

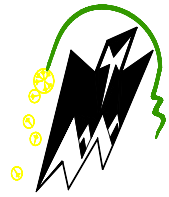
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche

Université Mouloud Mammeri de Tizi ouzou

Faculté du génie de la construction

Département de génie civil.



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Spécialité : Génie Civil

Option : Structure et matériaux.



Les bétons à base de GBD Résistances & Vitesses à l'Ultrason & porosités ouvertes

Proposé et dirigé par :

M^{me} O. MALEK-HADDAD

Présenté par :

M^{lle} OUAMMAR-AKILA

Année 2013/2014

Remerciements

Remerciements

*Je tien à présenter mes plus vifs remerciements à ma promotrice **Mme O. MALEK-HADDAD** pour l'aide qu'elle a apportée à la réalisation de ce travail et pour ses précieux conseils, orientations brillantes et motivations, dont elle a fait preuve durant la réalisation de ce mémoire. et à tous ceux qui m'ont aidés de près ou de loin.*

Surtout un grand merci à mes parents qui ont le droit de recevoir mes chaleureux remerciements pour le courage et le sacrifice qu'ils ont consentis pendant la durée de mes études en leurs souhaitant une longue vie pleine de joie et de santé. Sans oublié mes deux frère que j'aime beaucoup. Ainsi que tous mes ami(e)s.

Je remercie par cette occasion nos enseignants qui nous ont enrichis de connaissances et de savoir, ainsi les responsables de la bibliothèque et du laboratoire du département Génie Civil.

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

Merci 

Dédicaces

Le projet de fin d'étude que j'ai l'honneur de présenter a été exécuté et mené à bien grâce à la participation exceptionnelle de ma promotrice.

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents qui ont su être à mes cotés dans les moments difficile sans lesquels je n'aurai pas abouti à ce stade d'étude, ainsi que chaque instant de bonheur qu'ils m'ont procuré, fasse Dieu que je puisse les honorés.

*A mes adorable frères **jugurtha** et **tayeb** pour leur soutien, orientation et conseil. Sans oublier mon oncle **meziane** pour sa patience, disponibilité et son aide. et à toute la famille **OUAMMAR***

*A mon fiancé **Samir** et sa famille*

*A Tous mes ami(e)s en particulier **khoukha**, **fatma**, et leurs familles*

A tous ceux qui n'ont pas eu la chance d'emprunter le chemin de l'école

Et pour tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près à la réalisation de ce mémoire.

Akila

Résumé :

Les déchets de la construction offrent un gisement riche en terme de matériaux de construction, les Granulats de béton de démolition (GBD) en est un. Par les résultats de cette étude, nous avons démontré que les propriétés des bétons à base de GBD sont inversement proportionnelles au taux de substitution des granulats naturels (GN) par les GBD. Le pourcentage de la porosité ouverte est proportionnel au taux de substitution des GN par les GBD.

L'exploitation des résultats de l'ultrason pour les deux états : bétons séchés et bétons humides nous ont permis de conclure qu'une partie de la porosité des GBD reste accessible à l'eau, connectée à l'extérieur. Par ces résultats on conclut que ; oui on peut formuler des bétons d'une certaine résistance mécaniques avec les GBD, mais toute fois il faut rester vigilant quant à la porosité ouverte et donc à toutes les propriétés afférentes avec la porosité ouverte comme la durabilité, notamment pour le cas des ouvrages où la qualité est de rigueur.

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

| | |
|---|-----------|
| Introduction Générale..... | 1 |
| CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE..... | 4 |
| <i>Partie 1 : Généralités sur les bétons.....</i> | 4 |
| I.1- Introduction..... | 4 |
| I.2 Les constituants d'un béton | 4 |
| <i>I.2.1-le ciment.....</i> | 4 |
| <i>I.2.2 Les granulats.....</i> | 7 |
| <i>I.2.2.1 Provenance des granulats.....</i> | 8 |
| A-Granulats alluvionnaires | 8 |
| B- Granulats de roches massives | 8 |
| C-Granulats de transformation | 9 |
| D- Granulats de recyclage | 9 |
| <i>I.2.2.2 Propriétés des granulats.....</i> | 11 |
| A- granulométrie | 12 |
| B- Module de finesse..... | 13 |
| C- Forme et texture des granulats..... | 13 |
| E- Propriétés mécaniques des granulats..... | 14 |
| <i>I.2.3 Les adjuvants.....</i> | 14 |
| <i>I.2.3.1- Classes des adjuvants.....</i> | 15 |
| <i>I.2.3.2- Les adjuvants modifiant l'ouvrabilité du béton.....</i> | 15 |
| <i>I-2-3-3 : Les adjuvants modifiant la prise et le durcissement.....</i> | 17 |
| <i>I.2.3.4- Les adjuvants modifiant certaines propriétés du béton.....</i> | 18 |
| <i>I.2.4- Les additions minérales.....</i> | 19 |
| <i>I.2.5- L'eau de gâchage du béton.....</i> | 20 |
| I.3 Classification des bétons..... | 20 |
| <i>I.3.1- Classification selon les masses volumiques.....</i> | 20 |

| | |
|---|-----------|
| I.3.2- Classification selon la consistance (ouvrabilité) | 21 |
| I.3.3- Classification selon la résistance mécanique | 22 |
| I.3.4- Classification selon l'exposition & actions dues à l'environnement. | 23 |
| I.4- Composition des bétons..... | 23 |
| I.4.1 Méthode de Bolomey..... | 24 |
| I.4.2- Méthode de Dreux Gorisse | 24 |
| I.4.2.1 Calcul du dosage en ciment..... | 25 |
| I.4.2.2 Calcul du dosage en eau..... | 26 |
| I.4.2.3- Calcul du dosage en granulats..... | 26 |
| I.5- Propriétés essentielles des bétons..... | 28 |
| I.5.1- Propriétés de résistance des bétons | 29 |
| I.5.2- Le béton armé..... | 29 |
| I.5.3- Les bétons de fibres..... | 30 |
| Partie2 : La durabilité des bétons..... | 31 |
| I-6 Introduction..... | 31 |
| I-7 Dégradation des bétons..... | 32 |
| I-7-1 Principaux processus de dégradation chimique..... | 32 |
| I-7-1-1 La lixiviation ou l'hydrolyse (dissolution) des hydrates..... | 33 |
| I-7-1-2 Les échanges ioniques entre les hydrates et le milieu agressif..... | 33 |
| I-7-1-3 Formation de produits expansifs..... | 33 |
| I-7-2 Cinétique de dégradation des matériaux..... | 33 |
| I-7-2-1 Porosité..... | 34 |
| I-7-2-2 Transfert de matière..... | 34 |
| I-7-3 Principales attaques chimiques..... | 35 |
| I-7-3-1 Attaque par la carbonatation..... | 36 |

| | |
|--|-----------|
| <i>I-7-3-2 Attaque par les sulfates</i> | 36 |
| <i>I-7-3-3 Attaque par les chlorures</i> | 37 |
| <i>I-7-3-4 Attaque par les eaux (lixiviation)</i> | 37 |
| <i>I-7-3-5 Réaction alcali-granulats</i> | 38 |
| <i>a - réaction alcali-silice</i> | 38 |
| <i>b – réaction alcali-carbonate</i> | 38 |
| I-8 Conclusion | 39 |
| <i>Partie 3 : Généralité sur les essais non destructifs</i> | 40 |
| I.9-Introduction | 40 |
| I.10-Définition et but des essais non destructifs | 41 |
| I.11-Domaine d’application des essais non destructifs | 41 |
| I.12-Les différents types d’essais non destructifs | 42 |
| <i>I.12-1-essais au scléromètre (norme P18-417)</i> | 42 |
| <i>I.12-1-1-Généralités</i> | 42 |
| <i>I.12-1-2-Définition et description</i> | 42 |
| <i>I.12-1-3-But et principe d’utilisation</i> | 43 |
| <i>I.12-2-Essai à l’ultrason</i> | 45 |
| <i>I.12-2-1-But de l’essai</i> | 45 |
| <i>I.12-2-2-Description de l’appareil</i> | 46 |
| <i>I.12-2-3-Principe d’utilisation des ultrasons</i> | 48 |
| <i>I.12-2-4- Les différents types d’ondes</i> | 49 |
| I.12-2-4-1-Les ondes longitudinales et transversales..... | 49 |
| <i>I.12-2-5-Facteurs ayant de l’influence sur la valeur de la vitesse du son</i> | 51 |
| <i>I.12-2-6-Avantages et inconvénients de cet appareil</i> | 52 |
| I.13-conclusion | 53 |

| | |
|--|-----------|
| CHAPITRE II : Caractérisation des matériaux et composition des bétons | 54 |
| II.1- Introduction | 54 |
| II-2 Matériaux et formulation | 54 |
| <i>II-2-1 Matériaux de base utilisés</i> | 54 |
| II-2-1-1- Ciment | 54 |
| II-2-1-2 Granulats..... | 54 |
| II-2-1-3-Fillers..... | 55 |
| II-2-1-4 Le super-plastifiant (SP)..... | 55 |
| II-2-1-5 Eau de gâchage..... | 56 |
| II-2-2 Résultats de caractérisation des granulats | 56 |
| II-2-2-1 Echantillonnage (NF P 18- 553)..... | 56 |
| II-2-2-2 Analyse granulométrique (EN 933-1 et EN 933-2)..... | 56 |
| II.2.2.3- Module de finesse du sable..... | 58 |
| II.2.2.4- Absorption et masses volumiques des granulats <NF P 18-555> | 58 |
| II.3- Formulation des bétons | 60 |
| II-3-1 Nomenclature des bétons utilisés..... | 60 |
| II.3.2- Formulation du béton de référence..... | 61 |
| II.3.3- Formulation des bétons étudiés..... | 64 |
| CHAPITRE 3 : Expérimentation et exploitation des résultats | 65 |
| III-1: Introduction | 65 |
| III-2: Confection des bétons | 65 |

| | |
|---|-----------|
| <i>III-2-1 Préparation de la gâchée</i> | 65 |
| <i>III-2-2: Confection des éprouvettes</i> | 67 |
| <i>III-2-3: Essais sur les éprouvettes</i> | 67 |
| <i>III-2-3-1: Essais de résistance à la compression à 28 jours</i> | 67 |
| <i>III-2-3-2: Essai par ultrason</i> | 68 |
| <i>III-2-3-3: Porosité ouverte</i> | 68 |
| III-3: Résultats des essais menés | 70 |
| <i>III-3-1 Résultats des masses volumiques des bétons durcis</i> | 70 |
| <i>III-3-2 Résultats des résistances à 28 jours</i> | 71 |
| <i>III-3-3: Porosité ouverte</i> | 73 |
| <i>III-3-4 vitesse à l'ultrason (Etats Humide & Sec)</i> | 75 |
| III.3-4-1 Vitesses à l'ultrason à l'état Humide..... | 76 |
| III.3-4-2 Vitesses à l'ultrason à l'état sec..... | 77 |
| III.4-4-3 Comparaison Vitesses à l'ultrason état humide & état sec..... | 78 |
| III.4: Corrélation entre la résistance à 28 jours et la porosité | 79 |
| III-5: Corrélation entre les vitesses à l'ultrason et la résistance à 28 jours. | 80 |
| III-6: Corrélation entre les vitesses à l'ultrason et la porosité | 82 |
| III-7: Conclusion | 82 |
| Conclusion générale | 84 |
| Références bibliographique | 86 |
| <i>Annexe 1 : Différents essais de laboratoire</i> | 89 |
| <i>Annexe 2 : Résultats des différents essais de caractérisation</i> | 97 |
| <i>Annexe 3 : Mesure à l'ultrason</i> | 103 |

Chapitre 1 : étude bibliographique

Figure I- 1: Exemples de granulats d'origines différentes7

Figure I- 2: Illustration des granulats expansés : a, b l'argile ; c schiste9

Figure I-3 : Béton fortement armé concassé avec un broyeur11

Figure I-4 : Éventail de grosseurs de granulats utilisés dans le béton.12

Figure I-5 : Défloculation du ciment par l'action des super-plastifiants16

Figure I-6 : Courbes d'évolution du seuil de cisaillement (début de prise) en fonction de la présence d'un accélérateur ou d'un retardateur de prise [8] 17

Figure I-7 : Courbes illustrative de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams.....21

Figure I-8 : Dosage en ciment en fonction de rapport E/C et de l'affaissement au cône d'Abrams [2]25

Figure I-9 : Fuseaux préférentiels pour la granularité des sables pour béton selon la méthode de Dreux Gorisse [2] 26

Figure I-10 : Courbe du mélange optimum selon la méthode de Dreux Gorisse [02]27

Figure I-11 : Représentation schématique d'un solide poreux32.

Figure I.12 : Abaque déterminant la dureté du béton (source GINGER CEB TP).....44

Figure I.13 : Appareil d'auscultation sonore [punditLab]46

Figure I.14 Types de propagation d'ondes47

Figure I.15 Ondes longitudinales50

Figure I.16 Ondes transversales51

Chapitre 2 : Caractérisation des matériaux et composition des bétons

Figure II- 1 : Eprouvettes usagées trouvées au niveau de notre laboratoire....55

| | |
|---|------------|
| <i>Figure II-2 : Courbes granulaires des granulats naturels et des granulats de béton de démolition.....</i> | <i>57</i> |
| <i>Figure II- 3 : granulats naturels (gauche), granulats de béton de démolition (droite).....</i> | <i>59.</i> |
| <i>Figure II- 4 : Formes de granulats recyclés.....</i> | <i>60</i> |
| <i>Figure II-5 : Courbes granulaires des 3 granulats, la courbe brisée et lignes de partage.....</i> | <i>63</i> |
| Chapitre 3 : Expérimentation et exploitation des résultats | |
| <i>Figure III-1 : Malaxeur utilisé.....</i> | <i>66</i> |
| <i>Figure III- 2 : Rupture de l'éprouvette ; La presse utilisée.....</i> | <i>68</i> |
| <i>Figure III-3 : calibrage de l'appareil, marquage des points d'essai.....</i> | <i>69</i> |
| <i>Figure III-4 : Utilisation d'un ultrason.....</i> | <i>69</i> |
| <i>Figure III.5 : Masses volumiques des différents types de béton.....</i> | <i>71</i> |
| <i>Figure III-6 : Histogramme des résistances à la compression à 28 jours des bétons testés.....</i> | <i>73</i> |
| <i>Figure III-7 : Porosité ouverte (accessible à l'eau) des bétons étudiés.....</i> | <i>74</i> |
| <i>Figure III-8 : Histogramme des vitesses à l'ultrason à l'état humide.....</i> | <i>77</i> |
| <i>Figure III-9 : Histogramme des vitesses à l'ultrason à l'état sec.....</i> | <i>78</i> |
| <i>Figure III-10 : superposition des résultats des vitesses à l'ultrason état humide (V Ultr-Hum) et état sec (V Ultr-sec).....</i> | <i>79</i> |
| <i>Figure III-11 : droite de corrélation entre les résultats de résistance et ceux de la porosité.....</i> | <i>80</i> |
| <i>Figure III.12 : Corrélation entre les vitesses à l'ultrason et la résistance à 28 jours.....</i> | <i>81</i> |
| <i>Figure III-13 : droite de corrélation entre les vitesses à l'ultrason et la porosité.....</i> | <i>82</i> |

Chapitre 1 : étude bibliographique

| | |
|--|-----------|
| <i>Tableau I.1 : liste des différents types de ciments courants normalisés [1]</i> | <i>6</i> |
| <i>Tableau I.2 : Classes de consistances des bétons ordinaires</i> | <i>22</i> |
| <i>Tableau I.3 : Classes de résistances des bétons</i> | <i>22</i> |
| <i>Tableau I.4: Coefficients d'appréciation de la qualité KG des granulats</i> | <i>25</i> |
| <i>Tableau-I.5 : Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation des ondes ultrasonique [21]</i> | <i>49</i> |

Chapitre 2 : Caractérisation des matériaux et composition des bétons

| | |
|---|-----------|
| <i>Tableau II.1 : Masse volumique et coefficients d'absorption des différents granulats</i> | <i>59</i> |
| <i>Tableau II.2 : Nomenclature des formules de Béton à base de GBD testés.</i> | <i>60</i> |
| <i>Tableau II.3 Compositions de béton de référence pour 1 m³</i> | <i>63</i> |
| <i>Tableau II.4 : Compositions des différents bétons pour 1 m³</i> | <i>64</i> |

Chapitre 3 : Expérimentation et exploitation des résultats

| | |
|--|-----------|
| <i>Tableau III- 1 : Récapitulatif des pesées des éprouvettes de bétons (kg) et des masses volumique calculées des bétons durcis (kg/m³)</i> | <i>70</i> |
| <i>Tableau III. 2 : Résistances moyennes en compression et écarts types des bétons (MPa)</i> | <i>72</i> |
| <i>Tableau III.3: Résultats porosité accessible à l'eau (porosité ouverte)</i> | <i>74</i> |
| <i>Tableau III.4 : vitesses à l'ultrason obtenues à 28 jours pour un état d'éprouvettes humides</i> | <i>76</i> |
| <i>Tableau III.5 : vitesses à l'ultrason obtenues à 28 jours pour un état d'éprouvettes sèches</i> | <i>78</i> |

Introduction Générale

Le béton est utilisé par tous et pour tout type de construction, il en résulte une demande accrue en matériau de construction notamment en granulats naturels pour approvisionner les secteurs du bâtiment et des travaux publics. La fabrication du béton est facile et nécessite peu de moyen, elle est faite sur tout le territoire en quantités presque illimitées à partir des matériaux naturels (ciments, granulats, eau et d'éventuels adjuvants). Le béton est résistant, durable et entièrement recyclable.

Certes, les granulats naturels se trouvent d'une façon abondante dans la nature, granulats alluvionnaires ou de carrières..., mais leur extraction est soit nuisible à l'environnement ou bien revient à des coûts excessifs. L'extraction des granulats de carrière a une grande incidence sur l'environnement, comme le déboisement et le changement de relief d'un massif et de paysage; l'extraction des granulats alluvionnaire (rivières et oueds) provoque la baisse de la nappe phréatique puis le séchage des sols aux alentours de ces rivières. Ces deux procédés d'extraction ont des incidences négatives sur la faune et la flore qui dépendaient de ces massifs de terres, et de ces eaux qui finissent par disparaître.

Pour des raisons, économiques et environnementales, il est devenu indispensable de trouver de nouvelles sources en granulats qui peuvent apporter des solutions alternatives. Les granulats de recyclage semblent être une des solutions. Les matériaux de démolition ou de chantier provenant de la démolition ou réhabilitation du vieux bâti sont en quantité croissante et ne sont éliminés que par l'utilisation en remblai ou la mise en décharges sauvages causant un impact négatif sur l'environnement. Ce dernier constitue un paramètre essentiel du développement durable et sa préservation passe obligatoirement par le recyclage des gravats.

L'utilisation des granulats recyclés à une grande importance du point de vue environnemental car cela permet de préserver la nature en réduisant l'extraction des granulats

Introduction Générale

naturels. En Algérie, l'utilisation des granulats recyclés dans la production du béton n'a pas encore franchie le seuil des laboratoires, et ces études sont motivées par des besoins de formation et non sous l'impulsion d'ordre environnemental ou économique.

De part le monde, le vieux bâti est devenu non conforme aux normes de construction en vigueur que ce soit en terme de résistance ou de confort. A cela se rajoutent les constructions démolies par les catastrophes naturelles. Ainsi s'offre au monde un grand gisement en termes de granulats de substitution aux granulats naturels. Ces granulats sont donc soit du béton de démolition soit des déchets de maçonnerie. Le recyclage de ces matériaux offre plusieurs avantages majeurs :

- Disparition des décharges sauvages, réduction des volumes dans les décharges,
- Préservation de l'environnement en réduisant les volumes d'extraction des carrières, et des gisements alluvionnaires ;
- économie d'énergie soit par le transport, ou par l'extraction, puisqu'il s'agit de matériaux locaux.

La présente étude a pour objectif, de formuler des bétons à base des granulats de béton de démolition (GBD), puis de comparer leurs performances à un béton formulé uniquement avec des granulats naturels (GN). Le premier paramètre de comparaison est la résistance mécanique à la compression à 28 jours. Mais en c'est plus intéressé d'approcher la durabilité par l'étude de la durabilité en essayons deux approches différentes : études de la porosité ouverte accessible à l'eau et étude des vitesses de propagation des ondes ultrasoniques en deux états des bétons (bétons Humides et bétons secs). Les bétons étudiés sont formulés à plusieurs pourcentages de substitution des GN par des GBD.

Ce présent document est subdivisé en trois chapitres :

Ce présent mémoire est organisé de la manière suivante :

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

Le premier chapitre : est composé de trois parties :

- *Partie 1* : nous avons fait un rappel des définitions fondamentales sur les bétons et les méthodes de formulation des bétons.
- *Partie 2* : dans cette partie sont récapitulés certains aspects de durabilité ainsi que les définitions sommaires des différentes attaques chimiques des bétons.

Introduction Générale

- Partie 3 : Dans cette partie nous avons fait un petit rappel des méthodes non destructives d'auscultation des bétons (intérêt et inconvénient des ces méthodes). Nous avons alors développé deux des méthodes les plus utilisées scléromètre et Ultrason. L'ultrason est d'ailleurs la méthode choisie pour réaliser notre étude.

Au deuxième chapitre : nous avons:

- présenté les résultats de caractérisation des matériaux utilisés pour la composition de nos bétons
- illustré la méthode de formulation des bétons utilisés ;
- nous avons donné les compositions des sept formules de bétons étudiées. Les bétons formulés sont à rapport (GN/GBD) variable.

Troisième chapitre : dans ce chapitre sont décrits les modes opératoires pour les essais réalisés sur les différentes formules de béton. Deux programmes d'essais sont alors menés. Dans le premier programme nous avons confectionné une série de 3×7 éprouvettes de bétons pour la caractérisation de la résistance à 28 jours. Dans le deuxième programme nous avons confectionné 4×7 éprouvettes de bétons ; pour chaque béton 3 éprouvettes sont utilisées pour la caractérisation à l'ultrason à deux états (humide et sec), une éprouvette est utilisée pour la caractérisation de la porosité ouverte accessible à l'eau.

Nous avons, par la suite, présenté les résultats et l'exploitation des ces résultats. Nous avons alors tenté de trouver des corrélations entre les différents paramètres étudiés.

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

CHAPITRE 1 : *ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE*

Partie 1 : *Généralités sur les bétons*

I.1- Introduction

Le béton varie en fonction de ses composants : nature des granulats, des adjuvants, du ciment, mais aussi en fonction de la mise en œuvre et du traitement de surface. Ainsi, en combinant ces différents produits 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/m³ pour l'eau à 3 t/m³ pour le ciment. Les dimensions de leurs grains s'échelonnent du \square 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 béton

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 [4, 21]. Le ciment est composé essentiellement de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO), de silice (SiO₂), d'alumine (Al₂O₃) et d'oxyde de fer (Fe₂O₃). 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. Ces derniers se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne et contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier Na₂O + K₂O et MgO, l'oxyde ferrique.

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.

| 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) CEM II/B (CPJ) | Ciment portland composé | 80 à 94% 65 à 79% | 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 % (*) ; de 21 à 35 % avec les mêmes restrictions que ci-dessus. | 0 à 5% |
| 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) CEM IV/B (CPZ) | Ciment pouzzolanique | 65 à 90 % 45 à 64 % | 10 à 35 % de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à 10 %. 36 à 55 % comme si dessus | 0 à 5 % |
| CEM V/A (CLC) CEM V/A (CLC) | Ciment au laitier et aux cendres | 40 à 64 % 20 à 39 % | 18 à 30 % de laitier de haut-fourneau et 18 à 30 % de cendres siliceuses ou de pouzzolanes. 31 à 50 % de chacun des constituants comme ci-dessus | 0 à 5 % |

Tableau I.1 : liste des différents types de ciments courants normalisés [1].

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 et 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).

1.2.2- Les granulats

On appelle granulats, tout matériau inerte, sable gravier ou cailloux, qui entre dans la composition des bétons. C'est l'ensemble des grains compris entre 0 et 125mm dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant de recyclage. On distingue quatre catégories de granulats en fonction de leur provenance :

- Les granulats d'origine alluvionnaire ;
- Les granulats de roches massives ;
- Les granulats de transformation ;
- Les granulats de recyclage.



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

Les granulats ont des effets sur la résistance mécanique et sur la consistance du béton de plusieurs manières [22, 5] :

- Par leurs propriétés de résistances mécaniques ;
- Par leur capacité d'adhérence à la pâte liante (pâte de ciment) ;

- Par la forme de ces granulats (roulés, concassés et semi-concassés) ;
- Par leur granulométrie et le leur diamètre maximal ;
- Par la compacité du mélange granulaire formé.

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 d'un grand nombre de

paramètres : origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage... On peut distinguer :

- Roches sédimentaires consolidées telles que les calcaires ou les degrés. 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).

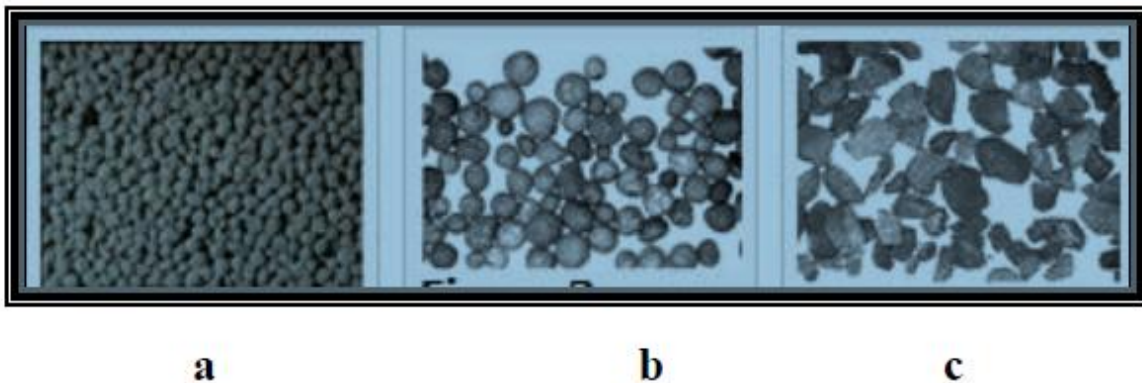


Figure I- 2: Illustration des granulats expansés : a, b l'argile ; c schiste.

La cuisson à haute température (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 : La réutilisation des déchets de démolition a été effectuée la première fois après la deuxième guerre mondiale en Allemagne. Depuis, plusieurs recherches

ont été menées de part le monde pour développer et promouvoir la réutilisation de ces déchets dans le secteur du bâtiment [26, 28, 29, 30].

De nos jours, le recyclage des déchets du secteur du génie civil, notamment à la démolition, constitue une part non négligeable à la production de granulats et peut donc être considéré comme un véritable gisement. Le déchet à récupérer subit des traitements divers (concassage, calibrage, nettoyage...) pour le rendre apte pour l'utilisation.

Ces déchets peuvent être du béton démolé (déchets du bâtiment, des plates formes des aéroports en béton, chaussées des routes en béton etc.), déchets de brique du bâtiment, ou déchets des éléments de trottoir, refus de l'industrie du béton disponibles sur les sites de préfabrication, filières de récupération particulières (traverses de voies ferrées ou poteaux électriques), sous-produits de l'industrie (laitiers de hauts-fourneaux, mâchefers...).



L'utilisation des granulats recyclés a une grande importance du point de vue environnemental car d'un côté elle permet de récupérer les matériaux résultants de la démolition des constructions ; démolition due soit aux catastrophes naturelles soit à la démolition des vieux bâtis, donc participé à réduire les décharges dans la nature. De l'autre côté, leur réutilisation permet de protéger la nature de l'exploitation excessive de la réserve des granulats naturels

Ces dernières années plusieurs chantiers ont démontré la viabilité du recyclage de vieux bétons provenant de chaussées, de bâtiments ou autres structures comme source de granulats. Cette pratique permet d'économiser matériaux et énergie. Les étapes de traitement de ce genre de déchets peuvent être résumées comme suit :

1. enlever le vieux béton ;
2. Le broyer dans des broyeurs primaires et secondaires ;

3. le débarrasser de l'acier d'armature et des éléments noyés ;
4. le cribler et laver les morceaux ;
5. entreposer le gros granulat et le granulat fin ainsi produits.



Figure I-3 : Béton fortement armé concassé avec un broyeur.

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 [2, 3].

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

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

Les granulats (gravillons et sable) ont des effets sur la résistance mécanique et sur la consistance du béton de plusieurs manières [4, 5]:

- Par leurs propriétés de résistance mécanique ;
- Par la capacité d'adhérence de ces granulats avec la pâte liante ;
- Par la forme de ces granulats (roulés, concassés et semi-concassés);

- Par leur granulométrie et le diamètre maximal des granulats.

A- granulométrie : Dans une composition de béton la dimension des granulats à utiliser passe des micromètres à quelques centimètres. La dimension maximale est variable, elle dépend des confinements 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 I-4 : Éventail de grosseurs de granulats utilisés dans le béton.

B- Module de finesse

Pour confectionner des bétons de qualité, on utilise au moins des granulats de deux classes granulométriques 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. Au-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 [2, 4].

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.

C- Forme et texture des granulats : La forme et la texture ont des effets sur le serrage des granulats dans le béton soit la compacité granulaire. Ils ont donc une incidence sur la 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.

D- La propreté : Les granulats utilisés dans le béton doivent être propres, débarrassés de tous corps polluant qui peuvent nuire à l'adhérence entre la pâte de ciment et les granulats et provoquer une fissuration précoce du béton [2, 4].

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 des 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 organiques.

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 gravillons concassés 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.

E- 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.

1.2.3- Les adjuvants

Produits chimiques ou naturels (liquides ou poudres) susceptibles d'améliorer certaines propriétés des bétons, mortiers, coulis. Les adjuvants sont incorporés aux bétons à faible dose inférieure à 5 % de la masse du ciment, avant ou pendant le malaxage. Le but est d'améliorer certaines propriétés du béton, qu'il soit à l'état frais, pendant la prise et le durcissement, ou à l'état durci [6,7].

- 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 voir 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 [4, 6]. Dans leur ensemble, les adjuvants ne doivent pas contenir de chlore.

I.2.3.1- Classes des adjuvants

Selon les objectifs visés, on introduit dans le béton tel ou tel adjuvants. Dans cette section ont présente les différentes classes de bétons

I.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 et en modifient 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 importante plus l'affaissement est grand. L'affaissement cesse lorsque l'on atteint le dosage de saturation au 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-5 : ***Défloculation du ciment par l'action des superplastifiants.***). L'eau initialement piégée entre les flocculats est à nouveau disponible pour fluidifier le béton [6].

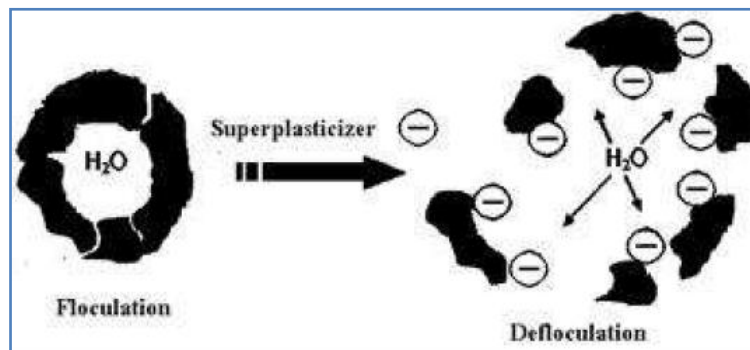


Figure I-5 : Défloculation du ciment par l'action des superplastifiants.

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

Les plastifiants / réducteurs d'eau

Ces adjuvants ont pour fonction principale de conduire, à même ouvrabilité, à une augmentation des résistances mécaniques par une réduction de la teneur en eau d'un béton, d'un mortier ou d'un coulis.

La diminution de la teneur en eau – de 10 à 35 l/m³ de béton entraîne une augmentation de sa compacité, par conséquent de sa durabilité. Cette amélioration des caractéristiques résulte de la diminution des vides dus à l'excès d'eau [4].

Les superplastifiants / hauts réducteurs d'eau

Introduits dans un béton, en général peu avant sa mise en œuvre, ils ont pour fonction principale de provoquer un fort accroissement de l'ouvrabilité du mélange.

Sur le béton frais, on constate une augmentation considérable de l'ouvrabilité pour une même teneur en eau. Ces effets ont une durée d'effet prolongée dans le temps, sans risque de ségrégation, ni de ressuage si des précautions sont prises à la mise en œuvre; la cohésion du béton reste très bonne.

Les superplastifiants sont particulièrement utiles pour la réalisation des fondations, dallages, radiers, sols industriels, etc. Les superplastifiants sont indispensables pour la confection des bétons autoplaçants et dans le cas des bétons pompables [4].

I.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).

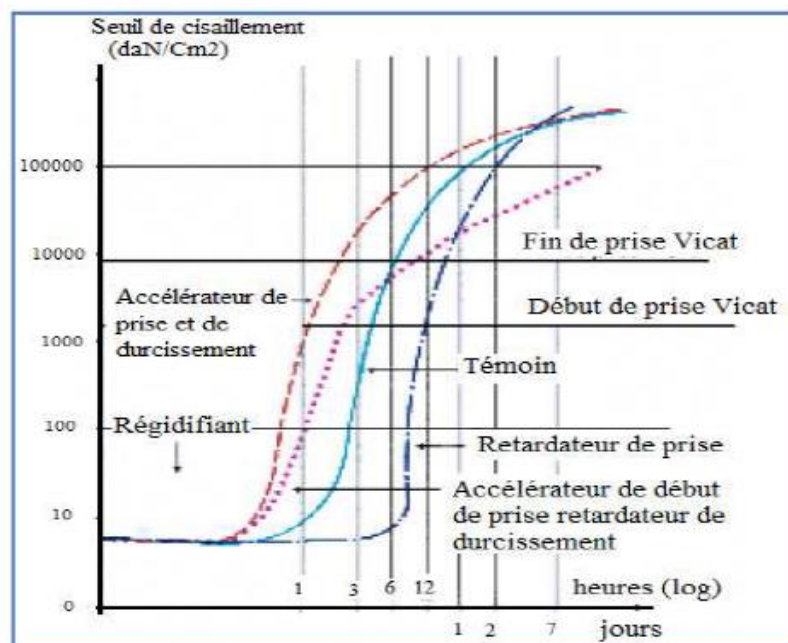


Figure I-6 : Courbes d'évolution du seuil de cisaillement (début de prise) en fonction de la présence d'un accélérateur ou d'un retardateur de prise [8].

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 du 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.

L'accélérateur du 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.

I.2.3.4- Les adjuvants modifiant certaines propriétés du béton

Les entraîneurs d'air

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

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.

En Europe, l'utilisation des entraîneurs d'air pour les bétons routiers est obligatoire. La valeur de l'air occlus doit être comprise entre 4 et 6 %.

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 à préciser que ces adjuvants ne peuvent pas rendre étanche un mauvais béton, mal composé, 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, qui sont, entre autres, des agents colloïdaux ou des dérivés de la cellulose 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 effet 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.

1.2.4- Les additions minérales

Les additions minérales sont souvent sous forme d'une poudre fines ou ultra fines de faibles dimensions, elles sont ajoutées en quantités de l'ordre de 10 % du poids de ciment. Les additions minérales sont soit actives ou inertes qui, 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 [9].

Par ailleurs pour les poudres actives à caractères pouzzolanique (fumée de silice et cendres volantes...), ils permettent d'obtenir des bétons plus résistants et plus compacte et donc plus durables.

Ces poudres sont souvent utilisées pour produire des bétons à haute résistances et des bétons à ultra haute performances.

1.2.5- 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 potable 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 bétons

Les bétons peuvent être classés en plusieurs catégories de plusieurs manières.

1.3.1- Classification selon les masses volumiques

Il existe quatre grandes classes

- Bétons très lourd $Mv > 2500 \text{ kg/m}^3$
- 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 kg/m^3 environ. Ils peuvent être armés ou non. Lorsqu'ils sont très sollicités en flexion ils sont précontraints.

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

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

1.3.2- 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.

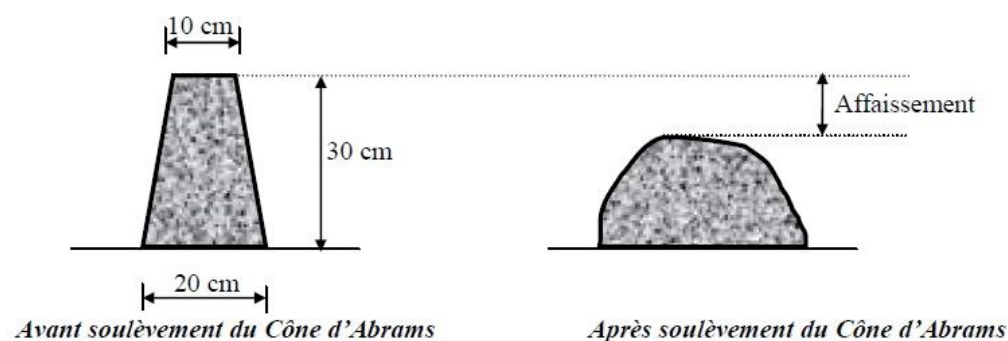


Figure I-7 : Courbes illustrative de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams.

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

| 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 |

Tableau I.2 : Classes de consistances des bétons ordinaires.

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 du béton et à 28 jours (R_{c28j}). Les classes de résistance à la compression des bétons courants de masses volumiques comprises entre 1800 kg/m^3 et 2500 kg/m^3 , selon la norme EN 206-1 sont données dans le tableau suivant.

| Classes de résistance | R_c minimale sur cylindre N/mm^2 | R_c minimale sur cube N/mm^2 |
|-----------------------|---|---|
| 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 |

Tableau I.3 : Classes de résistances des bétons.

Les valeurs données dans le tableau 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 & 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 Chimiques

I.4- Composition des bétons

La formulation d'un béton ordinaire (vibré ou autoplaçant) consiste à définir les proportions de ces différents constituants. La formulation des bétons dépend des propriétés de mise en œuvre, mécaniques et de durabilité souhaitées [2, 5, 10]. 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.

Quand 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.

1.4.1 Méthode de Bolomey

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

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

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

C : quantité ciment,

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

Air : volume d'air (en litre),

G : coefficient de qualité des granulaire.

La formulation du squelette granulaire du béton, ciment compris, est 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 de 8 à 16, il est d'autant plus élevé que le dosage en ciment est plus fort ; P : est le pourcentage de grains passant au tamis de diamètre d ; D : est le diamètre du plus gros grain.

Cette méthode aboutit théoriquement, plus au moins, à une granularité continue [23].

1.4.2- 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 [23]. Les étapes de la méthode sont récapitulées dans les paragraphes suivants.

Expérimentalement on commence par l'évaluation du rapport C/E en fonction de la résistance moyenne désirée,

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

La relation est nommée formule de Bolomey, où : f_{cb} : résistance moyenne en compression visée (à 28 jours) en MPa ; F_{cim} : classe vraie du ciment (à 28 jours) en MPa ; C : dosage en ciment (kg/m^3) ; E : dosage en eau (kg/m^3) ; 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.

Ainsi si l'on souhaite formuler un béton de classe de résistance C25, on vise alors une résistance

$$f_{cb} = 1,15f_{c28} = 1,15 \times 25 = 28,75 \text{MPa}$$

Le coefficient KG : il traduit la qualité des granulats (forme, texture, minéralogie, diamètre maximal, dureté,...). La valeur de KG doit être mentionnée sur la fiche technique des granulats à l'achat. Le tableau suivant donne quelques valeurs de KG en fonction de leurs diamètres est de leurs qualités.

| Qualité des granulats | Dimension D des granulats | | |
|-----------------------|--------------------------------------|---|------------------------------------|
| | D ≤ 12.5 (granulats fin s) | 20 ≤ D ≤ 31.5 (granulats moyens) | D ≤ 50 (gros granulats) |
| Excellente | 0.55 | 0.60 | 0.65 |
| Bonne | 0.45 | 0.50 | 0.55 |
| Passable | 0.35 | 0.40 | 0.45 |

Tableau I.4: Coefficients d'appréciation de la qualité KG des granulats.

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.

I.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.

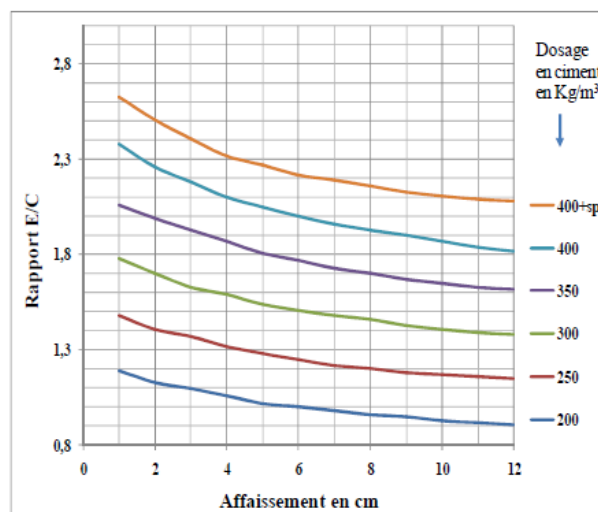


Figure I-8 : Dosage en ciment en fonction de rapport E/C et de l'affaissement au cône d'Abrams [2].

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.

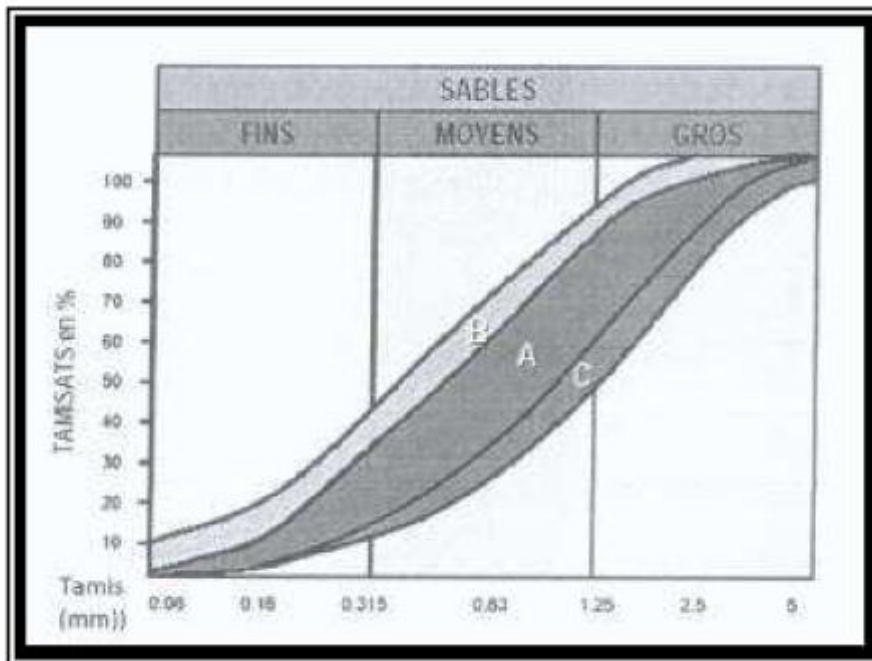


Figure I-9 : Fuseaux préférentiels pour la granularité des sables pour béton selon la méthode de Dreux Gorisse [2].

- 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 humidifier 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 granulométrique de référence

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

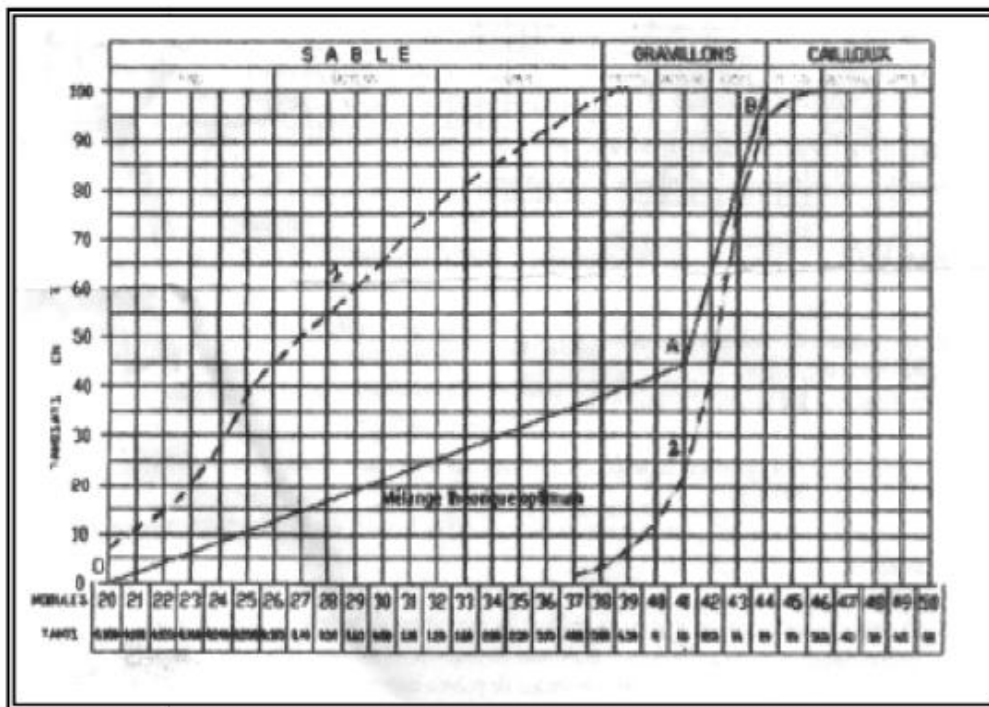


Figure I-10 : Courbe du mélange optimum selon la méthode de Dreux Gorisse [02]

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.

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

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

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^3 du volume absolu des matières solides (ciment + granulats) réellement obtenues dans 1 m^3 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.

I.5- Propriétés essentielles des bétons

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

de sa résistance finale. A partir de 28 jours l'évolution de la résistance du béton continue d'évoluer lentement et d'une façon asymptotique.

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

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

1.5.1- Propriétés de résistance des bétons

Résistance à la compression : le béton présente une excellente résistance à la compression ; f_{c28} jours des bétons peut prendre des valeurs entre 20 MPa et 120 MPa.

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

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

Dans ces cas le béton se comporte comme un matériau fragile, il se brise juste après la sollicitation, il n'est pas ductile. Un matériau ductile se déforme largement avant de rompre.

Pour compenser les insuffisances du béton, notamment en terme de résistance à la traction, au cisaillement, aux chocs ; mais aussi aux effets des attaques chimiques qui provoquent de la fissuration dans le béton, on introduit alors dans le béton soit des armatures ou bien des fibres, d'où le béton armé et le béton fibré.

1.5.2- 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 m³. 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 kg/m^3 .

Toutefois, 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 des 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.5.3- Les bétons de fibres

Ce sont les bétons armés (BO, BHP, BUHP) auxquels on va associer des fibres. Les fibres ont des longueurs qui varient entre quelques millimètres à quelques centimètres, elles sont très fines au plus 1 à 2 mm de diamètre. Elles peuvent être de plusieurs natures : aciers, verre, végétales, synthétiques... Dans le béton les fibres sont réparties d'une manière homogène dans son volume, sans orientation privilégiée. Les fibres sont introduites pour limiter la fissuration du béton au jeune âge et à long terme. Ils vont également réduire le caractère fragile des bétons en lui procurant une meilleure résistance aux chocs notamment pour les surfaces extérieures et les surface de dallage

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Partie 2 : La durabilité des bétons

I-6 Introduction

Traditionnellement l'aptitude d'un béton à résister à la dégradation était appréciée par sa résistance à la compression. En effet, la résistance est une propriété étroitement liée à la structure poreuse donc à la perméabilité et la diffusivité et par conséquent à la durabilité. La durabilité du béton s'explique en grande partie, par la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans les réseaux poreux des bétons. Un béton est d'autant plus durable qu'il résiste à la pénétration des agents agressifs. Cette qualité peut être caractérisée au moyen de deux grandeurs physiques : la perméabilité et la diffusivité. La première est relative au déplacement d'un fluide sous l'effet d'une pression motrice, elle dépend de la taille des espaces poreux dans lesquels s'écoule le fluide ainsi que leur interconnexion figure II.1. La seconde est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration.

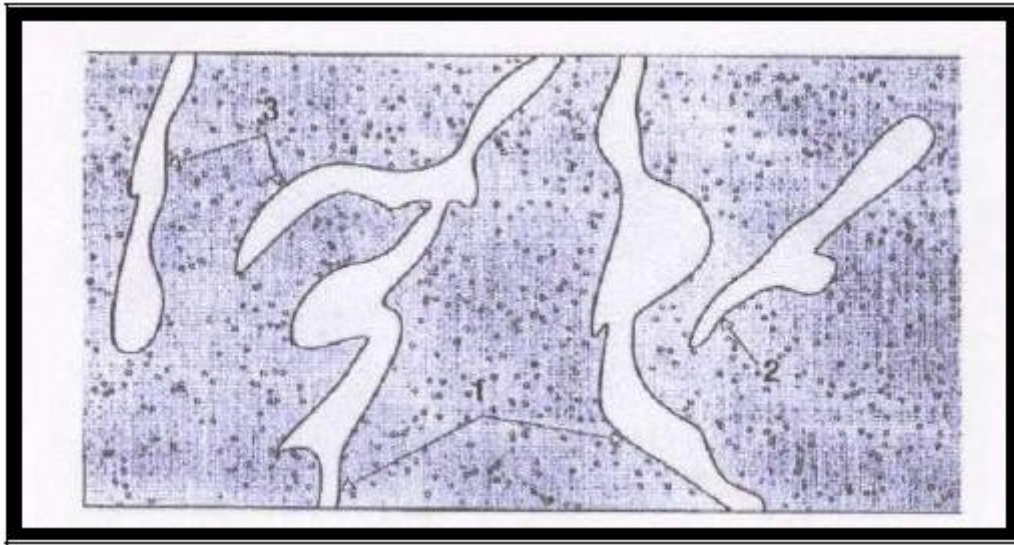


Figure I-11 : Représentation schématique d'un solide poreux.

- 1- Pores traversant la pièce de part et d'autre
- 2- Pores fermés
- 3- Pores semi-fermés

La dimension et la connectivité des pores varient d'un béton à un autre en fonction de leur composition (compacité granulaire, rapport eau/ ciment, nature des ciments, teneur du béton en éléments fin...) mais aussi du mode de malaxage et de mise en place (durée de malaxage, manque de vibration...).

I-7 Dégradation des bétons

La mauvaise durabilité de matériaux cimentaires se manifeste par une dégradation résultant d'une action simultanée des phénomènes internes au matériau (réaction physico-chimique) et des facteurs externes (conditions d'exposition). Ces phénomènes peuvent être subdivisés en plusieurs catégories [4, 11, 25] :

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

I-7-1 Principaux processus de dégradation chimique

Il est à noter que la structure interne du ciment est un milieu très alcalin possédant un pH voisin de 13. Par conséquent, tous les environnements lui sont agressifs. Sa structure poreuse

le rend plus vulnérable devant la présence de liquide et de gaz qui le traverse ; les processus de perméation le régissant sont la perméabilité et la diffusion.

I-7-1-1 La lixiviation ou l'hydrolyse (dissolution) des hydrates

Lorsque l'eau entre en contact avec la pâte de ciment, elle tend à dissoudre certains produits qui sont à base de calcium. La chaux formée par l'hydratation est la plus vulnérable vis-à-vis des processus de dissolution [11]. Le processus de dissolution a pour effet d'accroître la porosité, et par conséquent, la résistance mécanique de la pâte de ciment chute.

I-7-1-2 Les échanges ioniques entre les hydrates et le milieu agressif

Les eaux agressives sont en grande partie des milieux acides par rapport à la solution interstitielle. Ce qui favorise leurs réactions avec la pâte de ciment pour former de nouveaux produits qui peuvent être solubles et se diffuser par la suite vers l'extérieur. Ou bien elles peuvent se précipiter et remplir les pores, ne participant à aucune fonction de liaison ou de résistance.

I-7-1-3 Formation de produits expansifs

La formation de produits expansifs est en fonction des matériaux utilisés ou du type d'exposition produite, on citera par exemple [4] :

- L'attaque par les sulfates produit des gels expansifs. C'est le cas des sulfates de sodium qui réagissent avec la portlandite pour former du gypse à volume plus important que les produits d'origine.
- Réactions alcali-silice qui produit du gel de silice fortement expansif. Les alcalins contenus dans la solution interstitielle réagissent avec la silice contenue dans les grains produisant des produits silico-alcalin qui sont expansifs en présence d'eau.
- Corrosion des armatures forme du dioxyde de fer fortement expansif au voisinage des barres et provoque l'éclatement du béton.

Ces produits expansifs créent de très grandes pressions internes qui provoquent la fissuration de la matrice de ciment.

I-7-2 Cinétique de dégradation des matériaux

La cinétique de dégradation de la pâte de ciment est régie par la vitesse de transfert par diffusion ou par perméabilité des substances chimiques. Ces dernières sont fonction des

dimensions des pores ainsi que de leur connectivité. L'étude de la porosité et du transfert de matière paraît indispensable pour pouvoir déterminer ou prévoir la position du front de dégradation à n'importe quel âge du matériau.

I-7-2-1 Porosité

Les analyses porosimétriques d'une pâte de ciment durcie distinguent deux familles de pores [11].

Pores capillaires : qui sont des pores à grande taille (environ 0,5 μm), ils correspondent aux espaces entre les grains de ciment non remplis d'hydrates. Leurs tailles sont inversement proportionnelles à la durée d'hydratation et augmentent proportionnellement avec le rapport E/C, plus les grains de ciment sont rapprochés et plus le diamètre moyen des pores est petit. La porosité capillaire dépend également de la taille des grains de ciment anhydres. [4, 11], Le degré d'hydratation du matériau augmente avec la diminution de la taille des grains anhydres. Pour une pâte entièrement hydratée, la connectivité capillaire n'est plus assurée de ce fait, les phénomènes de diffusion et de perméabilité sont réduits.

Pores de gel hydraté : ils sont de dimension inférieure à quelques dizaine de nanomètres. Ils constituent la structure micro poreuse des silicates de calcium hydratés, ces pores sont peu influencés par le rapport E/C [4].

Dans le cas de béton et des mortiers, une zone plus poreuse apparaît aux interfaces pâte/granulat (auréoles de transition). Cette porosité est due à la modification des réactions en surface des inclusions dures à cause de la présence excessive d'eau due au ressuage et aux effets de paroi. Les granulats créent un effet de paroi ce qui entraîne une compacité plus faible des grains de ciment à l'interface des granulats et donc une porosité plus importante qui est rapidement remplie d'eau. A tout âge, la porosité au voisinage de l'interface des granulats demeure plus élevée que celle du cœur de la pâte de ciment [11].

I-7-2-2 Transfert de matière

La durabilité des matériaux est en fonction de son aptitude à être traversé par des liquides, des gaz. On distingue 3 modes de transfert dans un matériau cimentaire.

Transport de liquide par perméation : Le processus de perméation est dû à un gradient de pression entre deux milieux. Le mouvement du liquide se fait de la zone à grande pression

vers la zone à pression moins élevée. Ce mode de transport est négligeable pour le cas des matériaux cimentaires à cause de leur faible propriété de perméation. [11, 25]. Le débit du fluide q est décrit par la loi de Darcy :

$$\vec{q} = \frac{K}{\mu} \mathbf{grad}(P) \text{ (m}^3/\text{m}^2/\text{s)}$$

K : perméabilité intrinsèque (m^2) ; μ : viscosité dynamique du fluide (kg/m/s) ; P : pression hydraulique (Pa).

Transport par migration: traduit le mouvement des ions sous l'application d'un champ électrique. L'orientation des particules dépend directement de la valence (loi de Nerst). Cette technique est utilisée par B. GERARD (1996), essai (leaching induced by forced transport) pour des essais de dégradation accélérée.

Transfert par diffusion : c'est le processus le plus rencontré dans le transport de matières à travers les matériaux. Lorsque le béton est mis au contact avec une solution agressive le phénomène de diffusion se déclenche. Le mouvement est dû au gradient de concentration entre l'intérieur et l'extérieur. Le débit d'ions est calculé à partir de la première loi de Fick. La diffusion est suivie de réactions chimiques entre les hydrates et la solution interstitielle.

$$\vec{q} = -D \mathbf{grad}(C)$$

D : coefficient de diffusion ; C : concentration.

Le transport des ions agressifs se fait par diffusion en solution aqueuse ou en phase gazeuse, la pénétration des gaz s'effectue dans l'air contenu dans la porosité du matériau (pénétration du gaz carbonique CO_2). La variation de concentration dans l'eau interstitielle de la pâte de ciment, provoquée par la diffusion engendre des sur/sous saturations par rapport à différentes phases solides, ce qui rompt l'équilibre thermodynamique et provoque des phénomènes de dissolution ou de précipitation.

La cinétique de dégradation est la résultante des deux cinétiques de diffusion et de dissolution ou précipitation, la cinétique des réactions chimiques est très grande devant celle de la diffusion. Raison pour laquelle les phénomènes de dégradation sont gouvernés principalement par le processus de diffusion et par conséquent par la valeur de la concentration en ions dans la solution agressive.

I-7-3 Principales attaques chimiques

I-7-3-1 Attaque par la carbonatation

En présence d'humidité, le gaz carbonique contenu dans l'air, au contact du ciment, forme de nouveaux produits (CaCO_3). La carbonatation provoque le changement de la composition chimique de la microstructure des hydrates, par conséquent les propriétés liantes et mécaniques du matériau sont modifiées. L'action du CO_2 sur le matériau se manifeste même à très faibles concentrations (environ 0.03 en volume d'air) [4]. Les parois des tunnels destinés à la circulation routière sont un très bon exemple de structure en béton les plus exposés à une concentration très élevée en CO_2 . La carbonatation est influencée par plusieurs facteurs parmi d'autres :

La porosité notamment, la tortuosité a une grande influence sur la diffusion qui est le processus qui contrôle le phénomène de carbonatation [11].

Le degré d'humidité des pores. Si les pores sont saturés, la vitesse de diffusion du gaz carbonique est très lente alors que si les pores sont secs le CO_2 demeure sous forme gazeuse et ne peut attaquer les hydrates. La vitesse de carbonatation la plus élevée se produit lorsque l'humidité relative est comprise entre 50% et 75% [4].

La variation de la température (entre 20°, 30° jusqu'à 50°) accélèrent un peu la carbonatation mais, au-delà de 60°, 70° le phénomène d'évaporation d'eau des pores se déclenche, ainsi le gaz carbonique ne trouve plus d'eau pour réagir et le phénomène la carbonatation va en baisse.

La concentration en gaz carbonique dans l'air : Plus la concentration en gaz carbonique extérieur est grande, plus la différence de concentration entre l'intérieur et l'extérieur est importante et plus la cinétique de diffusion devient grande et donc la carbonatation devient importante.

I-7-3-2 Attaque par les sulfates

La présence des sulfates de calcium, de sodium, magnésium et d'ammonium dans l'environnement de la pâte de ciment représente un risque de dégradation majeur qu'on ne peut négliger. Lorsqu'ils sont mis en solution, les sulfates réagissent avec les hydrates de la pâte de ciment durcie mais également avec les produits anhydres, (aluminat tricalcique C_3A restant dans la pâte durcie). Ces réactions produisent de nouveaux composants expansifs. Ces produits, créent des tensions internes considérables qui, à une certaine limite, provoquent la fissuration de la pâte durcie et donc la diminution de ces caractéristiques mécaniques [4, 11].

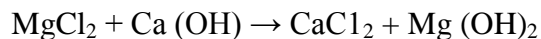
Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, contenus dans les sols ou issus des déchets industriels, mais ils peuvent également parvenir d'une succession de processus de transformations chimiques et biologiques. C'est le cas de l'acide sulfurique produit par les bactéries présentes dans les canalisations des eaux usées. [2, 10].

La pénétration des sulfates est régie par le processus de diffusion, leur agressivité est en relation directe avec la porosité de la pâte de ciment et donc le rapport E/C, mais également, avec le type de ciment utilisé, notamment la teneur en C₃A incorporé dans le mélange anhydre car, les sulfates réagissent avec les C₃A.

I-7-3-3 Attaque par les chlorures

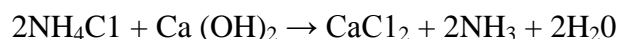
Autres que la corrosion des aciers, les chlorures quand ils sont à forte concentration (eau de mers et sel de déverglaçage) provoquent l'altération des hydrates. Une partie des chlorures est fixée par les silicates de calcium hydratés, une autre par l'hydroxyde de calcium formant des composés expansifs comme l'oxychlorure de calcium CaCl₂ Ca(OH)₂ H₂O, le monochloroaluminate C₃A CaCl₂ 10H₂O et la chloroettringite CaCl₂ 3CaSO₄ 31H₂O. [11, 4]

Les chlorures de magnésium réagissent également avec la portlandite.



Le Mg(OH)₂ formé, appelé brucite, précipite dans les pores à la surface du béton en constituant une couche de surface protectrice qui empêche la réaction de se poursuivre.

Le chlorure d'ammonium réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former du chlorure de calcium et de l'ammoniaque qui sont très solubles dans l'eau.



I-7-3-4 Attaque par les eaux (lixiviation)

L'eau représente un vecteur commun de toutes les attaques. Sa présence déclenche et/ou accélère leurs mécanismes d'action. L'eau pure peut nuire à la pâte de ciment, du fait qu'au contact de la solution interstitielle caractérisé par une basicité (pH compris entre 12,5 et 13,5), l'eau crée un déséquilibre thermodynamique entre la solution interstitielle et les hydrates, ce qui engendre le changement de phase des hydrates. La lixiviation est influencée par deux catégories de facteurs

- ceux liés à la solution agressive : son pH qui traduit le caractère de basicité ou d'acidité de la solution; sa dureté : soit la somme des concentrations en cations métalliques présent dans l'eau, sa teneur en dioxyde de carbone agressif, en sulfate, etc.
- ceux liés à la pâte de ciment : le type de ciment utilisé, le rapport E/C et donc la porosité.

Les eaux de mer : L'attaque chimique résulte des réactions simultanées entre les sulfates et les chlorures contenues dans l'eau et des constituants du ciment [4, 11].

Les eaux de pluies : Les pluies propres ont généralement un PH compris entre 5 et 7. Les pluies provoquent une dégradation superficielle suivant des processus plus ou moins complexes mettant en jeu des phénomènes de dissolution dus aux acides (sulfurique, nitrique, carbonique) et d'expansion dus à la cristallisation des sels. [4].

Attaque par les eaux usées : L'activité bactérienne conduit au dégagement d'hydrogène sulfuré par la transformation de produits soufrés. Cet hydrogène sulfuré se combine avec l'humidité atmosphérique puis se condense sous forme d'acide sulfurique sur les parois du béton et réagit avec les hydrates. Cette réaction provoque la dégradation du béton. On peut aussi retrouver des eaux riches en minéraux provenant des zones industrielles. Selon le type de minéraux qu'elles véhiculent, elles attaquent les bétons avec lesquels elles sont en contact [4, 11].

I-7-3-5 Réaction alcali-granulats

Le béton peut subir des désordres dus aux réactions chimiques produites entre la solution interstitielle, fortement basique et alcaline, avec certaines phases minéralogiques présentes dans les granulats. La réaction alcali-granulats produit des produits expansifs, ce qui conduit à la fissuration et à la baisse des performances mécaniques de la matrice de ciment. Selon la pétrographie des granulats, on distingue deux types de réaction pouvant se produire [11]

a - réaction alcali-silice : réaction entre les phases siliceuses réactives des granulats, l'opale amorphe, la calcédoine, la tridymite et la pâte de ciment

b – réaction alcali-carbonate : qui a lieu entre quelques calcaires dolomitiques et les alcalins du ciment Cette réaction conduit à la décomposition des cristaux de dolomite disséminés dans la fine matrice microcristalline des granulats calcaires. Pour que la réaction alcali granulat se développe dans un béton, plusieurs conditions doivent être réunies présence de granulats réactifs, une concentration en alcalins élevée dans la solution interstitielle et surtout des conditions d'humidité très élevée, soit plus de 85%. A ceux-là s'ajoutent le type de ciment et le rapport E/C qui conditionnent la porosité et donc le transfert d'ions dans le matériau.

I-8 Conclusion

La durabilité, mais aussi les propriétés mécaniques des bétons dépendent essentiellement de la porosité soit le volume des vides. On vient de voir que toutes les attaques chimiques et leurs cinétiques sont régies par la porosité et la connectivité des pores dans le béton durci. La cinétique de dégradation du béton est régie par la vitesse de transfert par diffusion ou par perméabilité des substances chimiques. Ces dernières sont fonction des dimensions des pores ainsi que de leur connectivité. Par conséquent, l'étude de la porosité et du transfert de matière paraît indispensable pour pouvoir déterminer ou prévoir la position du front de dégradation à n'importe quel âge du matériau, soit donc prévoir la durée de vie d'une construction.

La porosité est un paramètre déterminant de la résistance et la durabilité du béton. En effet, une faible porosité constitue le meilleur moyen de défense des bétons contre tous les agents agressifs.

L'absorption d'eau par immersion est le résultat des mouvements capillaires dans les pores du béton qui sont ouverts sur le milieu ambiant. Elle est déterminée par immersion d'une éprouvette de béton dans l'eau jusqu'à masse constante et en mesurant l'augmentation de masse. Elle est exprimée en pourcentage de la masse sèche de l'éprouvette. Etant une image de la porosité, l'absorption d'eau est utilisée comme un indicateur de la qualité du béton.

CHAPITRE 1 : étude bibliographique

Parie 3 : *Généralité sur les essais non destructifs*

I.9-Introduction

Le passage du temps laisse sa trace sur les structures de génie civil. Ce vieillissement est consécutif à une dégradation des propriétés physiques et chimiques des matériaux de construction. Ces dégradations, 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, superficiels ou souterrains. Face à ce problème, les choix économiques actuels des sociétés industrielles sont orientés vers la réparation des structures existantes plutôt que vers la démolition et la construction des nouvelles structures. Cependant les méthodes d'essais non destructives présentent un grand intérêt.

Les méthodes d'essai non destructives des ouvrages en béton simple, en béton armé ou en béton précontraint 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.

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 [12, 16, 17, 18, 19].

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 [19]. L'application des méthodes non destructives se fait à l'aide des appareils comme l'ultrason et le scléromètre.

- L'ultrason est un appareil qui mesure la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques à travers le béton, il peut nous renseigner sur l'homogénéité du béton, l'estimation du module élastique, l'estimation de la profondeur des fissures et de la résistance en compression.
- Le scléromètre, appliqué sur une face de la partie à ausculter, permet d'évaluer l'homogénéité du béton in situ, donc déterminé des zones de faible qualité du béton.

I.10-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.

I.11-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.12-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.12-1-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.

1.12-1-3-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.

Après avoir lu les indices sclérométriques, il faut calculer la moyenne arithmétique, puis déterminer la résistance en se reportant aux graphiques ou aux tableaux dessinés sur le manchon qui varient d'un appareil à un autre.

Comment interpréter les résultats obtenus par scléromètre?

L'indice sclérométriques d'une éprouvette est la moyenne des douze mesures, effectuées sur l'éprouvette ou sur la zone d'ouvrage testé.

Les valeurs faibles correspondent généralement à des impacts effectués sur des zones poreuses, alors que les valeurs très élevées correspondent à des impacts réalisés sur de grands agrégats.

Chaque appareil est livré avec des abaques, qui donnent la relation entre cet indice et la résistance en compression du béton. Par report de l'indice sclérométriques sur l'abaque de la norme et en considérant l'inclinaison du scléromètre, on obtient la résistance en compression de l'éprouvette ou du béton de l'ouvrage.

L'appareil le plus connu est le scléromètre de Schmidt dont les courbes de transformation sont données ci-après.

I.12-2-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.12-2-1-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.12-2-2-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 [24].



Figure I.13 : Appareil d'auscultation sonore punditLab [24]

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'osculation pourra être direct, semis directe ou indirecte de surface.
- Etendre 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).

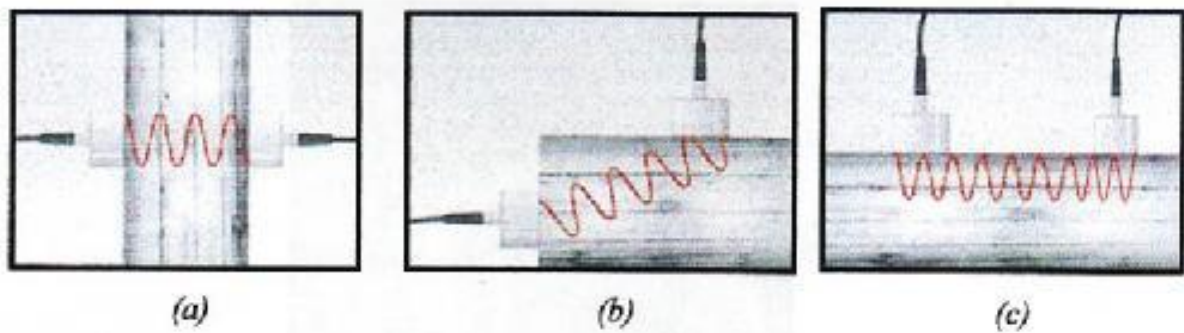


Figure I.14 Types de propagation d'ondes

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.

1.12-2-3-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, E_d , par l'expression suivante [16]:

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

V : vitesse du son ; ρ : masse volumique ; E_d : module d'élasticité; μ 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 [17] :

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

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 [16, 31] :

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

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 :

| <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 |

Tableau-I.5 : Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation des ondes ultrasonique [17]

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 dépendent de la qualité du béton fabriqué.

I.12-2-4- 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

I.12-2-4-1-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, σ : (sans dimension) coefficient de Poisson, ρ : (kg/m³) 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.

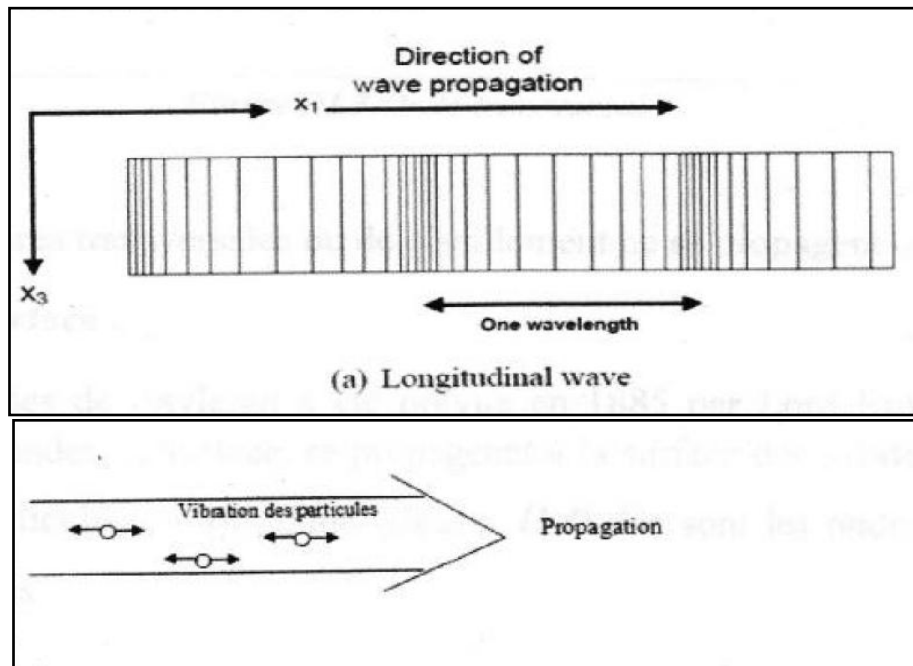


Figure I.15 Ondes longitudinales

– 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 V_T est liée aux caractéristiques du matériau par la relation :

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

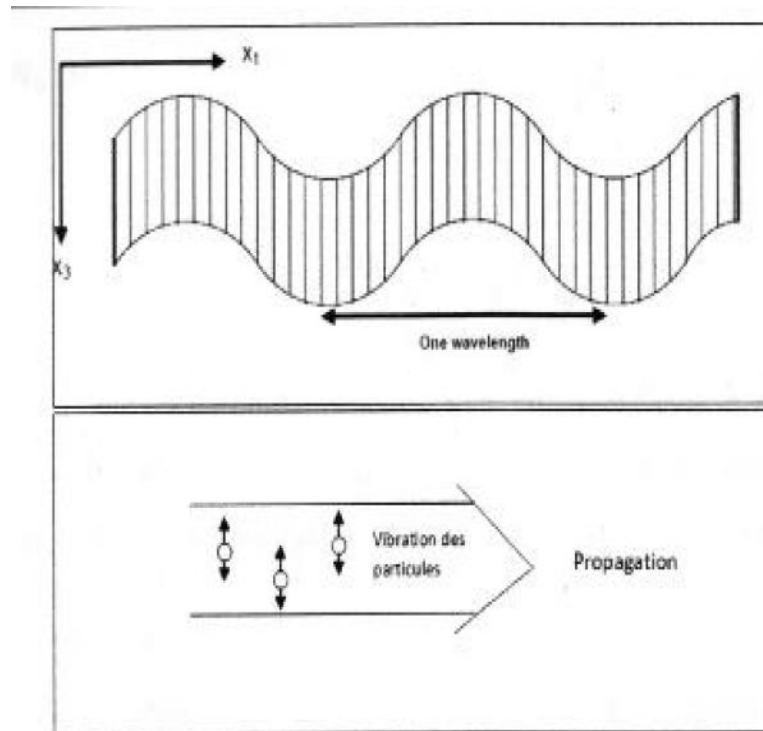


Figure I.16 Ondes transversales

I.12-2-5-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 granulat utilisé.
- 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 :

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

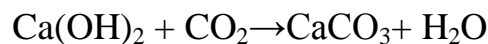
Si on teste des éprouvettes de hauteur inférieure à 80 mm, la vitesse de propagation des ultrasons est réduite ; donc les résultats obtenus doivent être utilisés avec attention.

- 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_2) de l'atmosphère sur les chaux libres, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 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_3).

La transformation ayant lieu est la suivante :



La dureté du carbonate de calcium (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 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.

1.12-2-6-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.

C'est une méthode qui requiert un assez haut niveau technique des opérateurs et qui est promise à un très bel avenir.

I.13-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 II : *Caractérisation des matériaux et composition des bétons*

II.1- Introduction

Les granulats sont considérés comme des éléments essentiels dans la composition du béton ordinaire et des bétons spéciaux. L'utilisation des granulats recyclés a une grande importance dans les structures. D'un côté elle permet de récupérer les matériaux résultants de la démolition des constructions due aux catastrophes naturelles ou la démolition du vieux bâti, cela permet de préserver l'environnement par la réduction des déchets dans la nature. D'un autre côté; leur réutilisation permet de protéger la nature de l'exploitation excessive de la réserve des granulats naturels et donc de l'environnement.

Dans ce chapitre nous avons dans une première étape donner les résultats de caractérisation des granulats de béton de démolition (GBD) et ceux qui sont naturels (GN).

Pour étudier la faisabilité d'utiliser les GBD, en terme de durabilité, nous avons alors présenté dans ce chapitre la méthode de formulation des bétons étudiés ainsi que les paramètres de variation des bétons à étudier.

II-2 Matériaux et formulation

II-2-1 Matériaux de base utilisés

Dans notre étude, nous avons utilisé des matériaux naturels locaux et ceux du recyclage, soit les granulats de béton de démolition.

II-2-1-1- Ciment :

Le ciment utilisé pour notre étude est un ciment de type CPJ- CEM II/B 42,5 N Produit par LAFARGE Algérie.

II-2-1-2 Granulats :

On a utilisés dans cette étude deux sortes des granulats: les granulats naturels et les granulats de béton de démolition.

Les granulats naturels (GN) d'une forme semi concassés. Ils sont de trois classes granulaires délivrées sous les appellations commerciales suivantes :

Sable 0/3,

Gravier (GN 3/8),

Gravier (GN 8/15).

Les granulats de béton de démolition (GBD) nous les avons préparés par concassage manuel d'éprouvettes usagées trouvées au niveau de notre laboratoire (voir figure ci dessous).



Figure II- 1 : Eprouvettes usagées trouvées au niveau de notre laboratoire.

Les granulats ainsi obtenus sont séparé aux tamis 3 mm, 8 mm et 15 mm pour avoir les deux fractions à utiliser.

Gravier (GBD 3/8),

Gravier (GBD 8/15).

II-2-1-3-Fillers :

Produit obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte, laitiers, bentonite, cendre volante...) naturelles ou non, agissant principalement, grâce à une granularté appropriée, par leurs propriétés physique sur certaine qualité du ciment (accroissement de maniabilité, diminution de perméabilité et de capillarité, réduction de la fissurabilité...). Les fillers sont inertes s'ils n'ont aucune action chimique sur les ciments en présence d'eau ; ils sont actifs s'ils ont, même partiellement, des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques en présence de ciment et d'eau.

II-2-1-4 Le super-plastifiant (SP) :

Le SP utilisé est le Super plastifiant MEDAPLAST SP 40, produit par Granitex. Il est aussi un haut réducteur d'eau. Il permet d'obtenir des bétons et mortiers de grande qualité en termes de résistance et de fluidité. En plus de sa fonction principale de super-plastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton. MEDAPLAST SP 40 permet également un maintien d'ouvrabilité sur une longue période (2 heures).

II-2-1-5 Eau de gâchage : L'eau utilisée dans cette étude est l'eau potable du robinet.

II-2-2 Résultats de caractérisation des granulats

Les granulats utilisés dans les travaux de bâtiments doivent répondre à des impératifs de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage, il est nécessaire d'en établir les caractéristiques par différents essais de laboratoire.

II-2-2-1 Echantillonnage (NF P 18- 553)

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. L'opération d'échantillonnage est essentielle et elle s'effectue en général en deux étapes :

1. Prélèvement d'échantillon global du matériau, soit dans une carrière ou dans une usine.
2. Au laboratoire, prélèvement d'un échantillon par quartage pour les essais prévus. Cet échantillon doit être représentatif de l'échantillon du prélèvement de départ.

II-2-2-2 Analyse granulométrique (EN 933-1 et EN 933-2)

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains constituant l'échantillon.

L'essai consiste à classer les différents grains qui constituent l'échantillon en utilisant des tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur et le classement des grains est obtenu par vibration de la colonne de tamis.

Quant à la courbe granulaire, il est bien de la connaître, car plus une courbe est régulière plus le squelette granulaire formé est compacte (meilleure compacité du squelette du béton). Par ailleurs, la courbe granulaire a aussi un effet sur l'ouvrabilité du béton.

Dans ce qui suit nous avons présenté les résultats de l'essai pour les granulats utilisés. Sur la figure II-2 sont représentées les courbes des granulats naturels (Sable 0/3 ; GN 3/8 et GN 8/15) et les (GBD 3/8 et GBD 8/15).

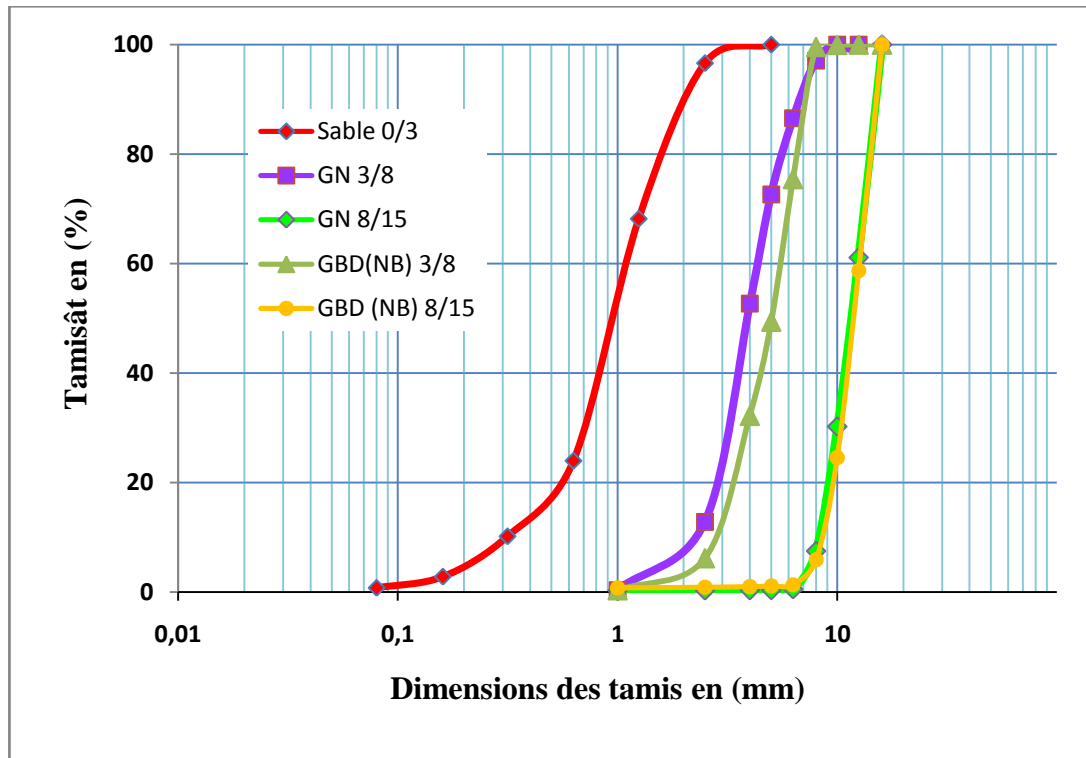


Figure II-2 : Courbes granulaires des granulats naturels et des granulats de béton de démolition.

D'après la figure II- 2 on remarque que la courbe granulière du GBD 8/15 est semblable à celle des GN 8/15.

Le descriptif des essais de granulométrie ainsi que les calculs des différents résultats sont donnés dans l'annexe1.

II.2.2.3- Module de finesse du sable

Le module de finesse (MF) est défini comme étant la somme des refus cumulés % ramené à l'unité des tamis : 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5 et 5 mm. Ce paramètre est particulièrement appliqué aux sables dont il est une caractéristique importante. Un bon sable à béton doit avoir un MF entre 2.2 et 2.8.

- **2.2 < MF < 2.8** sable préférentiel: convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités.
- **1.8 < MF < 2.2** sable un peu trop fin : est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance.
- **2.8 < MF < 3.2** sable un peu trop grossier : correspond à des sables à utiliser pour la recherche de résistance élevées, mais on aura en général une moins bonne ouvrabilité et des risques de ségrégation.

Le module de finesse de notre sable est :

$$MF = \frac{97,18 + 89,82 + 76,00 + 31,85 + 3,44 + 0,00}{100} = 2,98$$

Ce qui correspond à un sable peu grossier.

II.2.2.4- Absorption et masses volumiques des granulats <NF P 18-555>

La mesure d'absorption est essentielle pour la formulation des bétons. En effet cette mesure va nous permettre 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, dans ce cas les granulats peuvent fournir au béton plus d'eau, et le rapport E/C change 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

| | Sable 0/3 | GN 3/8 | GN 8/15 | GBD 3/8 | GBD 8/15 |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Masse volumique absolue (g/cm³) | 2,75 | 2,73 | 2,71 | 2,69 | 2,67 |
| Masse volumique réelle (g/cm³) | 2,60 | 2,63 | 2,63 | 2,25 | 2,30 |
| Masse volumique saturée à surface sèche (g/cm³) | 2,66 | 2,67 | 2,66 | 2,41 | 2,44 |
| Ab (%) | 2,09 | 1,38 | 1,15 | 7,22 | 6,09 |

Tableau II.1 : Masse volumique et coefficients d'absorption des différents granulats.

Les masses volumiques des GBD sont légèrement inférieures à celles des GN, ceci s'explique par la présence des pores dans la pate durcie qui constitue une partie des granulats recyclés.

L'essai d'absorption affiche une grande différence entre ces deux types de granulats. les GBD ont une forte absorption d'eau (entre et 6 à 7 %) quand aux GN (environ de 1.2 %). On peut expliquer ce phénomène par la forte porosité des bétons concassés en comparaison à celle des granulats naturels. Ceci est aussi dû à la présence d'une porosité résiduelle de la pâte durcie du béton de démolition.

Comparaison des GN et GBD de fraction 8/15



Figure II- 3 : granulats naturels (gauche), granulats de béton de démolition (droite).

La forme des grains pour le gravier naturel ainsi que celui provenant du béton concassé est plus au moins ronde, alors que pour celle de grains de brique concassé, a la forme angulaire aigue. La texture des particules des gros granulats issues du béton concassé est couverte d'une couche relativement non négligeable de mortier de ciment. Sur la figure II-4 est représentée une schématisation des granulats issus de la démolition.

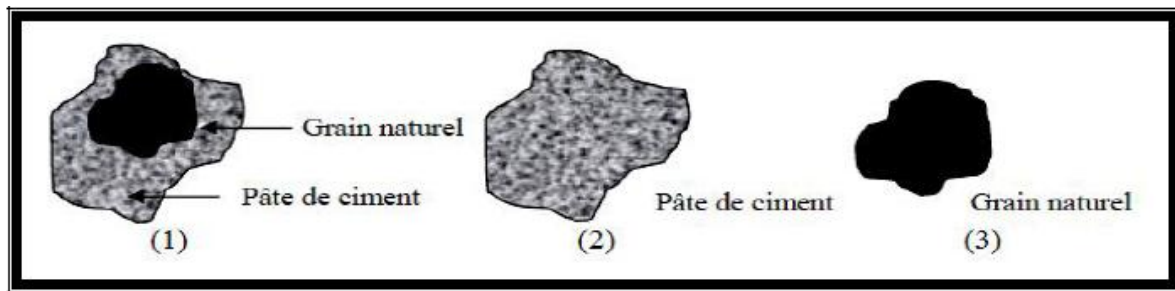


Figure II- 4 : Formes de granulats recyclés.

- (1) Un grain de gravier enrobé par la pâte de ciment,
- (2) Une pâte de ciment durci seule,
- (3) Un grain de gravier naturel.

II.3- Formulation des bétons

Sept bétons sont formulés. Le béton de référence à 100 % de GN, et six bétons formulés en substituant une partie des GN par des GBD à différents pourcentages.

Pour définir les proportions des différents granulats dans le béton de référence nous avons utilisé la méthode de Dreux Gorisse pour le calcul des proportions relatives des composants du squelette granulaire. Pour les autres bétons nous avons fait une substitution volumique des GN par des GBD.

II-3-1 Nomenclature des bétons utilisés

Les différentes compositions formulées et testées sont récapitulées dans le tableau suivant :

| Désignation du Béton | % de GN (8/15) | % de GBD (8/15) | % de GN (3/8) | % de GBD (3/8) |
|----------------------|----------------|-----------------|---------------|----------------|
| BR 100/0 | 100 | 0 | 100 | 0 |
| B 80/20 | 80 | 20 | 100 | 0 |
| B 60/40 | 60 | 40 | 100 | 0 |
| B 40/60 | 40 | 60 | 100 | 0 |
| B 20/80 | 20 | 80 | 100 | 0 |
| B 0/100 | 0 | 100 | 100 | 0 |
| B 0/100 bis | 0 | 100 | <u>0</u> | <u>100</u> |

Tableau II.2 : Nomenclature des formules de Béton à base de GBD testés.

Exemples :

- Le BR100/0 est le béton composé à 100 % de GN (8/15) et 100% de GN (3/8), 0 % de GBD (8/15) et 0 % de GBD (3/8).
- Le B60/40 est le béton composé à 60 % de GN (8/15) et 100% de GN (3/8), 40 % de GBD (8/15) et 0 % de GBD (3/8).
- le B0/100 est le béton composé à 0 % de GN (8/15) et 100% de GN (3/8), 100 % de GBD (8/15) et 0 % (3/8).
- le B0/100 bis est le béton composé à 0 % de GN (8/15) et 0% de GN (3/8), 100 % de GBD (8/15) et 100 % (3/8).

II.3.2- Formulation du béton de référence

La méthode utilisée pour la formulation de du béton est la méthode de Dreux Gorisse. Cette méthode permet de déterminer les quantités optimales de matériaux pour 1 m³ de béton. La méthode est basée sur la connaissance des courbes granulométriques des granulats.

Tracer de la courbe de référence selon la méthode de Dreux Gorisse

Cette courbe correspondant au mélange des granulats (sable 0/3, GN 3/8 et GN 8/15). Sur le même graphe d'analyse granulométrique (pourcentage des tamisats en fonction du diamètre des tamis), on trace une courbe granulaire de référence OAB avec :

- Le point **O** est repéré par les coordonnées : [0,080 ; 0,76].
- Le point **B** est repéré par les coordonnées : [D_{max} = 16 ; 100], (D_{max} : le diamètre du plus gros granulat à l'analyse granulométrique).
- Le point de **brisure A**, a les coordonnées suivantes :

$$\text{Abscisse : } X_A = D_{\max} / 2 = 8 \text{ mm ;}$$

$$\text{Ordonnée : } Y_A = 50 - \sqrt{D} + K' \quad \text{ou } k' = k + k_s + k_p$$

Avec K : coefficient qui dépend du dosage en ciment, de l'intensité de vibration, de la forme des granulats roulés ou concassés.

Pour le cas de notre béton de référence, on a souhaité formuler un béton courant d'un dosage en ciment de 350 kg, pas de vibration, soit donc une valeur de K = 0.

K_s et K_p étant des coefficients correctifs définis par :

K_s (correction supplémentaire en fonction de la granularité du sable) :

$$K_s = 6 M_f - 15 \quad \text{ou } M_f : \text{ module de finesse, } M_f = 2,98$$

$$\text{D'où } K_s = 6 \times 2,98 - 15 = 2,88$$

K_p (correction supplémentaire si le béton est pompable) :

$K_p = 5$ à 10 selon le degré de plasticité désiré.

Dans notre étude nous avons souhaité de formuler des bétons fluides, nous avons également souhaité que ces bétons soient pompables sans ségrégation, soit donc une valeur de $K_p = 5$

Ce qui nous donne : $Y_A = 50 - 4 + 0 + 2,88 + 5 = 53$

Détermination des pourcentages en volume absolus de matériaux

Pour déterminer les pourcentages (ou les lignes de partage) en volume absolus de granulats permettant la confection d'un mélange à minimum de vide, il est nécessaire de tracer comme indiqué sur la figure ci-dessous des droites reliant deux à deux les courbes granulométriques des matériaux du mélange.

Ces droites sont définies par 95% de refus pour le matériau à faible granularité et par 5% de passant pour le matériau à forte granularité. L'intersection des droites ainsi tracé avec la courbe brisée (courbe de référence) de Dreux permet, par projection sur l'axe des ordonnées, de déterminer les pourcentages en volume absolus de chaque matériau. Ces pourcentages doivent permettre l'obtention d'un mélange dont la courbe granulométrique est proche de la droite brisée de Dreux.

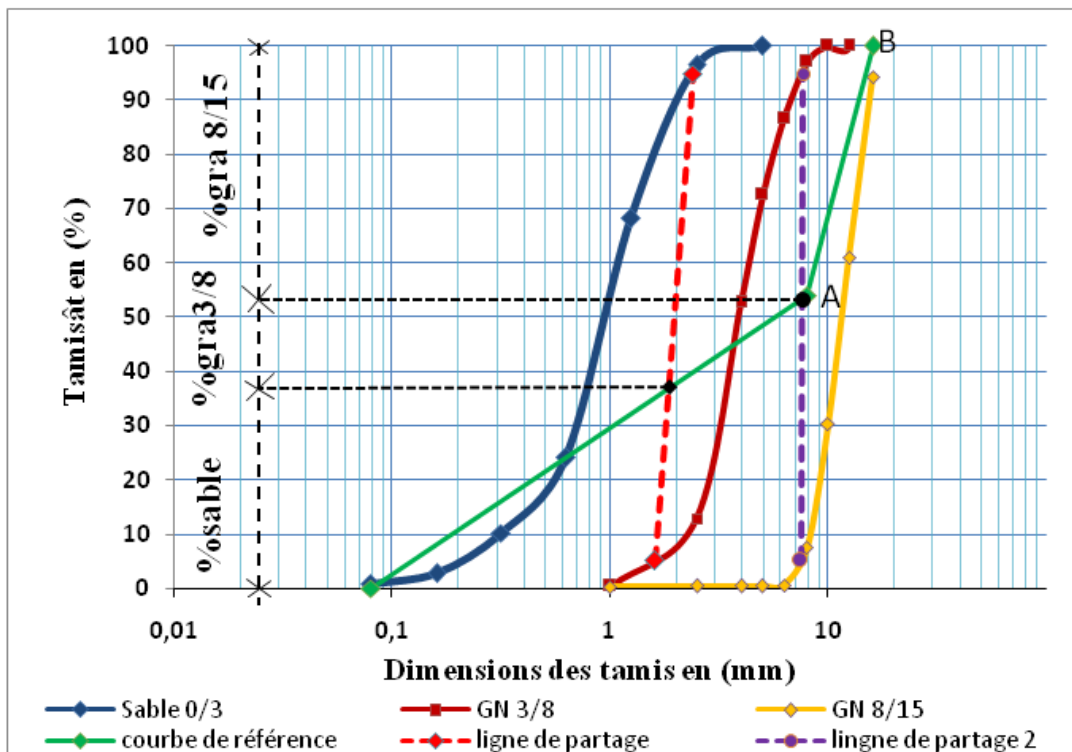


Figure II-5 : Courbes granulaires des 3 granulats, la courbe brisée et lignes de partage.

Sur la courbe granulométrique, les points d’intersections entre les lignes de partage et la courbe de référence OAB donnent les pourcentages des granulats suivants :

Sable (0/3) : 38%

GN 3/8 : 52% - 38% = 14 %

GN 8/14 : 48%

La composition finale de (1 m³) de béton de référence a donc été fixée puis réajustée par des essais au laboratoire pour avoir la consistance souhaitée. Les quantités sont données dans le tableau suivant, elles sont indiquées en kg, le superplastifiant est donné en pourcentage par rapport au poids du ciment.

| | |
|------------------------------|--------|
| Ciment | 350 |
| Fillers | 250 |
| Sable 0/3 | 645,45 |
| GN 3/8 | 286 |
| GN 8/15 | 699,8 |
| Eau totale | 200,44 |
| Super plastifiant (%) | 1,45 |

Tableau II.3 Compositions de béton de référence pour 1 m³.

II.3.3- Formulation des bétons étudiés

Après avoir définis les proportions du béton de référence, nous avons alors calculé les autres compositions des autres bétons étudiés. On rappelle que les autres bétons sont obtenus en maintenant tous les composants identiques au béton de référence, la seule modification est la nature des granulats. A cet effet, nous avons fait une substitution volumique des GN par des GBD, tout en réajustant les quantités d'eau totale en considérant les absorptions différentes des deux types de granulats.

Toutes les compositions étudiées sont présentées dans le tableau ci-dessous, les quantités de granulats sont données en masse de matériaux secs.

| Compositions (kg/m ³) | Désignation des bétons | | | | | | |
|--------------------------------------|------------------------|--------|--------|--------|---------|-------------|-----------|
| | BR100/0 | B80/20 | B60/40 | B40/60 | B20/80 | Béton 0/100 | B0/100bis |
| Ciment | 350 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350 |
| Fillers | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 |
| Sable 0/3 | 645,45 | 643,45 | 643,45 | 643,45 | 643,45 | 643,45 | 643,45 |
| GN 3/8 | 286 | 286 | 286 | 286 | 286 | 286 | * |
| GBD 3/8 | * | * | * | * | * | * | 258,14 |
| GBD 8/15 | * | 105,2 | 261,83 | 401,77 | 547,8 | 641,96 | 641,96 |
| GN 8/15 | 699,8 | 524,6 | 401,75 | 273,37 | 139,44 | * | * |
| Eau totale | 200,44 | 225,55 | 219,87 | 213,66 | 207,187 | 231,46 | 246,8 |
| SP (%) | 1,45 | 1,27 | 1,27 | 1,27 | 1,26 | 1,26 | 1,26 |

Tableau II.4 : Compositions des différents bétons pour 1 m³.

CHAPITRE 3 : Expérimentation et exploitation des résultats

III-1: Introduction

Dans ce chapitre nous avons présenté les étapes de confection des bétons utilisés pour notre étude ; depuis les pesées des matériaux jusqu'aux essais de caractérisation. Pour rappel, ces bétons sont à base de granulats naturels (GN) et de granulats de béton de démolition (GBD). On a décrit les méthodes d'essais utilisées, les conditions de fabrication et de conservation des éprouvettes. Trois types d'essais sont menés :

- résistances à la compression à 28 jours,
- vitesses de transfert des ondes ultrasonique de travers les éprouvettes de béton,
- Estimation de la porosité ouverte accessible à l'eau.

Les essais sont menés sur des éprouvettes cylindriques de hauteur (15 cm) et de diamètre de (30 cm). Nous avons dans une deuxième phase, donné les interprétations, comparaisons et conclusions sur les résultats de caractérisation des différentes formulations étudiées.

III-2: Confection des bétons

III-2-1 Préparation de la gâchée

Pour la confection des bétons, il y a lieu dans un premier temps de préparer le nécessaire en matériel et matériaux.

Pour uniformiser les essais, nous avons décidé de travailler avec des granulats secs. Il a donc fallu mettre à l'étuve à 105 °C pendant une durée suffisamment longue pour sécher les granulats (jusqu'à l'obtention d'une masse constante). Après séchage, les granulats et refroidissement les granulats sont mis en sac pour éviter qu'ils reprennent de l'humidité.

Préparer les moules prévus pour les éprouvettes de béton, les moules sont huilés pour faciliter le décoffrage.

Tous le matériels nécessaire est préparé (balance, récipients, spatules, truelles, cône d'Abrams, table pour l'affaissement, chronomètre, mètre ...).

Tout le matériel est pré-humidifié. Le malaxeur utilisé est à axe vertical de mouvement planétaire.



Figure III-1 : Malaxeur utilisé.

Après avoir déterminé les proportions de chaque composant, la séquence de malaxage retenue a été la suivante :

1. Humidifier tout le matériel à utiliser ;
2. Introduire le sable et les gravillons dans le malaxeur ;
3. Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec pendant 30 s ;
4. Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement l'eau de pré-humidification et le mélanger pendant 30 s ;
5. Laisser reposer 1 mn 30 s ;
6. Ajouter le ciment le filler, ensuite mélanger le tout durant 30 s ;
7. Verser l'eau restante graduellement et laisser se malaxer pendant 60 s ;
8. Introduire le super-plastifiant et malaxer pendant 1 mn 30 s.
9. Réaliser l'essai d'affaissement et d'étalement au cône d'Abrams ;
10. Remplir les moules d'éprouvettes par simple versement (sans vibration).

Essai cône d'Abrams

Cet essai est utilisé pour apprécier la consistance des bétons par deux mesures distinctes (affaissement du béton et étalement du béton). Il est réalisé en utilisant un moule tronconique

de 300 mm de hauteur, de 200 mm diamètre à sa base inférieure et 100 mm de diamètre à sa base supérieure.

Le cône est placé sur une surface lisse horizontale, il est rempli de béton, après arasement, le moule est retiré verticalement pour laisser le béton couler. Une fois le béton stable, on mesure alors une des deux valeurs souhaitées ou les deux « affaissement ou étalement ».

L'échantillon de béton s'effondre sous son poids propre ; plus l'affaissement est grand plus le béton est plastique ; aussi plus l'étalement est grand plus le béton est fluide.

III-2-2: Confection des éprouvettes

Nous avons utilisé des moules cylindrique de 15 cm de hauteur et de 30 cm de diamètre conformément à la norme NF P18-406 pour les essais de résistance mécanique en compression. Après mise en place du béton dans les moules les éprouvettes sont restées 24 heures dans la salle de fabrication. Nous les avons protégées par un film en plastique afin d'éviter l'évaporation de l'eau. Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées, puis référencées (on mentionne sur la surface supérieure des éprouvettes en béton la date de leur confection et la référence du béton). Les éprouvettes sont par la suite immergées dans un bac rempli d'eau à la température ambiante. Les éprouvettes sont alors conservées jusqu'à l'âge de 28 jours soit 27 jours dans le bac d'eau.

III-2-3: Essais sur les éprouvettes

Pour notre étude nous avons confectionné 7 formules en faisant varier les pourcentages des granulats naturels et ceux des granulats de béton démolition. Ces Bétons sont testés en compression et par ultrason d'une part, puis nous avons évalué leur porosité ouverte. Une étude comparative est alors effectuée entre les résultats du Béton de référence à 100 % de granulats naturels et ceux à base de granulats de béton de démolition.

III-2-3-1: Essais de résistance à la compression à 28 jours

La résistance mécanique en compression d'un béton 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 (voir la figure III-2). Les éprouvettes utilisées pour déterminer la résistance mécanique en compression des différents bétons étudiés sont cylindriques de diamètre 15 cm et de hauteur 30 cm. La presse utilisée est d'une capacité maximale de 2000 kN, (voir figure ci dessous). La

résistance en compression a été évaluée suivant la norme NF P 18-406. Les essais ont été réalisés avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s.



Figure III- 2 : Rupture de l'éprouvette ; La presse utilisée.

III-2-3-2: Essai par ultrason

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).

Il est nécessaire d'effectuer certaines opérations préliminaires sur les éprouvettes pour les préparer à l'auscultation ultrasonique à savoir :

- 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 (μs) 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 fermement sur la barre de calibrage de 25 μs (code article 710 10 028) (voir la figure III-4).
- 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-3) (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 III-3 : calibration 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.

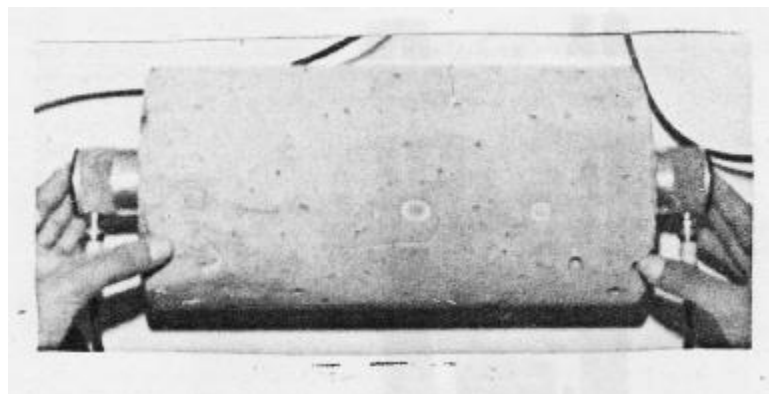


Figure III-4 : Utilisation d'un ultrason

III-2-3-3: Porosité ouverte

La porosité est la somme de la porosité ouverte à l'extérieur (pores connectés à l'extérieur) et de la porosité fermée (non connectée avec l'extérieur). Seule la première est accessible aux fluides. Pour la mesurer nous avons alors fait deux mesures distinctes : mesures des éprouvettes saturées à l'eau à surface sèche ; et mesures des éprouvettes totalement séchées. L'état de saturation ou de séchage sont contrôlés par les pesées qui se stabilisent.

Dans notre essai nous avons mesuré les masses de ces deux états sur des éprouvettes cylindriques de base 15 cm et de hauteur 30 cm. Les opérations sont effectuées dans l'ordre suivant :

- Immersion dans un bac à eau durant 28 jours; avant la pesée l'éprouvette est essuyée avec un tissu absorbant de manière à la débarrasser de l'excès d'eau de la surface extérieure;
- Séchage pendant une durée suffisamment longtemps jusqu'à l'obtention de la masse sèche constante dans une étuve dont la température est maintenue à 90°C.

Il faut souligner que le traitement en salle sèche est absolument nécessaire afin que l'eau contenue dans tous les pores accessibles, à des profondeurs par rapport à la surface extérieure, puisse quitter l'éprouvette.

La porosité accessible à l'eau (Pae) est exprimée en pourcentage de la masse sèche et calculée par la relation suivante :

$$P_{ae} = \frac{M_{humide} - M_{sèche}}{M_{sèche}} \times 100$$

Avec : M_{humide} : masse humide à saturation (kg); $M_{sèche}$: masse sèche (kg).

III-3: Résultats des essais menés

III-3-1 Résultats des masses volumiques des bétons durcis

Avant de faire les essais d'écrasement, nous avons pesés les différentes éprouvettes (trois éprouvettes par béton). Nous avons par la suite calculé la masse volumique des différents bétons, en utilisant la moyenne des pesées. La moyenne est calculée en utilisant la formule suivante :

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

Avec : X correspond à la variable mesurée.

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau suivant :

| | Ep1 | Ep2 | Ep3 | moyenne | Mv |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| BR100/0 | 12,77 | 12,71 | 12,45 | 12,64 | 2385 |
| B80/20 | 12,55 | 12,53 | 12,65 | 12,58 | 2373 |
| B60/40 | 12,38 | 12,79 | 12,70 | 12,62 | 2381 |
| B40/60 | 12,48 | 12,17 | 12,40 | 12,35 | 2330 |
| B20/80 | 12,35 | 12,52 | 12,33 | 12,40 | 2339 |
| B0/100 | 12,46 | 11,93 | 12,25 | 12,21 | 2303 |
| B0/100 bis | 12,41 | 12,13 | 12,16 | 12,23 | 2307 |

Tableau III- 1 : Récapitulatif des pesées des éprouvettes de bétons (kg) et des masses volumique calculées des bétons durcis (kg/m^3).

Sur la figure suivante nous avons représenté les résultats des masses volumiques en fonction du tau de substitution des GN par des GBD (tau qui augmente de gauche vers la droite). Nous avons également schématisé la courbe de tendance obtenue.

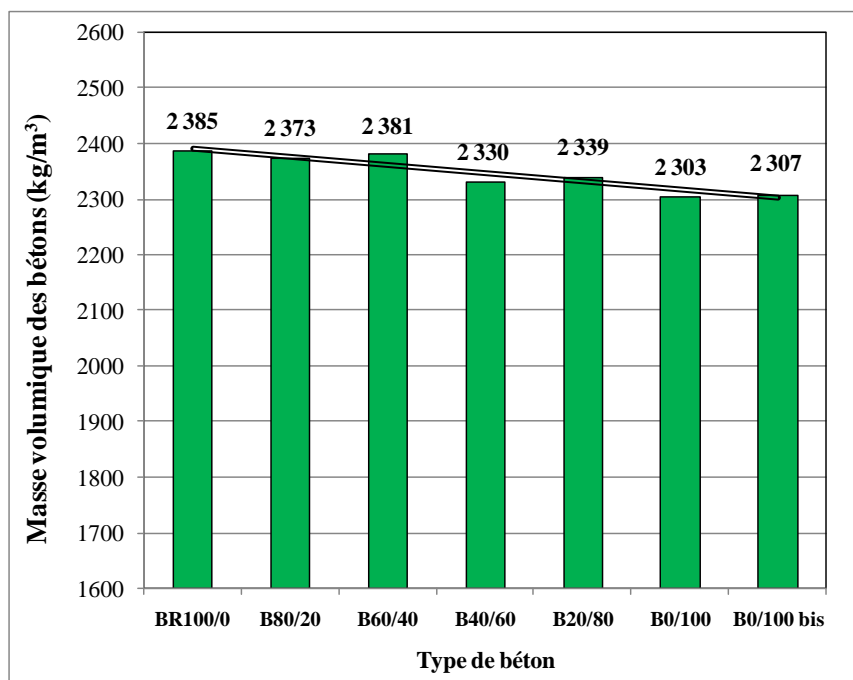


Figure III.5 : Masses volumiques des différents types de béton.

D'après les résultats, on constate que les masses volumiques des bétons baisse légèrement avec l'augmentation du tau de substitution des GN par les GBD.

III-3-2 Résultats des résistances à 28 jours

Les résistances mécaniques obtenues pour les différentes formules de bétons testés sont données dans le tableau III- 2. Sur le même tableau nous avons donné les résistances moyennes sur trois mesures ainsi que les valeurs des écarts types des trois mesures. Les écarts type sont calculés, dans un premier temps sur les trois mesures de chacun des bétons selon la formule suivante :

$$\text{Ecart type} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_{ci} - R_{cmoy})^2}{n - 1}}$$

Avec : n : nombre de mesures (pour un nombre d'opération limitée $n \leq 10$ on prend $n-1$ au lieu de n) ; R_{cmoy} : résistance à la compression moyenne de l'éprouvette i.

| | Eprouvette 01 | Eprouvette 02 | Eprouvette 03 | Rc Moyenne | Etype |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|------------|-------|
| BR100/0 | 27,04 | 26,78 | 26,30 | 26,71 | 0,38 |
| B80/20 | 24,11 | 25,12 | 23,90 | 24,38 | 0,65 |
| B60/40 | 23,08 | 25,54 | 22,00 | 23,54 | 1,81 |
| B40/60 | 23,31 | 22,68 | 22,87 | 22,95 | 0,32 |
| B20/80 | 21,42 | 21,49 | 19,73 | 20,85 | 0,97 |
| B0/100 | 21,04 | 18,87 | 21,12 | 20,34 | 1,28 |
| B0/100 bis | 20,21 | 19,71 | 19,80 | 19,91 | 0,27 |

Tableau III. 2 : Résistances moyennes en compression et écarts types des bétons (MPa).

Les valeurs d'écart type obtenues sur les 7 formules de béton sont légèrement différentes. Cette différence est due au fait que le nombre d'éprouvettes testées pour chacune des formules est petit (population de l'échantillon de 3 éprouvettes). Et comme on ne connaît pas la précision de la presse de béton, nous avons alors estimé notre écart type de résistance à la compression de nos bétons par la moyenne des écarts type de chacun des bétons. L'écart type de la population => l'écart type de l'échantillon et l'inverse n'est pas valable : l'écart type de l'échantillon \neq l'écart type de la population.

$$\text{L'écart type moyen} = 0,81$$

Pour une meilleure appréciation des résultats nous avons représenté sur la figure III.6 les différents bétons selon le pourcentage de substitution des GN par les GBD. Les résultats sont représentés sous forme d'histogramme, l'écart type des mesures est schématisé par une barre d'erreur.

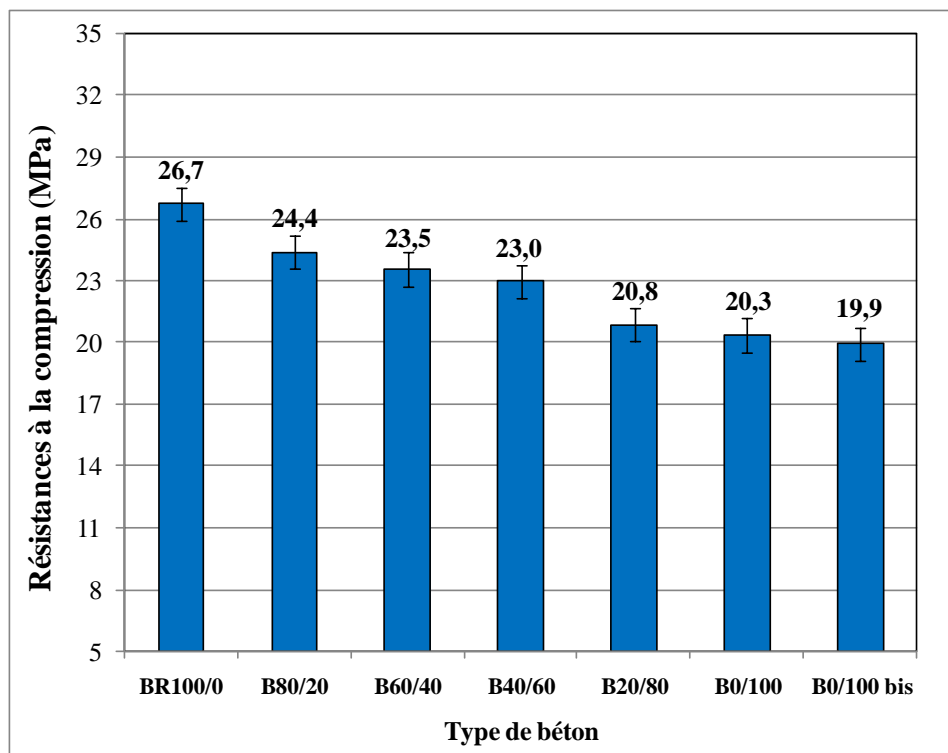


Figure III-6 : Histogramme des résistances à la compression à 28 jours des bétons testés.

Sur la figure III-6, on remarque que la valeur de la résistance en compression diminue avec l'augmentation du tau de substitution des GN par les GBD.

Le béton de référence à 100 % de GN a une résistance de 26,71 MPa qui est supérieure à celle des bétons à 100 % de GBD (soit le B 0/100 bis) qui a une résistance de 19,9 MPa.

Toute fois, il est bien de souligner que même pour les bétons à base de GBD, on a pu avoir des résistances assez bonnes en comparaison au béton de référence. Ce résultat montre l'intérêt dans l'utilisation des GBD dans le domaine des bétons. Mais reste à prouver leur conformité en terme de durabilité.

III-3-3: Porosité ouverte

On a vu au chapitre I que la durabilité du béton s'explique, en grande partie, par la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans le réseau poreux des bétons. La cinétique de dégradation du béton dépend de la vitesse de transfert par diffusion ou par perméabilité des substances chimiques, donc du réseau poreux, dimensions des pores et connectivité des pores. Le béton est un matériau poreux, les dimensions et la tortuosité des pores varient suivant les caractéristiques de composition du béton soit son rapport Eau/Ciment, nature du ciment, présence d'additions minérales, etc.

Les résultats de la porosité accessible à l'eau obtenus sur des éprouvettes cylindriques de 30 cm de hauteur et 15 cm de diamètre pour les différents bétons étudiés sont récapitulés dans le tableau III.3 suivant :

| | Masse à saturation | Masse sèche | Porosité |
|------------|--------------------|-------------|----------|
| BR100/0 | 12,530 | 11,800 | 6,2 |
| B80/20 | 12,570 | 11,800 | 6,5 |
| B60/40 | 12,460 | 11,640 | 7,0 |
| B40/60 | 12,330 | 11,490 | 7,3 |
| B20/80 | 12,280 | 11,370 | 8,0 |
| B0/100 | 12,160 | 11,220 | 8,4 |
| B0/100 bis | 11,951 | 10,946 | 9,1 |

Tableau III.3: Résultats porosité accessible à l'eau (porosité ouverte)

La porosité ouverte (porosité accessible à l'eau) est calculée par la relation donnée au paragraphe III-2-3-3. Elle correspond au rapport de la masse absorbée par un échantillon, initialement sec, immergé dans l'eau sur la masse sèche de l'échantillon. Les résultats de porosité ouverte accessible à l'eau obtenus pour les différents types de béton étudiés sont représentés sur la figure III-11 sous forme d'histogramme.

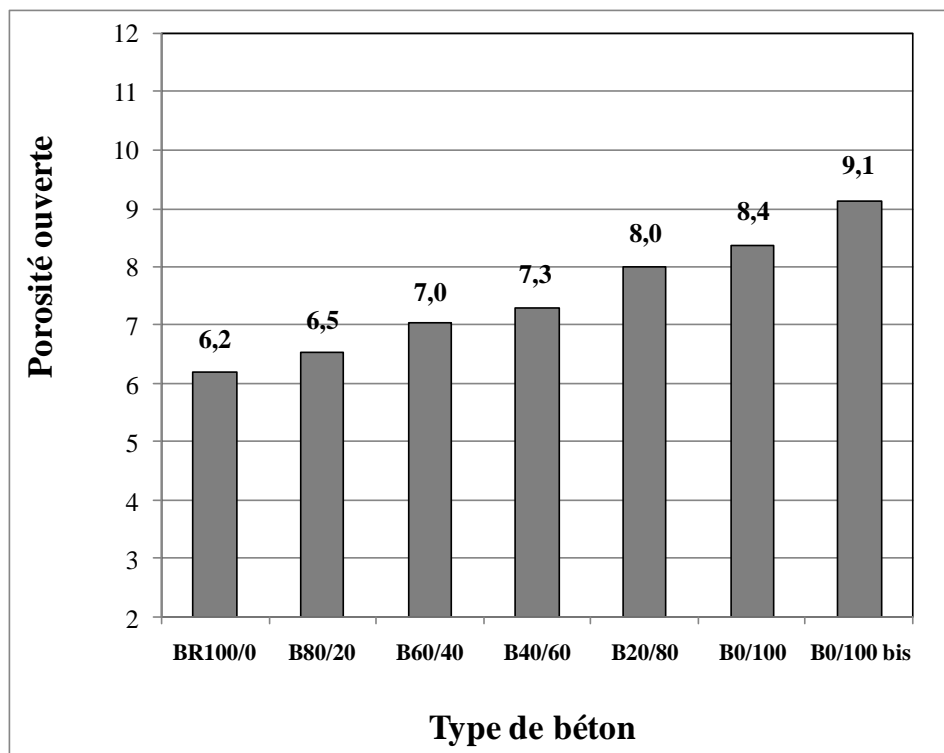


Figure III-7 : Porosité ouverte (accessible à l'eau) des bétons étudiés

On remarque que la porosité augmente en fonction du tau de substitution des GN par les GBD. Plus le pourcentage des GBD est grand dans le béton plus la porosité est grande. Ainsi, la valeur de la porosité est augmentée de 50 % entre le béton de référence à 100 % de GN ($P = 6,2$) et celui à 100 % de GBD ($P = 9,1$).

Cet augmentation de la porosité est liée au fait que les GBD sont des composés de granulats naturels et de pâte de ciment vieilles, pâte qui à priori présente déjà une certaine porosité résiduelle, ce qui se répercute sur la porosité finale du béton formulé par ces granulats.

A partir de ce résultat, on se pose la question sur les conséquences de cette porosité augmentée sur la durée de vie des ouvrages à réaliser avec ce type de granulats.

III-3-4 Vitesse à l'ultrason (Etats Humide & Sec)

Pour la réalisation de cette partie d'essai, nous avons réalisé un nouveau programme d'éprouvettes. Nous avons alors répété le même programme expérimental de gâchées de bétons tel que déjà réalisé pour l'étude de la résistance à 28 jours. Sept formulations ont été réalisées.

Pour cette partie, nous avons mesuré les vitesses à l'ultrason en deux états d'humidité différents (éprouvettes humides ensuite éprouvettes sèches). 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].

Calcul de la vitesse de propagation

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 parcours (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 :

$$V=L/T$$

III.3-4-1 Vitesses à l'ultrason à l'état Humide

Pour cette partie d'étude, après la confection des bétons, au décoffrage soit le deuxième jour, les éprouvettes sont immergées dans l'eau pendant 15 jours. Au 16^{ème} jour les éprouvettes sont retirées d'eau, nous les avons alors gardé à l'air libre jusqu'au 28^{ème} jour. Au 28^{ème} jour nous avons alors réalisé les essais de caractérisation à l'ultrason.

Les résultats des vitesses obtenues sur les différentes éprouvettes sont récapitulés dans le tableau III.4 suivant.

| | E1 | E2 | E3 | moyenne | écartype |
|------------|-----------|-----------|-----------|----------------|-----------------|
| BR100/0 | 4219 | 4226 | 4211 | 4219 | 8 |
| B80/20 | 4111 | 4183 | 4154 | 4150 | 36 |
| B60/40 | 4004 | 4034 | 4048 | 4029 | 22 |
| B40/60 | 4004 | 4048 | 4039 | 4030 | 23 |
| B20/80 | 3941 | 3995 | 4003 | 3980 | 33 |
| B0/100 | 3921 | 3960 | 3955 | 3945 | 21 |
| B0/100 bis | 3800 | 3778 | 3797 | 3791 | 12 |

Tableau III.4 : vitesses à l'ultrason obtenues à 28 jours pour un état d'éprouvettes humides.

L'écart type moyen = 22 m/s

Bien sûr, les éprouvettes sont pesées avant chaque essai. Les résultats des pesées sont donnés à l'**annexe 3**(mesure à l'ultrason).

Pour bien exploiter les résultats des vitesses nous avons calculé les moyennes des vitesses obtenues sur les trois éprouvettes, puis nous avons calculé les écarts types par béton et en dernier nous avons calculé l'écart type moyen sur l'ensemble des bétons.

Ces résultats sont représentés sur un histogramme tel que schématisé sur la figure suivante.

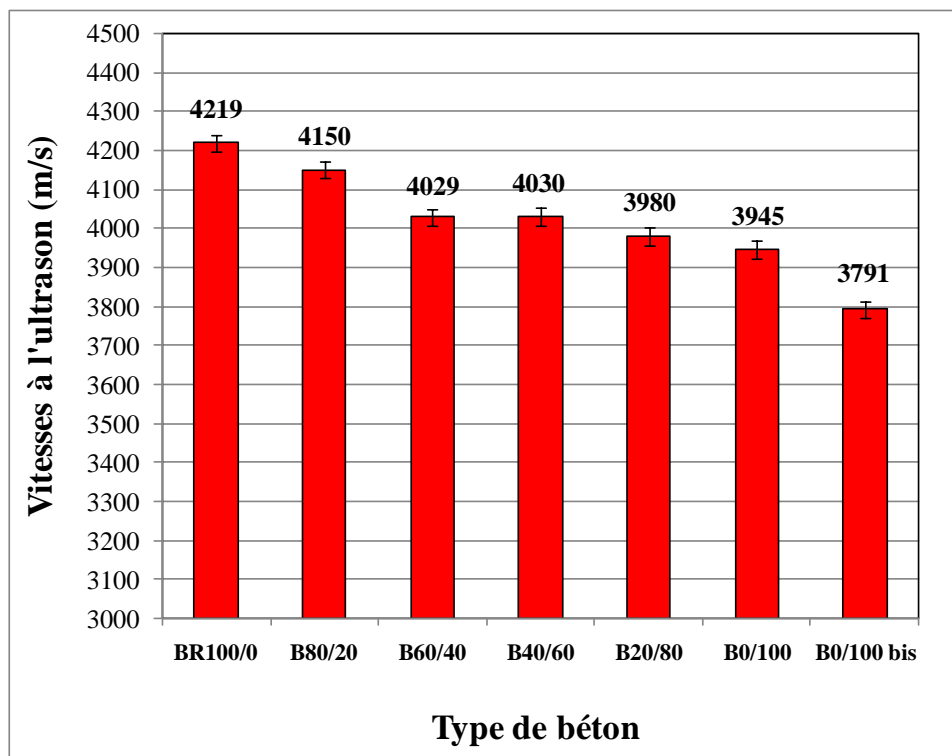


Figure III-8 : Histogramme des vitesses à l'ultrason à l'état humide.

Les résultats de la figure montrent que les vitesses à l'ultrason pour cet état d'humidité baissent avec l'augmentation du tau de substitution des GN par les GBD. Plus il y a de GBD moins les ondes vont vite. Dans ces cas les ondes sont retardées par la présence de pores plus importante dans les bétons riches en GBD, notamment le béton B0/100 bis.

III.3-4-2 Vitesses à l'ultrason à l'état sec

Après avoir effectué l'essai à l'état humide, les éprouvettes sont introduites dans une étuve où la température est maintenue à 95°C. Les éprouvettes sont maintenues à cette température jusqu'à ce que leurs masses se stabilisent (masse sèche constante). Les éprouvettes sont par la suite dans des sacs hermétiques pour se refroidir et ne pas absorber de l'humidité. Après 24 heures, nous avons alors pesé les éprouvettes puis réalisé les essais à l'ultrason. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau III.5. Les pesées des éprouvettes sont données à l'annexe mesures à l'ultrason.

| du béton | E1 | E2 | E3 | moyenne | écartype |
|------------|------|------|------|---------|----------|
| BR100/0 | 3992 | 3938 | 3942 | 3957 | 30 |
| B80/20 | 3895 | 3964 | 3948 | 3936 | 36 |
| B60/40 | 3742 | 3764 | 3743 | 3750 | 12 |
| B40/60 | 3747 | 3733 | 3759 | 3746 | 13 |
| B20/80 | 3589 | 3574 | 3564 | 3576 | 13 |
| B0/100 | 3545 | 3544 | 3485 | 3525 | 34 |
| B0/100 bis | 3455 | 3370 | 3441 | 3422 | 46 |

Tableau III.5 : vitesses à l'ultrason obtenues à 28 jours pour un état d'éprouvettes sèches.

L'écart type moyen = 26 m/s

Pour une meilleure exploitation des résultats des vitesses nous avons calculé les moyennes des vitesses obtenues sur les trois éprouvettes, puis nous avons calculé les écarts types par béton et en dernier nous avons calculé l'écart type moyen sur l'ensemble des bétons.

Ces résultats sont représentés sur un histogramme tel que schématisé sur la figure suivante.

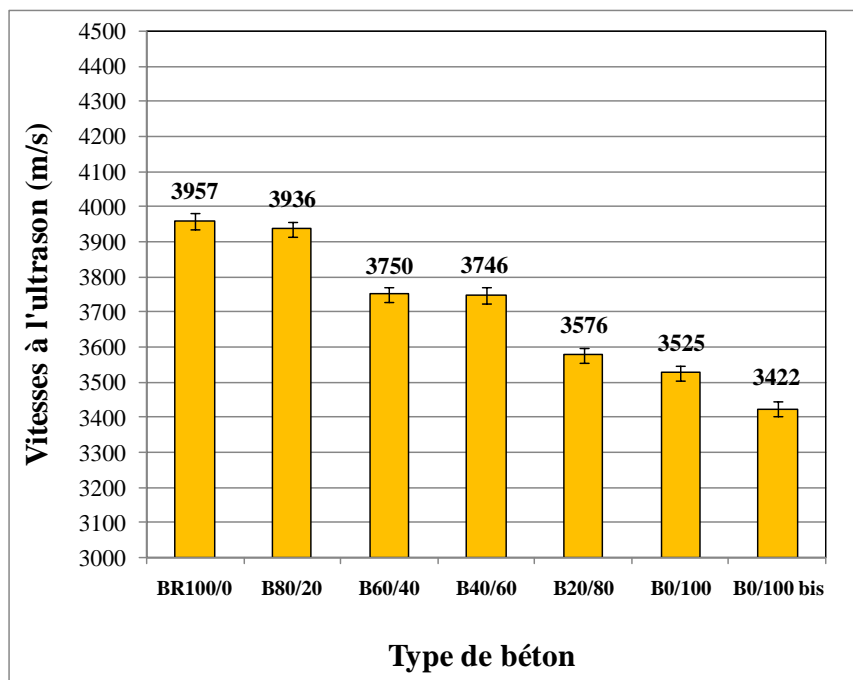


Figure III-9 : Histogramme des vitesses à l'ultrason à l'état sec.

De même que pour les résultats obtenus à l'état humide, les résultats de la figure montrent que les vitesses à l'ultrason pour cet état sec baissent avec l'augmentation du tau de substitution des GN par les GBD. Plus il y a de GBD moins les ondes vont vite. Dans ces cas les ondes sont retardées par la présence de pores plus importante dans les bétons riches en GBD, notamment le béton B0/100 bis.

III.3-4-3 Comparaison Vitesses à l'ultrason état humide & état sec

Dans cette section nous avons comparé les résultats des vitesses obtenus pour les deux états (humide et sec). Nous avons alors regroupé les deux types de résultats sur un même histogramme tel que schématisé sur la figure suivante.

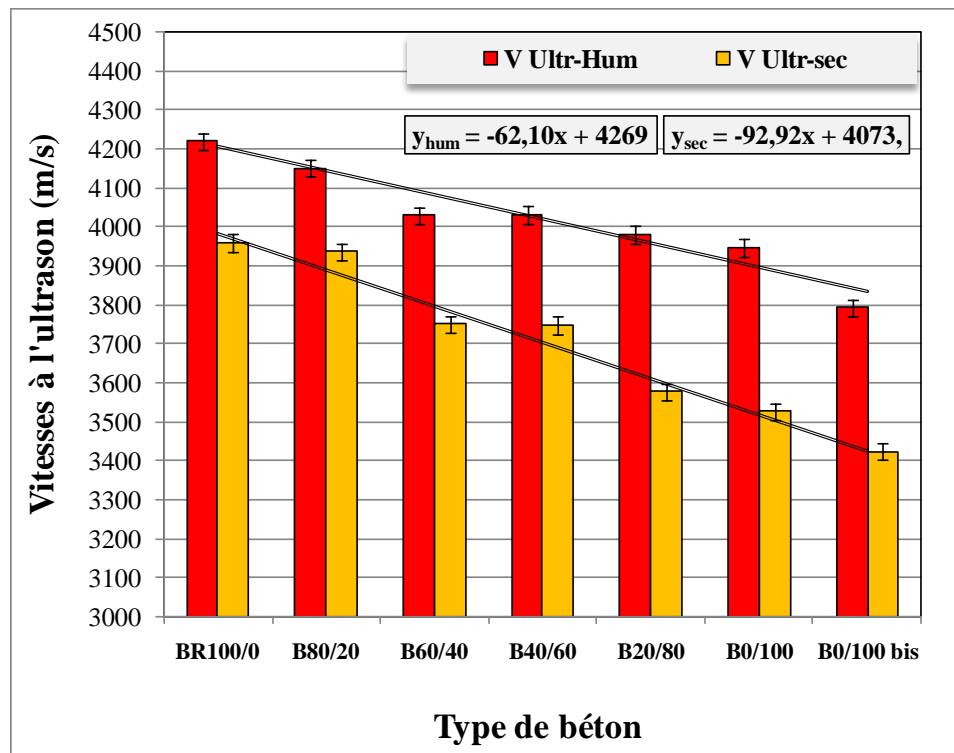


Figure III-10 : superposition des résultats des vitesses à l'ultrason état humide (V Ultr-Hum) et état sec (V Ultr-sec).

Pour les deux catégories d'essais (humide et sec) la tendance est la même, baisse des vitesses avec le tau de substitution des GN par les GBD.

Ce que l'on peut également dire à partir de ces résultats, la baisse constatée est plus accentuée sur les bétons sec par rapport aux bétons humide. En effet, le tracé des courbes de tendance montre cette accentuation : la pente de la courbe de tendance dans l'état sec est de près de 92,9 alors qu'elle est de 62,1 pour l'état humide.

III.4: Corrélation entre la résistance à 28 jours et la porosité

Dans cette partie nous avons cherché à savoir s'il y a une corrélation entre la variation de la résistance et celle de la porosité des bétons étudiés. Pour ce faire, nous avons représenté la résistance en fonction de la porosité tel que schématisé sur la figure suivante.

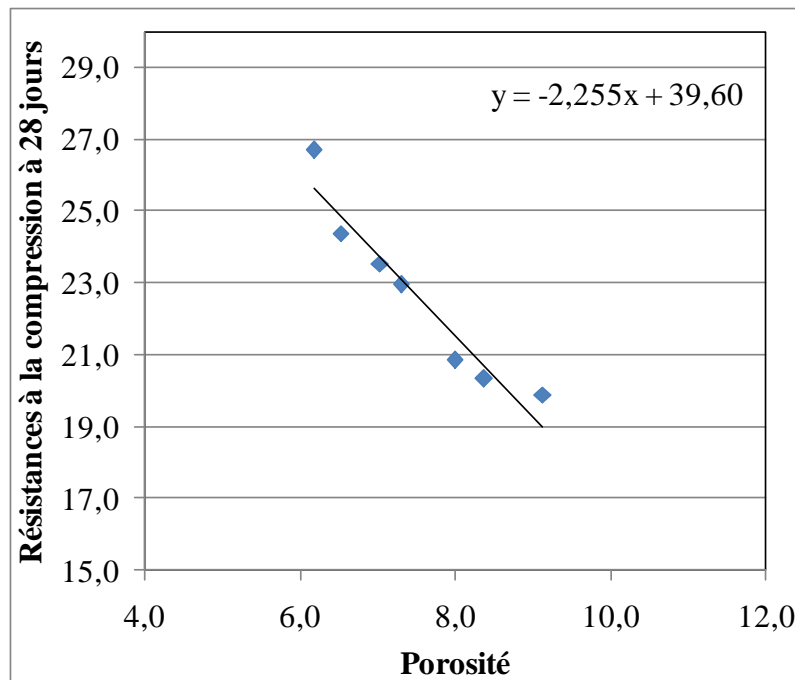


Figure III-11 : droite de corrélation entre les résultats de résistance et ceux de la porosité.

Conformément à l'usage, les résistances obtenues sont inversement proportionnelles à la porosité. En effet, plus le rapport GN/GBD baisse plus il y a de GBD plus la porosité est importante et moins la résistance est grande.

III-5: Corrélation entre les vitesses à l'ultrason et la résistance 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. Plusieurs formules sont alors proposées. Ces formules permettent d'exprimer la résistance mécanique en fonction de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques dans le béton c'est le cas par exemple de la fonction suivante [31].

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

E_d module d'élasticité du béton testé, il est calculé à partir des résultats à l'ultrason en utilisant la relation suivante :

$$v^2 = \frac{E_d(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}$$

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 (voir tableau

annexe mesures à l'ultrason). Or pour le cas de nos bétons nous avons enregistré des vitesses différentes entre l'état humide et l'état sec voir figure suivante.

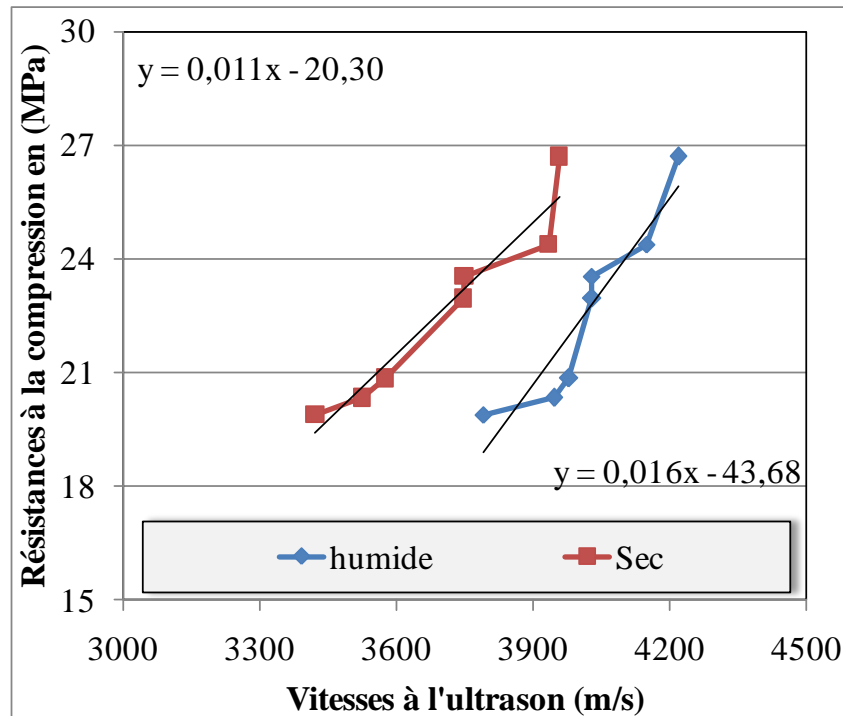


Figure III.12 : Corrélation entre les vitesses à l'ultrason et la résistance à 28 jours

Ces deux vitesses leur correspondent alors deux résistances différentes. En effet, on peut considérer que le module d'élasticité et le coefficient de poisson sont deux paramètres intrinsèques aux bétons donc fixes. Dans ces cas on aurait pu utiliser une des formules proposées dans la littérature pour calculer la résistance des ces bétons. Or cette formule aboutirait logiquement à une seule valeur de résistance à ce stade, peut être légèrement différente. Or si l'on regarde la figure, on voit que les vitesses de propagation sont très influencées par l'état d'humidité et ce n'est pas les cas des résistances.

Toute fois, pour les deux cas d'humidité, on constate la même tendance augmentation des vitesses avec l'augmentation de la résistance mécanique soit donc avec l'augmentation du tau des GN dans le volume des bétons.

Ce qui peut être envisagé en perspective, c'est de rechercher une formule qui permettrait d'estimer la résistance mécanique en fonction des vitesses de propagation des ondes ultrasonique et la porosité du béton ainsi que sont état d'humidité.

III-6: Corrélation entre les vitesses à l'ultrason et la porosité

Dans cette partie nous avons représenté les vitesses à l'ultrason obtenues pour les deux états (humide et sec) en fonction de la porosité.

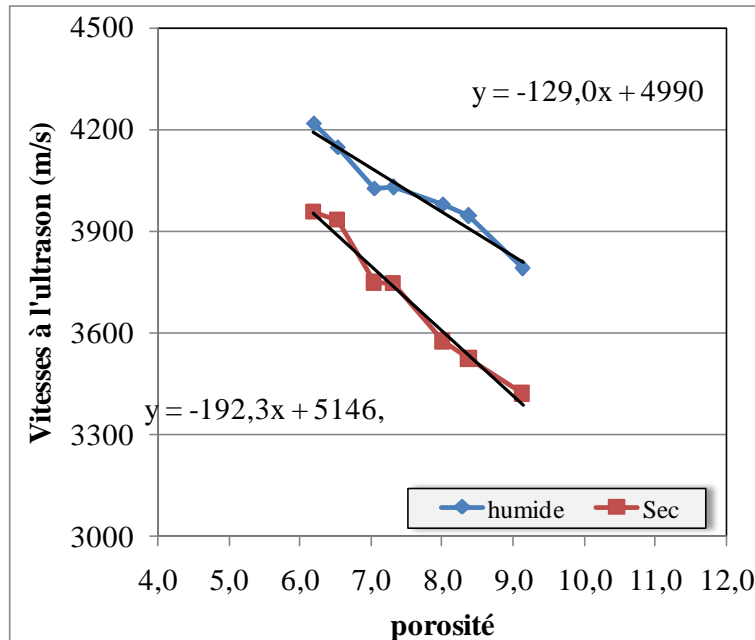


Figure III-13 : droite de corrélation entre les vitesses à l'ultrason et la porosité.

Les droites montrent que la vitesse de propagation des ondes ultrasonique de travers la matrice de béton dépends de deux paramètres à savoir la porosité et l'état d'humidité des pores. Plus la porosité est importante moins la vitesse est grande et cela quelque soit l'état d'humidité du béton. Et plus le béton est humide plus la vitesse est grande l'onde à plus de facilité (chemin) pour traverser le béton.

Par ailleurs, il est intéressant de signaler que la pente avec laquelle la baisse de vitesse progresse est différente entre les deux états. En effet, pour le cas où le béton est humide la pente de progression de la vitesse en fonction de la porosité est moins raide que celle obtenue pour le cas où les bétons sont secs (129 pour les bétons humides contre 192 pour les bétons secs).

Il sera donc intéressant de chercher à comprendre l'origine de cette différence dans les pentes de progression et de faire des investigations supplémentaires.

III-7: Conclusion

Après l'analyse des résultats que l'on vient de présenter on peut tirer les conclusions suivantes :

- Avec les matériaux utilisés, qui sont des matériaux locaux nous avons pu formuler un béton de référence qui présente une assez bonne résistance mécanique à la compression et à 28 jours soit 26,71 MPa. On rappelle que la formule de référence est composée de granulats naturels, de fillers, et d'un ciment de classe 42,5.

Les bétons à granulats de béton de démolition sont formulés en substituant le volume des gravillons naturels dans le béton de référence par le même volume en granulats de béton de démolition. Tous les autres paramètres de formulation sont restés identiques (mêmes quantités en ciment, eau, filler, sables).

- Les bétons formulés à base de GBD (en partie ou en totalité) présentent des résistances à la compression intéressantes, elle a tendance à baisser légèrement en fonction du taux de substitution des GN par les GBD.
- Plus le volume de GBD est grand, plus la porosité est grande moins la vitesse des ondes ultrasoniques sont importantes.

Les bétons à GBD présentent des porosités ouvertes (accessible à l'eau) légèrement supérieures à celles des bétons à GN. Cette différence peut être associée à la porosité existante dans la pâte durcie des GBD. En effet, les GBD avec la pâte de ciment durcie et vieillie qui les composent en partie présentent déjà une porosité résiduelle.

- De la même manière, les bétons formulés avec les GBD présentent des vitesses d'ondes à l'ultrason inversement proportionnelles au taux de substitution des GN par les GBD. Par ailleurs, par les résultats de cette étude on a vu que les bétons testés dans un état humide ont des vitesses à l'ultrason différentes que celles obtenues sur les bétons secs. toute fois, les tendances d'évolution des vitesses restent les mêmes cela que ce soit sur les bétons humides ou les bétons secs.

Conclusion générale

D'après les résultats trouvés dans la partie expérimentale, nous avons essayé de répondre à l'objectif principal de notre étude (étudier les performances d'un béton formulé à base de granulats de béton de démolition). Dans un premier temps, on s'est intéressé à la résistance à la compression à 28 jours, résistances mesurée par l'essai destructif à la presse. On s'est par la suite intéressé à la durabilité par le paramètre de la porosité ouverte (accessible à l'eau). Ainsi, nous avons mené des essais de mesure de la porosité ouverte. Dans le même contexte, nous avons testé les éprouvettes à l'ultrason dans deux états (humide et sec).

Sur l'ensemble des essais menés, nous avons fait une substitution volumique des GN par des GBD tout en maintenant les autres paramètres de composition constants (mêmes quantités en ciment, eau, filler, sables).

Sur la base des résultats obtenus, après les essais effectués au laboratoire, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

Les bétons à base de GBD (en partie ou en totalité) présentent des résistances à la compression intéressantes, supérieures à 20 MPa, mais inférieure à celle du béton de référence à 100 % de GN qui a près de 27 MPa. Plus le tau de substitution des GN par les GBD est grand moins la résistance est importante.

Les bétons à base de GBD présentent des porosités ouvertes légèrement supérieures à celles des bétons de référence à 100 % de GN. Cette différence est à priori liée au fait que les GBD présentent une absorption deux fois plus importante que celle des GN. De plus les GBD sont composé d'une pâte de ciment durcie et vieillie qui présente déjà une porosité existante.

Nous avons constaté que les bétons à base de GBD présentent des vitesses à l'ultrason inversement proportionnelles au tau de substitution des GN par les GBD. Cela confirme que ces granulats apportent de la porosité additionnelle. Plus le béton est poreux, moins il se laisse traverser par les ondes ultrasonique, donc la vitesse devient plus grande.

Cette différence dans les porosités ouvertes n'est pas négligeable, il sera donc intéressant de mener de vrais essais de durabilité pour essayer de quantifier les pertes en terme de durée de vies des structures à envisager avec ce genre de matériaux et donc leur choisir un domaine d'utilisation le plus adéquat (où les risque environnementaux sont les moins agressifs).

Les résultats obtenus sont prometteurs, les bétons ainsi formulés présentent des performances satisfaisantes en terme de propriétés mécanique, elles sont à approfondir en terme de durabilité. En perspective, il sera intéressant d'étudier d'autres aspects de bétons à granulats de démolition :

- Effectuer des essais de durabilité réels.
- Etude du comportement de ces bétons en présence des armatures.
- Tester de nouveaux produits de récupération
- ...

Références bibliographiques

- [1] AFN 196-NF EN 196-1, « Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques », AFNOR Avril 2006.
- [2] Dreux G., Festa J., « Nouveau guide du béton et de ses constituants » 8^{ème} édition Eyrolles 2002.
- [3] Dupain R., Saint Arroman J.C. « granulats, sols, ciments et bétons », 4^{ème} édition Casteilla 2009.
- [4] Neville A., « Propriétés des bétons » édition Eyrolles, 2000.
- [5] De Larrard F. « Structures granulaires et formulation des bétons », édition Laboratoire central des ponts et chaussées, 2000.
- [6] 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.
- [7] Aitcin P. C., S. Jiang, B. Kim, P. Nkinamubanzi, N. Pétrou, « l'interaction ciment /superplastifiant cas des polysulfonates », B.L.P.C n°233 juillet - août 2001 pp 87-89.
- [8] Acker P., « Prise et durcissement des bétons : Les effets thermomécaniques », Techniques de l'ingénieur. Vol. 3, n° C2235, 1988.
- [9] 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.
- [10] 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
- [11] BARON J. et OLIVIER J. P. « La durabilité des bétons », presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 1992
- [12] STEFAN BALAN, MIRCEA ARCAN « essais des constructions » édition Meridian Bucarest, édition EYROLLES, paris 1972
- [13] A. BENOUIS. N. KHALDI. Z. NAFFA, « Détermination de la résistance des bétons par les ultrasons (influence de la composition) », Université de Guelma. Algérie.

- [14] A. BENOUIS, N. KHALDI, Y. CHERAIT, « Comparaison des résistances des bétons déterminées par écrasement et par scléromètre : influence de la composition », Laboratoire de génie civil et d'hydraulique, Université de Guelma, (août 2007).
- [15] LAURY- ALAN MOALIC, « Réhabilitation d'ouvrage en béton armé : Du diagnostic au confortement », thèse ingénieur, INSA de Strasbourg, GINGER CEB TP.
- [16] IDRES. Rabah. « Essai non destructif : application de l'auscultation dynamique pour la détermination de la résistance du béton par vitesse du son ». Thèse d'ingénieur à l'institut national d'enseignement supérieur de génie civil Tizi-Ouzou. Janvier 1987.
- [17] A.TOUKAL, Influence des taux de chargement sur la caractérisation non destructive du béton par ultrason, thèse de magister, Université de Boumerdès, (2009-2010).
- [18] DJAMILA AMZAL. et ABDENOUR MOSTFAOUI., Contrôle de la qualité du béton durci par les méthodes non destructives, thèse ingénieur, Université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou, (1994). « MAT 39 ».
- [19] HERVE BEINISH, Contrôle non destructif des bétons, mesure de la dureté de surface, fiche 37, France. (février 1999).
- [20] M. SAMUEL NAAR, Evaluation non destructives du béton par mesure de résistivité électrique et thermographie infrarouge passive, thèse de doctorat, Université de bordeaux 1 et de Sherbrooke (Mai 2006).
- [21] M. REGOURD. « L'hydratation du ciment portland », Le béton hydraulique' P.E.N.P.Ch 1982
- [22] DEL 98 : F. De LARRARD, C. FERRARIS. « Béton frais remanié I et II et III », BLPC. N° 213 pp 73-89, Jav-fév 1998.
- [23] DRE 98 : G. DREUX, J. FESTA, « Nouveau guide du béton et de ses constituants » 8° édition Eyrolles 1998.
- [24] Controls, "Instruction manual: Ultrasonic pulse velocity tester", Mod. 58-E0048, 2002.
- [25] A.Khelidj, V.Broghel-Bouny, G. Bastian, J. Godin, G.Villain, « Transfert dans les bétons et durabilité des ouvrages », Laboratoire Centrale des ponts et chaussées.
- [26] Nuno Almeida, Fernando Branco, Jorge de Brito, José Roberto Santos "High-performance concrete with recycled stone slurry", Cement and Concrete Research 37 (2007) 210-220

- [28] M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí, M. Barra, “Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete”, *Cement and Concrete Research* 37 (2007) 735–742
- [29] How-Ji Chen, Tsong Yen, Kuan-Hung Chen, “Use of building rubbles as recycled aggregates”, *Cement and Concrete Research* 33 (2003) 125–132
- [30] Debieb F, Kenai S. “The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete”. *Constr Build Mater* 2008; 22:886–93.
- [31] OUCHERIF Nouara., Utilisation des ondes ultrasoniques pour caractérisation d’un béton immergé dans l’eau ; Thèse de Master, Université de Tizi-Ouzou (2011-2012)
«Structure 12».

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.

a- Prélèvement sur tas normaux (sables et graviers)

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

a) à la main, à l'aide d'une planche ou d'une plaque métallique.

b) à la main, sur tas d'éléments grossiers (gravier concassé) par ratissage dans un récipient voir **figure 1.1**

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.

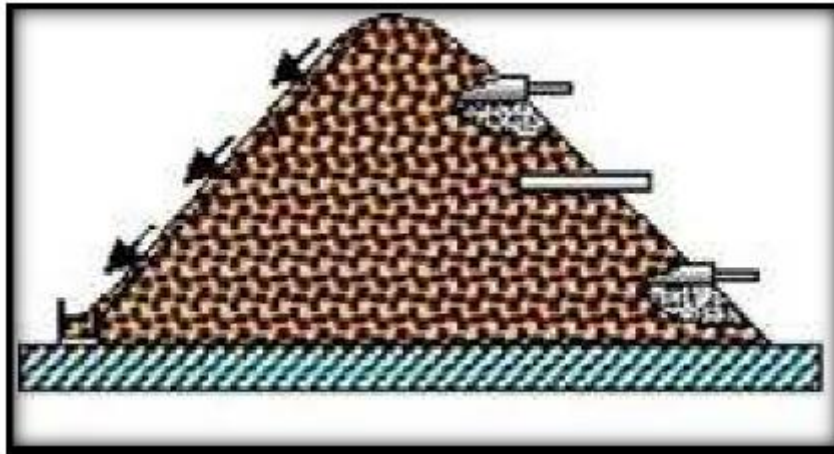


Figure 1-1 : le matériau en stock.

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.

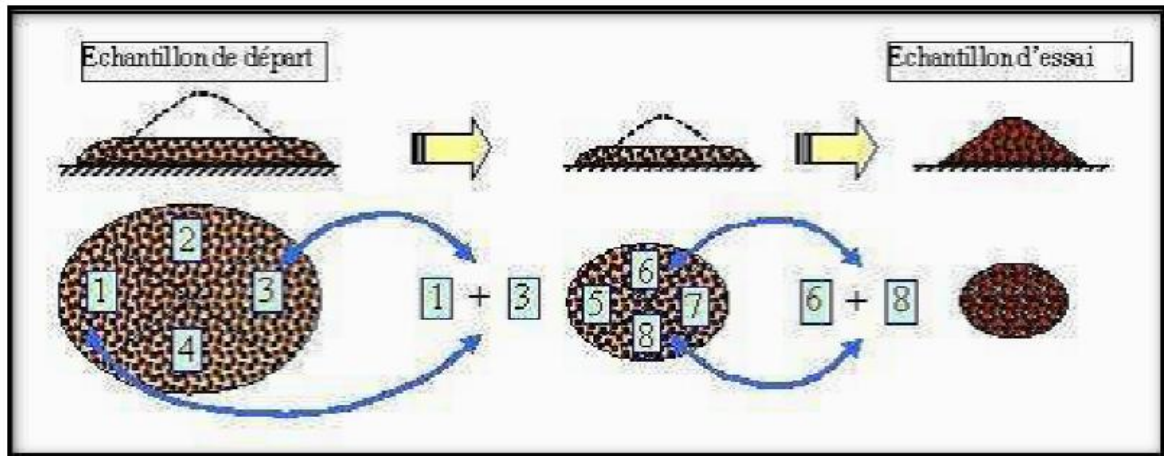


Figure 1.2: Opération de quartage.

1-3-Echantillonneur (quarteur)

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 quarteur (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 $3m$.

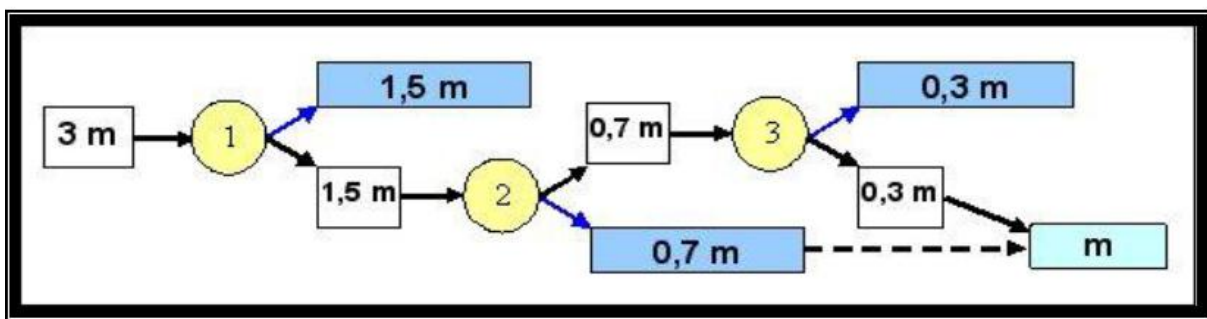


Figure 1. 4: Schéma d'une opération de répartition des matériaux en utilisant de l'échantillonneur.

2- Analyse granulométrique (EN 933-1 et EN 933-2)

2-1 But de l'essai

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. 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 classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont 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.

| | | | | | | | | | | | | |
|------------|-----|-------|------|-----|-------|-------|------|------|-------|-----|----|------|
| Tamis (mm) | 0 | 0.063 | 0.08 | 0.1 | 0.125 | 0.160 | 0.2 | 0.25 | 0.315 | 0.4 | 0 | 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 | | |

Tableau 1.1 : Dimensions nominales des tamis selon norme EN 933-2.

2-3- Conduite de l'essai

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

- Dimensions des tamis utilisés

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



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 (Ab) est défini par la relation :

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

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.

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 1.6)

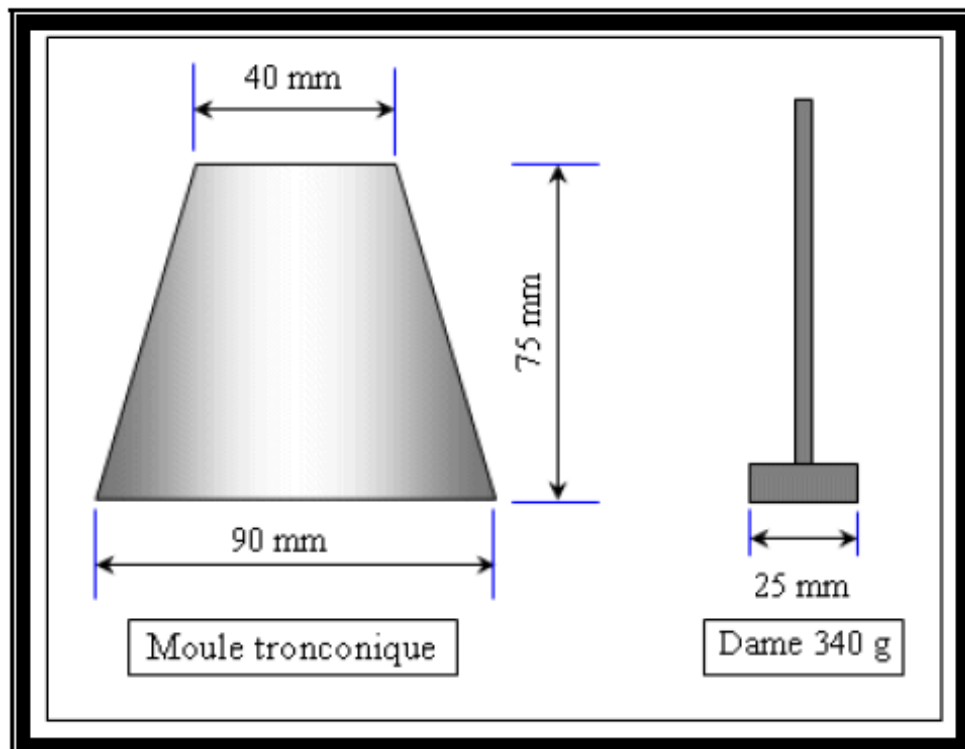


Figure 1. 6: Moule et dame pour coefficient d'absorption des graviers.

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.

Annexe 2 : Résultats des différents essais de caractérisation

Résultats de caractérisation expérimentale des granulats

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

1. Analyse granulométrique

| <i>Matériau : sable 00/03</i> | | | | |
|---|-------------------------------------|-----------------|----------------|------------------|
| Nature | Gravier semi concassé 00/03 | | | |
| Provenance | Carrière de Tizi ouzou | | | |
| Date d'analyse | 24/03/2014 | | | |
| Caractérisation faite selon EN 933-1 | | | | |
| Analyse granulométrique | | | | |
| Procédé utilisé: Lavage par tamisage | | | | |
| Masse sèche totale | $M_1 =$ | | 1710,0 | |
| Masse sèche après lavage | $M_2 =$ | | 1699,5 | |
| Masse sèche des fines retirées par lavage | $M_1 - M_2 =$ | | 10,5 | |
| Passant au 0,063 | $P =$ | | 12,5 | |
| Tamis en (mm) | Refus en (gr) | Refus C en (gr) | Refus C en (%) | Tamisât C en (%) |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 2,5 | 58,5 | 58,5 | 3,44 | 96,56 |
| 1,25 | 483 | 541,5 | 31,85 | 68,15 |
| 0,63 | 750,5 | 1292 | 76,00 | 24,00 |
| 0,315 | 235 | 1527 | 89,82 | 10,18 |
| 0,16 | 125 | 1652 | 97,18 | 2,82 |
| 0,08 | 35 | 1687 | 99,24 | 0,76 |
| Fond | 12,5 | 1699,5 | 99,97 | 0,03 |
| C: Cumulé | | | | |
| % du tamisât des fines < 0,063 | $\frac{(M_1 - M_2) + p}{M_1} * 100$ | | 1,35 | |

| <i>Matériau : Gravier 03/08</i> | | | | |
|---|--------------------------------------|---------------------------------|----------------|------------------|
| Nature | Gravier semi concassé 03/08 | | | |
| Provenance | Carrière de Tizi ouzou | | | |
| Date d'analyse | 24/03/2014 | | | |
| Caractérisation faite selon EN 933-1 | | | | |
| Analyse granulométrique | | | | |
| Procédé utilisé: Lavage par tamisage | | | | |
| Masse sèche totale | M₁= | 2010,0 | | |
| Masse sèche après lavage | M₂= | 1997,5 | | |
| Masse sèche des fines retirées par lavage | M₁-M₂ = | 12,5 | | |
| Passant au 0,063 | P = | 5 | | |
| Tamis en (mm) | Refus en (gr) | Refus C en (gr) | Refus C en (%) | Tamisât C en (%) |
| 16 | 0 | 0 | 0,00 | 100,00 |
| 12,5 | 0 | 0 | 0,00 | 100,00 |
| 10 | 0 | 0 | 0,00 | 100,00 |
| 8 | 58,5 | 58,5 | 2,93 | 97,08 |
| 6,3 | 210,5 | 269 | 13,45 | 86,55 |
| 5 | 278,5 | 547,5 | 27,38 | 72,63 |
| 4 | 398,5 | 946 | 47,30 | 52,70 |
| 2,5 | 797,5 | 1743,5 | 87,18 | 12,83 |
| 1 | 249 | 1992,5 | 99,63 | 0,38 |
| Fond | 5 | 1997,5 | 99,88 | 0,13 |
| C: Cumulé | | | | |
| % du tamisât des fines < 0,063 | | $((M_1 - M_2) + p) * 100 / M_1$ | 0,87 | |

| Matériau : Gravier 08/15 | | | | |
|---|--------------------------------------|---------------------------------|----------------|------------------|
| Nature | Gravier semi concassé 08/15 | | | |
| Provenance | Carrière de Tizi ouzou | | | |
| Date d'analyse | 24/03/2014 | | | |
| Caractérisation faite selon EN 933-1 | | | | |
| Analyse granulométrique | | | | |
| Procédé utilisé: Lavage par tamisage | | | | |
| Masse sèche totale | M₁= | 2500,0 | | |
| Masse sèche après lavage | M₂= | 2495,5 | | |
| Masse sèche des fines retirées par lavage | M₁-M₂ = | 0,5 | | |
| Passant au 0,063 | P = | 3 | | |
| Tamis en (mm) | Refus en (gr) | Refus C en (gr) | Refus C en (%) | Tamisât C en (%) |
| 16 | 139,5 | 139,5 | 5,58 | 94,42 |
| 12,5 | 833 | 972,5 | 38,90 | 61,10 |
| 10 | 771 | 1743,5 | 69,74 | 30,26 |
| 8 | 569 | 2312,5 | 92,50 | 7,50 |
| 6,3 | 174 | 2486,5 | 99,46 | 0,54 |
| 5 | 4,5 | 2491 | 99,64 | 0,36 |
| 4 | 0,5 | 2491,5 | 99,66 | 0,34 |
| 2,5 | 0,5 | 2492 | 99,68 | 0,32 |
| 1 | 0,5 | 2492,5 | 99,70 | 0,30 |
| Fond | 3 | 2495,5 | 99,82 | 0,18 |
| C: Cumulé | | | | |
| % du tamisât des fines < 0,063 | | $((M_1 - M_2) + p) * 100 / M_1$ | 0,14 | |

| Matériau : granulats de béton de démolition 03/08 | | | | |
|--|-------------------------------------|---------------------------------|----------------|------------------|
| Nature | Granulats de recyclage 03/08 | | | |
| Provenance | Eprouvettes usagées | | | |
| Date d'analyse | 26/03/2014 | | | |
| Caractérisation faite selon EN 933-1 | | | | |
| Analyse granulométrique | | | | |
| Procédé utilisé: Lavage par tamisage | | | | |
| Masse sèche totale | $M_1 =$ | | 2000,0 | |
| Masse sèche après lavage | $M_2 =$ | | 2000,0 | |
| Masse sèche des fines retirées par lavage | $M_1 - M_2 =$ | | 0,0 | |
| Passant au 0,063 | $P =$ | | 7 | |
| Tamis en (mm) | Refus en (gr) | Refus C en (gr) | Refus C en (%) | Tamisât C en (%) |
| 16 | 0 | 0 | 0,00 | 100,00 |
| 12,5 | 0 | 0 | 0,00 | 100,00 |
| 10 | 1,5 | 1,5 | 0,08 | 99,93 |
| 8 | 7,5 | 9 | 0,45 | 99,55 |
| 6,3 | 482,5 | 491,5 | 24,58 | 75,43 |
| 5 | 520,5 | 1012 | 50,60 | 49,40 |
| 4 | 344 | 1356 | 67,80 | 32,20 |
| 2,5 | 520 | 1876 | 93,80 | 6,20 |
| 1 | 117 | 1993 | 99,65 | 0,35 |
| Fond | 7 | 2000 | 100,00 | 0,00 |
| C: Cumulé | | | | |
| % du tamisât des fines < 0,063 | | $((M_1 - M_2) + p) * 100 / M_1$ | | 0,35 |

| Matériau : granulats de béton de démolition 08/15 | | | | |
|--|-------------------------------------|---------------------------------|----------------|------------------|
| Nature | Granulats de recyclage 08/15 | | | |
| Provenance | Eprouvettes usagées | | | |
| Date d'analyse | 26/03/2014 | | | |
| Caractérisation faite selon EN 933-1 | | | | |
| Analyse granulométrique | | | | |
| Procédé utilisé: Lavage par tamisage | | | | |
| Masse sèche totale | $M_1 =$ | | 2500,0 | |
| Masse sèche après lavage | $M_2 =$ | | 2498,5 | |
| Masse sèche des fines retirées par lavage | $M_1 - M_2 =$ | | 1,5 | |
| Passant au 0,063 | $P =$ | | 14 | |
| Tamis en (mm) | Refus en (gr) | Refus C en (gr) | Refus C en (%) | Tamisât C en (%) |
| 16 | 26,5 | 26,5 | 1,06 | 98,94 |
| 12,5 | 754,5 | 781 | 31,24 | 100,00 |
| 10 | 874,5 | 1655,5 | 66,22 | 68,76 |
| 8 | 633,5 | 2289 | 91,56 | 33,78 |
| 6,3 | 172 | 2461 | 98,44 | 8,44 |
| 5 | 11,5 | 2472,5 | 98,90 | 1,56 |
| 4 | 4 | 2476,5 | 99,06 | 1,10 |
| 2,5 | 4 | 2480,5 | 99,22 | 0,94 |
| 1 | 4 | 2484,5 | 99,38 | 0,62 |
| Fond | 14 | 2498,5 | 99,94 | 0,06 |
| C: Cumulé | | | | |
| % du tamisât des fines < 0,063 | | $((M_1 - M_2) + p) * 100 / M_1$ | | 0,62 |

2. Résultats des Essai d'absorption

| Gravier 03/08 | |
|--|-------------|
| M ₁ (masse après séchage) | 2,019 |
| M ₂ (masse de récipient+ eau+gravier) | 5,52 |
| M ₃ (masse d'eau + récipient) | 4,2585 |
| M ₄ (masse après passage à l'étuve) | 1,9915 |
| Mv absolue | 2,73 |
| Mv réelle | 2,63 |
| Mv saturée à surface sèches | 2,67 |
| Absorption | 1,38 |

| Gravier 08/15 | |
|--|-------------|
| M ₁ (masse après séchage) | 2,11 |
| M ₂ (masse de récipient+ eau+gravier) | 5,5745 |
| M ₃ (masse d'eau + récipient) | 4,2585 |
| M ₄ (masse après passage à l'étuve) | 2,086 |
| Mv absolue | 2,71 |
| Mv réelle | 2,63 |
| Mv saturée à surface sèches | 2,66 |
| Absorption | 1,15 |

| Béton concassé (GBD) 03/08 | |
|--|-------------|
| M ₁ (masse après séchage) | 1,2695 |
| M ₂ (masse de récipient+ eau+gravier) | 3,2845 |
| M ₃ (masse d'eau + récipient) | 2,514 |
| M ₄ (masse après passage à l'étuve) | 1,184 |
| Mv absolue | 2,69 |
| Mv réelle | 2,25 |
| Mv saturée à surface sèches | 2,41 |
| Absorption | 7,22 |

| Béton concassé (GBD) 8/15 | |
|--|-------------|
| M ₁ (masse après séchage) | 1,5685 |
| M ₂ (masse de récipient+ eau+gravier) | 3,459 |
| M ₃ (masse d'eau + récipient) | 2,534 |
| M ₄ (masse après passage à l'étuve) | 1,4785 |
| Mv absolue | 2,67 |
| Mv réelle | 2,30 |
| Mv saturée à surface sèches | 2,44 |
| Absorption | 6,09 |

Sachant que :

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

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

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

- Coefficient d'absorption :
$$\omega_{ssd} = \frac{100(M_1 - M_4)}{M_4}$$

Annexe 3 : Mesures à l'ultrason

| béton | Ep | M (Kg) | Mv (Kg /m ³) | T (s) | V (m/s) | Moy (m/s) | Ed x10 ⁴ | Rc (MPa) | Moy (MPa) |
|-----------------|----|--------|--------------------------|-------|---------|-----------|---------------------|----------|-----------|
| Béton Témoïn | 1 | 12,47 | 2333,63 | 72,0 | 4219 | 4219 | 39339,41 | 23,02 | 23,02 |
| | 2 | 12,36 | | 71,9 | 4226 | | 39476,28 | 23,05 | |
| | 3 | 12,29 | | 72,2 | 4211 | | 39190,36 | 23,00 | |
| B 80/20/0 | 1 | 12,34 | 2339,16 | 74,0 | 4111 | 4150 | 37439,69 | 22,67 | 22,80 |
| | 2 | 12,57 | | 72,7 | 4183 | | 38770,55 | 22,92 | |
| | 3 | 12,29 | | 72,5 | 4154 | | 38229,63 | 22,82 | |
| B 60/40/0 | 1 | 12,48 | 2316,69 | 75,9 | 4004 | 4026 | 35179,26 | 22,26 | 22,33 |
| | 2 | 12,10 | | 75,4 | 4034 | | 35700,98 | 22,35 | |
| | 3 | 12,27 | | 74,3 | 4048 | | 35949,22 | 22,40 | |
| B 40/60/0 | 1 | 12,06 | 2273,11 | 75,4 | 4004 | 4030 | 34507,48 | 22,13 | 22,22 |
| | 2 | 12,11 | | 75,4 | 4048 | | 35275,93 | 22,27 | |
| | 3 | 11,98 | | 74,3 | 4039 | | 35115,77 | 22,24 | |
| B 20//80/0 | 1 | 11,99 | 2275,78 | 77,1 | 3941 | 3980 | 33480,66 | 22,95 | 22,07 |
| | 2 | 11,97 | | 76,1 | 3995 | | 34398,64 | 22,11 | |
| | 3 | 12,24 | | 76,0 | 4003 | | 34529,64 | 22,14 | |
| B 0/100/0 | 1 | 11,86 | 2252,68 | 77,8 | 3921 | 3945 | 32805,23 | 21,83 | 21,90 |
| | 2 | 11,99 | | 76,5 | 3960 | | 33455,38 | 21,94 | |
| | 3 | 11,98 | | 77,1 | 3955 | | 33370,95 | 21,93 | |
| B 0/100/100 | 1 | 11,64 | 2207,47 | 80,0 | 3800 | 3791 | 30186,30 | 21,37 | 21,34 |
| | 2 | 11,70 | | 80,5 | 3778 | | 29833,43 | 21,31 | |
| | 3 | 11,77 | | 80,1 | 3797 | | 30140,64 | 21,36 | |

Tableau 1 : Résistance à la compression du béton obtenue à partir de la loi $\sigma=16.7exp (Ed/122500)$ à l'état humide

| | N° de l'ep | Poids (Kg) | Mv (Kg /m ³) | Temps (ms) | Vitesse (m/s) | Moy (m/s) | Ed x10 ⁴ | Résistance (Mpa) | Moy (Mpa) |
|----------------------------|------------|------------|--------------------------|------------|---------------|-----------|---------------------|------------------|-----------|
| Béton Témoin 100/0/0 | 1 | 11,89 | 2184,77 | 76,2 | 3992 | 3957 | 32977,51 | 21,86 | 21,76 |
| | 2 | 11,79 | | 77,2 | 3938 | | 32087,35 | 21,70 | |
| | 3 | 11,07 | | 77,1 | 3942 | | 32152,57 | 21,71 | |
| B 80/20/0 | 1 | 11,75 | 2226 ,08 | 78,1 | 3895 | 3936 | 31978,39 | 21,68 | 21,80 |
| | 2 | 11,96 | | 76,7 | 3964 | | 33127,20 | 21,89 | |
| | 3 | 11,70 | | 77,0 | 3948 | | 32860,32 | 21,84 | |
| B 60/40/0 | 1 | 11,83 | 2195,02 | 81,2 | 3742 | 3743 | 29108,68 | 21,18 | 21,20 |
| | 2 | 11,47 | | 80,8 | 3764 | | 29451,96 | 21,24 | |
| | 3 | 11,61 | | 78,2 | 3743 | | 29124,24 | 21,18 | |
| B 40/60/0 | 1 | 11,66 | 2168,61 | 80,6 | 3747 | 3546 | 28835,38 | 21,13 | 21,13 |
| | 2 | 11,44 | | 80,9 | 3733 | | 28620,31 | 21,10 | |
| | 3 | 11,39 | | 80,3 | 3759 | | 29020,37 | 21,16 | |
| B 20/80/0 | 1 | 11,29 | 2144,09 | 84,7 | 3589 | 3576 | 26155,70 | 20,67 | 20,64 |
| | 2 | 11,28 | | 85,1 | 3574 | | 25937,53 | 20,64 | |
| | 3 | 11,53 | | 85,3 | 3564 | | 25792,59 | 20,61 | |
| B 0/100/0 | 1 | 11,15 | 2117,68 | 85,8 | 3545 | 3525 | 25204,01 | 20,51 | 20,47 |
| | 2 | 11,27 | | 85 ,8 | 3544 | | 25189,80 | 20,51 | |
| | 3 | 11,26 | | 87,2 | 3485 | | 24358,06 | 20,37 | |
| B 0/100/100 | 1 | 11,89 | 2064,77 | 88,0 | 3455 | 3422 | 23342,35 | 20,21 | 20,13 |
| | 2 | 11,95 | | 90,2 | 3370 | | 22207,94 | 20,02 | |
| | 3 | 11,00 | | 88,3 | 3441 | | 23153,56 | 20,17 | |

Tableau 2 : Résistance à la compression du béton obtenue à partir de la loi

$$\sigma = 16.7 \exp (Ed/122500) \text{ à l'état sec}$$