le béton. Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. Ainsi, trois cas peuvent se présenter :

Si :  $1.8 < MF < 2.2$  : le sable a une majorité d'éléments fins, le béton formulé avec ces sables nécessite un dosage en eau élevé.

- Si :  $2.2 < MF < 2.8$  : bon sable a béton
- Si :  $2.8 < MF < 3.3$  : le sable manque d'éléments fins (grossier) et le béton formulé avec ces sables perd en ouvrabilité
- En dehors de ces plages le sable doit être rejeté.

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.3.2.4. Absorption et masses volumiques des granulats

La mesure d'absorption est essentielle pour la formulation des bétons **NF P 18-555**. En effet cette mesure 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 (granulats 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 3/10	GC
<b>Masse volumique absolue (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,74	2,73	1,04
<b>Masse volumique réelle (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,68	2,64	1,04
<b>Masse volumique saturée à surface sèche (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,71	2,67	/
<b>Masse volumique apparente vibrée (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,945	1,592	0,270
<b>Absorption (%)</b>	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 nous avons 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 echantillon 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 , nous avons alors utilisé les résultats précédamment réalisés sur ces mêmes granualts dans le cadre d'un mémoire de master 2015. Nous avons 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.4 Formulation des bétons a étudié

### II.4.1 Application des conditions du cahier des charges

On a calculé la composition du béton de référence en respectant le cahier des charges que nous avons décrit précédemment. En revanche Les autres compositions des bétons testés sont calculées en faisant une substitution volumique du volume granulaire (sable + gravier 3/10) par le 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, nous avons réduit à la même fraction le sable et le gravier 3/10. 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  $m^3$  de béton et un rapport Eau efficace / Ciment égal à 0,5.

Les granulats utilisés au moment des gâchées étaient tous séchés, la quantité d'eau a donc été corrigée par l'eau d'humidification des granulats pour avoir la quantité d'eau total.

#### II.4.2 Nomenclature des bétons à étudier

Les pourcentages de substitution des granulats qu'on a utilisés sont (0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 25 %). 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	B15GC	B25GC
% GC	0	05	10	15	25
% GN	100	95	90	85	75

Nous avons travaillé sur des éprouvettes cylindriques de base 15 cm et d'une hauteur de 30 cm . Ainsi pour chaque composition nous avons prévu un volume de 18 litres.

#### II.4.3 Compositions des bétons à tester

Les compositions de 1  $m^3$  de béton de différentes 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 pour 1m3 de béton des différentes formulations**

	BR	B05GC	B10GC	B15GC	B25GC
Ciment	350	350	350	350	350
Sable 0/3	825	784	743	702	619
GV 3/10	825	784	743	702	619
GC	0	25	51	76	127
Eau totale	195	195	195	195	195

Cinq bétons sont testés. Le premier étant le béton de référence BR.

## II.5 Procédures expérimentales et conditions de conservation

Pour uniformiser les essais, nous avons décidé de travailler avec des granulats secs, cela pour la confection des bétons. Il a donc fallu mettre en étuve tous les granulats pour sécher pendant au moins 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.5.1 Fabrication des bétons et confection des éprouvettes

pour la préparation des éprouvettes nous avons adapté le protocole suivant :

En premier temps, préparer le matériel et les matériaux nécessaires.

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.

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

- 1- Humidification du malaxeur avec le quel on travaille.
  - 2- L'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 plastiques 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.
- Pour rappel : les moules utilisés pour la confection des éprouvettes sont de forme cylindrique (15\*30).conformément à la norme NF P18-406 pour la résistance mécanique à la compression.



Figure II.4 confection des éprouvettes, protection, marquage et immersion dans l'eau.

## II.5.2 Caractérisation des éprouvettes de bétons à 28 jours

Il est à rappeler que pour chaque composition sont réalisées trois éprouvettes. Pour les trois éprouvettes à l'âge de 28 jours, on a effectué la campagne suivante :

- Au 28<sup>ème</sup> jours les éprouvettes sont systématiquement pesées
- Après le pesage les éprouvettes sont d'abord testées à l'ultrason
- En dernier, les éprouvettes sont équipées pour les mesure de déformations,
- Elles sont sollicitées en compression jusqu'à la rupture.

### II.5.2.1 Essai à l'ultrason

L'essai à l'ultrason consiste à déterminer la vitesse de propagation d'ondes sonique à travers un élément en béton. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée. Le contrôle par ultrasons permet, sans nuire à l'intégrité de l'élément testé, de caractériser les défauts qu'elle contient et de porter ainsi un jugement sur l'acceptation des pièces réalisées.

#### *Description de l'appareil de mesure*

Dans notre essai, nous avons utilisé l'appareil de test ultrasonique Pundit-Lab (Figure II.4). L'appareil est constitué de :

- a. Un testeur ultrasonique
- b. Deux transducteurs (émetteur et récepteur) ;
- c. Un barreau de calibrage ;
- d. Deux câbles de connexions
- e. Un gel de contact
- f. Une centrale d'acquisition des données.



**Figure II.5. : Appareil de test ultrasonique Pundit-Lab**

Avant de commencer, l'essai il faut régler l'appareil de mesure et préparer les éprouvettes à tester.

- calibrage de l'appareil : l'appareil doit être remis à zéro en utilisant régulièrement la barre de calibrage et en particulier si la fréquence du transducteur est modifiée ou si les câbles sont changés. La valeur de calibrage attendue ( $\mu\text{s}$ ) est marquée sur la barre de calibrage.
- Coupler les transducteurs avec la barre de calibrage en appliquant le couplant sur les transducteurs et les deux extrémités de la barre et en appuyant sur la barre de calibrage de  $25 \mu\text{s}$  (code article 710 10 028) (voir la figure III-6).
- Le surfacage des éprouvettes : la surface des éprouvettes doit être lisse pour faciliter le passage des ondes ultrasonique, cette étape est très importante pour que les transducteurs soient en contact avec le béton.
- La préparation des points de mesure : Cette opération consiste à marquer les points d'essais afin de centrer les transducteurs dessus (voir la figure III-6) (on peut marquer ces points avec de la craie ou avec un crayon), en évitant d'appliquer les sondes sur des cavités, ainsi les enduire de gel pour assurer le couplage acoustique.



**Figure II.6.: calibrage de l'appareil, marquage des points d'essai**

Ainsi, on place les câbles qui relient les transducteurs et l'afficheur, et on met les transducteurs aux milieux des deux faces opposées de l'éprouvette, enfin on lit le temps de passage sur l'écran.



**Figure II.7. Essai à ultrason transmission directe.**

L'appareil ultra-sonique génère des ondes ou des impulsions "ultra-soniques" qui sont transmises au béton par un transducteur mis au contact avec la zone à évaluer. Le temps de propagations des ondes à travers le béton est visualisé sur un afficheur digital de l'appareil.

Dans notre cas, nous avons utilisé la disposition directe pour les transducteurs car cela permet une transmission maximale du signal. Nous avons placé les transducteurs (émetteur et récepteur) sur deux faces opposées, au même niveau (Figure II.7). La longueur de trajet est la distance entre le centre des deux faces opposées, dans notre cas elle correspond à la longueur de l'éprouvette qui est de 300 mm.

### **II.5.2.2 Mesure des déformations des éprouvettes**

Dans les cas courants, le béton est défini du point de vue mécanique par sa résistance à la compression à 28 jours d'âge. Cette dernière correspond à la charge de rupture (charge maximale enregistrée) au cours de l'essai d'écrasement sous une contrainte normale axiale. La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette (Figure II.8). La presse utilisée est d'une capacité maximale de 2000 kN (voir figure ci-dessous).

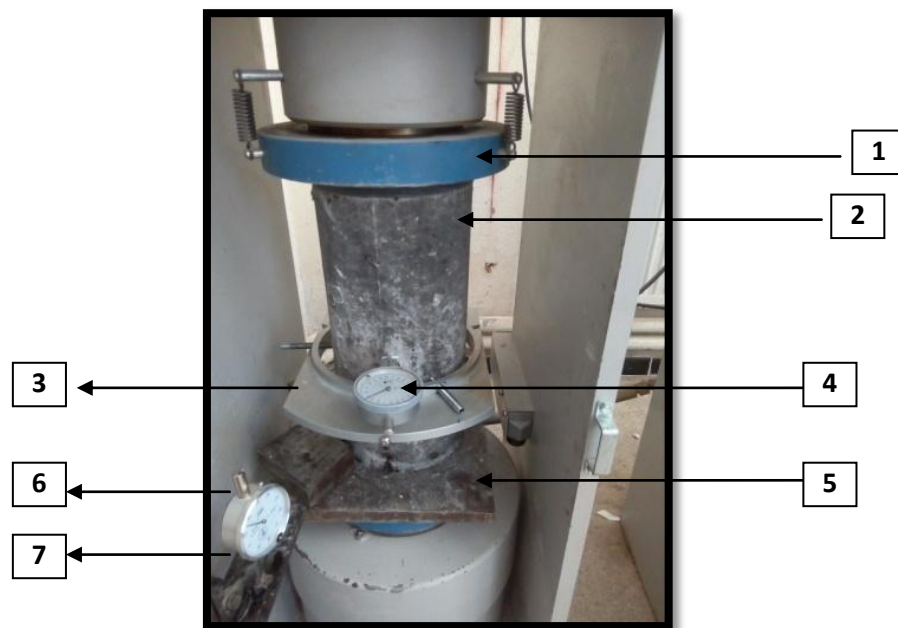
Or, pour le cas de notre étude, on a souhaité également faire un suivi de déformations (longitudinales et transversales) des éprouvettes en cours de chargement.

Les éprouvettes d'essai sont donc exploités pour à la fois enregistrer les déformations, mais aussi pour à la fin de l'essai avoir la charge de rupture.

### **II.5.2.3 Mesure des déformations à 28 jours**

Pour faire cet essai nous avons placé aux éprouvettes un anneau à mi hauteur. Ce dernier contient un comparateur transversal qui permet d'indiquer les déformations transversales de l'éprouvette.

Pour le suivi de la déformation longitudinale, nous avons fixé sur le plateau mobile de la presse une plaque métallique solide. Nous avons alors placé un deuxième comparateur à l'extérieur, ce deuxième comparateur est mis en contact de la plaque métallique mobile. Ainsi, pendant l'essai, la plaque métallique bouge avec le déplacement du plateau mobile qui accompagne la déformation de l'éprouvette. Et le comparateur réglé à la plaque indique donc le mouvement de la plaque et donc la déformation de l'éprouvette.



- Figure II.8. : Essai de déformation

1 – Plateau fixe de la presse

2 – Epreuve de l'essai

3 - -Anneau de fixation du comparateur des déformations transversales (fixé de manière à avoir la tête du comparateur à mi hauteur

4 - Comparateur des déformations transversales sa tête affleure la surface de l'éprouvette avant l'essai, il est mis à zéro avant l'essai.

5 - Plateau mobile de la presse

6 - Comparateur des déformations longitudinales, sa tête affleure la surface de la plaque métallique qui accompagne le mouvement du plateau mobile de la presse, il est mis à zéro avant l'essai.

7 – plaque métallique, fixée au plateau mobile de la presse ; elle bouge verticalement en suivant la déformation longitudinale de l'éprouvette, elle sert d'appuis à la tête du comparateur qui indique directement le mouvement de cette plaque.

La lecture des déformations se fait directement sur les comparateurs pour chaque palier de 20 kN. La vitesse de chargement de la presse est fixée à 0.5 kN/s. L'essai est mené jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

Les résultats sont par la suite donnés sous forme d'un tableau qui indique pour chaque palier de chargement sa déformation longitudinale et sa déformation transversale.

### **II.5.2.3 Résistance à la compression à 28 jours**

La résistance à la compression à 28 jours est obtenue à la rupture des éprouvettes équipées pour la mesure des déformations, elle est évaluée selon la norme NF P 18-406, avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s.

# *Chapitre III*

## *Résultats & Interprétations*

## CHAPITRE III : *Résultats & Interprétations*

### III.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats et l'exploitation des différentes parties étudiées.

Il est à préciser que notre programme expérimental est réalisé sur des éprouvettes cylindriques (diamètre 15 cm et hauteur de 30 cm).

Les résultats d'essais sont présentés dans ce chapitre. Le programme expérimental peut être subdivisé en trois parties complémentaires qui sont :

Dans la première partie, nous avons présenté les résultats obtenus sur l'influence de substitution des granulats en caoutchouc sur les masses volumiques ainsi que sur la résistance à la compression à l'âge de 28 jours.

Dans la seconde partie, nous avons présenté les propriétés du comportement mécanique après rupture (comportement pseudo-ductile), les déformations des bétons et leur module d'élasticité.

Dans la troisième partie, nous avons présenté les résultats de l'Ultrasons, l'évolution de la vitesse de propagation d'onde en fonction du pourcentage des granulats en caoutchouc.

A la fin de chacune des parties nous avons essayé d'établir des corrélations entre les différents paramètres d'étude.

## Partie 1 : Résultats de résistances mécaniques à la compression

### III.2. RESULTATS DES ESSAIS MENES SUR LES BETONS

#### III.2.1. Résultats des masses volumiques des bétons durcis

Pour chaque béton, nous avons confectionné trois éprouvettes. Au 28<sup>ème</sup> jour, avant tout écrasement, les éprouvettes sont systématiquement pesées. Nous avons par la suite calculé la masse volumique des différents bétons, en utilisant la moyenne des pesées. Cette dernière est calculée en utilisant la formule suivante :

$$X_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^3 X_i}{3}$$

Avec : X correspond à la variable mesurée.

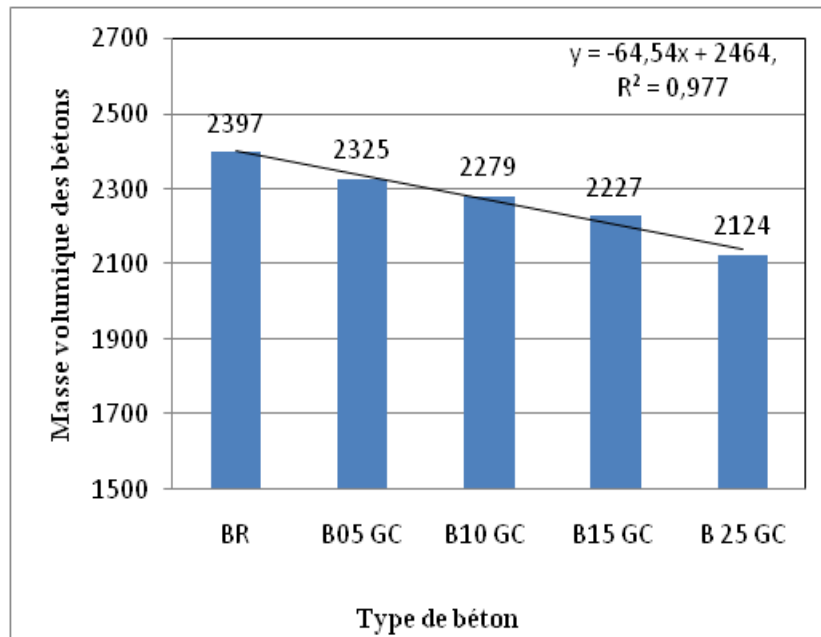
Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau III.1 suivant. Le diamètre maximal de nos granulats est de 10 mm. Nous avons fait une substitution volumique des GN par les GC. Les pourcentages testés sont (0 % ; 05 % ; 10 % ; 15 % et 25 %).

**Tableau III.1. Masses des éprouvettes (kg) et masses volumiques des bétons durcis (kg/m<sup>3</sup>)**

	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3	Moyenne	Masse volumique	% de baisse de Mv
BR	12,70	12,74	12,67	12,70	2397	
B05 GC	12,31	12,32	12,33	12,32	2325	3%
B10 GC	12,12	12,04	12,07	12,08	2279	5%
B15 GC	11,76	11,81	11,83	11,80	2227	7%
B 25 GC	11,24	11,27	11,25	11,25	2124	11%

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

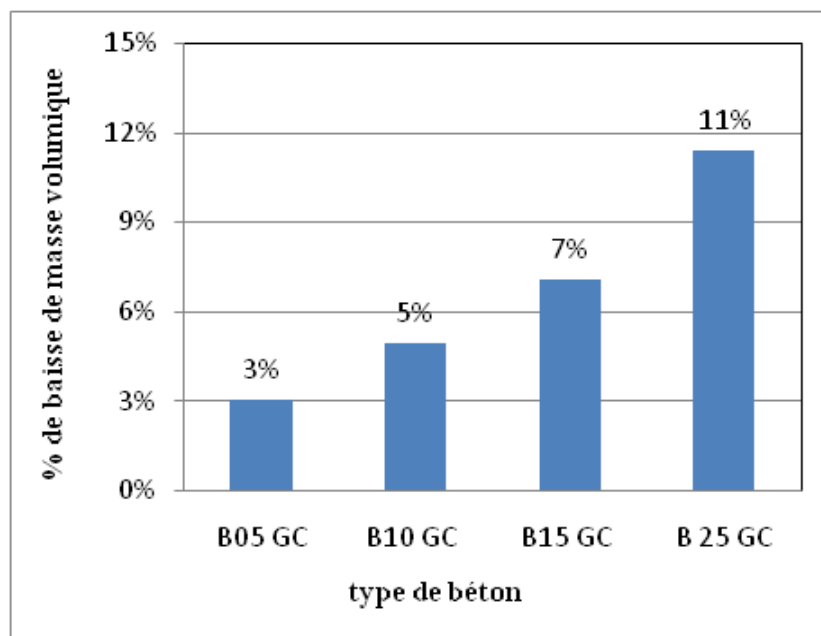
Pour faciliter l'interprétation de ces résultats, nous représenté sur la figure III.1 suivante les résultats des masses volumiques en fonction du pourcentage de substitution des GN par des GC. Nous avons également schématisé la courbe de tendance obtenue.



**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 2397 kg/m<sup>3</sup> à un béton de B25GC à 25 % du volume en GC à 2124 kg/m<sup>3</sup>, soit une baisse de masse volumique de près de 11 % 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 tau de substitution des GN par les GC.

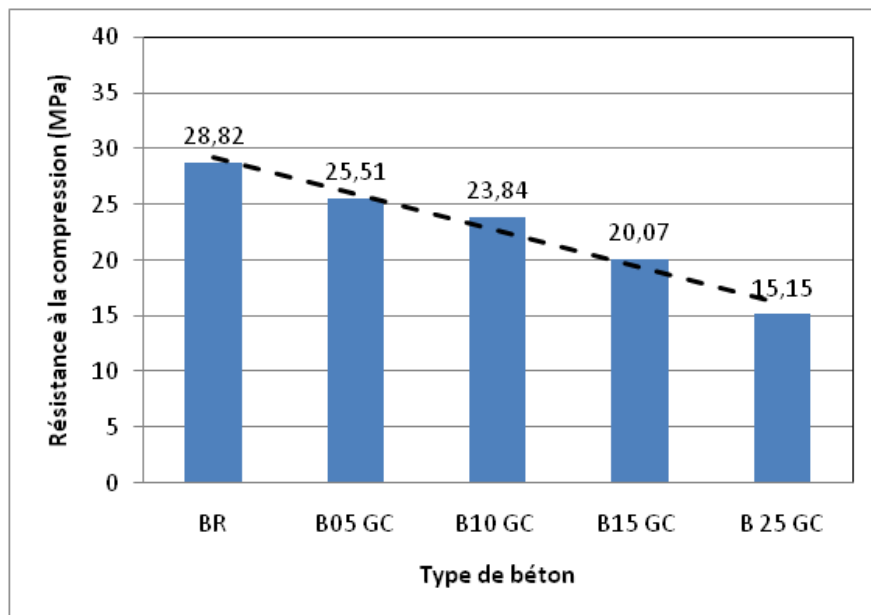
### III.2.2. Résultats des résistances à 28 jours

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

**Tableau III.2. Résistance moyenne à la compression à 28 jours (MPa)**

	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3	Résistance moyenne	% de baisse des résistances
BR	23,55	31,92	30,98	28,82	/
B05 GC	28,08	24,13	24,32	25,51	11 %
B10 GC	25,37	23,68	22,47	23,84	17 %
B15 GC	19,37	21,25	19,6	20,07	30 %
B 25 GC	14,27	15,23	15,94	15,15	47 %

Pour une meilleure appréciation des résultats nous avons 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 d'histogramme.



**Figure III.3. Histogramme des résistances à la compression à 28 jours des bétons**

D'après les résultats de la figure III.3 on constate que la résistance des bétons diminue proportionnellement avec l'augmentation du pourcentage en GC dans les bétons. On passe d'une résistance à 28 jours de 28,82 MPa pour le béton à 100 % de GN à une résistance de 15,15 MPa pour

le béton B 25 GC, soit une baisse de 47 % de la résistance à 28 jours pour un volume solide en granulats en caoutchouc de 25 % du volume solide des granulats naturels.

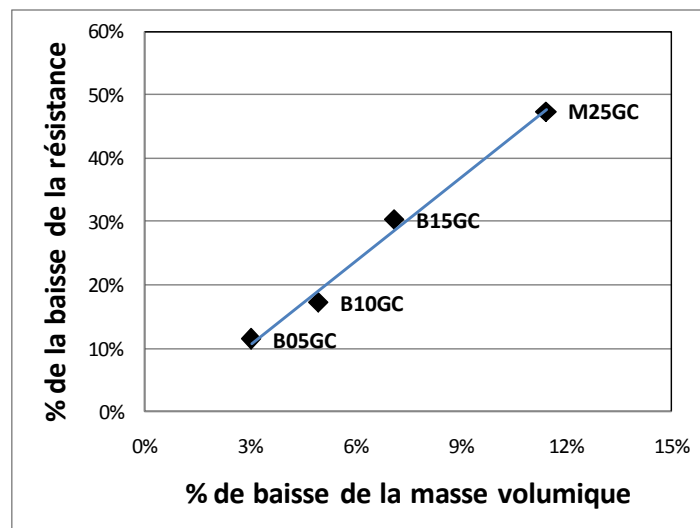
La tendance de baisse sur cette plage de substitution (soit entre 0 et 25 % de substitution) est de type linéaire, son équation peut être exprimée comme suit :

$$R_{c28j} = -3.28 \times (\% GC) + 32.5 \quad (\text{MPa})$$

La précision de cette courbe de tendance est de 0,971.

### III.2.3. Corrélation entre la Rc à 28 jours et le pourcentage en CG

Pour une meilleure exploitation des résultats nous avons cherché à établir la courbe de corrélation entre le pourcentage de baisse de la résistance des bétons en fonction du % de baisse de la masse volumique. La courbe est représentée sur la figure III.4 suivante.



**Figure III.4.** % de baisse de la Rc à 28 jours en fonction du % de baisse de la masse volumique

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.

## **Partie 2 : Résultats des vitesses à l'Ultrason**

### **III.3. RESULTATS DES ESSAIS MENES SUR LES BETONS**

En plus de l'essai d'écrasement pour l'appréciation des propriétés de nos bétons, nous avons également travaillé avec un essai non destructif (mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonique de travers l'échantillon de béton).

Au 28<sup>ème</sup> jour, avant écrasement et après les pesées ; les éprouvettes de chacun des bétons sont testées à l'ultrason. Il est à noter qu'à cette étape les éprouvettes sont toutes dans le même état d'humidité (Saturé en eau).

Les vitesses des ultrasons ont été déterminées par mesure du temps de parcours sur une série de trois éprouvettes pour chaque béton utilisé.

Les mesures des vitesses à l'ultrason ont été réalisées en mode de transmission directe. Ce mode fournit le maximum d'énergie. Elles sont réalisées par un testeur ultrasonique 58-E0048 (marque Control), comprenant un transducteur de transmission et un transducteur de réception de 54 kHz de fréquence. Un type de transducteur de diamètre  $D = 49.5$  mm. Les transducteurs sont mis en contact sur les faces des éprouvettes par l'intermédiaire d'un couplant. Le temps de propagation à travers le béton est visualisé sur un afficheur digital. La longueur parcourue est de 300 mm et la dimension transversale est de 150 mm, Fiches technique Pundit Lab[25].

#### ***III.3.1 Calcul de la vitesse de propagation et exploitation***

On produit un train d'impulsion de vibration au moyen d'un émetteur appliqué sur l'une des faces de l'élément à contrôler. Après avoir franchie une longueur de parcourt ( $L$ ) dans le béton, l'impulsion de vibration est convertie en un signal électrique à l'aide d'un récepteur et

la base de temps électronique permet de mesurer le temps de propagation des ondes ultrasonores (T). La vitesse de propagation des ultrasons est donnée par la formule suivante :

$$V=L/T$$

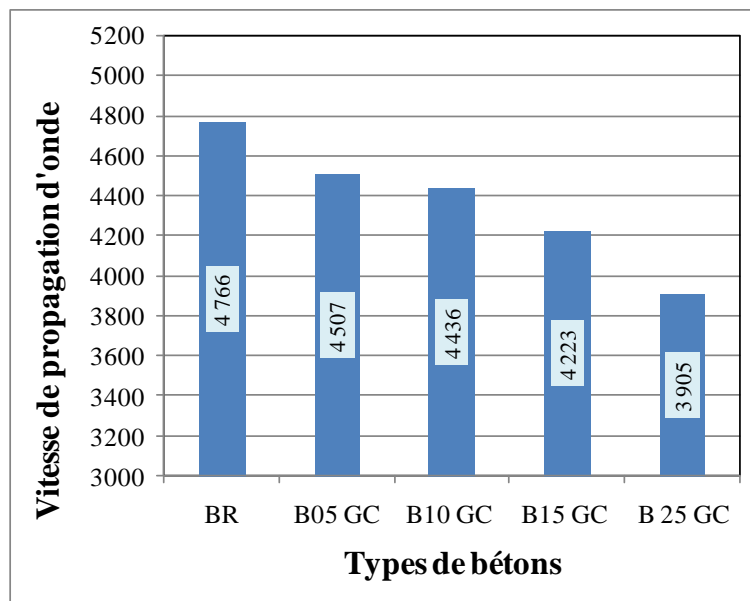
Les moyennes des résultats des vitesses obtenues sur les différentes éprouvettes sont données dans le tableau suivant.

**Tableau III.3. Vitesse de propagation des ondes ultrasoniques dans les bétons**

	V (m/s)	% de baisse des vitesses
BR	4766	
B05	4507	5%
B10	4436	7%
B15	4223	11%
B25	3905	18%

Dans le même tableau sont donnés les pourcentages de baisse des vitesses, valeurs calculées par rapport au BR.

Sur l'histogramme de la figure suivante sont représentés les résultats des vitesses (m/s).



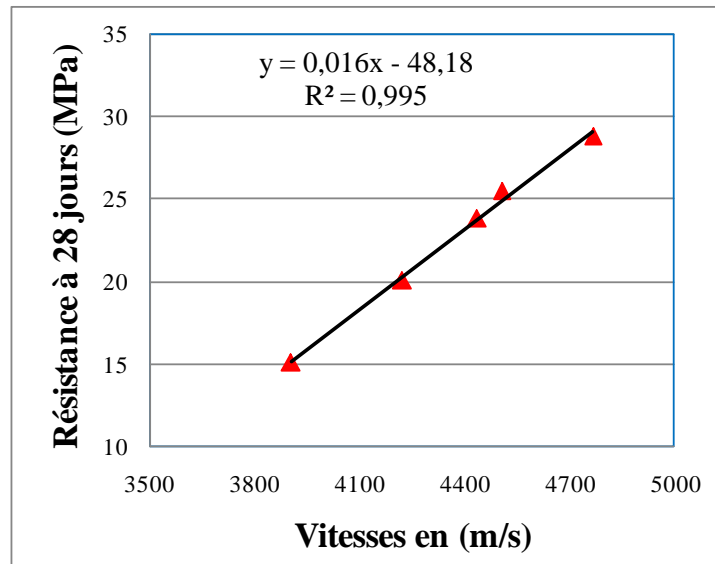
**Figure III.5 : Histogramme des vitesses à l'ultrason au 28ème jour.**

Les résultats de la figure montrent que les vitesses à l'ultrason baissent avec l'augmentation du pourcentage de substitution des GN par les GC. Plus il y a de GC moins les ondes vont vite. Dans ces cas les ondes sont retardées par la présence des GC qui sont de nature différente que celle des autres composants du béton.

Ainsi les vitesses passent de 4766 m/s pour le BR à 3905 m/s pour le béton à 25 % de GC, soit une baisse de 18 %.

### III.3.2 Corrélation des vitesses de propagation des ondes ultrasoniques

Pour une meilleure exploitation des résultats nous avons cherché à établir la corrélation entre la vitesse de propagation d'onde et les résultats de résistance à la compression à 28 jours. Nous avons alors représenté sur la figure la courbe de corrélation entre les vitesses et les résistances à 28 jours.



*Figure III.6 : Corrélation entre les résistances à la compression et les vitesses à l'ultrason (à 28 jours).*

Dans la pratique l'essai à l'ultrason est désigné comme l'essai non destructif qui permet d'apprécier les propriétés mécaniques des bétons, notamment la résistance à la compression.

Tel que l'on vient de décrire les choses, pour chaque béton correspond une résistance mécanique caractéristique qui correspond à une vitesse à l'ultrason bien définie. Et d'après la figure précédente les deux variables sont liées par une courbe de corrélation de type linéaire (la vitesse et la résistance varient proportionnellement au pourcentage de GC). L'équation donnée sur la figure permet le calcul de la résistance (en MPa) à partir de la mesure à l'ultrason en (m/s) ; les deux variables sont mesurées au 28<sup>ème</sup> jour.

## **Partie 3 : Résultats des déformations**

### **III.4. INTRODUCTION**

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 de déformation d'un béton composé en partie de ces granulats ? Comment évolue la loi de comportement de ce composite à pourcentage évolutif en GC ?

A l'écrasement les éprouvettes sont équipées de comparateurs pour suivre les déformations des éprouvettes. Un comparateur pour les déformations longitudinales.

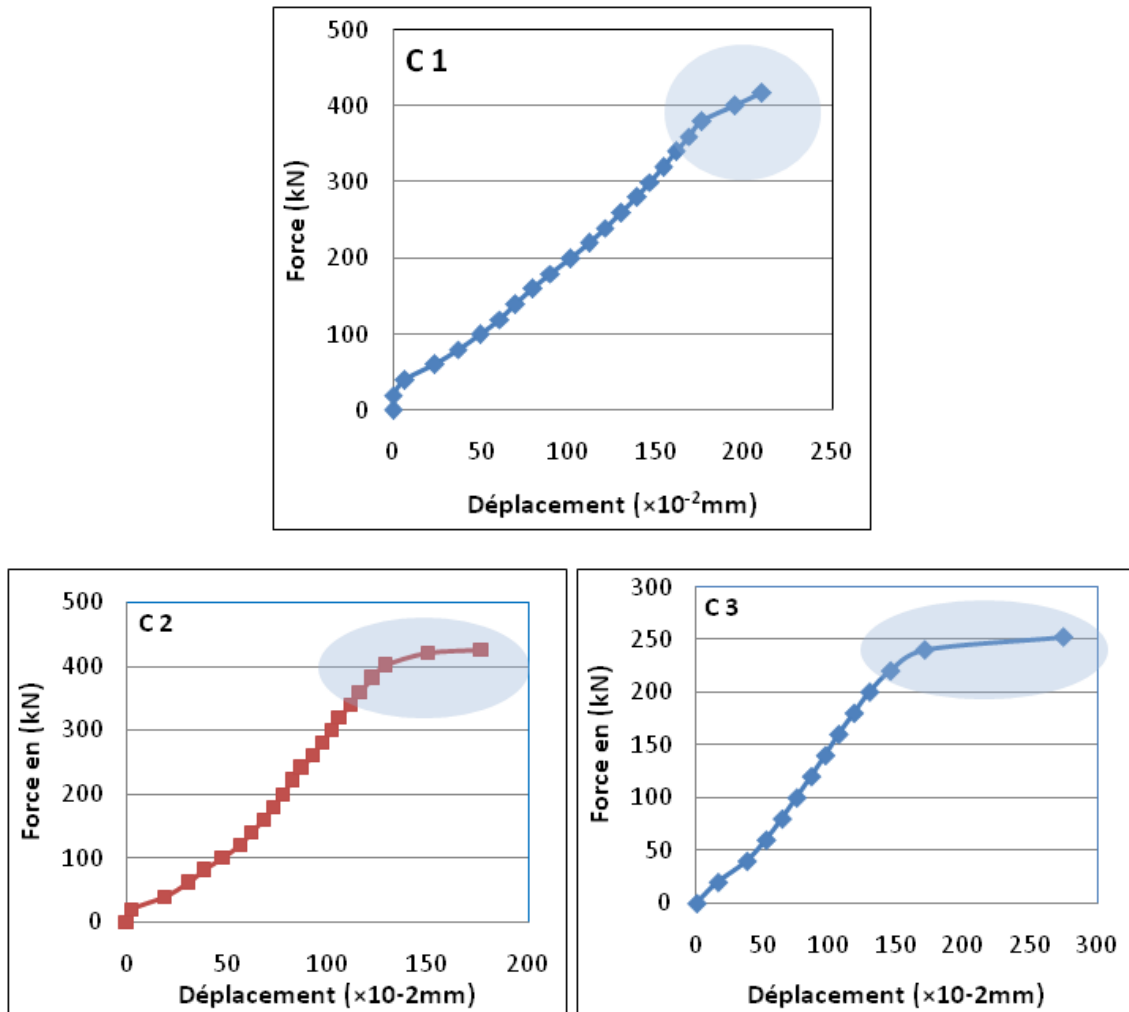
Sans cette partie de ce chapitre nous avons donné les résultats obtenus et nous avons essayé de donner une interprétation à ces résultats.

### **III.5 Résultats des essais de déformations longitudinales**

Dans cette partie les résultats sont exprimés directement : force de chargements en kN(en fonction des déplacements enregistrés. On rappelle que ces variables peuvent être exprimées sous forme de contrainte-déformations en utilisant les propriétés géométriques des éprouvettes (Eprouvettes cylindriques de hauteur  $h = 30$  cm, diamètre égal à 15 cm).

#### **III.5.1. Exemples de courbes de déplacement obtenus**

Pour ne pas encombrer le document on présente dans un premier temps les deux sortes de courbes obtenues. Les autres courbes sans de mêmes allures, leurs paramètres de caractérisation comme le module sont récapitulés sous forme d'un tableau comparatif.



**Figure III.7 : Exemples de courbes de force (kN) fonction des déplacements (mm) enregistrés.**

Les trois sortes de courbes obtenues se caractérisent par au moins deux paramètres caractéristiques à chacune des courbes. Ces derniers sont utilisés pour la comparaison des bétons entre eux. Les paramètres sont :

- La pente de la courbe, appelé aussi module de déformation élastique (déplacement) qui correspond à la phase linéaire de la courbe.
- La phase plastique (ou bien) post-élastique qui vient juste après la phase linéaire (appelée aussi dans certains ouvrages pseudo-ductile), qui présente une autre sorte de pente et qui est plus au moins allongée, selon les cas.

**Note** : Nous avons noté pour la suite de ce document  $D_I$  projetée horizontale du déplacement correspondant à cette phase ductile. Et  $E_d$ , module de déplacement (pente de la phase élastique).

### III.5.2. Interprétation des courbes

Ainsi, pour les bétons de cette étude les valeurs de  $D_I$  minimales enregistrées vont de 0 à Selon les graphes de la figure précédente la phase  $D_I$  peut aller de 0 à 1 mm.

Selon les définitions présentées au chapitre 1 : lorsque cette valeur vaut 0 cela correspond à un comportement purement élastique de l'éprouvette ; la rupture qui coïncide directement à la fin de la phase élastique. Et lorsque cette valeurs augmente, le béton continu de se déformer après cette phase élastique sans incrémentation de chargement. Cette déformation est irréversible, la rupture n'a pas encore lieu avant ce déplacement limite.

### III.5.3. méthode de calcul des caractéristiques des courbes Forces-Déplacements

Avant de calculer les paramètres de caractérisation des courbes des bétons, nous avons superposé sur un même graphique une courbe forces-déplacements pour chacun des bétons.

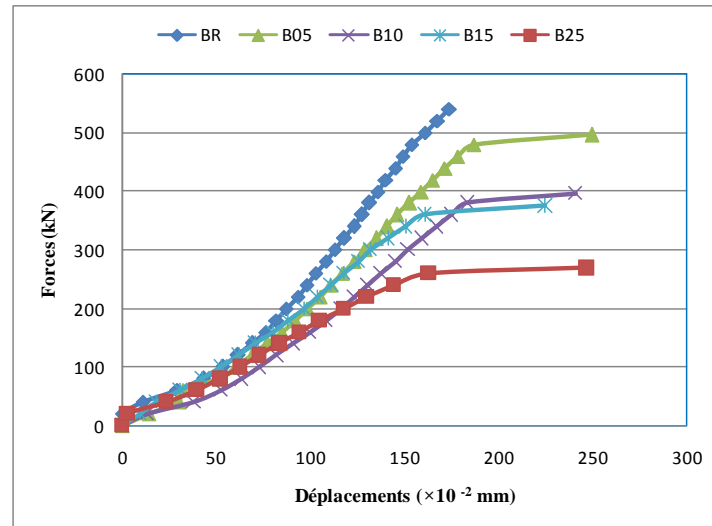


Figure III.8 : superposition des courbes de force fonction des déplacements enregistrés.

Pour faciliter la comparaison des courbes entre elles, nous avons alors calculés les paramètres décrits ci-haut pour toutes les courbes (3 courbes par béton). Les résultats sont par la suite comparés entre eux.

#### III.5.3.1 Calcul du module de déplacement

Ainsi pour faciliter la comparaison entre les différents bétons de cette étude, nous avons calculé pour chacun des bétons sa pente pour qui on a donné l'appellation module de déplacement ( $E_d$ ). Et pour la phase pseudo-ductile nous avons calculé le déplacement de ductilité ( $D_I$ ).

La pente  $E_d$  est calculée avec la relation :

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

▮  $F$  : Différence de forces calculée entre deux points choisis dans la partie linéaire de la courbe, localisée vers la mi-hauteur. ▮  $d$  : déplacements des points choisis pour le calcul de cette pente.

### III.5.3.2 Calcul du déplacement ductile (DI)

DI : pour qui on a donné l'appellation déplacement ductile, il est calculé directement des valeurs de déplacement enregistrées. Il correspond au palier où les chargements sont quasi stationnaires alors que le déplacement est très important.

### III.5.4. Caractéristiques des résultats de forces-déplacement des différents bétons

Dans cette partie nous avons récapitulé les paramètres de caractérisation des courbes forces-déplacements enregistrées pour les 05 bétons étudiés, formulés on substituant en partie des granulats naturels par des granulats en Caoutchouc.

Pour chaque composition trois éprouvettes sont testées. Nous avons alors calculé sur chacune des éprouvettes ces caractéristiques, par la suite nous avons calculé les moyennes des valeurs obtenues.

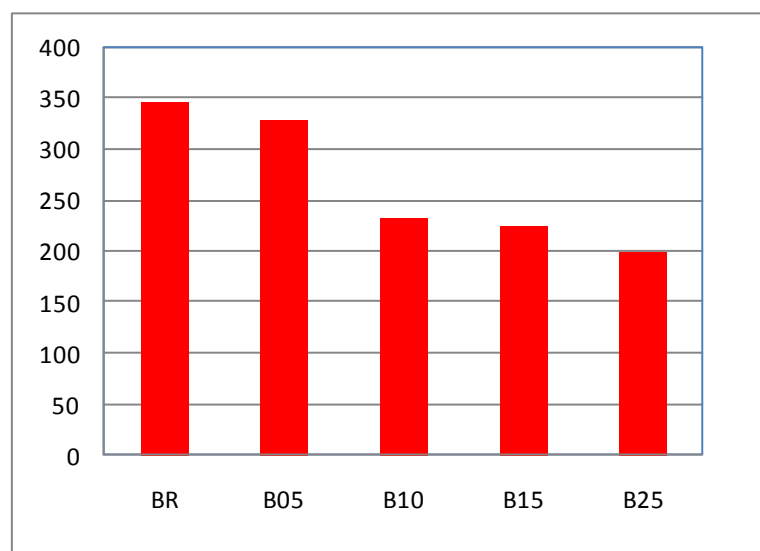
#### III.5.4.1 module de déplacement des bétons

Les valeurs moyennes des modules de déplacement  $E_d$  obtenues pour chacun des bétons sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau III.4 : Tableau récapitulatif des modules de déplacements**

Bétons	BR	B05	B10	B15	B25
Ed (kN/mm)	346	329	232	226	200
% de baisse	/	5,2%	33,0%	34,8%	42,3%

Ces résultats sont tracés sous forme d'un histogramme sur la figure suivante.



**Figure III.9 : histogramme représentatif des modules de déplacements (kN/mm)**

Ainsi, tel que représenté sur la figure précédente le module de déplacement des bétons est inversement proportionnel au pourcentage de granulats en caoutchouc dans le béton.

Entre le béton de référence BR et le béton B05GC la baisse est d'environ 5 %. Au delà de ce pourcentage la baisse obtenue est beaucoup plus importante, elle est d'environ 42 % pour le B25 GC.

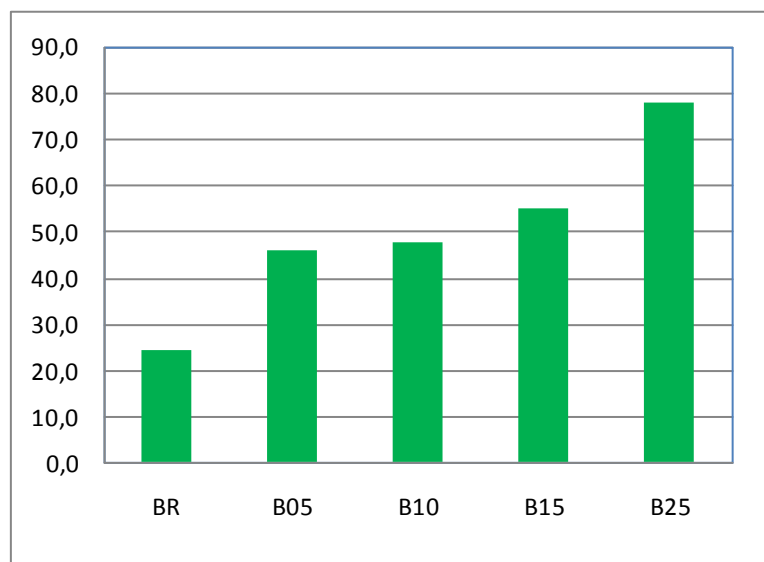
### III.5.4.2 déplacement ductile des bétons

Les valeurs moyennes des déplacements ductiles DI obtenues pour chacun des bétons sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau III.5 : Tableau récapitulatif des déplacements ductiles**

Bétons	BR	B05	B10	B15	B25
DI ( $\times 10^{-2}$ mm)	24,1	46,0	47,6	54,9	78,0
% de Hausse	/	91%	98%	128%	224%

Ces résultats sont tracés sous forme d'un histogramme sur la figure suivante.



**Figure III.10 : histogramme représentatif des déplacements ductiles ( $\times 10^{-2}$  mm)**

Ainsi, tel que représenté sur la figure précédente le déplacement ductile augmente proportionnellement avec le pourcentage des GC dans les bétons.

Entre le béton de référence BR et le B05GC la hausse est d'environ 100 % (la valeur est doublée). Plus le pourcentage de GC augmente dans les bétons et plus cette hausse est importante ; elle est d'environ de 224 %.

**III.5.5. Etat de dégradation des éprouvettes**

À l'écrasement des éprouvettes, nous avons constaté que plus le % des GC dans les éprouvettes est grand moins les éprouvettes sont dégradées. Les éprouvettes pour qui le pourcentage en GC est important sont dépourvues de fissures (moins endommagées).

**BR****B05 GC****B10 GC****B15 GC****B25 GC**

**Figures III.11 Etat d'endommagement des éprouvettes de bétons après rupture.**

Les éprouvettes à 25 % de granulats en caoutchouc ne contiennent presque pas de fissures à l'œil nues. 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. Sur cet aspect de ce matériau il y a donc des choses à découvrir.

### III.6 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 25 % de substitution en GC nous avons observé une baisse des résistance à la compression d'environ 50 % .

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 20 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 dans celle des granulats naturels. Le B25 GC la baisse en masse volumique est d'environ de 11 %.

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 B25 GC on a une baisse de 50 % contre une baisse en masse volumique de 11 % uniquement).

Les vitesses de propagation des ultra-sons sont inversement proportionnelles au pourcentage de GC dans le béton. Plus le béton est riche en GN, plus les ondes vont moins vite.

En dernier, on a constaté que plus le pourcentage en GC est grand moins le module de déplacement est important.

Pour l'aspect déplacements (déformations), plus le béton est riche en granulats en plus il présente un palier de ductilité plus large, donc le béton ne rompt pas directement à la fin de la phase élastique.

# *Conclusion Générale & Perspectives*

## Conclusion générale

L'objectif principal de notre travail est d'étudier les potentialités de l'incorporation des granulats en caoutchouc (notés GC) dans les bétons. Pour se faire, nous avons alors travaillé sur trois parties différentes :

- Résistance à la compression à 28 jours des bétons composés de différents pourcentages en GC.
- Vitesses de propagation des ondes ultrasonique des bétons.
- Suivie des déformations sous une sollicitation de compression des bétons par l'intermédiaire de comparateurs.

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 :

L'utilisation des granulats en caoutchouc dans le béton provoque une baisse des résistances mécanique à 28 jours des bétons. La résistance est inversement proportionnelle au pourcentage de substitution des GN par les GC. A 25 % de substitution en GC nous avons observé une baisse d'environ 50 % de la résistance par rapport au béton de référence formulé sans GC.

Les courbes de forces déplacement, nous ont permis de conclure sur le fait que le module de déplacement (déformation) des ces bétons est inversement proportionnel à la quantité de granulats en caoutchouc introduite.

Aussi, on a constaté que plus les bétons sont riches en granulats en caoutchouc plus leur comportement devient ductile, il présente un palier de déformation post-élastique assez prolongé. L'éprouvette atteint sa limite de résistance mais ne se démolie pas.

Cette étude reste restreinte, en perspective, il sera intéressant de trouver des possibilités d'associer à ces études expérimentales un aspect modélisation pour d'éventuelles applications structurelles, mais aussi sur d'autres aspects comme l'isolation phonique, thermique, etc.

# *Références Bibliographiques*

### *Références bibliographiques*

- [1] Neville A., « Propriétés des bétons » édition 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] Dreux G., Festa J., « Nouveau guide du béton et de ses constituants » 8ème édition Eyrolles 2002.
- [5] Dupain N R., Saint arroman J.C. « granulats, sols, ciments et bétons », 4<sup>ème</sup> édition Casteilla 2009.
- [6] De Larrard F. « Structures granulaires et formulation des bétons », édition Laboratoire central des ponts et chaussées, 2000.
- [7] De Larrard F., Ferraris C. « Béton frais remanié I et II et III », BLPC. N° 213 pp 73-89, Jav-fév 1998.
- [8] 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.
- [9] Aitcin P. C., S. JIANG, B. KIM, P. NKINAMUBANZI, N. PETROV, « l'interaction ciment /superplastifiant cas des polysulfonates », B.L.P.C n°233 juillet - août 2001 pp 87-89.
- [10] Acker P., « Prise et durcissement des bétons : Les effets thermomécaniques », Techniques de l'ingénieur. Vol. 3, n° C2235, 1988.
- [11] 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.
- [12] 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»
- [13] G. Dreux, J. Festa, « Nouveau guide du béton et de ses constituants » 8° édition Eyrolles 1998.
- [14] Chen, W.F. «plasticity in reinforced concrete» published by Mc.Graw-Hill Booshstore, New York, 1982.
- [15 ] Karsan. P. Jirsa. J. O, « behavior of concrete under compressive loading», Journal of Structure Div , Vol-95, 1969. Cité dans (Serifou, 2014)
- [16] Rachida I (2009). Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre dur la réaction alcali-silice et réaction pouzzolanique. Thèse de doctorat de l'université de Toulouse. 56 p.

- [17] BAEL 91 modifié 99 «Règles techniques de concept et de calcul des ouvrages et des constructions en bétons armé suivant la méthode des états limites».
- [18] Eurocode 2, 2009, PAILLE.JM, « Calcul des structures en béton ».
- [19] Sargien. M 1971 « stress-strain relation-ship for concrete and the analysis of the structural concrete section » S.M study n04, solid Machine Division, University of waterloo, Canada.
- [20] Balan S., ARCAN M. « essais des constructions » édition Meridian Bucarest, édition Eyrolles, paris 1972
- [21] Idres. R. « Essai non destructif : application de l'auscultation dynamique pour la détermination de la résistance du béton par vitesse du son ». Thèse d'ingénieur, INES de GC Tizi-Ouzou. Janvier 1987.
- [22] Toukal A., Influence des taux de chargement sur la caractérisation non destructive du béton par ultrason, thèse de magister, Université de Boumerdès, (2009-2010).
- [23] Amzal Dj., Mostfaoui A., Contrôle de la qualité du béton durci par les méthodes non destructives, thèse ingénieur, UMMTO, (1994). « MAT 39 ».
- [24] Beinsh H., Contrôle non destructif des bétons, mesure de la dureté de surface, fiche 37, France. (février 1999).
- [25] Controls, "Instruction manual: Ultrasonic pulse velocity tester", Mod. 58-E0048, 2002.
- [26] Oucherif N., Utilisation des ondes ultrasoniques pour caractérisation d'un béton immergé dans l'eau ; Thèse de Master, Université de Tizi-Ouzou (2011-2012).
- [27] 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
- [28] Benazzouk 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.

# *Annexes*

## *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 ont 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.

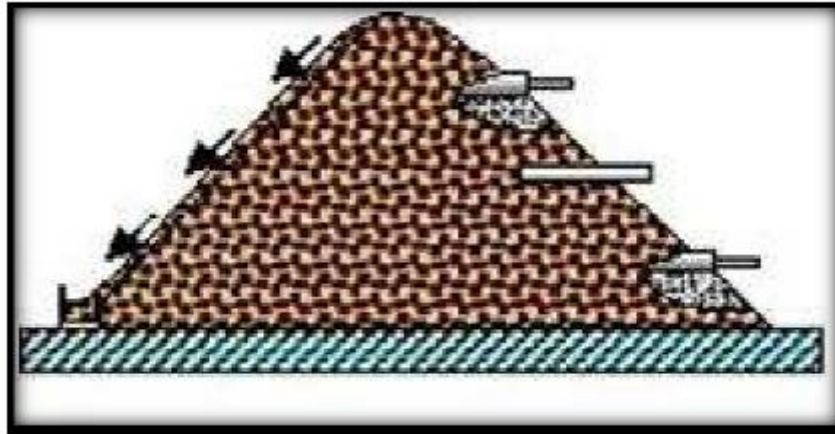


Figure I.1. le matériau en stock.

### 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.

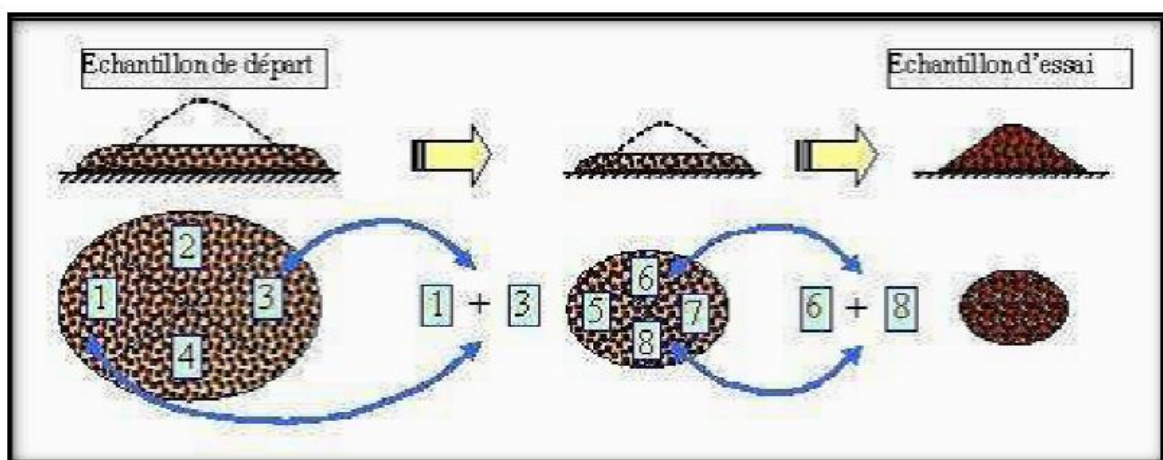


Figure I.2. Opération de quartage

### 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  $3m$ .

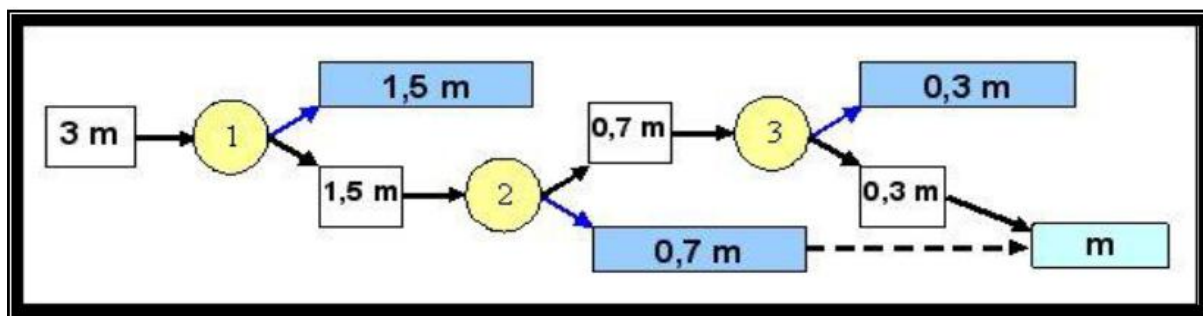


Figure 1.4. Schéma d'une opération de répartition des matériaux en utilisant de l'échantillonneur.

## 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  $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$  jusqu'à masse constante puis pesée (**masse M 1**). 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  $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ . 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**)



**Figure1.5. 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.

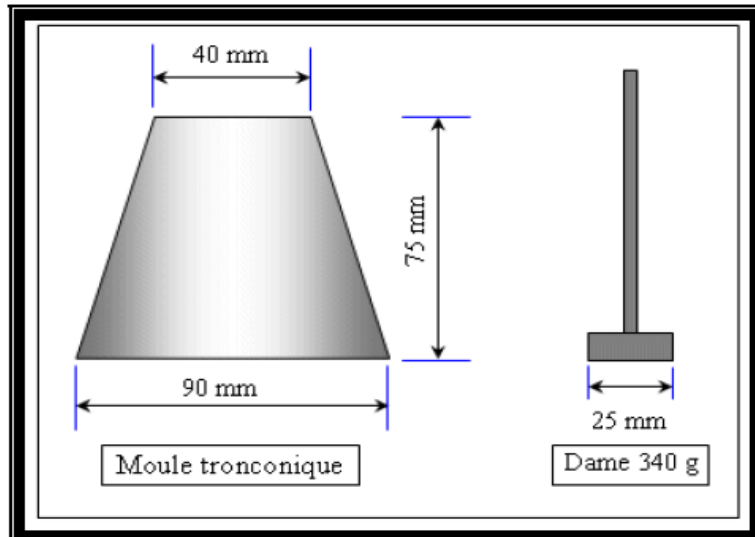
#### Détermination de la masse imbibée à surface sèche cas des sables

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

<b>Matériau : Sable 00/3</b>				
Nature	<b>Gravier semi concassé 00/03</b>			
Provenance	<b>Gravier de Tizi ouzou</b>			
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

<b>Matériau : Gravier 03/10</b>				
Nature	<b>Gravier semi concassé 03/10</b>			
Provenance	<b>Gravier de Tizi ouzou</b>			
Date d'analyse	02/04/2015			
Masse initial a l'état sec en (g)	M1 =	2218 g		
Masse après le tamisage	M2 =	2017 g		
Pert des granulats en (g)	M1 - M2 =	1 g		
	P =	1g		
Tamis en (mm)	Refus en (g)	Refus C en (g)	Refus C en (%)	Tamisat C en (%)
10	43	43	1,93	98,07
8	765	808	36,43	63,57
6,3	427,5	1235,5	55,7	44,3
5	477,5	1713	77,23	22,77
4	245,5	1958,5	88,3	11,7
3,15	217,5	2176	98,1	1,9
0,08	36	2212	99,73	0,27
Fond	5	2217	99,95	0,05

<i>Matériau : Granulats en caoutchoucs</i>				
Nature	<b>Granulats de recyclage</b>			
Provenance	<b>Pneus usagé</b>			
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 (%)	Tamisé 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 :

- Masse volumique absolue : 
$$X_v = \frac{M_4}{M_4 + M_2 + M_3}$$

- Masse volumique réelle déterminée par séchage à l'étuve : 
$$X_{rd} = \frac{M_4}{M_1 + M_2 + M_3}$$

- Masse volumique saturée à surface sèche : 
$$X_{ssd} = \frac{M_1}{M_1 + M_2 + M_3}$$

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

## 2.2 Gravier 03/10

Le procédé de détermination de différente caractéristique des granulats du gravier 03/10 est représenté dans l'annexe 1

<b>Gravier 03/10</b>	
M <sub>1</sub> ( masse après séchage )	1217,00
M <sub>2</sub> ( masse de récipient +verre+eau +Gravie	4765,50
M <sub>3</sub> (masse d'eau +récipient+verre)	4004,00
M <sub>4</sub> (masse après passage à l'étuve	1202,00
Mv absolue	2,73
Mv réelle	2,64
Mv 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.

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