REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud MAMMERI de TIZI-OUZOU

Faculté du Génie de la Construction

Département de Génie Civil.



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique
Spécialité : Génie Civil
Option : Structure

Thème :

Comparaison entre deux compositions de béton différentes en utilisant l'ultrason et la presse

Dirigé par :

Mr. MEHADDENE Rachid

Réalisé par :

M^{elle} CHERIEF Lynda

Mr. HADDADOU Fateh

Promotion 2012-2013

Remerciements :

Au terme de ce travail, nous saisissons cette occasion pour exprimer nos vifs remerciements à toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

La première personne que nous tenons à remercier est notre promoteur Mr **MEHADDENE RACHID**, pour l'orientation, la confiance, la patience qui a constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité. Nous le remercions aussi pour sa gentillesse et sa disponibilité.

Nous tenons à remercier très chaleureusement le responsable du laboratoire de technologie des matériaux M^{r} MAMOU Mohand pour les moyens qu'il a mis à notre disposition ainsi que M^{r} BOUHERRAOUA Rachid pour son aide dans la réalisation de la partie expérimentale.

Nous remercions vivement tous les enseignants qui ont contribué à notre formation ainsi que les responsables de la bibliothèque qui ont facilité notre recherche bibliographique.

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

La liste ne serait pas complète sans citer tous nos amis (es) et nos familles qui ont su nous supporter et nous soutenir chacun à sa manière durant toute cette période. C'est aussi grâce à eux que cette thèse est menée à bien !

Que tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin à notre formation trouvent ici note profonde reconnaissance.



Dédicaces

Le projet de fin d'étude qu'on a l'honneur de présenté, a été exécuté à mené à bien grâce à la participation exceptionnelle de notre promoteur.

Je dédie ce travail à ma très chère Mère, mon cher Père
Qui on su être à mes cotés dans les moments difficiles 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 deux sœurs SAMRA et que j'aime beaucoup

A toute ma famille HADDADOU

A mon binôme CHERIEF LYNDA ainsi que sa famille ;

A tous les étudiants de l'option structure exceptionnellement :
*OULD BELKACEM.K*DEBIT.B*GHARBI.K*ABID ALLAH.A*GHADOUCHI.T*CHABANE.G*
A tous mes ami(e)s :
*KANDSI.L*KACIMI.S*KEZZOULI.S*HAMMAN I.D*HADJEB.A*BELKACEMI.O*HABECHE.A...*

A pour tous qui m'ont aidé de loin ou de prés pour la réalisation de ce mémoire.

HADDADOU FATEH

Dédicaces

Le projet de fin d'étude qu'on a l'honneur de présenté, a été exécuté à mené à bien grâce à la participation exceptionnelle de notre promoteur.

Je dédie ce travail à ma très chère *Mère,* mon cher *Père*
Qui ont su être à mes cotés dans les moments difficiles 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 mon très cher frère *Karim* que j'aime beaucoup et mes cousins *DJAMEL, HAKIM* et *FARID*

A ma sœur *ZAHIA* qui me soutient tout le temps et ma petite cousine *LYNA*

A toute ma famille *CHERIEF*

A Mon binôme *HADDADOU FATEH* ainsi que sa famille ;
A tous mes ami(e)s et les étudiants de l'option structure, et pour tous qui m'ont aidé de loin ou de prés pour la réalisation de ce mémoire.

CHERIEF LYNDA _

Résumé

En général il n'existe pas de méthode de composition du béton qui soit universellement reconnue comme étant la meilleure. La composition du béton est toujours le résultat d'un compromis entre une série d'exigences généralement contradictoires. De nombreuses méthodes de composition du béton plus ou moins compliquées et ingénieuses ont été élaborées. On notera qu'une étude de composition de béton doit toujours être contrôlée expérimentalement et qu'une étude effectuée en laboratoire doit généralement être adaptée ultérieurement aux conditions réelles du chantier.

Notre travaille consiste à comparer les résistances données par la composition 1/3 de sable et 2/3 de gravier et celle obtenus par la composition 1/3 de sable et 2/3 de gravier déterminée par deux essai différents, essai non destructif on utilisant l'ultrason et essai destructif en utilisant l'écrasement des éprouvettes. Pour cela en a procédé de la manière suivante :

Confectionné des éprouvettes cylindrique de dimension 16*32 cm puis en les à conservées dans deux états différentes (à l'aire et à l'eau).Les résistances donnée par la composition 1/3 sont meilleure que celle de la composition 1/2, ce gain de résistance est plus important à l'eau que à l'aire, et la caractérisation par l'écrasement est plus fiable que l'ultrason.

Abstract:

In general there does not exist method of composition of the concrete which is universally recognized as being the best. The composition of the concrete is always the result of a compromise between a series of generally contradictory requirements. Many methods of composition of the more or less complicated and clever concrete were elaborate. It will be noted that a study of composition of concrete must always be controlled in experiments and that a study carried out in laboratory must generally be adapted later on to the real conditions of the building site.

Our works consists in comparing the resistances given by the composition 1/3 of sand and 2/3 of gravel and that obtained by composition 1/3 of different sand and 2/3 of gravel determined by two test, non-destructive test one using the ultrasound and destructive test by using the crushing of the test-tubes. For that proceeded about it in the following way:

Made test-tubes cylindrical of dimension 16*32 cm then in to preserve in two states different (with the surface and water). Resistances given by composition 1/3 are better than that of composition 1/2, this profit of resistance is more important with water than with the surface, and the characterizations by crushing are more reliable than the ultrasound.

Chapitre I:

Figure I.1: *Coupe longitudinal d'un scléromètre*

Figure I.2 *: Abaque déterminant la dureté du béton (source GINGER CEB TP).*

Figure I.3 *: Scléromètre original Schmidt série N/L.*

Figure I.4 *: Scléromètre original Schmidt série LR/NR.*

Figure I.5 *: Scléromètre digi-Schmidt série LD/ND.*

Figure I.6: *Scléromètre Silver Schmidt série N/L.*

Figure I.7*: Abaque des résistances en fonction des vitesses des ondes.*

Figure I.8 : *Appareil d'ultrason*

Figure I.9*: Types de propagation d'ondes.*

Figure I.10 *: Ondes longitudinales.*

Figure I.11*: Ondes longitudinales.*

Figure I.12 *: Ondes transversales.*

Figure I.13: *Ondes de Rayleigh.*

Figure I.14*: Ondes de Lamb.*

Figure I.15 : *Mesure de la vitesse du son dans une zone de béton non fissuré.*

Figure I.16*: mesure de la vitesse du son dans la zone fissure.*

Chapitre II:

Figure II.1: *Composants d'un béton.*

Figure II.2: *production du ciment portland.*

Figure II.3: *Différents types de retrait.*

Figure II.4: *Différents types de granulats*

Figure II.5 *: Courbe granulométrique d'un sable et deux gravillons*

Figure II.6*: Extraction des granulats à proximité des grandes métropoles.*

Figure II.7 : *Découpage en blocs parallélépipédiques de la roche massive en place.*

Figure II.8 *: Granulat issus d'une roche éruptive.*

Figure II.9: *Roche sédimentaire.*

Figure II.10 : *Illustration des granulats expansés : a) l'argile ; b) et c) schiste.*

Figure II.11 : *Détermination des pourcentages en volume absolu du matériau.*

Chapitre III:

Figure III.1 : *moule 16cm de largeur et 32cm de hauteur.*

Figure III.2*: Malaxeur utilisé.*

Figure III.3*: table vibrante.*

Figure III.4*: Remplissage des moules(a), éprouvette après démoulage(b).*

Figure III.5*: Marquage des éprouvettes.*

Figure III.6*: éprouvette à l'aire libre(a) ; éprouvette immergées dans l'eau(b).*

Figure III.7*: Essai ultrason.*

Figure III.8: *éprouvette avant la rupture.*

Figure III.9: *Rupture de l'éprouvette.*

Figure III.10 : *Comparaison entre les résistances des deux compositions obtenues par l'ultrason.*

Figure III.11 *: Comparaison entre les résistances des deux compositions obtenues par l'écrasement.*

Figure III.12 *: Comparaison des résistances du béton obtenues par l'ultrason et l'écrasement.*

Figure III.13 *: Comparaison entre les résistances des deux compositions obtenues par l'ultrason.*

Figure III.14 : *Comparaison entre les résistances des deux compositions obtenues par l'écrasement.*

Figure III.15 : *Comparaison entre les résistances des deux compositions obtenues par l'ultrason.*

Figure III.16 *: Comparaison obtenues par entre les résistances des deux compositions l'écrasement.*

Figure III.17 : *Comparaison des résistances du béton obtenues par l'ultrason et l'écrasement.*

Figure III.18 : *Comparaison des résistances du béton obtenues par l'ultrason et l'écrasement.*

Figure III.19 : *Variation des résistances obtenues à l'aire libre et à l'eau avec l'ultrason.*

Figure III.19 : *Variation des résistances obtenues à l'aire libre et à l'eau avec la presse.*

Chapitre I:

***Tableau I.1**: Estimation de la qualité du béton selon la vitesse du son.*

Chapitre II:

***Tableau II.1:** Diférents types de ciments courant*

***Tableau II.2 :** Résistance à la compression*

***Tableau II.3** : Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône*

Chapitre III:

***Tableau III.1** : Quantités des constituants utilisés pour la première composition*

***Tableau III.2** : Quantités des constituants utilisés pour la seconde composition*

***Tableau III.3** : résistance de béton par ultrason de la composition1/3de sable et 2/3 de gravier dans l'aire.*

***Tableau III.4**: Résistance de béton par ultrason de la composition1/3 de sable et 2/3 gravier dans l'eau.*

***Tableau III.5**: Résistance de béton par ultrason de la composition1/2 de sable e 1/2 de gravier dans l'aire.*

***Tableau III.6** : Résistance de béton par ultrason de la composition1/2 de sable 1/2 de gravier dans l'eau.*

***Tableau III.7 :** Résultats d'écrasement des éprouvettes de la composition1/3 de sable et 2/3 de gravier dans l'aire.*

***Tableau III.8:** Résultats d'écrasement des éprouvettes de la composition1/3de sable et de 2/3 de gravier dans l'eau.*

***Tableau III.9 :** Résultats d'écrasement des éprouvettes de la composition1/2 de sable et 1/2 de gravier dans l'aire.*

***Tableau III.10 :** Résultats d'écrasement des éprouvettes de la composition1/2 de sable et 1/2de gravier dans l'eau.*

***Tableau III.11 :** Comparaison entre les résistances de deux compositions différentes avec deux essais différents..*

Tableau III.12 : *Comparaison entre les résistances de deux compositions différentes avec deux essais différents.*

Tableau III.13. *: Résistance obtenue à l'aire et à l'eau.*

Tableau III.14 : *résistance obtenue à l'aire et à l'eau.*

Tableau III.15 : *variation entre deux compositions à l'aire et à l'eau.*

SOMMAIRE

Introduction générale 1

Chapitre I: Généralités sur les essais non destructifs

- Introduction 3

I.1- Définition et but des essais non destructifs 3
I.2 - Les avantages et désavantages des essais non destructifs 4
I.3 - Principe et technique des essais non destructifs 4
I.4- Domaine d'application des essais non destructifs 4
I.5- La surveillance des structures 5
I.5.1- Rôle de la surveillance dans la gestion des structures 5
I.5.2- Les composantes de la surveillance des ouvrages de génie civil 5
I.6- Les différents types d'essais non destructifs 6
I.6.1- Essai au scléromètre 6
I.6.1.1- Définition et généralité 6
I.6.1.2- But et principe d'utilisation 6
I.6.1.3- Description d'un scléromètre 6
I.6.1.4- Caractéristiques du scléromètre 7
I.6.1.5- Méthodologie 8
1-Choix des zones d'essai 8
2 - Choix des points d'essai 8
I.6.1.6- Comment interpréter les résultats obtenus par scléromètre ? 9
I .6.1.7- Les différents types de scléromètre 10
I.6.1.8- Les avantage de la méthode 12
I.6.1.9 : Les inconvénients de la méthode 12
I.6.2- Les essais par ultrason 12
I.6.2.1- Généralités 12
I.6.2.2- But de l'essai 13
I.6.2.3- Principe d'utilisation des ultrasons 13
I.6.2.4- Relation vitesse du son-résistance 14
I.6.2.5- Description de l'appareil « ultrason » 15
1. Fonctionnement de l'appareil 16
2. Positionnement des transducteurs 16
I.6.2.6 -Différents types d'ondes 17
I.6.2.7 - Distribution de la vitesse ultrasonique à travers le béton 20

I.6.2. 8- Facteurs ayant de l'influence sur la valeur de la vitesse du son 22

- Conclusion 23

Chapitre II : Présentation du matériau

II.1-Généralités 24

II.2- Les constituants du béton 25

II.2.1-Les ciments 25

II.2.1.1-Introduction 25
II.2.1.3- Principe de production du ciment portland 26
II.2.1.4-Différents types des ciments courants 27
II.2.1.5- Classes de résistances 28
II.2.1.6 : propriétés des ciments 28

II.2.2 -Les granulats 30

II.2.2.1- Introduction 30

II.2.2 .2- Classifications des granulats 31

II.2.2 .3- Courbe granulométrie 32

II.2.2 .4- Différents types de granulats 33

a. Les granulats naturels 33

1-Les granulats de roche meuble 33

2-Les granulats de roche massive 34

b. Les granulats artificiels 34

c. Les granulats recyclés 35

II.2.2.5-Production des granulats 35

II.2.3 -Les adjuvants 36

II.2.3.1-Définition 36

II.2.3.2 : Classification et utilisation 36

- Plastifiants réducteurs d'eau ou fluidifiants 36
- Les retardateurs de prise 37
- Les accélérateurs de prise 37
- Les entraineurs d'air 38
- Les hydrofuges 38

II.2.4- Eau de gâchage 38

II.2.5- Les additions minérales 39

II.3 : Rôle des différents éléments constituants le béton 39

II.4 : Propriétés essentielles des bétons 39

- ✓ Importance de la dimension maximale D 39
- ✓ L'ouvrabilité 39
- ✓ Résistance 40
- ✓ Rapport eau/ciment (E/C) 40

II.5- Classification et désignation des bétons 41

II.6- Formulation du béton 41

II.6.1- Les méthodes de formulation 41

a. La méthode de Bolomey 42
b. La méthode de Faury 42
c. La méthode de Dreux_Gorrisse 43

II.6.2- Composition du béton utilisé 45

- Conclusion 45

Chapitre III : Elaboration des essais et exploitation des résultats

III.1- Introduction 46

III.2- Confection du béton 49

III.2.1-Formulation du béton utilisé 50

III.2.2-Préparation de la gâchée 50

III.2.3- Confection des éprouvettes 50

III.2.4 : Présentation des essais 50

II.3- Caractérisation des éprouvettes en utilisant l'ultrason 50

III.4-Caractérisation des éprouvettes en utilisant la presse hydraulique 54

III.5-Partie Comparative 58

- **Partie I** : comparaison avec des éprouvettes dans l'aire.
  1. Comparaison des résultats obtenus par la composition 1/3de sable et2/3 de gravier avec ceux de la composition 1/2de sable et1/2 de gravier avec les deux essais 59

2. Comparaison des résultats obtenus par l'ultrason avec ceux de la presse 61

- **Partie II** : comparaison avec des éprouvettes immergées dans l'eau.

1. Comparaison des résultats obtenus par la composition 1/3de sable et2/3 de gravier avec ceux de la composition 1/2de sable et1/2 de gravier avec les deux essais 63
2. Comparaison des résultats obtenus par l'ultrason avec ceux de la presse 65

- **Partie III :** comparaison avec des éprouvettes dans l'aire et des éprouvettes immergées dans l'eau 67

1. Comparaison des résultats obtenus à l'aire libre avec ceux obtenus à l'eau en utilisant la même composition 67
2. Comparaison des variations entre les deux compositions obtenus à l'aire libre avec celles obtenus à l'eau 68

- Conclusion 70

Conclusion générale et perspectives 71

Introduction générale :

Le béton, matériau parfois mal aimé et souvent mal connu, est capable de performances remarquables lorsqu'il est employé dans des ouvrages tels que des grands ponts (pont de Normandie en France ou pont de la Confédération au Canada) ou lorsqu'il constitue l'ossature d'immeubles de grande hauteur.

La sécurité de ces ouvrages dépend évidemment de l'adéquation des caractéristiques obtenues lors de la fabrication et de la mise en place de ce matériau comparées à celles prises en compte dans les calculs. Dans tous les cas, la qualité prédominante à rechercher est la régularité des performances et l'on s'attache autant à minimiser le coefficient de variation des caractéristiques obtenues.

La fabrication du béton constitue la première opération irréversible de la construction de l'ouvrage et sa bonne exécution conditionne toutes les propriétés que le béton pourra acquérir, propriétés qui sont à la base du dimensionnement de cet ouvrage. Cette phase est d'autant plus délicate qu'elle part de constituants inertes dont, pour certains, les caractéristiques sont peu ou pas maîtrisées, pour réaliser un matériau « vivant » composant principal de l'ouvrage.

La qualité et le contrôle de qualité des bétons constituent un cas où l'application des principes précédents se révèle particulièrement fructueuse, bien que délicate. Cela tient à la grande variété d'usage des bétons, à la difficulté de définir des performances accessibles à la mesure dans des conditions techniques.

La composition du béton est une exigence de moyen portant essentiellement sur la qualité des constituants et limité par sa proportion dans le mélange.

Dans le but de satisfaire cette exigence il existe plusieurs critères à prendre en compte :

- Le rapport de l'eau au ciment, qui peut simuler les contacts eau ciment et donc la qualité future des hydrates ;
- Le rapport de la pâte (eau + ciment) à la surface des grains, qui caractérise l'enrobage et donc la quantité moyenne probable d'hydrates autour des grains ;
- Le rapport du sable à l'ensemble du squelette granulaire, qui représente la distribution granulaire et donc la compacité future du mélange ;

Ce dernier critère malgré sont importance, est devenu un paramètre sous-estimé sur chantier soit par ignorance ou par manque de rigueur et ça se voit par la formulation adaptée pour la confection du béton sur le chantier. on utilise fréquemment la composition 1/2 de sable et 1/2de gravier dans le monde rural malgré les inconvénients qu'elles présentent et cela rien que pour protégé le matériel de pompage (pompe à béton) or qu'il existe d'autre compositions qui peuvent s'avérer être plus performante en terme de résistance mais moins utilisé comme la composition 1/3de sable et 2/3de gravier.

Cela nous a poussés à faire une étude comparative en s'appuyant sur une recherche expérimentale entre les deux compositions, en déterminant les résistances avec deux méthodes :

- Méthode destructif, on utilise la presse hydraulique qui est la plus utilisée surtout pour déterminer la résistance à la compression du béton et à la traction;
- La méthode non destructif d'échantillon est une méthode qui permet l'obtention rapide de la résistance des ouvrages (en béton) sans procéder à des prélèvements de béton durci et en a utilisé l'ultrason ;

Ce présent travail est subdivisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est réservé à la présentation des essais non destructifs, leurs avantages et leurs inconvénients ainsi que l'appareil utilisé pour la caractérisation du béton : l'ultrason.

Dans deuxième chapitre on présente les généralités sur le béton et ses constituants.

Le troisième chapitre présente les différentes étapes pour la confection des éprouvettes et présentation des résultats expérimentaux effectué sur deux compositions de béton différentes à différents états (l'air libre et immergées dans l'eau) on déterminant les résultats par l'essai destructif en utilisant la presse hydraulique et essai non destructif en utilisant l'ultrason. On fait par la suite l'interprétation et discussions des ces résultats obtenus par la composition 1/3 de sable et 2/3de gravier en les comparant aux résultats obtenus par la composition 1/2de sable et1/2 de gravier.

On termine se travail par une conclusion générale et des perspectives.

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, charges de service, 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 de nouvelles structures. Cependant les méthodes d'essais non destructives présentent un grand intérêt. Les méthodes d'essai non destructifs 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 méthodes non destructives sont basées sur le fait que certaine propriétés du béton peuvent êtres 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 et les rayons X et gamma.

Pour assurer une bonne qualité du béton utilisé dans les ouvrages, il y a lieu de développer des méthodes qui vérifient les propriétés du béton in-situ. Pour cela, plusieurs méthodes non destructives sont mises en point pour leur importance particulière.

L'application de ces méthodes 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 (qui est le facteur étudié dans ce projet).
- L'utilisation d'essais d'auscultation au scléromètre sur les matériaux de construction, en particulier sur le béton, daté de plusieurs décennies. 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.1. Définition et but des essais non destructifs :

Le contrôle non destructif (C.N.D) est un ensemble de méthode qui permet de caractériser l'état d'intégrité de la structure, sans les dégrader ; elle permet l'obtention rapide de la résistance des matériaux des ouvrages (béton d'un ouvrage), sans procéder à des prélèvements de béton durci par carottage , ils permettent aussi 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 maintenance.

Ces essais, sont rapides et légers à mettre en œuvre, et apportent de surcroît une réponse globale à l'échelle d'une structure ou d'un ouvrage. Ces essais, sont réalisés in situ, sur des structures qui existent, ils ont la particularité de pouvoir être refaits au même endroit, ce qui permet de suivre les changements des caractéristiques du béton dans le temps.

I.2. Les avantages et désavantages des essais non destructifs :

Les avantages de ces essais par rapport aux autres peuvent être résumés dans le caractère non destructif. On peut obtenir des informations dans des zones inaccessibles aux méthodes classiques, économiser des matériaux, du temps et des outils des essais, 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, dû à la rapidité de l'exécution de ce type d'essais.

Le principal désavantage des méthodes non destructives réside dans le fait au le stade actuel, ils ne peuvent pas fournir aux constructeurs des données suffisamment précises pour remplacer totalement les méthodes destructives ou, au moins, dans les principaux domaines d'application. Le rythme au quel elles progressent nous donne cependant la certitude que le moment de leur substitution aux méthodes destructives n'est pas très lointains.

I.3. Principe et technique des essais non destructifs :

Ces essais ont la particularité de pouvoir être refaits au même endroit, ce qui permet de suivre les changements des caractéristiques du béton dans le temps, ils sont basés sur les techniques de mesure suivantes :

- Le radar géophysique pour détecter pour les armatures d'une structure en béton armé, mesurer leur enrobage, reconstituer des plans de ferraillage d'éléments structurels (poutre, poteau, dalle…), mesurer des épaisseurs, détecter les vides…
- La mesure de potentiel d'électrodes pour évaluer la corrosion des armatures en béton armé.
- La mesure de la vitesse de corrosion des armatures pour évaluer la perte de section des aciers en fonction du temps.
- Le scléromètre et la vitesse du son pour caractériser la dureté superficielle du béton, contrôler son homogénéité en différents points de la structure, repérer une zone fissurée …
- Les mesures d'humidités par capacimètre électrique pour localiser des zones humides en surface de parements, sols, …Ets.

I.4. Domaine d'application des essais non destructifs :

Le besoin 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 forcement la structure exacte du béton d'ouvrage ou bien dans le cas des petites structure dont le carottage est quasiment impossible .En revanche, l'utilisation de ces méthodes se fait pour éviter la dégradation des structures causées par les méthodes destructives et afin d'obtenir des informations dans des domaines inaccessibles aux méthodes classique, par la particularité d'économiser des matériaux, du temps et des outils d'essais, 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.

I.5. La surveillance des structures :

I.5.1. Rôle de la surveillance dans la gestion des structures :

Alors que les exigences pour le maintien en bon état des infrastructures augmentent, les font disponibles ne permettent pas la répartition à court terme de toutes les infrastructures en service. Le problème majeure auquel tous les pays sont confrontés est l'identification d'une méthodologie qui permettrait d'investir de la manière la plus efficace qui soit dans les infrastructures (ponts, chaussées, barrages, Ets).En réponse aux besoins sociaux, le concept de la gestion des structures a donc été mis en avant ces dernières années pour résoudre, de façon économique et durable, les nombreux problèmes liés à la pérennité des structures en service. La mise en place d'un tel système repose sur la connaissance précise de l'état actuel de la structure .Cette connaissance est essentielle pour identifier les causes, l'étendue et la sévérité des dommages, pour prédire la progression des détériorations dans le temps et, en définitif, pour fournir un outil d'aide à la décision en ce qui concerne les programmes de réparation. Les techniques de surveillance sont donc extrêmement importantes pour les gestionnaires et les propriétaires des structures. Ces techniques exigent un niveau élevé de précision et de fiabilité pour répondre aux besoins actuels et futurs.

Une évaluation erronée peut en effet se traduire par des accidents graves du fait de la non-détection des dégradations, ou donner lieu à la perte d'investissements en cas de travaux de réparation ou de renforcement inutile si les dommages sont surestimés.

I.5.2. Les composantes de la surveillance des ouvrages de génie civil :

La surveillance des ouvrages de génie civil englobe les trois types d'activités complémentaires suivantes : l'inspection visuelle, l'instrumentation et l'auscultation (ou contrôle non destructif) :

- L'inspection visuelle périodique des structures est une activité primordiale car elle permet de déceler les anomalies de fonctionnement et les signes extérieurs de dégradation. En générale, tous les propriétaires et gestionnaire d'ouvrage (barrages, ponts, chaussées, Ets.) ont une politique interne d'inspection visuelle.
- L'instrumentation consiste à équiper la structure d'un ensemble des capteurs (fissuration, inclinomètre, Ets.) choisis en fonction de la problématique. Ces instruments sont installés à des endroits stratégiques de l'ouvrage de manière à suivre en continu son comportement en conditions réelles de fonctionnement. Ce type de surveillance passive est pratiqué depuis longtemps engendrés par les gestionnaires des barrages, compte tenu des conséquences qu' aurait la déstabilisation de ces ouvrages, est aussi adopté par les gestionnaires d'autres types de structure tels que les ponts.
- Les techniques de contrôle non destructif(CND) consistent à induire une perturbation dans le matériau à étudier et enregistrer la réponse de celui-ci. La perturbation peut être de nature mécanique, thermique, électrique ou électromagnétique, etc... Théoriquement, la réponse du matériau à l'excitation est fonction de son état. Dés lors, toute la difficulté réside dans l'extraction de l'information concernant l'état du matériau à partir de sa réponse. Différents outils de traitement des données plus ou moins complexes sont employés à cet effet.

I .6. 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 vont être cités dans se qui suit :

I .6.1 Essai au scléromètre :

I.6.1.1 Définition et généralité :

L'utilisation d'essais sclérométriques sur matériaux de construction, en particulier sur béton, date de plusieurs décennies. Il est considéré comme l'un des plus vieux essais non destructifs et encore très utilisé de nos jours. Il a été développé par Ernst Schmidt en 1948 et connu sous le nom d'essai au Schmidt ou essai au scléromètre. Le scléromètre est l'appareil le plus répondu dans le domaine du contrôle non destructif, il est destiné à mesurer la dureté superficielle du béton pour évaluer l'homogénéité surfacique de sa qualité sur un ouvrage in situ. Au fil des années, son application s'est étendue aux tests de roche et aux tests de dureté de la bobine à papier. Les scléromètres sont disponibles en version analogique ou digitale.

I.6.1.2 : 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 celui 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 ou 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.

I.6.1.3 : Description d'un scléromètre :

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.

I.6.1.4 : Caractéristiques du scléromètre :

Les constituants d'un scléromètre sont :

1. Elément vérificateur de contact (la sonde)
2. Surface à mesurer
3. Carcasse de l'appareil
4. Indicateur de la valeur de mesure
5. Echelle de mesure
6. Bouton
7. Baguette conductrice central
8. Flanc conducteur
9. Couvercle inférieur de la carcasse
10. Crochet
11. Couvercle supérieur de la carcasse
12. Carcasse du ressort
13. Suspension du ressort
14. Percuteur réel
15. Anneau amortisseur
16. Anneau percuteur léger
17. Emplacement de l'anneau tenseur
18. Anneau en feutre
19. Pivot
20. Ecrou
21. Taquet d'entraînement pour l'indicateur
22. Enclave du taquet d'entraînement
23. Suspension
24. Fixation de la suspension (coussin)

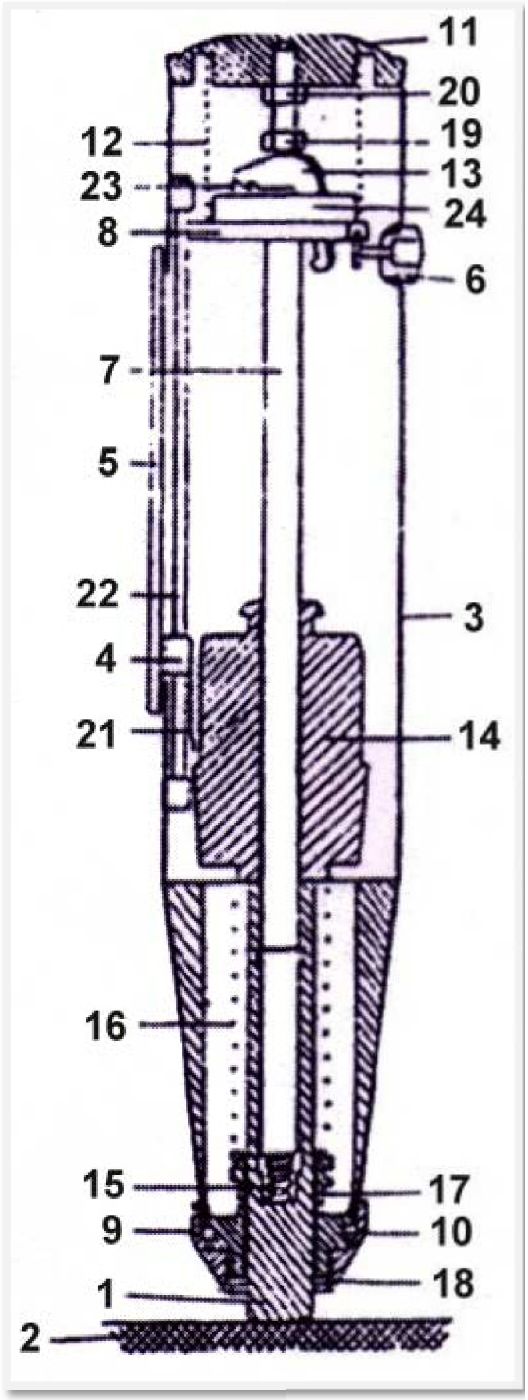


Figure I.1: Coupe longitudinale d'un scléromètre.

I.6.1.5 : Méthodologie :

Le scléromètre peut être utilisé en laboratoire comme sur chantier. Dans tous les cas, il doit être correctement étalonné pour avoir des résultats précis et définir l'indice sclérométriques I_s minimum correspondant au seuil de résistance garanti. L'étalonnage peut être effectué avec des éprouvettes cylindriques constituées du même ciment et des mêmes granulats que ceux utilisés pour l'ouvrage.

1. Choix des zones d'essai :

On doit éviter la face de coulée ou la face opposée, faire l'essai sur des surfaces lisses. La zone choisie doit être représentative et comprendre les régions fortement sollicitées et les régions soupçonnées être faibles dans l'élément.

Pour avoir une idée correcte de la valeur de la résistance du béton, il est nécessaire de réaliser un nombre important de mesures. Il est recommandé de définir sur la surface à essayer des zones d'environ 400cm^2, soit des carrés de 20x20 cm, d'éliminer toute peinture ou enduit adhérent susceptible de fausser les mesures, qui pourrait s'y trouver et d'opérer environ de 20 à 27 mesures par zone, la distance entre deux points de mesures étant 2 à 3cm. La surface à tester doit être débarrassée de tout film avec une ponceuse par conséquent la surface d'un béton âgé devra être poncée jusqu'à 10mm de profondeur.

Notre essai donne des résultats valables si l'on considère la moyenne d'un assez grand nombre de points (une douzaine environ) puisqu'on a à tester des éprouvettes dont la surface est limitée.

2. Choix des points d'essai :

On doit éviter les régions proches des arêtes de l'élément (au moins 5cm pour les coffrages en bois et 3 cm pour les coffrages en acier).

La distance entre deux points d'essai doit être d'au moins 2cm, pour éviter l'influence du compactage superficiel dû au coup du scléromètre.

Ne pas faire d'essais dans les pores visibles à la surface du béton ou sur les gros granulats (gravier $\geq$ 7 mm).

Le mode opératoire de l'essai est le suivant :

- Placer la sonde à l'endroit de la mesure,
- Presser l'appareil contre l'élément à ausculter jusqu'au déclanchement de la projection de la bille,
- Presser le bouton poussoir,
- Tout en maintenant le bouton poussoir enfoncé, relâcher la presse exercée sur la sonde,
- La sonde reste bloquée, relâcher le bouton poussoir,
- Noter l'indice sclérométriques,
- Effectuer cette mesure plusieurs fois sur la zone d'ouvrage testé.

I.6.1.6. 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. L'appareil le plus connu est le scléromètre de Schmidt dont les courbes de transformation pour le type N sont données ci-après.

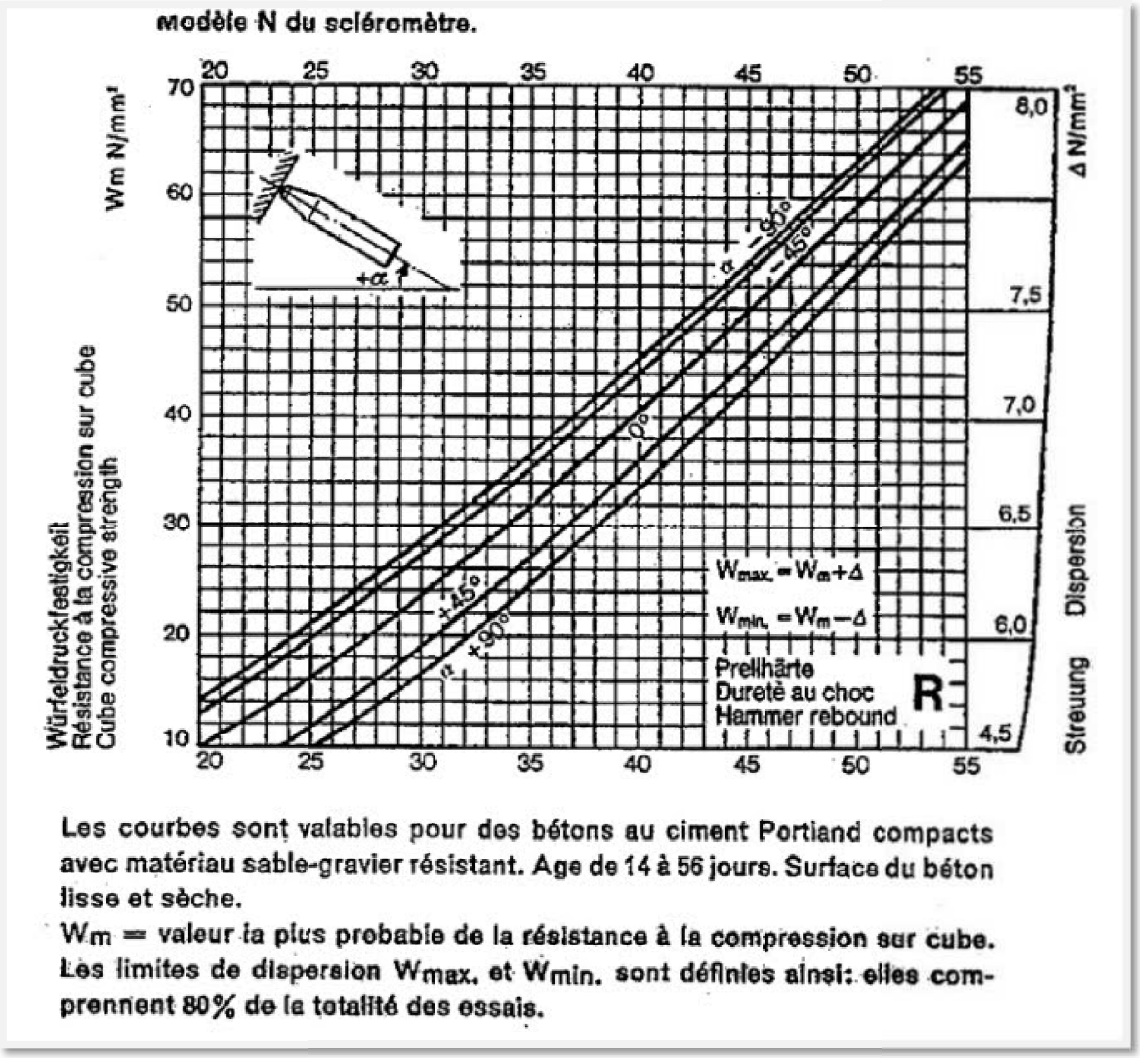


Figure I.2: Abaque déterminant la dureté du béton (source GINGER CEB TP).

Remarque :

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

Résistance d'un cylindre = résistance d'un cube x 0,85.

I.6.1.7. Les différents types de scléromètre :

Le scléromètre à béton a été développé par Ernst O. Schmidt et introduit au début des années 1950.

Il existe deux modèles de scléromètre, l'un étant simplement manuel, l'autre enregistreur, on choisit le modèle à utiliser selon la capacité, les options et les domaines d'utilisation. Le dernier modèle de la famille des scléromètres est le Silver Schmidt, le scléromètre à rebond le plus avancé.

1) Original Schmidt série N/L :

Les scléromètres à rebond sont disponibles avec différentes énergies d'impact pour permettre aux clients de tester un large choix de matériaux et de types de structures.



Figure I.3: Scléromètre original Schmidt série N/L.

2) Original Schmidt série NR/LR :

C'est une version éprouvée avec valeurs d'impact enregistrées sur du papier nominatif pour un contrôle plus facile. Simplifie grandement le calcul de la valeur de rebond et le contrôle de l'uniformité de l'objet testé. La plage de mesure de ce type est 10 à 70Mpa. Les valeurs de rebond sont enregistrées sous forme de diagramme à barres sur du papier nominatif. Une bobine de papier peut enregistrer jusqu'à 4000 frappes.

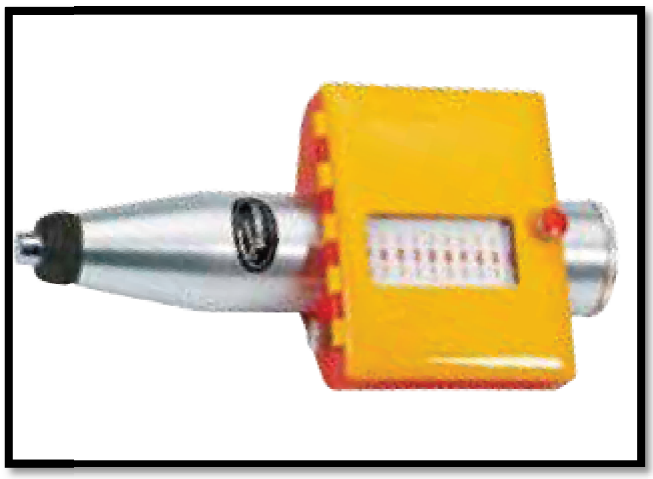


Figure I.4 : Scléromètre original Schmidt série LR/NR.

3) Digi-Schmidt série ND/LD :

Le premier scléromètre à rebond digital au monde avec stockage de données, correction de l'angle d'impact et affichage direct de la résistance à la compression. Il permet également de corriger le facteur de forme et les carbonations. On est accompagné d'un certain nombre de courbes de corrélation préprogrammées, permettant à l'utilisateur de sélectionner celle qui convient le mieux au béton testé.



Figure I.5: Scléromètre digi-Schmidt série LD/ND**.**

4) Silver Schmidt série N/L (ST/PC) :

Le scléromètre à rebond le plus abouti avec des caractéristiques de dispersion, une durabilité et une plage de mesure inégalée. Il se distingue par sa conception compacte, sa légèreté et son absence de maintenance. Il est compatible avec un large éventail d'applications et n'est pas affecté par l'angle d'impact. Les courbes de corrélation définies par l'utilisateur pour les mélanges spécifique à ce dernier peuvent être chargées sur le scléromètre afin d'obtenir la meilleure évaluation possible de la résistance à la compression.



Figure I.6 : Scléromètre Silver Schmidt série N/L.

I.6.1.8 : Les avantages de la méthode :

- ✓ C'est une méthode non destructive ;
- ✓ C'est la méthode la plus rapide et la plus économique pour évaluer la qualité et la résistance du béton.

I.6.1.9 : Les inconvénients de la méthode :

- ✓ Nécessite un étalonnage précis en vue d'estimer une résistance du béton ;
- ✓ Nécessite de nombreux points de mesure pour obtenir une valeur moyenne (11mesures par point selon la norme) ;
- ✓ Utilisable seulement sur les surfaces lisses et sans trace ni porosité élevée ;
- ✓ Mesure superficielle.

I.6.2. Les essais par ultrason :

I.6.2.1. Généralités :

Le contrôle non destructif par ultrasons est une technique qui est très proche du contrôle échographique utilisé en médical. C'est un outil idéal pour établir si le béton est uniforme. Il peut être utilisé sur les deux structures existantes et en cours de construction. Il consiste à envoyer une onde ultrasonore à l'aide des transducteurs dans un matériau qui peut être métallique, composite, plastique ou céramique et à recueillir la présence ou l'absence de signaux de réflexions sur des discontinuités internes de la matière (fissure, porosité…etc.). Il s'agit d'une technique capable de localiser et de dimensionner les défauts internes. Elle peut être utilisée en manuel ou en mode automatisé

- Les essais consistant à mesurer la vitesse de propagation des impulsions peuvent être effectués sur des éprouvettes de laboratoire comme sur des ouvrages en béton terminés. Certains facteurs influent toutefois sur la prise de mesures:
- La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, et une substance de contact telle une mince couche de gel est indispensable.
- Le parcours doit être préférablement d'au moins 12 po (30 cm) de façon à prévenir toute erreur occasionnée par l'hétérogénéité du béton..
- La présence d'acier d'armature dans le béton a un effet appréciable sur la vitesse des impulsions. Il est par conséquent souhaitable et souvent indispensable de choisir des parcours d'impulsions qui ne sont pas influencés par la présence d'acier d'armature ou d'effectuer des corrections si l'acier se trouve sur le parcoure de l'impulsion.
- 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.6.2.2. 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.
- ✓ Evaluer la résistance du béton.

I.6.2.3. Principe d'utilisation des ultrasons :

Connu depuis longtemps, cet essai non destructif permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) laquelle est d'autant plus élevées que le béton est plus dense donc plus résistant. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde pour 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 10et 150Hz, un amplificateur, un circuit de mesure du temps et un affichage digitale du temps mis par les ondes longitudinales pour traverser le béton entre les transducteurs. La vitesse d'onde, V, dans un milieu homogène, isotrope et élastique, est reliée au module d'élasticité dynamique, Ed, par l'expression suivante :

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

$\boldsymbol{\rho}$: est la masse volumique.

Ed : module d'élasticité dynamique.

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 connaitre au moins deux vitesses de propagation de types différents ondes longitudinales et ondes transversales:

$$\mathbf{V_t} = \sqrt{\frac{\mathbf{1-2\mu}}{\mathbf{2(1-\mu)}}} \cdot \mathbf{V_L}$$

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 :

$$\boldsymbol{\sigma = 16.7 \exp(Ed/122500)}$$

Le module d'élasticité des granulats varie énormément, en sorte que la vitesse dépend du module d'élasticité du granulat utilisé et de la quantité que contient le béton. Cependant, pour un granulat donné et une composition donnée, la vitesse de propagation des ondes dépend des modifications de la pâte du ciment durci, telles qu'un changement du rapport eau/ciment qui influence le module d'élasticité de la pâte.

On admet en général, que la connaissance de la vitesse des ondes permet de porter sur le béton une appréciation sur la résistance en compression fc. Mais afin que cette appréciation soit valable pour un certain béton, un étalonnage sur éprouvette est pratiquement indispensable, on le réalise par des mesures jumelées de résistance et de vitesse des ondes; en effet la vitesse du son n'est pas une fonction simple de la résistance mais d'autre paramètres interviennent (densité, module d'élasticité) pour un béton de granulat léger par exemple, de résistance fc=27 MPa, la vitesse du son n'est que de 3800 m/s alors que pour un béton dense de granulat silico- calcaire elle serait de l'ordre de 4200m/s pour une résistance du même ordre. Mais pour ce béton léger la densité n'est que 1.65 le module d'élasticité instantané 18000 MPa (au lieu de 33000 MPa pour le béton dense traditionnel).

On peut aussi trouver la résistance du béton à partir de la nature des granulats qui le constituent (calcaire ou siliceux) en utilisant l'abaque des résistances à la compression en fonction des vitesses du son. La vitesse de propagation sera calculée en transmission directe et semi-directe selon la formule suivante :

$$V=L/T$$

Avec : V : vitesse de propagation de l'onde.

L : distance parcourue par l'onde.

T : temps de propagation de l'onde.

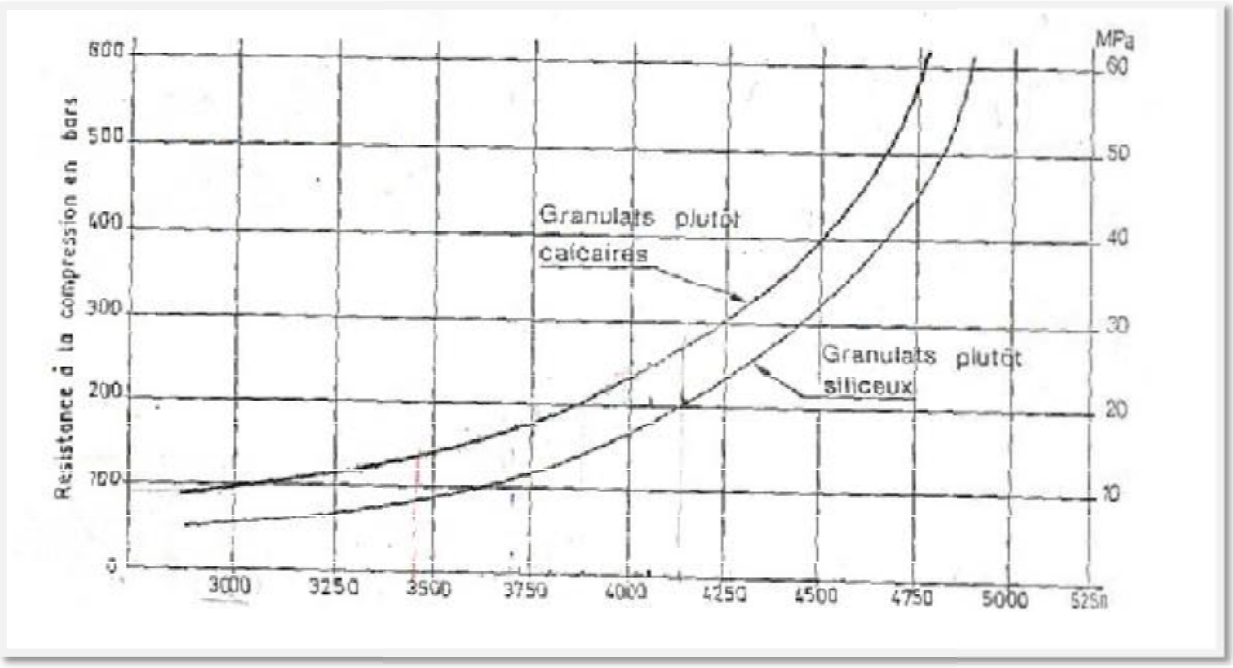


Figure I.7 : Abaque des résistances en fonction des vitesses des ondes**.**

I.6.2.4. Relation vitesse des ondes sonique résistance :

D'une façon générale, la résistance augmente avec la vitesse du son. Cette dernière est fonction également de la nature des granulats employés. Mais c'est à nouveau une question de compacité et les granulats poreux ou légers en particulier, procurent pour une même résistance à la compression, une vitesse plus faible.

1- La vitesse de propagation des impulsions ultrasoniques est directement liée à la résistance du béton. D'autres paramètres interviennent dans le calcul tel que le coefficient de poisson pouvant varier de 0,15 et 0,30 et la densité du béton.
2- Une présence de vides dans le béton (trous, fissures, ou cavité) gênerait la transmission des ondes soniques donc diminuerait sensiblement la vitesse de propagation et par conséquent, pourrait affecter négativement les valeurs de résistance.
3- La présence d'armature dans le béton perturbe la vitesse de propagation. Il est donc souhaitable voire indispensable de choisir un parcours d'ondes le moins influencé possible par des armatures.
4- Habituellement, si de grandes différences dans la vitesse d'impulsion se trouvent dans une structure sans aucune raison apparente, il ya de fortes raisons de présumer que le béton défectueux ou détérioré est présent.
5- Hautes mesures de vitesse d'impulsions sont généralement indicatives de béton de bonne qualité.
6- Une augmentation de la vitesse des impulsions se produit à des températures sous le point de congélation à cause du gel de l'eau; entre 5 et 30°C (41 et 86°F), la vitesse des impulsions n'est pas subordonnée à la température.

En règle générale, le degré de dommage est lié à une réduction de la vitesse d'impulsion. Des fissures peuvent également être détectées. Un grand soin doit être exercé, dans l'utilisation de mesures de vitesse d'impulsion, car il est souvent difficile d'interpréter les résultats.

Le tableau ci-dessous récapitule la qualité du béton selon la vitesse du son :

Vitesse du son en m/s	Appréciation de la qualité
> 4500	Excellent
3500 à 4500	Bon
3000 à 3500	Assez bon
2000 à 3000	Médiocre
< 2000	Très mauvais

Tableau I.1: Estimation de la qualité du béton selon la vitesse du son.

I.6.2.5. Description de l'appareil « ultrason » :

Les caractéristiques de conception fondamentales de tous les unités disponibles dans le commerce sont très semblables, constitué d'un générateur d'impulsions et un récepteur d'impulsions.

L'ultrason utilisé dans cette étude est de type 58-E0048, il comprend :

- ✓ Le testeur ultrasonique 58-E0048.
- ✓ Une tête de transmission et une de réception (54Khz).
- ✓ Deux câbles de connexion.
- ✓ Un barreau de calibrage.
- ✓ Un flacon de gel contact (gel de paraffine) pour assurer un bon contact du béton avec les transducteurs.
- ✓ Deux piles alcalines 1,5V type « D ».



Figure I.8 : Appareil d'ultrason.

1. Fonctionnement de l'appareil :

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

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

L'appareil est maintenant prêt à l'essai, après un étalonnage. Le taux d'impulsion est de une par seconde.

- Choisir la surface à tester, de préférence lisse et sans crevasses. Le mode d'osculation pourra être direct, semis direct ou indirect 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.

2. Positionnement des transducteurs :

Bien que la direction pour laquelle le maximum d'énergie soit propagé soit par apport à la face d'émission, il est possible de détecter des impulsions s'étant propagées dans le béton en d'autres directions. Il est donc 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).

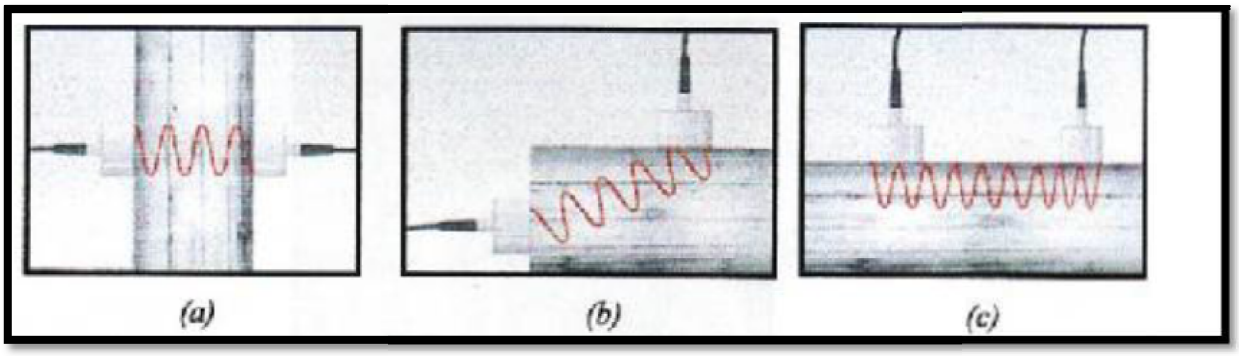


Figure. I.9: Types de propagation d'ondes.

2. 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.

2. 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.

2. c. Transmission indirecte :

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

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

I.6.2.6 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 :

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 suivante :

$$L = V/f$$

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 :

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

Avec :

E : (Pa) : module de Young,

μ : (sans dimension) : coefficient de Poisson,

ρ : (kg/m^3) : 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 reliée aux caractéristiques du matériau traversé.

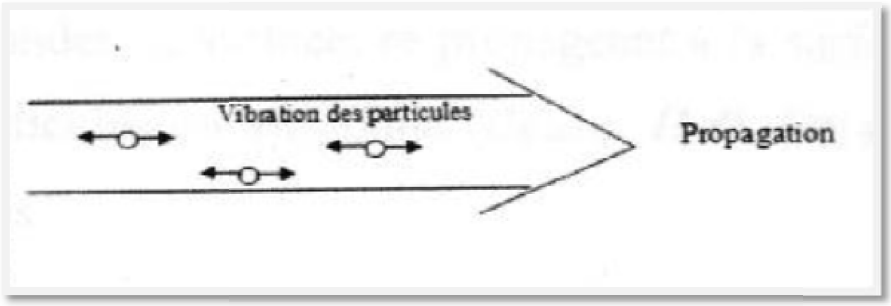


Figure I.10 :Ondes longitudinales.

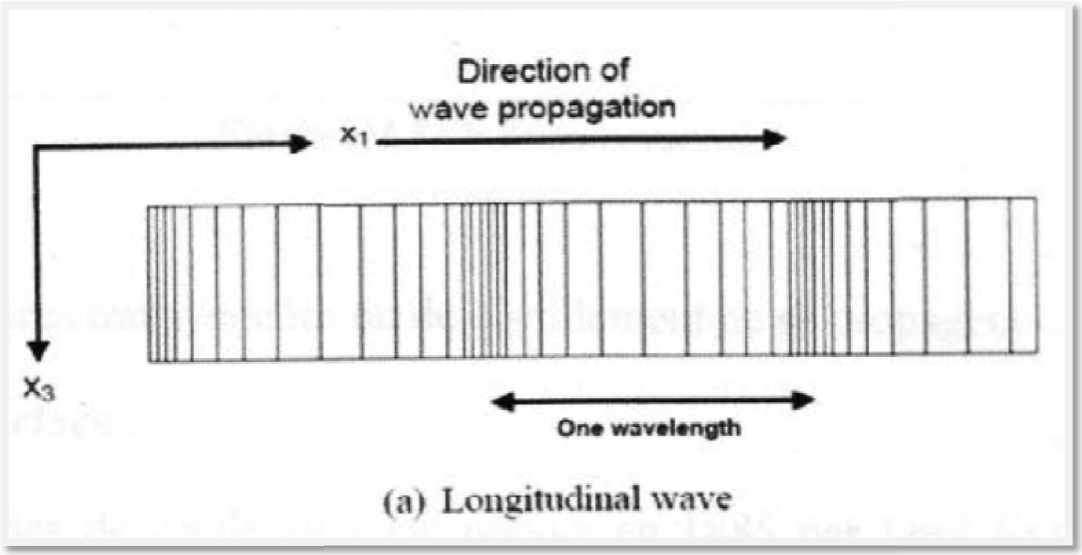


Figure I.11 : Ondes longitudinales**.**

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 :

$$\mathbf{V_T} = \left(\frac{\boldsymbol{E}(\mathbf{1}-\mu)}{\boldsymbol{\rho}(\mathbf{1}+\mu)(\mathbf{1}-\mathbf{2}\mu)}\right)^{\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}}}$$

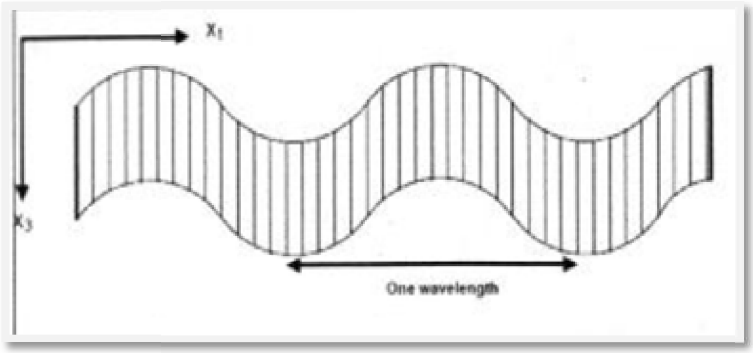


Figure I.12 : Ondes transversales.

2. Les ondes de surfaces :

Les ondes de surfaces s'appellent aussi ondes de Rayleigh, l'existence de ces ondes a été prévue en 1885 par Lord Rayleigh. Ceux sont des ondes ultrasonores qui se propagent à la surface des matériaux. Dans le cas des matériaux épais devant la longueur d'onde, les ondes de surface, sont le résultat de la superposition d'une onde longitudinale et d'une onde transversale de même fréquence déphasée de $\pi/2$.

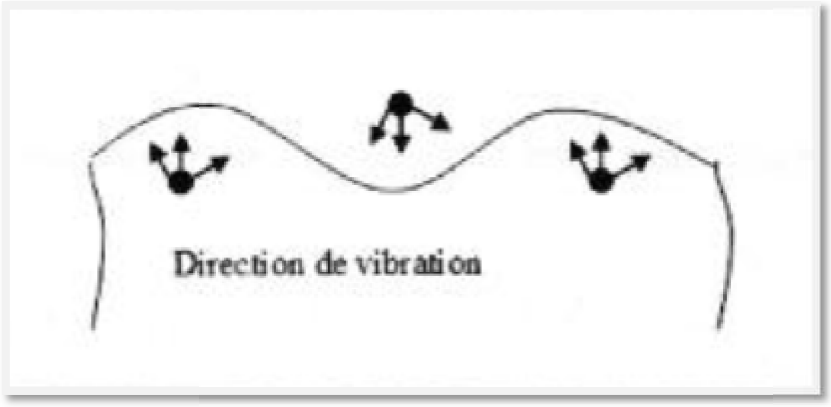


Figure I.13. Ondes de Rayleigh.

3. Les ondes de Lamb :

Les ondes de Lamb ou ondes de plaques correspondent à des ondes de surface qui se propagent dans des matériaux dont l'épaisseur est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde. Dans ce cas, l'onde vibratoire intéresse toute l'épaisseur de la plaque. On distingue deux grandes familles d'ondes de Lamb, suivant que la plaque vibre en conservant un plan de symétrie (modes symétriques ou de compression S) ou non (modes antisymétriques ou de flexion A).les ondes de Lamb sont utilisées industriellement pour le contrôle des tôles minces métalliques et de certains composites.

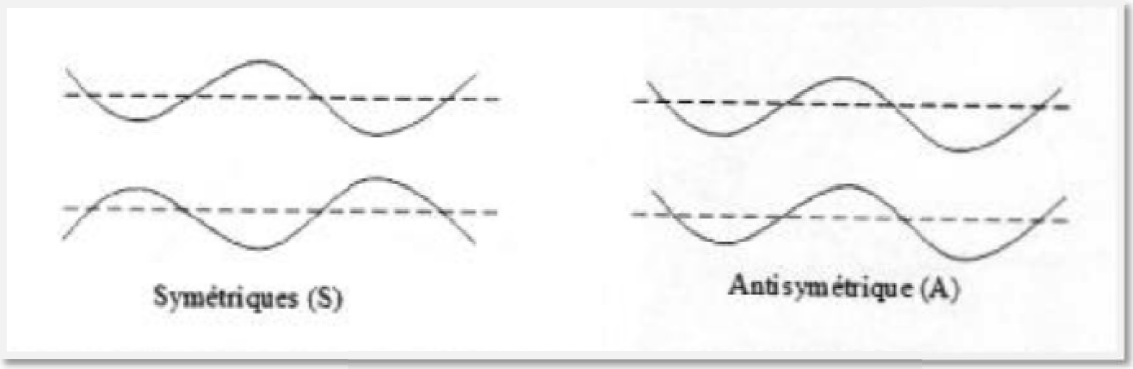


Figure I.14 : Ondes de Lamb.

I.6.2.7. Distribution de la vitesse ultrasonique à travers le béton :

Pour la détection des vides, quand une impulsion d'onde passant à travers un béton rencontre de l'air à l'intérieur, la transmission est négligeable : les dimensions du vide sont grandes en comparaison de la longueur d'onde. Une proportion d'énergie de l'impulsion est dispersée autour de la périphérie du vide et le temps de parcours augmente.

L'existence d'un vide est détectée par un saut brusque de la vitesse mesurée aux nœuds d'un réseau primaire qui recouvre la surface mise à l'essai. La dimension du vide est calculée en comparant la mesure du temps de propagation t1 à la mesure courante t0 sur la même distance d'émetteur- récepteur. Conformément au principe de Huygens, la différence est due à la présence du vide qui oblige l'onde à l'éviter par le chemin le plus court.

Des calculs physiques montrent que la dimension minimale perpendiculaire à la direction de propagation des ondes est donnée par la relation :

$$L = \sqrt{d\left(\frac{t1}{t0}\right)^2 - 1}$$

Avec :

L : dimension du vide.

d : distance émetteur – récepteur.

t1 : temps de propagation des ondes.

t0 : temps de propagation courante des ondes.

Ø Déterminer la profondeur des fissures existantes dans le matériau : la mesure exacte est faite pour une fissure perpendiculaire une zone de béton non fissurée.

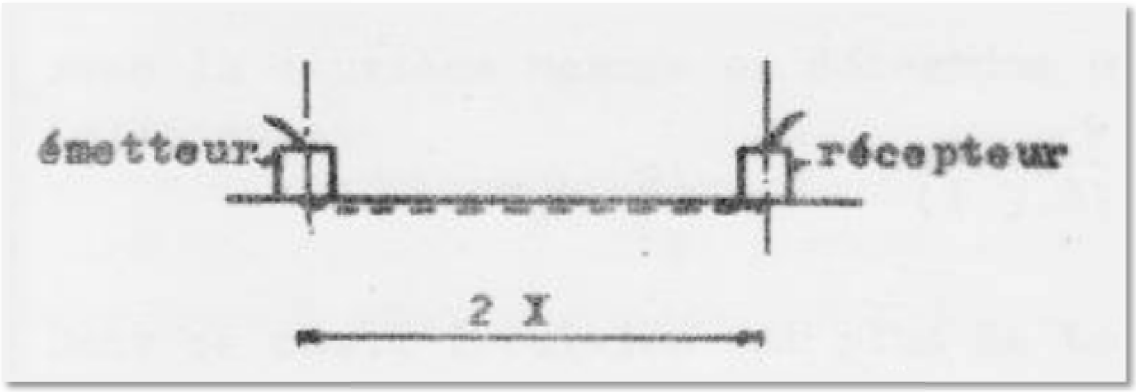


Figure I.15 : Mesure de la vitesse du son dans une zone de béton non fissuré

Après lecture du temps t1, on détermine une vitesse de propagation du son v1 telle que :

$$V1=\frac{t1}{2x}$$

Ensuite on place l'émetteur et le récepteur dans la zone de béton fissurée de chaque côté de la fissure et à égale distance X de la fissure.

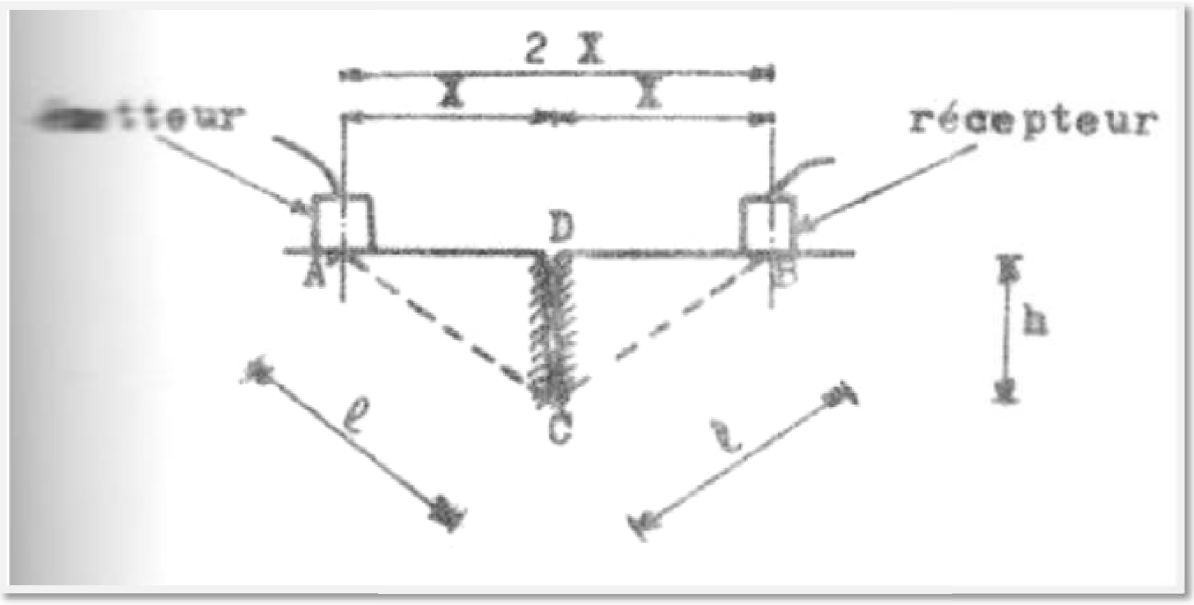


Figure I.16 : mesure de la vitesse du son dans la zone fissurée

Les ondes dans ce cas-là auront parcouru les distances 2 L. en appliquant le théorème de Pythagore au triangle rectangle ADC ou ABC, on obtient :

$$L=\sqrt{(x^2+h^2)}$$

H : étant la profondeur de la fissure.

Avec la deuxième mesure, on détermine la vitesse v2.

Dans ce cas, l'impulsion met plus de temps à se déplacer du point A position de l'émetteur, au point B position du récepteur, que dans le cas précèdent ; car l'impulsion a contourné la fissure.

I.6.2.8. 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 influer 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 : des 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 général, 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 50khz, la longueur d'onde des vibrations est de 80mm (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 par de l'eau et non par de l'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 décarbonatation provoqué par l'action de l'oxyde de carbone (co2) de l'atmosphère sur les chaux libres, Ca(OH) 2qui 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 (caco3).

La transformation ayant lieu est la suivante :

$Ca(OH)_2 + co_2 \rightarrow caco_3 + H_2O$

La dureté du carbonate de calcium (caco3) 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 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.

Conclusion

Il est évident que les essais non destructifs, en raison de leur simplicité, de leur coût et de la possibilité qu'elles confèrent à l'ingénieur d'ausculter à volonté, sur ouvrage ou sur éprouvette, à n'importe qu'elles âge du béton, suscitent un intérêt particulier chez les chercheurs, qui tentent d'établir des relations empiriques entre les résultats d'essai non destructif (indice sclérométrique vitesse de propagation des ultrasons) et la résistance à la compression obtenue par écrasement, sous presse hydraulique.

L'utilisation de méthodes d'évaluation dites « 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.

Les obstacles technologiques et scientifiques qui ont freiné le développement des technologiques de CND en génie civil ont été réduits. Un grand pas en avant a été réalisé depuis les deux dernières décennies car on dispose aujourd'hui d'une panoplie d'outils permettant la résolution d'un certain nombre de problème. Certes, tous les besoins ne sont pas encore satisfaits. Par exemple, l'estimation de la résistance à la compression par des technique de CND constitue encore l'un des objectifs à atteindre car les moyens actuels sont indirects et pas suffisamment fiable. Les efforts de développement doivent donc se poursuivre dans le cadre d'une synergie multidisciplinaire associant des ingénieures en matériaux et en instrumentation aux physiques, mathématiciens et informaticiens.

Le contrôle non destructif des structures a pour objectif de fournir des renseignements qui peuvent être obtenus ni par l'inspection visuelle ni par l'instrumentation. En effet, l'intérêt premier de ce contrôle est d'avoir une évaluation in situ de la qualité des matériaux (ex : résistance à la compression, ..). En plus de l'estimation des propriétés, les techniques de CND sont aussi utilisées 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.

Généralités :

De nos jours, le béton est le produit industriel le plus utilisé dans le monde. Il est fabriqué puis mit en place en phase fluide, il durcit et se consolide dans un deuxième temps, ce qui permet des réalisations techniques extrêmement variées. De plus, il présente des caractéristiques de résistance particulièrement importantes.

Le béton est utilisé dans tous types de construction : bâtiment, ouvrages d'arts, monuments et éventuellement dans les éléments de décoration…etc. Avec le béton on réalise également des produits de préfabrication tels que : tuyaux, blocs, poutrelles, pavés, planchers, cloisons, escaliers.

Certes, on peut construire avec d'autres matériaux tels que les charpentes en bois, charpente métallique, maçonneries (pierres, briques) éventuellement avec du verre …, mais avec des utilisations limitées, et pour cause, leur coût très élevé par rapport à celui du béton et parfois pour leurs propriétés technologiques inadaptées. Ils sont alors souvent utilisés en complément des structures de béton qui, du fait de leurs caractéristiques et de leur coût économique, assurent l'ossature et la tenue des édifices.

Le béton est un matériau composite constitué de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée, sable), de ciment et d'eau. Le mélange entre le ciment et l'eau forme une pâte qui durcit. La pâte de ciment hydraté et le sable constituent le mortier. Celui-ci à pour rôle de se lier avec les gros granulats pour former un conglomérat solide. Les adjuvants et les additions servent à améliorer certaines caractéristiques du béton frais.

La performance des bétons ordinaires dépend de la nature des matériaux constituant son mélange.

II.2 les constituants du béton :

Le béton, mélange de plusieurs composants très différents, dont les uns sont actifs et les autres inertes, présente des caractéristiques qui sont en fonction de celles de ses composants.

- Le mélange entre le ciment et l'eau forme une pâte qui durcit.
- La pâte de ciment hydratée et le sable constituent le mortier.

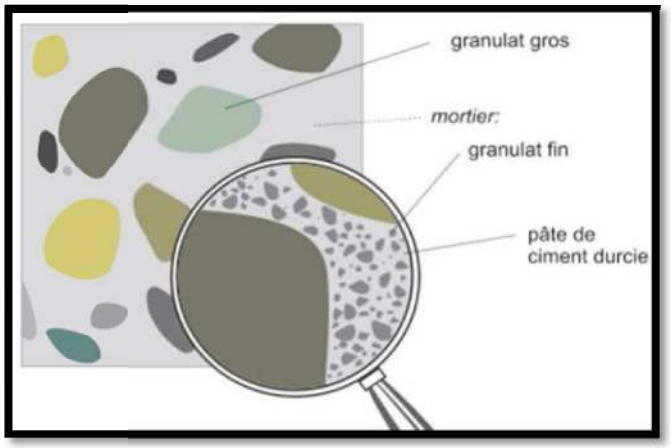


Figure II.1 : Composants d'un béton.

II.2.1. Le ciment :

II.2.1.1. Introduction :

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450°-1550°C, température de fusion.

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau, et parce que cette hydratation transfère la pâte liante, qui a une consistance de départ plus en moins fluide, en un solide, pratiquement insoluble dans l'eau.

Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.

L'expression de « pâte de ciment durcissant » sera utilisée pour la transformation d'un état plus ou moins fluide en un état solide.

II.2.1.2.Constituants principaux :

- Fourneau ;
- Des cendres volantes ;
- Des fines calcaires ;
- De la pouzzolane naturelle ;
- Des schistes calcinés.

Les ciments courant ont pour constituant le clinker, auquel il peut être ajouté suivant leur type :

- Du calcaire ;
- Du laitier de haut ;
- Des fumées de silice.

Dans le but de modifier certaines de leurs propriétés et de proposer une gamme de produits capables de résoudre déférents problèmes qui se posent lors de la réalisation de certains ouvrages. Soit en raison des conditions d'environnement, soit pour des raisons de performances.

Le clinker contient encore en faible quantités, sous forme de solution solide ou pris dans des combinaisons complexes, des alcalis (Na_2O, K_2O), de la magnésie (MgO), et diverse traces de métaux. La teneur en alcalis et magnésie doit rester faible, car ces matières peuvent influencer défavorablement la stabilité du ciment durcit.

A l'aide du microscope, on peut distinguer la structure minéralogique du clinker en trois phases auxquelles les chercheurs donnent les noms suivants :

A = alite (phase cristallisée), se présente sous la forme de cristaux polygonaux assez grand (grains anguleux foncé).

B = bélite (phase vitreuse), se trouve sous forme impure dans le clinker (grains légèrement arrondis et rayés).

C = célite (phase vitreuse légèrement foncée et claire) se trouve dans le clinker sous forme impure et de phase vitreuse.

II.2.1.3. Principe de production du ciment portland :

La fabrication de ciment se réduit schématiquement aux trois opérations suivantes :

Préparation du cru : Cuisson, broyage et conditionnement.

La composition de la base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3), et l'oxyde de fer(Fe_2O_3). La chaux nécessaire, est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. Les matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne. Ils contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autre oxydes et en particulier Fe_2O_3 l'oxyde ferrique.

Le principe de fabrication du ciment est le suivant : calcaires et argiles sont extraits des carrières, concassés, homogénéisés, portés à la température (1450°C) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (de la trempe) est le clinker.

Un mélange est porté à 1450-1550°C, température de fusion. Le liquide ainsi obtenu permet l'obtention des déférentes réactions. On suppose que les composants du ciment sont formés de la façon suivante :

Une partie de CaO est retenu par Al_2O_3 et Fe_2O_3 en formant une masse liquide. Si_{O2} et CaO restant réagissent pour donner le silicate bi calcique, dont une partie se transforme en silicate tricalcique dans la mesure où il reste encore du CaO non combiné.

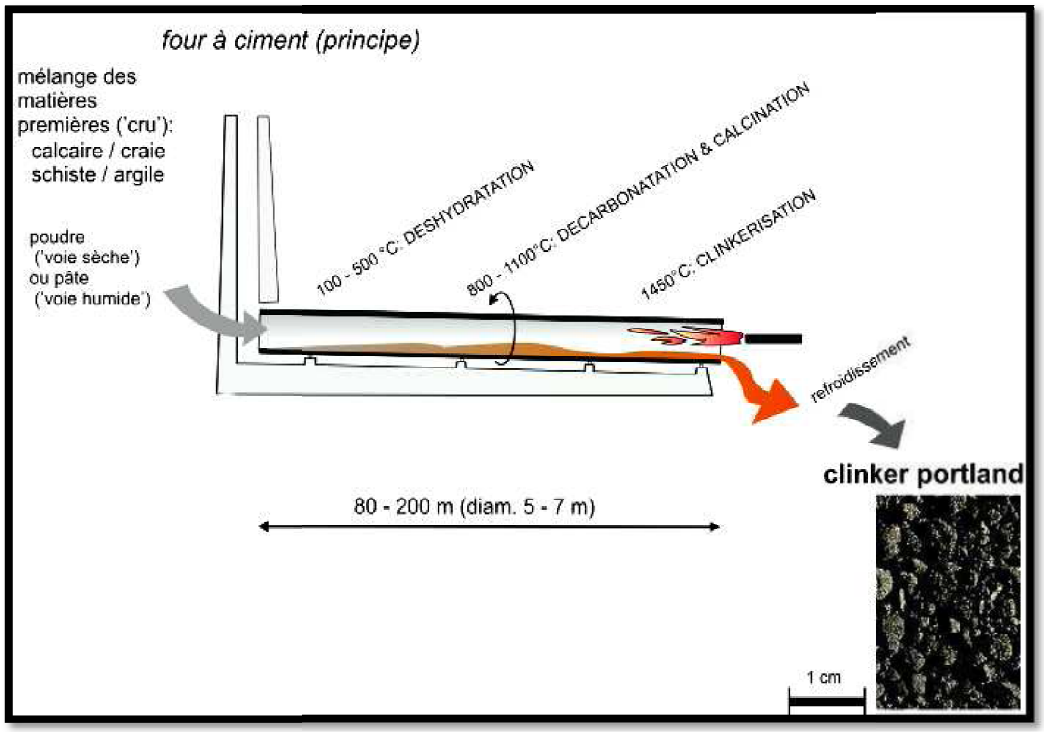


Figure II.2 : Production du ciment portland.

II.2.1.4. Différents types des ciments courants :

Il existe plusieurs sortes de désignations, propres à des pourcentages respectifs des constituants qui le composent. Le gypse, est ou non ajoutés au clinker. On peut résumer ces différents types de ciments dans le tableau suivant :

Désignation	**Types de ciment**	**Teneur en clinker**	**Teneur en% de l'un des constituants suivants : Laitier-pouzzolane-cendre calcaire**	**Teneur en constituants secondaires**
CPA-CEM I	Ciment portland	95à100%		0à5%
CPJ-CEM II/A	Ciment portland composé	-80à94%	-6à20%de l'un quelconque des constituants, sauf dans le cas ou le constituant est des fumés de cilice auquel cas la proportion est limitée à 10% De21à35%avec les restrictions que ci-dessus	0à5%
CPZ-CEM IV/A	Ciment pouzzolanique	65à90%	10à35%de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumes de cilice, ces dernières étant limitées à 10% 36à50%comme ci-dessus	0à5%
CLC-CEM V/A	Ciment au laitier Et aux cendres	40à64%	18à30%de laitier de haut fourneau et 18à30%de cendres siliceuses ou de pouzzolanes. 31à50%de chacun des deux constituants comme ci dessus	

Tableau II.1 : Diférents types de ciments courants.

II.2.1.5. Classes de résistance :

Les ciments se caractérisent en fonction de leur classe de résistance à la compression, mesurés à 28 jours d'âges. La résistance est exprimée en MPA.

Pour les ciments fabriqués jusqu'à fin 1994, on distinguait 4 classes de résistances dont les valeurs sont indiquées dans le tableau ci-dessous :

Désignation de la classe	Sous classe éventuelle	Résistance à la compression en bars		
		A 2jours minimaux	A 28jours	
			minimale	Maximale
350	……..	…….	250	450
450	……	…….....	350	550
	R (rapide)	150	350	550
550	……..	…….	450	650
	R (rapide)	225	450	650
THR très haute performance	……	300	550	…….

Tableau II.2 :Résistance à la compression.

II.2.1.6 : propriétés des ciments :

- **Prise :**

Le phénomène de prise, qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important, est lié à de nombreux paramètres :

- ✓ Le type du ciment, certains d'entre eux ayant des temps de prise beaucoup plus courts que d'autre dans les même conditions d'ambiance.
- ✓ La finesse de monture, le début de prise est plus rapide que la finesse de mouture.
- ✓ La température ambiante, la prise étant stoppée à 0°C, alors qu'elle est très accélérée dés que la température dépasse 30°C.
- ✓ La présence de matières organiques dans l'eau.
- ✓ L'excès d'eau de gâchage qui agit comme retardateur.

La norme spécifie, suivant les ciments, un temps de prise minimal de :

- ❖ 1h30 pour les ciments des classes 32.5et 32.5R ;
- ❖ 1h pour les ciments des classes 42.5-42.5R-52.5-52.5R ;

D'une façon générale les temps de prise sont supérieurs à ses valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2h30 à 3h30 pour la grande majorité des ciments. Ces valeurs s'entendent pour une température ambiante de 20°C.

- **Durcissement :**

Une fois la prise amorcée, le phénomène d'hydratation se produit. La période de durcissement qui se poursuit pendant des mois voire des années et durant ce temps la résistance mécanique continue de croitre.

Lorsqu' on désire un durcissement rapide, on choisit des ciments de classe élevée et de préférence de classe « R ». C'est-à-dire ayant la caractéristique complémentaire « rapide ».Il est également possible d'utiliser du ciment alumineux fondu CA, qui après quelques jours allient la quasi-totalité de sa résistance.

- **Fausse prise :**

En général, dans la composition des ciments rentre un peu de gypse (sulfate de calcium hydraté à deux molécules d'eau).

Si les clinkers sont trop chauds ou s'échauffent trop au cours du broyage. Il se forme alors un peu de plâtre, dont la prise très rapide donne l'impression d'un début de prise, c'est « la fausse prise ». Dans ce cas il ne faut surtout pas ajouter de l'eau mais augmenter la durée de malaxage. Les ciments les plus sensibles sont ceux à très fine mouture ou à assez fort pourcentage de gypse.

- **Chaleur d'hydratation :**

La dissolution des différents constituants est exothermique, selon leurs pourcentages relatifs, le dégagement de chaleur est donc plus ou moins important. C'est le cas par exemple des ciments en C_3A que l'on cherchera à utiliser par temps froids ou en préfabrication. Alors, qu'on aura intérêt à les éviter par temps chands.

Suivant les ciments, cette chaleur est comprise à 12h, approximativement, entre 65j/g par exemple pour certains CHF-CEM/B et 300j/g pour certains CPA-CEM.

La finesse de mouture a également une action sur l'exotherme.

- **Finesse de mouture :**

La finesse de mouture, également appelée finesse de Blaine. Exprimée en m^2/kg, représente la surface spécifique ou la surface développée d'une masse de 1kg de ciment. Elle est d'une façon générale, comprise entre 300 et 350. Certains ciments, tels les ciments prompts naturels « CNP », ont un Blaine supérieure à $450m^2/kg$.

Plus la finesse est grande, plus les résistances sont précoces et élevées. Mais par contre, plus les risques de retrait, et par conséquent de fissuration ainsi que d'éventement du ciment, sont accrus.

- **Retrait :**

C'est la diminution du volume apparent de la matière, on peut distinguer :

- ✓ Le retrait plastique avant prise, qui est dû essentiellement à la perte prématurée, par évaporation, d'une partie de l'eau de gâchage et dont l'amplitude est d'environ dix fois celle de retrait hydraulique classique. Ce retrait peut provoquer dans le béton frais non protégé de l'ensoleillement ou du vent et dont la résistance à la traction est pratiquement nulle. Des contraintes susceptibles d'entrainer l'apparition de crevasses peu profondes, mais d'une ouverture supérieure au millimètre, qu'il est d'ailleurs possible de refermer avant la fin de prise par un talochage serré.
- ✓ Le retrait thermique, dû à la contraction du béton ou du mortier lors de son refroidissement, qui est prépondérant pour les pièces massives.
- ✓ Le retrait hydraulique qui découle de la contraction du béton ou du mortier en séchant.

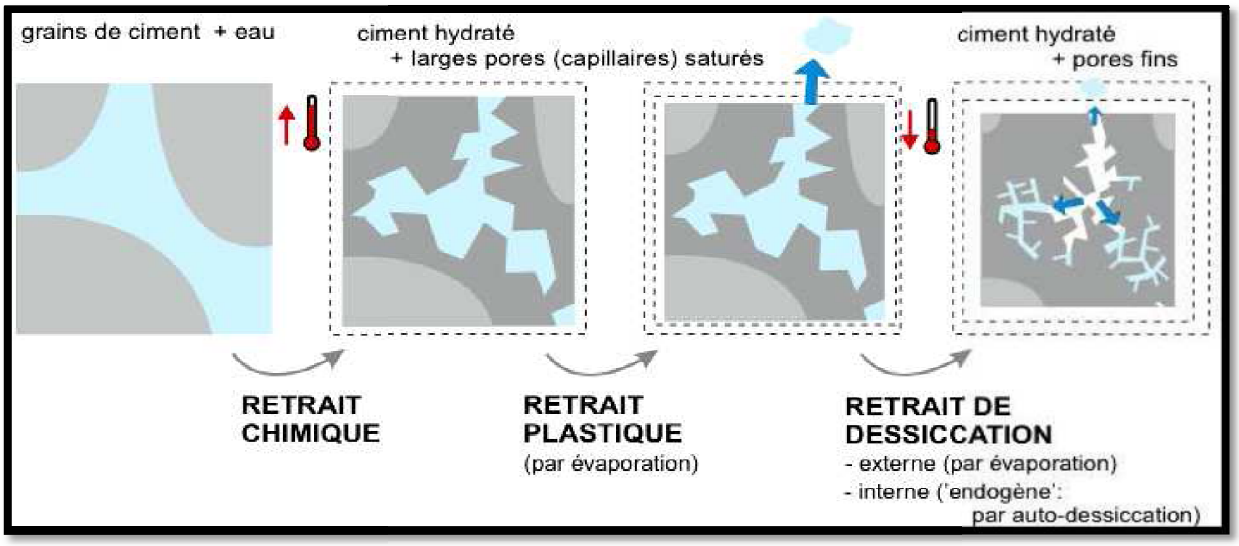


Figure II.3 : Différents types de retraits.

- **Expansion :**

Les causes possibles de l'expansion proviennent de l'hydratation des oxydes de calcium ou de magnésie que peuvent contenir certains ciments sous forme de chaux ou de magnésie libres.

Les ciments doivent être stables, car les risques d'expansion dans le temps peuvent provoquer des désordres importants par dislocation des maçonneries.

- **Gonflement :**

Bien que non normalisé, il est utile de rappeler qu'alors qu'il se rétracte dans l'air, le ciment augmente de volume lorsqu'il est immergé dans l'eau, ses variation dimensionnelles étant environ le $1/10^{e}$ de celles constatées dans l'air.

II.2.2. les granulats :

II.2.2.1. Introduction :

On appelle « granulat » les matériaux inertes, sables graviers ou cailloux, qui entrent 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 .Ces matériaux sont quelque fois encore appelés « agrégat ». Cependant, cette appellation est abandonnée depuis fort longtemps. Certains persistent à utiliser l'appellation agrégats, vieil usage tout à fait impropre, en effet le dictionnaire donne la définition suivante :

Agrégat : réunion de substances diverses formant un tout non homogènes.

Le béton, par exemple, est un agrégat de gravier sable et ciment, ce dernier jouant le rôle de matière d'agrégation.

Les spécifications auxquelles doivent satisfaire les granulats sont précisés dans les nouvelles normes XP P 18-540 d'octobre qui remplace les normes P 18-101 de décembre 1990 et P18-541 de mai 1994. Ces normes regroupent les caractéristiques que doivent présenter en général les granulats destinés aussi bien à la confection du béton hydrauliques, que ceux destinés à la confection des chaussées. Qu'il s'agisse de couches de fondation, de couches de roulement à base de liants hydrocarbonés ou hydrauliques, ou encore ceux destinés aux assises de voies ferrées ou à la réalisation de ballast. Les spécifications sont en fonction de chacune de ces utilisations.

Seules les spécifications des granulats destinés à la confection du béton sont indiquées par la suite.

Les granulats sont classés en plusieurs catégories avec des spécifications particulières pour chacune d'elles.

Les catégories A : correspondent aux granulats destinés à la confection du béton de qualités tels que ceux destinées à la construction d'ouvrages d'art ou de bâtiments, pour les- quels les résistances caractéristiques Rc sont supérieures ou égales à 35MPA. Eventuellement certaines caractéristiques des catégories B ou C sont.

Les granulats de catégories B sont destinés aux bons bétons ainsi qu'à ceux pouvant être utilisés dans un environnement agressif (3-4_b et $5_{c)}$, à la condition que leurs coefficients d'absorption respectent les spécifications imposées aux granulats de catégorie A.

Les catégories C et D conviennent aux bétons courants à la condition, dans le cas d'utilisation de granulats D, que seules 2 de leurs caractérisations soient présentes, et que les autres correspondantes à celles de catégorie supérieures. Fautes de quoi ils ne doivent pas être utilisés dans la confection des bétons courants.

II.2.2 .2. Classification des granulats :

Les granulats sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminées par criblage sur des tamis à mailles carrées dont la dimension intérieure est exprimée en millimètres.

On appelle « tamisât » la partie des granulats qui est passée à travers le tamis et « refus » la partie qui est restée sur le tamis.

Le terme granulat d/D est réservé aux granulats dont les dimensions s'étalent de d pour les petits éléments.

La norme xp p 18-540 précise les appellations des différentes classes granulaires avec leurs caractéristiques dimensionnelles :

Filler 0/D pour « D » < 2 mm et ayant au moins 70% de grains passent au tamis de 0.63 mm

Sablon 0/D pour « D » ≤1 mm et avec moins de 70 % de grains passent au tamis de 0.63 mm

Sable 0/D lorsque « D »est tel que : 1mm < D ≤ 6.3 mm

Graves 0/D lorsque « D » > 6.3mm

Gravillons d/D lorsque « d » ≥ 1 mm et « D » ≤ 1.25 mm

Ballet d/D lorsque « d » ≥ 25 mm et « D » ≤ 50 mm.



Figure II.4: Différents types de granulats.

II.2.2 .3 : Courbe granulométrique :

Les propriétés physiques et mécaniques du béton dépendent de beaucoup de facteurs.

Généralement, on souhaite un béton résistant, étanche et durable. Pour atteindre ce but il faut :

Que le béton, à l'état frais, soit facile à mettre en œuvre et à compacter (pour réduire la porosité).

Un maximum de granulats par unité de volume du béton (pour réduire la quantité de pâte liante nécessaire pour remplir les vides devant être remplis par pate liante).

Un maximum de surface spécifique (pour réduire la quantité d'eau de gâchage et obtenir un rapport E/C plus faible

Par ailleurs :

Il faut choisir D_{max} aussi grand que le permet la dimension minimum de la pièce à bétonner et l'encombrement des granulats.

La proportion de chaque dimension des grains doit être choisie de façon à remplir les vides laissés par les grains de dimensions supérieures.

Il faut réduire la teneur en éléments fins au minimum requis pour obtenir une bonne maniabilité et une bonne compacité.

Les courbes granulométriques apporteront quelques éléments de réponses à ces conditions.

La condition essentielle pour obtenir le moins de vides possibles (meilleure compacité) dans un mélange de sable et gravillon est de : 35%de sable de 0/5 et 65%de gravillon5/20.

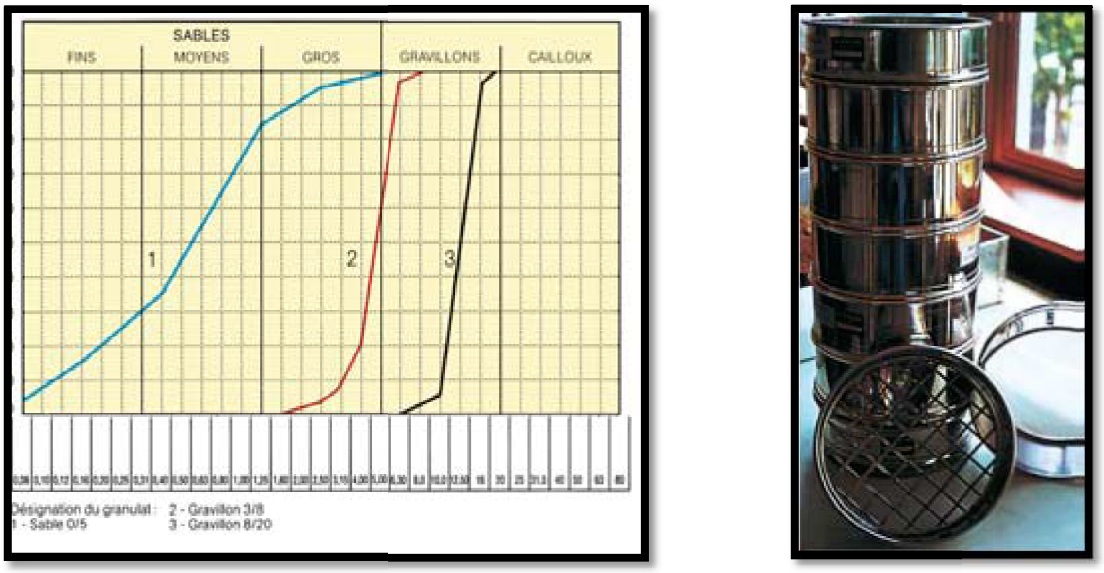


Figure II.5 : Courbe granulométrique d'un sable et de deux gravillons.

II.2.2.4.Différents types de granulats :

Un granulat, en fonction de sa nature et de son origine, peut être :

a- Les granulats naturels :

Les granulats naturels sont issus de roches meubles ou massives n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tel que concassage, broyage, criblage et lavage). Les roches meubles (matériaux alluvionnaires) sont exploitées le long des fleuves et des rivières. Les roches massives calcaires constituent les bassins sédimentaires et les chaînes récentes, les roches massives éruptives constituent les massifs anciens

1- Les granulats de roche meuble (matériaux alluvionnaires) :

Dits roulés, dont la forme a été acquise par l'érosion. Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses nuisibles à la résistance du béton, et criblés pour obtenir différentes classes de dimensions. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, les granulats utilisés pour le béton sont le plus souvent siliceux, calcaires ou silico-calcaires. Ils sont exploités à proximité des cours d'eau, dans la nappe ou au-dessus de la nappe ou sur des fonds marins peu profonds. L'extraction est donc réalisée en fonction du gisement à sec ou dans l'eau.



Figure II.6: Extraction des granulats à proximité des grandes métropoles.

2- Les granulats de roche massive, (de carrière) :

La carrière peut être implantée en plaine sur un plateau, en montagne ou au bord d'une falaise. Ils 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.

Parmi les granulats naturels, les plus utilisés pour le béton, proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques telles que le quartz et quartzites ou de roche éruptives telles que les basaltes, les granites et les porphyres.



Figure II.7: Découpage en blocs parallélépipédiques de la **roche massive** en place.



Figure II.8: Granulat issus d'une roche éruptive.



Figure II.9: Roche sédimentaire.

b- Les granulats artificiels :

Les granulats artificiels sont généralement soit plus lourd, soit plus léger que les granulats ordinaires. Des granulats artificiels peuvent être employés pour réaliser des bétons à usages spécifiques. Ils sont d'origine minérale résultant d'un procédé industriel, comprenant des transformations thermiques ou chimiques.

Les transformations se font 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 internes. Cela entraîne l'expansion du nodule, d'autre part une vitrification de la couche externe. Par conséquent, on obtient un granulat plus gros, avec une grande porosité, donc des granulats légers.

Dans cette catégorie se rangent les granulats légers transformés, comme l'argile expansée (Figure II.10 a) et II.10 b), le schiste expansé (Figure II.10 c).



(a) **(b)** **(c)**

Figure II.10: Illustration des granulats expansés : (a) l'argile ; (b) et (c) schiste.

a- Les granulats recyclés :

Ce sont essentiellement des granulats obtenus pour le recyclage du béton de démolition. Ils peuvent être de diverses natures selon la nature du déchet à recycler. Ce déchet subit différents traitements (concassage, tri, calibrage, nettoyage…) pour le rendre apte à l'utilisation. Les granulats recyclés sont obtenus par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments.

L'utilisation des granulats recyclés permet de récupérer les matériaux résultants de la démolition des constructions, due soit aux catastrophes naturelles soit à la démolition des vieux bâtis, donc participer à réduire les décharges dans la nature, comme elle protège la nature de l'exploitation excessive de la réserve des granulats naturels.

II.2.2.5. Production des granulats :

La production des granulats à partir de roches meubles ou massives, nécessite les principales étapes suivantes :

- **Le décapage :** consiste à enlever les terres situées au-dessus de la zone à exploiter.
- **L'extraction :** s'effectue dans des carrières. Les techniques mises en œuvre dépendent du type gisement :
  - ✓ Gisement de granulats alluvionnaires exploité en terrain sec (au moyen d'engins de terrassement)ou en site immergé(au moyen par exemple de drague)
  - ✓ Gisement compact de roches massives qui nécessite l'emploi d'explosif. L'abattage et la fragmentation des blocs.
- **Le traitement :**fait suite à l'extraction des matériaux, qui sont concassés et broyés(au moyen d'appareils travaillant par chocs ou écrasement) afin de réduire leur taille, criblés (au moyen de cribles vibrants) pour obtenir des granulats de tailles différents, puis lavés(afin d'éliminer les éléments de pollution et les fines)ou dépoussiérés et enfin stockés.les opérations de traitement permettent d'obtenir des granulats répondant à des spécification précises quant à leurs caractérisations précises quant à leurs caractéristiques géométriques et physiques pour des usages particuliers.
- **La remise en état du site :** a lieu après exploitation.

II.2.3. les adjuvants :

Il y a déjà longtemps qu'a été remarquée et étudiée l'action sur les bétons de ciment de certains produits employés en faibles quantités.

Depuis une dizaine d'années leur usage s'est généralisé et on peut admettre maintenant que plus de 50% des bétons sont adjuvantes.

Au fur et à mesure du développement de leur emploi, la formulation des adjuvants est devenue de plus en plus élaborée et fait appel depuis ces dernières années à des produits de synthèse.

II.2.3.1 : Définition :

Les adjuvants sont des produits chimiques qui, incorporés lors de leur malaxage ou avant leur mise en œuvre à des doses inférieure à 5% du poids de ciment, provoquent des modifications des propriétés.

Un adjuvant n'est pas un palliatif. Il n'a ni pour mission ni pour effet de faire un bon béton à partir d'un mauvais dosage ou d'une mise en œuvre défectueuse. Ce n'est pas un produit capable de se substituer aux règles de la bonne technique.

II.2.3.2 : Classification et utilisation :

La norme européenne EN 934-2(dont la publication est prévue en 1995) a retenu les classifications suivantes :

- **Plastifiants réducteurs d'eau ou fluidifiants :**

Ces produits jouent un double rôle. Ils sont utilisés soit pour fluidifier le béton en maintenant le rapport (E/C) constant, (rapport prévu pour une résistance donnée), donc fluidifier sans apport d'eau. Ou bien, réduire le rapport (E/C) pour avoir de meilleures résistances toute en ayant la même fluidité du béton.

Dans le premier cas, l'ajout du fluidifiant va nous permettre d'avoir des bétons de même classe de résistance mais de consistance variable allant d'un béton ferme, béton plastique, béton très plastique jusqu'au béton auto-plaçant.

La durée d'action des fluidifiants est très variable, elle dépend de la fabrication du béton, elle est courte pour les bétons fabriqués sur chantier et elle doit être longue pour les bétons fabriqués en centrales à béton. Pour ces derniers, le béton doit rester fluide toute au long de la durée du transport, jusqu'à la mise en place.

La quantité de fluidifiant à introduire dans une formule de béton ne doit pas être trop élevée (proche du dosage à saturation) sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage. Le dosage à saturation des fluidifiants est déterminé expérimentalement à partir d'essais sur des mortiers (ou bétons) frais. Dans certaines littératures, on les appelle plastifiant ou super-plastifiant.

- **Domaine d'utilisation :**

- Nécessité d'une bonne ouvrabilité du béton ;
- Béton à hautes résistances ;
- Béton très ferraillé ;
- Sable manquant de fines ;
- Béton coulé sous l'eau.

- **Les retardateurs de prise :**

Ceux sont des adjuvants qui prolongent la durée de vie du béton frais. Les réactions d'hydratation sont exothermiques ; elles sont accélérées par l'apport de chaleur. Ainsi le bétonnage en temps chaud ou bien d'éléments massique (où la température au cœur du béton peut atteindre 80°C) accélère la cinétique d'hydratation du ciment. En effet, l'accélération des réactions d'hydratation a des effets négatifs sur les résistances à long terme du béton. Dans le cas des ouvrages massifs, il y a apparition précoce de la fissuration.

Pour remédier à ces difficultés il est donc conseillé d'utiliser des retardateurs de prise. Ainsi, dans le cas du bétonnage en temps chaud ou bien d'éléments massifs, il est conseillé d'utiliser un retardateur de prise pour freiner les réactions d'hydratation et aussi réduire la chaleur au cœur du béton, de manière à ce que les propriétés de ce dernier soient préservées et le béton ne fissure pas.

Grâce aux retardateurs de prise il est possible d'effectuer des reprises de bétonnage après plusieurs heures d'interruption avec certaines précautions (protection contre la dessiccation).Il permettent aussi de transmettre sans problème tous les bétons sur de grandes distances quelle que soient les conditions (températures, risques d'embouteillage, etc.).

- **Domaine d'utilisation :**

- Bétonnage au temps chaud ;
- Transport du béton sur longue distance ;
- Coulage en continu ;
- Reprise de bétonnage ;
- Injection à grande profondeur ;
- Parois moulée dans le sol ;

- **Les accélérateurs de prise :**

Le bétonnage en temps froid ralenti les réactions d'hydratation du ciment, par conséquent, il entraîne du retard sur les durées du décoffrage. Les accélérateurs de prise sont très utilisés dans les bétons de préfabrication car ils permettent d'atteindre des résistances convenables au jeune âge, cela permet de réduire le temps d'étuvage et accélère donc le processus de fabrication. Les accélérateurs de prise permettent de réduire les délais de chantier, car ils permettent d'atteindre les résistances prévues pour 28 jours à des âges avancés. Mais il faut faire attention à la résistance à plus long terme, qui va en baisse par rapport à celle d'un béton sans accélérateurs de prise.

Ils sont généralement utilisés pour le bétonnage à temps froid pour accélérer la prise et le durcissement du béton à dosage normal. Il permet de gagner du temps pour la réalisation des ouvrages. Généralement, on utilise l'adjuvant minéral de chlorure de calcium.

- **Domaine d'utilisation :**

- Décoffrage rapide ;
- Bétonnage en temps froid ;
- Béton préfabriqué ;
- Travaux d'étanchement, cachetage, travaux à la mer (entre deux marées) ;
- Réparation rapide, pistes d'aérodromes, routes ;

- **Les entraîneurs d'air**

Les entraineurs d'air ont pour but d'augmenter la porosité du béton pour diminuer les effets de l'action des gels dégels sur le béton (ils évitent l'éclatement du béton) c'est-à-dire que ces adjuvants confèrent au béton durci la capacité de résister au effets gel et dégels successifs en favorisant la formation de microbulles d'air réparties de façon homogène qui serviront d'espace d'expansion dans le béton durci. Ces microbulles permettent d'améliorer la durabilité du béton soumis à l'action du gel et du dégel. Il améliore la résistance du béton sous l'action des incendies.

Un des modes d'action de ces microbulles peut être décrit comme suit : dans le cas du gel, l'eau contenue à l'intérieure du béton gèle et augmente de volume puis crée des surpressions à l'intérieur des pores du béton et par la suite une fissuration ; la présence des microbulles permet de freiner le développement des fissures et la dégradation du béton est arrêtée.

C'est le même mode d'action qui se développe lors des incendies, dans ce cas l'eau contenue dans les pores fermés se transforme en gaz, ce gaz avec l'augmentation de la température provoque des surpressions sur les parois des pores et donc de la fissuration.

Pour les bétons devant résister aux cycles de gel et de dégel, la teneur en air occlus doit être entre 3 et 6 %. Lors de l'utilisation d'entraîneurs d'air, la quantité d'espaces d'expansion n'est pas le seul critère important. La distance entre un point quelconque et une bulle d'air ne dépassera pas une certaine valeur, en général 200μm.

- **Domaine d'utilisation**

- Les routes, les barrages, ponts ;
- Travaux maritimes ;
- Ouvrages exposés au gel, à l'action des eaux agressives ;
- Bétons extrudés (ex : glissière de sécurité en béton, bordures)

- **Les hydrofuges :**

Ils sont utilisés pour assurer l'imperméabilité du béton et du fait l'infiltration de l'eau. Ils sont souvent utilisés dans les cas des barrages et des châteaux, de même, ils participent à la lutte contre la corrosion des armatures à travers du béton d'enrobage.

II.2.4. Eau de gâchage :

L'eau indispensable à la fabrication du béton. C'est d'elle que dépendent en grande partie la cohésion et la résistance de ce matériau de construction omniprésent. Associée au ciment, l'eau rempli deux fonction : d'une part elle sert à l'hydratation du ciment et d'autre part elle permet la fluidification de la pate.

La quantité du béton dépend du ciment et des granulats mais aussi de la qualité de l'eau ajoutée : les impuretés contenues dans l'eau peuvent influencer la prise du ciment ou la résistance du béton, elles peuvent même provoquer des taches à la surface du béton ou même favoriser la corrosion des armatures.

Dans la catégorie des eaux susceptibles de convenir à la confection de béton, on trouve :

- Les eaux potables ;
- Les eaux de recyclage ;
- Les eaux de pluie et des ruissellements.

A coté les catégories d'eau qui ne doivent pas être utilisées :

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

II.2.5. Les additions minérales :

Il existe deux catégories de fines minérales : les fines actives à caractère pouzzolanique ; ce sont des particules de faibles diamètres qui ajoutées en quantités de l'ordrée 10 % du poids de ciment, améliorent notablement les performances de résistances et de durabilité du béton grâce à leurs propriétés pouzzolaniques (cendres volantes, fumée de silice, laitier…) [NEV 00, KAR 02].

Les fines inertes comme les fillers calcaire, l'objectif dans leur utilisation est d'améliorer la compacité des bétons et donc sa résistance. Ils sont également utilisés pour améliorer la consistance des bétons notamment dans le cas des bétons autoplaçants qui nécessite une forte teneur en fines pour assurer au BAP un compromis entre une bonne fluidité apportée par les fluidifiant et une bonne viscosité que l'on essaye d'avoir par l'introduction des filler

II.3. Rôle des différents éléments constituants le béton :

- Ciment: c'est le constituant qui va réagir chimiquement avec l'eau, devenir résistant, et lier tous les ingrédients.
- L'eau: c'est elle qui va hydrater le ciment et rendre le mélange malléable.
- Les granulats: ils vont former une disposition plus ou moins ordonnée qui va conférer au béton sa résistance. C'est le ciment hydraté qui va « coller » les granulats.
- Le sable: il permet de remplir les trous qui subsistent entre les gros granulats.
- Les plastifiants: ils augmentent « l'ouvrabilité » du béton (facilité avec laquelle on peut travailler le béton).

II.4 : Propriétés essentielles des bétons :

- **Importance de la dimension maximale D :**

Un béton est un mélange de granulats (sable, graviers et éventuellement cailloux) liés entre eux par une pâte de ciment (ciment+eau).

Il ne faut pas prendre de vue qu'un béton tire des granulats une bonne part de résistance et plus particulièrement du gros granulat. D'où la nécessité d'employer des granulats de qualité, et de dimension maximale, celle-ci devant rester compatible avec une bonne facilité de mise en œuvre. Ce serait une hérésie de couler des bétons massifs avec du gavillon5/15mm par exemple ;par ailleurs, la pate de ciment intervenant comme une sorte de « colle » entre les différents grains du granulats, le dosage en ciment devra être d'autant plus élevé que les grains seront plus fins ; en effet, si l'on considère la surface spécifique d'un granulat(surface totale des grains par unité de volume) cette surface qui « consomme de la colle » (si l'on peut dire) décroit rapidement en fonction de la grosseur des grains.

- **L'ouvrabilité :**

L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton frais à remplir les coffrages (sans ségrégation) et à enrober convenablement les armatures. Elle doit donc être telle que, le béton soit maniable et qu'il conserve son homogénéité.

L'ouvrabilité est principalement influencée par :

- Le dosage du liant.
- La forme des granulats.
- La granularité, la granulométrie.
- Le dosage en eau.

Ce critère peut, en général, se définir à partir de la plasticité par l'affaissement au cône d'Abrams selon les valeurs indiquées dans le tableau ci-dessous

Classe de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Ferme F	0 à 4	± 1 cm
Plastique P	5 à 9	± 2 cm
Très plastique TP	10 à 15	± 3 cm
Fluide FL	≥16	± 3 cm

Tableau II.3: Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône

L'ouvrabilité est, pour le béton, une qualité fondamentale qui doit être très sérieusement prise en compte dans l'étude de composition du béton

- **Résistance :**

La résistance a été longtemps considérée comme la qualité essentielle, pour ne pas dire la seule, à rechercher pour un béton ; ouvrabilité et résistance sont étudier à de pair car elles sont étroitement dépendantes l'une de l'autre et d'autant plus qu'elles varient en sens inverse en fonction de certains facteurs essentiels de la composition du béton.

- **Rapport eau/ciment (E/C)**

La résistance croit en même temps que le dosage en ciment C et elle décroit en fonction du dosage en eau E et c'est pourquoi on a tendance à prendre en compte le rapport C/E comme facteur globale intervenant dans la résistance du béton. Il est également d'usage pour certains le facteur inverse E/C dans sa forme C/E, il permet d'exprimer la valeur de la résistance par une simple fonction linéaire et croissante comme par exemple celle qui correspond à la formule de Bolomey :

f_{c28} =GCE(C/E-0.5).

f_{c28} : résistance du béton en compression à 28jours

CE : classe vrais du ciment à 28 jours

C : dosage en ciment (en kN/m^3)

E : dosage en eau totale sur matériaux secs (1/m3)

G : coefficient granulaire (valeur moyenne G=0.5

Cette formule pourrait faire croire que l'on obtiendra des bétons de résistance analogue quel que soit le rapport C/E en déduisant le dosage en eau E à partir de la valeur choisie pour le dosage en ciment.

II.5: Classification et désignation des bétons :

La grande diversité des bétons a conduit à définir et préciser des critères de base pour leur classification et leur désignation.

Les critères fondamentaux adoptés sont au nombre de cinq :

- ✓ La résistance à la compression, exprimée en Mpa, qui est précédée de leur lettre B :

B16	B20	B25	B30	B35	B40	B50	B60

Ces valeurs normalisées en France sont notamment reprises dans les spécifications du fascicule 65A qui classent les bétons suivant les huit catégories ci-dessus de résistances caractéristiques :

- ✓ La consistance représentant l'aptitude à la mise en œuvre (ouvrabilité) et mesurée par un test de plasticité : l'essai d'affaissement au cône d'Abrams.
- ✓ La dimension des granulats utilisés O/D, D étant la dimension maximales exprimée en mm
- ✓ Le dosage minimal en kg de ciment par m^3 de béton.
- ✓ La désignation du ciment d'après les indications normalisées (par exemple CPA-CEM I /42.5)

II.6: Formulation du béton :

Le béton est un mélange dont la composition a une profonde influence sur ses caractéristiques ; mais si les caractéristiques attendues sont la plupart du temps bien définies, la mise au point d'un béton approprié peut s'avérer plus délicate. Les paramètres sont en effet nombreux:

- Les données du projet : caractéristiques mécaniques, dimensions de l'ouvrage, ferraillage…
- Les données du chantier : matériel de mise en œuvre, conditions climatiques…
- Les données liées aux propriétés du béton : maniabilité, compacité, durabilité, aspect,…

On mesure donc l'importance de l'étude de la formulation du béton, d'autant plus nécessaire que les caractéristiques requises sont élevée.

II.6.1 : Les méthodes de formulation :

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des composants du béton (granulat, eau, ciment) afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées (résistance, consistance).

On a recours, dans ce cas aux méthodes de proportions des différents composants ou on trouve soit :

- Les méthodes semi-empiriques (Faury, Bolomey, Valette).
- Les méthodes graphiques (Joisel, Dreux-Gorisse).

a. Méthode de Bolomey :

La méthode de Bolomey est une méthode très simple, elle consiste à tracer une courbe granulométrique de référence par une formule appropriée, puis on s'efforce de réaliser avec les granulats dont on dispose, une composition granulaire totale (ciment compris) dont la courbe soit aussi proche que possible de la courbe de référence théorique.

La formule de base est la suivante :

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

Avec P = pourcentage des grains passant à travers un passoir du diamètre d.

A = paramètre qui varie de 8 à 16, sa valeur est autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort.

D = diamètre des plus gros grains.

b. Méthode de Faury :

Cette méthode est venue en 1942 pour compléter la méthode de Bolomey. La méthode de Faury donne des bétons comportant moins de sable et plus de gravier. Ces bétons sont plus raides et conviendront à des travaux pour lesquels une très bonne maniabilité n'est pas indispensable. Les bétons Faury auront souvent une résistance supérieure aux bétons Bolomey correspondant.

- **Particularité de la méthode :**

1- Applicable à tous les granulats quelque soit la masse volumique.
2- Faury a étudié l'effet des vides, vides qui varient en fonction de $\sqrt[5]{D}$.
3- La courbe granulométrique idéale conduisant à la compacité maximale est, théoriquement, une droite, cependant, Faury a distingué les grains fins et moyen ($\leq$ D/2) des gros grains ($\geq$ D/2) donc la courbe optimale n'est plus un segment de droite, mais deux segments formant une ligne brisée. Il faut déterminer l'origine, l'extrémité et le point de brisure.

L'origine : point de l'axe des abscisses correspondant au tamis 0.0065mm. On représente sur l'axe des abscisses les dimensions des tamis et sur l'axe des ordonnées le pourcentage des tamisât cumulés en volume absolu.

Le point de brisure : abscisse D/2, ordonnée $y_{d/2}$ donnée par une formule tenant compte de la grosseur D du granulat.

$$\mathbf{Y_{D/2}=A+17\sqrt[5]{D}\ \frac{B}{\frac{R}{D}-0.75}}$$

A : constante traduisant la maniabilité du béton ;

B : constante traduisant l'importance du serrage du béton ;

D : Plus grande dimension de tamis ;

R : Rayon moyen des moules.

c. Méthode de Drew-Gorisse :

C'est une méthode pratique qui simplifie et rend la formulation du béton plus pragmatique.

Elle consiste à rechercher conjointement la résistance à la compression et l'ouvrabilité désirée à partir des données de base essentielles pour la formulation du béton telle que la dimension des granulats D. La méthode de formulation de Drew-Gorisse permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau E, ciment C, sable S, gravillon g, gravier G) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges.

Plusieurs étapes de calcul successif nécessaire à l'obtention de la formulation théorique de béton. Il faut déterminer au préalable le rapport C/E, C, E, le mélange optimal à minimum de vides, la compacité du béton et les masses des granulats.

Pour permettre une mise en œuvre correcte du béton, il est important que la taille des plus gros granulats D_{max} ne s'oppose pas au déplacement des grains entre les armatures métalliques du ferraillage. Il existe une borne supérieure D_{max} à respecter en fonction de la densité du ferraillage, des dimensions de la pièce à réaliser, et de la valeur de l'enrobage des armatures. D_{max} est le diamètre du plus gros granulat entrant dans la composition du béton. Sa valeur peut être lue sur la feuille d'analyse granulométrique des granulats correspondants.

- **Dosage en ciment :**

Selon Dreux-Gorisse, on utilise la formule $\sigma'_{28}=G\,\sigma'_{c}(C/E-0,5)$.

On en déduit une valeur approximative du rapport E/C ; puis par des abaques on détermine Cet E en fonction de C/E, de la résistance, et de la plasticité désirée.

σ'_{28} : Résistance moyenne à viser $\sigma'_{28}=\sigma'_{n}+15\%$.

σ'_{n} : Résistance nominale en compression à 28jours.

G : Coefficient granulaire : valeur tabulée en fonction de la qualité des granulats et de la dimension D des gros granulats ; les valeurs approximatives de G supposent que le serrage du béton sera effectué dans de bonnes conditions (par vibration en principe).

$\sigma'c$: Classe vraie du ciment à 28jours en bars.

C : Dosage en ciment en Kg/m^3.

E dosage en eau totale sur les matériaux secs en l/m^3.

- **Dosage en eau :**

La connaissance du rapport C/E et la valeur de C permet d'évaluer le dosage en eau E qui sera corrigé expérimentalement pour obtenir la plasticité désirée (Affaissement au cône d'Abrams).

- **Tracé de la courbe granulaire de référence :**

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

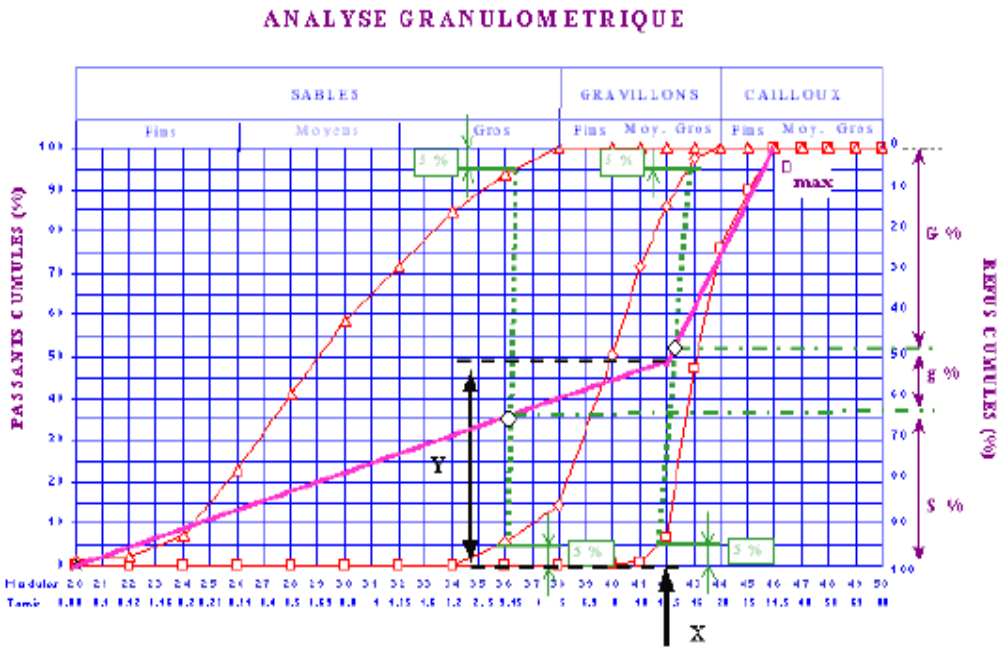


Figure II.10: Détermination des pourcentages en volume absolu du matériau.

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 ≤ 20 mm, l'abscisse est D/2.

Si D ≥ 20 mm, l'abscisse est située au milieu du segment délimité par D et par le tamis de maille 5 mm.

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

En ordonnée :

$Y = 50 - D + K$

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 Si le sable est roulé ;

K = 6 MF - 13 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.

II.6.2 : Composition du béton utilisé :

Dans notre étude, nous n'avons pas utilisé une de ces méthodes pour la formulation de notre béton, parce que notre but n'est pas d'avoir un bon béton mais l'essentiel avoir le même béton pour tous les essais.

Les compositions du béton utilisées dans notre mémoire sont celles des chantiers, qui sont soit représentées par 1/3 de sable et 2/3 de gravier ou 1/2 de sable et 1/2 de gravier.

Conclusion

Le béton peut varier en fonction de la nature des granulats, des adjuvants, des colorants, des traitements de surface, et peut s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ses performances et son aspect. La composition d'un béton et le dosage de ces constituants sont fortement influencés par l'emploi auquel est destiné le béton et par les moyens de mise en œuvre utilisés.

Dans ce chapitre, nous sommes revenus sur les généralités des bétons et ses constituants.

Nous avons discuté les différents types de granulats ainsi que, l'influence de leurs performances mécaniques sur la résistance mécanique du béton. Nous avons aussi expliqué la procédure de fabrication du ciment et l'effet d'utilisation des adjuvants dans les bétons. Par la suite, nous avons consacré une partie de ce chapitre aux méthodes de formulation d'un béton, nous avons donnés les grandes lignes des méthodes les plus utilisées en Algérie.

III.1 : Introduction :

Les propriétés mécaniques d'un béton dépendent de la technologie et des conditions de mises en œuvre. Les constats effectués sur des structures endommagées par des catastrophes naturelles ont révélé que la qualité du béton dans la structure ne reflète pas la résistance projetée par les laboratoires. La réduction du risque dû au non respect des propriétés du béton sur chantier nécessite la collaboration de tous les intervenants dans l'acte de bâtir.

Le développement de méthodes de caractérisation non destructives met à la disposition, des services de contrôle technique de la construction et des entreprises de réalisation, les outils nécessaires pour détecter les anomalies dans la qualité du béton mis en place.

Dans le domaine rural, l'utilisation d'un béton dans la construction des ouvrages nécessité un contrôle. La composition la plus utilisée, dans les chantiers, est celle d'1/2 de sable et ½ de gravier, mais théoriquement les quantités conseillées sont de 35% de sable et de 65% de gravier, cella nous a poussé à faire une étude comparative en s'appuient sur une recherche expérimentale en faisant deux compositions différentes :

- ✓ *Composition N°1 :* 1/3 de sable et 2/3 de gravier.
- ✓ *Composition N°2 :* 1/2 de sable et 1/2 de gravier.

Cella en mettant les deux compositions à différents états

- Immergées dans l'eau.
- A l'air libre.

On déterminera les résistances avec deux méthodes, premièrement essai destructif en utilisant la presse, deuxièmement essai non destructif en utilisant l'ultrason.

Pour atteindre notre objectif, on a confectionné 48 éprouvettes cylindriques de diamètre 16cm et de longueur 32cm. 24 de ces éprouvettes sont confectionnés avec la composition N°1 on a conservé 12 éprouvettes à l'air libre et 12 autres dans l'eau. On a aussi confectionné 24 autres éprouvettes avec la composition N° 2 de la même manière.

On a élaboré notre étude comparative en s'appuyant sur les deux compositions.

On a répartie notre travail en trois parties :

- ➢ **Partie I** : Comparaison des résistances des 24 éprouvettes mises à l'air libre, réalisé par l'ultrason et la presse, avec les deux compositions :
- ✓ *Composition N°1 :* 1/3 de sable et 2/3 de gravier.
- ✓ *Composition N°2 :* 1/2 de sable et 1/2 de gravier.
- ➢ **Partie II** : Comparaison des résistances des 24 autres éprouvettes immergées dans l'eau, réalisé par l'ultrason et la presse avec deux compositions :

- ✓ *Composition N°1 :* 1/3 de sable et 2/3 de gravier.
- ✓ *Composition N°2 :* 1/2 de sable et 1/2 de gravier.

- ➢ **Partie III** : Comparaison des résistances des 48 éprouvettes (à l'air libre et immergées dans l'eau) réalisé par l'ultrason et la presse avec deux compositions :
- ✓ *Composition N°1 :* 1/3 de sable et 2/3 de gravier ;
- ✓ *Composition N°2 :* 1/2 de sable et 1/2 de gravie

III.2 : Confection du béton :

III.2.1.Formule utilisée :

Il existe plusieurs méthodes pour confectionner un bon béton avec de bonnes caractéristiques. L'obtention d'un béton performant n'est pas le but de ce projet, mais de comparer entre deux compositions de béton couramment utilisées sur chantier. La première méthode utilisée est celle d'1/3 de sable et 2/3 de gravier la seconde est d'1/2 de sable et 1/2de gravier.

Pour notre étude, nous avons utilisé des matériaux naturels locaux, un ciment de type CPJ-CEM II/32.5, et des granulats naturels (sable 0/3, gravier 3/8 et 8/15).

Nous avons comme données pour calculer la proportion des constituants du dosage en ciment et le rapport eau/ciment :

- ✓ Le dosage en ciment de 350kg /m^3.
- ✓ Le rapport E/C qui veut 0.5.

Les proportions pour un mètre cube de béton pour la confection de nos éprouvettes de la composition N°1 : 1/3 de sable est 2/3 de gravier sont indiquées dans le tableau suivant :

Type de constituant	Quantité utilisée en kg
Eau	175
Ciment	350
Sable 0/3	716.67
Gravier 3/8	716.67
Gravier 8/15	716.67

Tableau III.1 : Quantités des constituants utilisés pour la composition N°1**.**

Les proportions pour un mètre cube de béton pour la confection de nos éprouvettes de la composition N°2 :1/2 de sable est 1/2 de gravier sont indiquées dans le tableau suivant :

Type de constituant	Quantité utilisée en kg
Eau	175
Ciment	350
Sable 0/3	1075
Gravier 3/8	537.5
Gravier 8/15	537.5

Tableau III.2 : Quantités des constituants utilisés pour la composition N°2**.**

III.2.2-Préparation de la gâchée :

- Pour la confection du béton, il y a lieu dans un premier temps de préparer le nécessaire en matériels et matériaux.
- Pour uniformiser les essais, nous avons décidé de travailler avec des granulats secs. Il a donc fallu laver tous les granulats puis les mètres en étuve pendant 24heures. Après séchage, faire en sorte que tous les granulats soient ramenés à leur température ambiante et les mettre dans un sac pour éviter qu'ils reprennent leur humidité.

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



Figure III.1 : moule 16cm de largeur et 32cm de hauteur.

- Préparer les pesées des matériaux à utilisés (gravillons, ciment, l'eau).
- Séparer l'eau en deux quantités (10% pour l'humidification des granulats et 90% prévue pour le béton).
- Vérifier que le malaxeur est bien nettoyé et en bonne état.



Figure III.2 : Malaxeur utilisé.

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

1- Humidifier tous les matériels à utilisé ;
2- Introduire le sable et les gravillons dans le malaxeur ;
3- Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec pendant quelque seconde ;
4- Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement l'eau de pré-humidification ;
5- Ajouter le ciment, verser l'eau restante graduellement et laisser se malaxer pendent quelques secondes ;
6- Remplir les moules d'éprouvettes et vibration du béton par la table vibrante pendant 40 s.



Figure III.3 : table vibrante.

III.2.3.Confection des éprouvettes :

Comme on fait plusieurs essais à différents âges (7, 14, 21 et 28 jours), pour chaque essai, on confectionne trois éprouvettes dans des moules cylindriques 16x32 conformément à la norme NF P18-406 pour la résistance mécanique à la compression. Le compactage se fera sur une table vibrante de façon à ce qu'il n'y ait plus de bulles d'air qui apparaisse sur la surface du béton. Ces éprouvettes sont démoulées 24h après leur coulage (voir la figure III.4).



(a) (b)

Figure III.4 : (a) Remplissage des moules, (b) éprouvette après démoulage.

Une fois démoulées, on mentionne sur la surface supérieure des éprouvettes la datte de leur confection et la composition utilisée (voir figure III.5**)**



Figure III.5 : Marquage des éprouvettes.

La moitie des éprouvettes sont laissées a l'air libre et l'autre moitié immergées dans l'eau à température ambiante pendant 24h (voir figure III.6) :



(a) (b)

Figure III.6 : (a) Eprouvettes à l'aire libre – (b) éprouvettes immergées dans l'eau.

III.2.4 : Présentation des essais :

Dans notre étude on a deux compositions différentes gardées dans deux conditions différentes (à l'air libre et immergées dans l'eau).

Les résistances trouvées en utilisant deux essais :

- Essai non destructif en utilisant l'ultrason ;
- Essai destructif en utilisant la presse hydraulique ;

III.3-Caractérisation des éprouvettes en utilisant l'ultrason :

III.3.1. : Essai par ultrason :

Afin de caractériser un béton, on utilise un ultrason qui est un appareil non destructif basé sur la mesure de la vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques à travers le béton.

III.3.1.1 : Préparation des éprouvettes :

Il est nécessaire d'effectuer certaines opérations préliminaires sur les éprouvettes pour les préparer à l'auscultation ; à savoir le calibrage de l'appareil et la préparation des points de mesure. Cette dernière opération consiste à marquer les points d'essais afin de centrer les transducteurs dessus (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 matière plastique pour assurer le couplage acoustique (pour notre cas nous avons utilisé de la graisse).

- **Description de la procédure :**

- Mettre les piles en place.
- Placer les câbles qui relient les transducteurs à l'afficheur.
- Etalonner l'appareil : après avoir enduit les deux faces du barreau de calibrage d'un peu de paraffine, on vérifie si le temps de propagation correspond à 55µs (temps indiquer sur le barreau), sinon on tourne la vis de calibration jusqu'à ce qu'il le soit.
- Mettre du gel de paraffine pour un meilleur contact entre les transducteurs et le béton.
- Placer les transducteurs au milieu des deux faces opposées de l'éprouvette.
- Lire le temps de passage sur l'écran.

Les mesures de vitesse de 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 320mm et la dimension transversale est de160mm.

Les vitesses de l'ultrason ont été déterminées par la mesure du temps de parcours sur une série de trois éprouvettes pour chaque âge considéré (voir figure III.7)



Figure III.7 : Essai ultrason.

- **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 du temps électronique, cela permet de mesurer le temps de propagation des ondes ultrasonores (T).

La vitesse de propagation des ultrasons est donnée par la formule suivante :

$$V=L/T$$

- **Calcul de la résistance :**

Afin d'établir une corrélation entre la vitesse de propagation et la résistance à la compression du béton utilisé, nous avons procédé aux mesures des vitesses pour les différents âges du béton.

On calculera la résistance en utilisant la méthode graphique, avec le graphe montré précédemment dans le chapitre I (voir figure I.7) sachant que les granulats utilisés sont plutôt de nature calcaire.

Les résultats trouvés avec la composition 1/3 de sable et 2/3 de gravier dans l'air sont résumés dans le tableau suivant :

N° de l'éprouvette	Age du béton (en jours)	Temps de propagation (en µs)	Vitesse en (m/s)	Résistance en (Mpa)	Résistance moyenne en (Mpa)
1	7	98.7	3242.15	11.5	11.66
2		98.1	3261.98	11.7	
3		98.6	3245.36	11.59	
4	14	83.9	3814.06	18.1	17.52
5		86.0	3720.90	17.27	
6		86.1	3716.60	17.20	
7	21	82.0	3902.44	20.18	19.92
8		82.4	3883.43	20	
9		82.7	3869.41	19.6	
10	28	81.2	3940.89	21.88	21.33
11		81.3	3936.04	21.71	
12		82.1	3897.69	20.41	

Tableau III.3: résistance du béton par ultrason de la composition 1/3 de sable et 2/3 de gravier à l'air libre.

Les résultats trouvés avec la composition 1/3 de sable et 2/3 de gravier dans l'eau sont résumés dans le tableau suivant :

N° de l'éprouvette	Age du béton (en jours)	Temps de propagation (en µs)	Vitesse en (m/s)	Résistance en (Mpa)	Résistance moyenne en (Mpa)
1	7	84	3809.52	18.10	18.45
2		86	3720.90	17.27	
3		82.4	3883.49	20.00	
4	14	82.7	3869.41	19.6	20.37
5		81.8	3911.98	21.12	
6		82.1	3897.69	20.41	
7	21	81.7	3916.77	21	21.04
8		81.1	3945.75	21.95	
9		82	3902.44	20.18	
10	28	80.1	3995.00	23.10	23.1
11		80	4000	23.20	
12		80.2	3990.02	23.00	

Tableau III.4 : Résistance du béton par ultrason de la composition1/3 de sable et 2/3 gravier dans l'eau.

Les résultats trouvés avec la composition 1/2 de sable e 1/2 de gravier à l'air libre sont résumés dans le tableau suivant :

N° de l'éprouvette	Age du béton (en jours)	Temps de propagation (en µs)	Vitesse en (m/s)	Résistance en (Mpa)	Résistance moyenne en (Mpa)
1	7	99.99	3200.1	10	10.33
2		98.28	3255.8	10.35	
3		97.48	3282.6	10.65	
4	14	88.3	3624.00	15.8	15.57
5		88.8	3603.60	15.0	
6		84.1	3632.23	15.93	
7	21	884.5	3786.98	18.1	17.99
8		85.1	3760.28	17.98	
9		85.2	3755.86	17.9	
10	28	84.8	37773.58	18.04	18.6
11		83.8	3818.61	19.0	
12		84.4	3791.46	18.76	

Tableau III.5 : Résistance du béton par ultrason de la composition 1/2 de sable e 1/2 de gravier à l'air libre.

Les résultats trouvés avec la composition 1/2 de sable et 1/2 de gravier dans l'eau sont résumés dans le tableau suivant :

N° de l'éprouvette	Age du béton (en jours)	Temps de propagation (en µs)	Vitesse en (m/s)	Résistance en (Mpa)	Résistance moyenne en (Mpa)
1	7	91.3	3504.93	13.2	13.06
2		91.4	3501.09	13.0	
3		92.0	3478.26	12.88	
4	14	83.8	3818.61	19.0	19.72
5		82.0	3902.43	20.18	
6		82.4	3883.4	20.0	
7	21	87.6	3897.69	20.41	20.13
8		88.0	3878.78	20.30	
9		88.1	3855.42	19.7	
10	28	81.8	3911.98	21.12	20.4
11		82.5	3878	20.09	
12		82.3	3888.21	19.98	

Figure III.6: Résistance du béton par ultrason de la composition 1/2 de sable 1/2 de gravier dans l'eau.

III.4-Caractérisation des éprouvettes en utilisant la presse hydraulique :

III.3.1. : Essai par écrasement :

La résistance en compression à différents âges est désignée par f_{cj}. Elle se mesure par compression axiale de cylindres droits de révolution et d'une hauteur double de leur diamètre. Le cylindre le plus couramment employé est le cylindre de 16x32. La résistance mécanique correspond à la charge de rupture (charge maximale enregistrée) au cours de l'essai sous une contrainte normale qui doit se faire d'une manière continue jusqu'à la rupture des éprouvettes.

Les détails d'exécution et toutes les précautions à prendre sont précisés dans la norme P 18-406(AFNOR), nous retiendrons en particulier les points suivants :

- ✓ Les extrémités des éprouvettes (face de chargement) doivent être surfacées en employant un mélange de soufre.
- ✓ L'éprouvette doit être bien centrée entre les plateaux de la presse.
- ✓ La mise en charge doit s'effectuer d'une manière continue à la vitesse moyenne de 0.5Mpa par seconde.



Figure III.8 : Eprouvette avant la rupture.



Figure III.9 : Rupture de l'éprouvette.

- **Expression des résultats** :

Rapporter la charge de rupture maximale enregistrée au cours de l'essai, ainsi que la contrainte de rupture.

Les résultats trouvés avec la composition 1/3 de sable et 2/3 de gravier à l'air libre sont résumés dans le tableau suivant :

N° de l'éprouvette	Age du béton (en jours)	Intensité de la charge (en KN)	Résistance (en Mpa)	Résistance moyenne (en Mpa)
1	7	139.1	7	7.5
2		148.8	7.36	
3		163.58	8.14	
4	14	389.86	19.14	19.2
5		399.91	19.90	
6		372.98	18.56	
7	21	421.61	20.98	21.13
8		422.22	21.01	
9		430.05	21.4	
10	28	454.17	22.6	22.32
11		447.34	22.26	
12		444.12	22.1	

Tableau III.7 : Résultats d'écrasement des éprouvettes de la composition1/3 de sable et 2/3 de gravier à l'air libre.

Les résultats trouvés avec la composition 1/3 de sable et de 2/3 de gravier dans l'eau sont résumés dans le tableau suivant :

N° de l'éprouvette	Age du béton (en jours)	Intensité de la charge (en KN)	Résistance (en Mpa)	Résistance moyenne (en Mpa)
1	7	379.81	18.90	18.99
2		383.83	19.1	
3		381.62	18.99	
4	14	427.24	21.26	21.14
5		421.61	20.98	
6		425.63	21.18	
7	21	441.11	21.95	22.7
8		460.2	22.9	
9		467.23	23.25	
10	28	475.47	23.66	23.62
11		481.3	23.95	
12		467.23	23.25	

Tableau III.8: Résultats d'écrasement des éprouvettes de la composition 1/3 de sable et 2/3 de gravier dans l'eau.

Les résultats trouvés avec la composition 1/2 de sable et 1/2 de gravier dans l'aire sont résumés dans le tableau suivant:

N° de l'éprouvette	Âge du béton (en jours)	Intensité de la charge (en KN)	Résistance (en Mpa)	Résistance moyenne (en Mpa)
1	7	82	5.10	5.4
2		80.1	5.40	
3		80.9	5.70	
4	14	340.1	16.91	16.30
5		335.7	16.70	
6		307.3	15.29	
7	21	367.76	18.30	18.89
8		371.58	18.49	
9		379.81	18.90	
10	28	408.95	20.35	20.27
11		400.11	19.91	
12		412.97	20.55	

Tableau III.9 : Résultats d'écrasement des éprouvettes de la composition1/2 de sable et 1/2 de gravier dans l'aire.

Les résultats trouvés avec la composition1/2 de sable et 1/2de gravier dans l'eau sont résumés dans le tableau suivant :

N° de l'éprouvette	Âge du béton (en jours)	Intensité de la charge (en KN)	Résistance (en Mpa)	Résistance moyenne (en Mpa)
1	7	272.8	13.57	13.26
2		260.7	12.97	
3		266.2	13.24	
4	14	413.5	20.57	19.93
5		432.1	21.49	
6		359.1	17.86	
7	21	404.73	20.14	20.21
8		420.61	20.93	
9		393.28	19.57	
10	28	435.08	21.65	21.52
11		440.10	21.90	
12		422.10	21.01	

Tableau III.10 : Résultats d'écrasement des éprouvettes de la composition 1/2 de sable et ½ de gravier dans l'eau.

Remarque :

Pour les résistances de la composition 1/3 de sable et 2/3 de gravier à l'air libre et 1/2 de sable et 1/2 de gravier à l'air libre à 7 jours on a utilisé un ciment qui a été exposé pendant longtemps à l'air libre. C'est pour cela qu'il a perdu ses propriétés. Conséquence, on a obtenu de très faibles résistances.

III.5-Partie Comparative :

Partie I : comparaison avec des éprouvettes à l'air libre.

Suite à l'objectif cité au début de ce chapitre, nous sommes arrivés à l'étape la plus importante qui est de faire une étude comparative entre les résistances obtenues avec la composition N°1, avec un rapport sable/granulat qui est égal à 0.33 et la composition N°2 avec un rapport sable/granulat qui est égal à 0.5 en déterminant les résistances par les deux méthodes.

1. **Comparaison des résultats obtenus par la composition 1/3 de sable et 2/3 de gravier avec ceux de la composition 1/2 de sable et 1/2 de gravier avec les deux essais :**

❖ Le tableau suivant montre la différence des deux résistances pour les deux rapports sable/granulat différents en utilisant l'essai destructif avec la presse et l'essai non destructif avec l'ultrason est ceci pour l'ensemble des âges du béton.

Pour mieux voir la différence entre ces deux compositions, nous avons calculé la variation entre ces deux résistances par la loi suivante :

$$\textbf{Variation} = \Delta R/R = (R - R_0)/ R$$

R, R_0 : Résistances du béton avec $R \geq R_0$

Age de béton (jours)	Rapport sable/granulat (S/S+G)	Résistance par Ultrason (Mpa)	Résistance par Presse (Mpa)	Variation des deux essais (%)
7	0.33	11.66	7.5	35.67
	0.5	5	5.4	7.41
	Variation des compositions(%)	57.12	2.8	
14	0.33	17.52	19.2	8.75
	0.5	15.57	16.30	4.48
	Variation des compositions(%)	11.13	15.10	
21	0.33	19.22	21.13	9.04
	0.5	17.99	18.89	4.76
	Variation des compositions(%)	6.4	10.60	
28	0.33	21.33	22.32	4.44
	0.5	18.6	20.27	13.17
	Variation des compositions(%)	12.79	9.18	

Tableau III.11 : Comparaison entre les résistances des deux compositions et avec deux essais différents.

- **Interprétation des résultats :**

❖ L'histogramme ci-après montre la différence entre les deux compositions en utilisant l'ultrason :

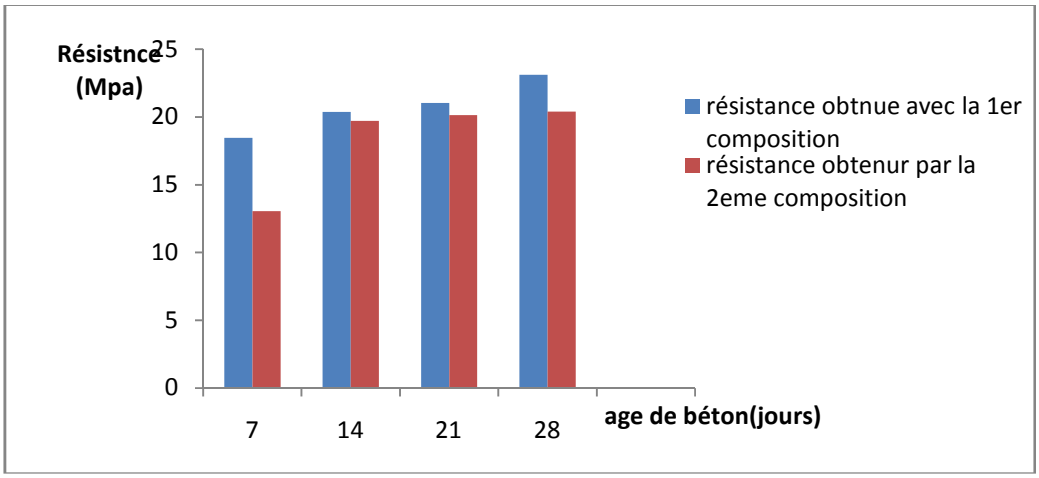


Figure III.10 : Comparaison entre les résistances des deux compositions obtenues par l'ultrason.

On constate que la résistance ultrasonique diminue quand le rapport S/(S+G) augmente elle varie de 11.66Mpa à 7 jours jusqu' à 21.33Mpa à 28jours pour S/(S+G)=0.33 et pour S/(S+G)=0.5 la résistance ultrasonique varie de 5Mpa (dû au ciment utilisé) à 7 jours jusqu'à 18.6Mpa à 28 jours.

On utilisant la composition 1/3 de sable et 2/3 de gravier on remarque un gain de résistance ultrasonique qui varie de 6.4% à 14jours jusqu'à 12.79% à 28 jours.

L'histogramme précédant montre que les résistances obtenues avec la composition 1/3 de sable et 2/3 de gravier en utilisant l'essai non destructif sont supérieures à celles obtenues avec la composition1/2 de sable et 1/2 de gravier pour tous les âges du béton.

❖ L'histogramme ci-après montre la différence entre les deux compositions en utilisant la presse :

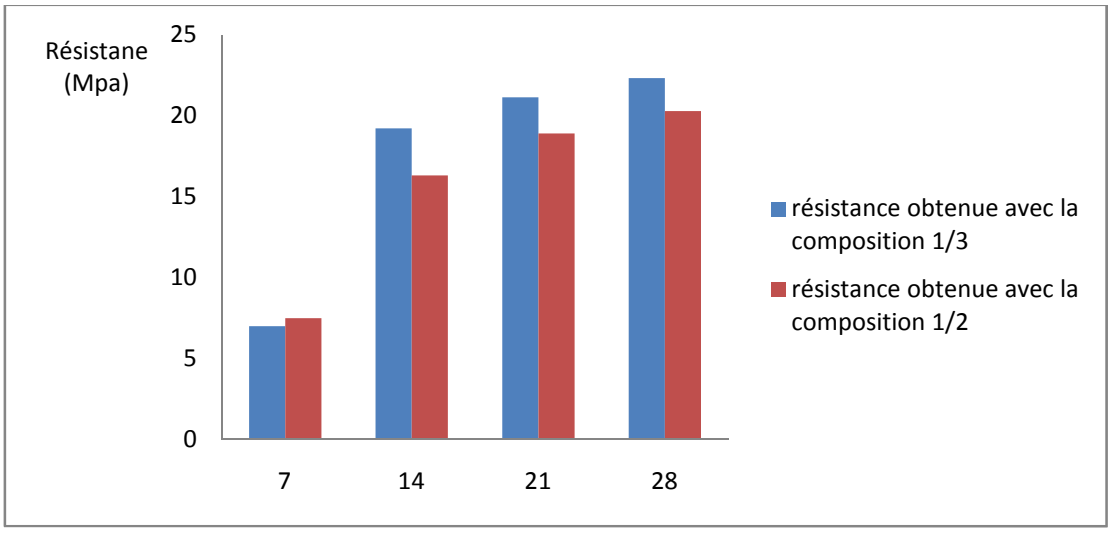


Figure III.11 : Comparaison entre les résistances des deux compositions obtenues par l'écrasement.

En utilisant la presse on remarque que la résistance donnée par la composition à rapport sable/granulat(S/S+G) égal à 0.5 qui varie de 5.4Mpa (dû au ciment utilisé) à 7 jours jusqu'à 20.27Mpa à 28 jours est inférieure à celle obtenue avec la composition qui à un rapport sable/granulat(S/S+G) égal à 0.33 qui varie 7.5 Mpa (dû au ciment utilisé) à 7 jours jusqu'à 22.32Mpa à 28jours.

La différence entre ces deux résistances varie de 9.18% à 28 jours jusqu'à 15.10% à 14jours.

L'histogramme précédant montre que les résistances obtenues avec la composition 1/3 de sable et 2/3 de gravier, en utilisant l'essai destructif, sont supérieures à celles obtenues avec la composition1/2 de sable et 1/2 de gravier pour tous les âges du béton sauf pour celle de 7eme jours et ça est dû a la mauvaise qualité du ciment qu' on a utilisé pour la composition N°1.

2. Comparaison des résultats obtenus par l'ultrason avec ceux de la presse :

Maintenant, on fera une comparaison entre les résistances obtenues avec l'essai destructif et l'essai non destructif en utilisant la même composition.

- L'histogramme ci-après montre la différence entre les résistances obtenues avec l'ultrason et les résistances obtenues avec la presse e en utilisant la composition 1/3 de sable et 2/3 de gravier:

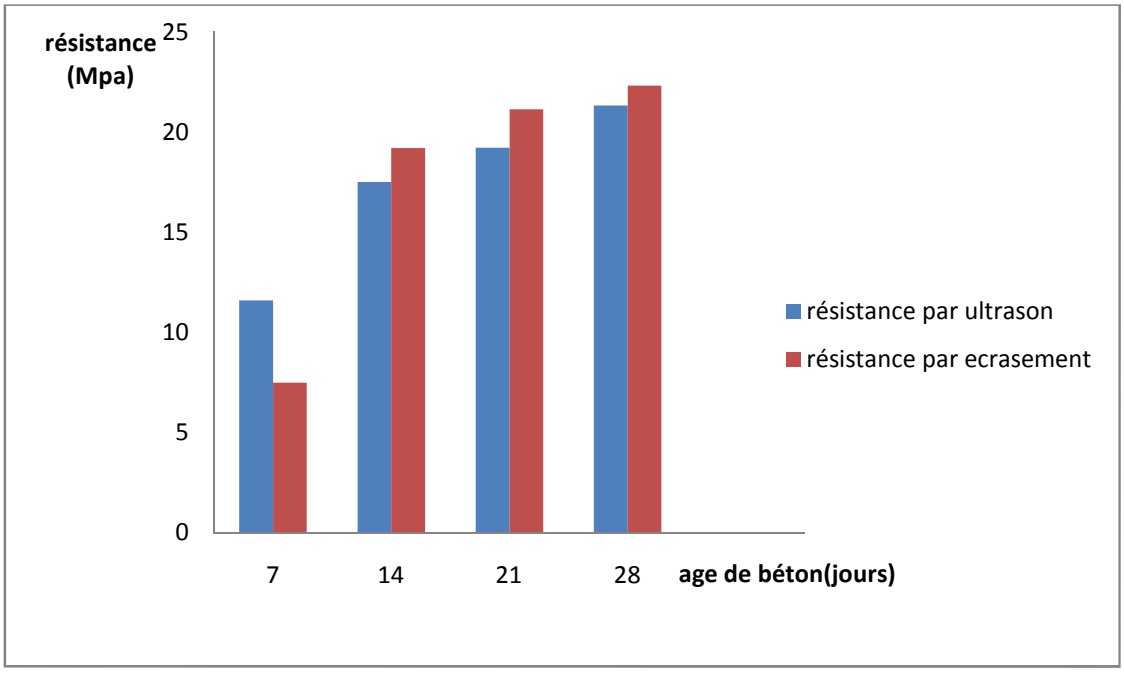


Figure III.12 : Comparaison des résistances du béton obtenues par l'ultrason et l'écrasement.

- L'histogramme ci-après montre la différence entre les résistances obtenues avec l'ultrason et les résistances obtenues avec la presse en utilisant la composition 1/2 de sable et 1/2 de gravier :

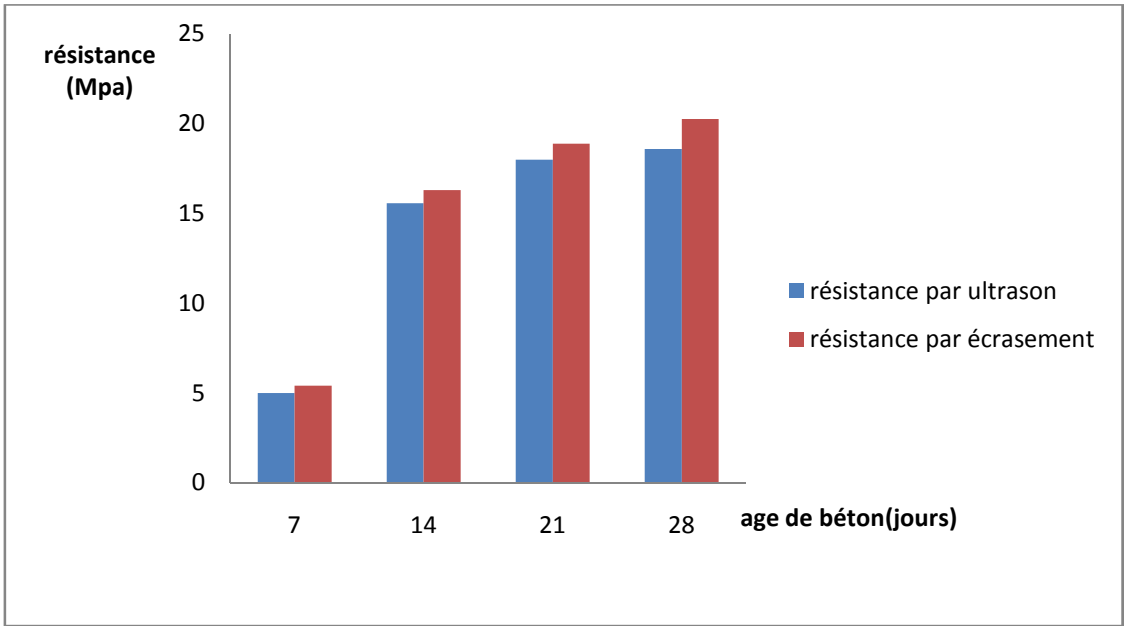


Figure III.13 : Comparaison des résistances du béton obtenues par l'ultrason et l'écrasement.

Nous remarquons que l'évolution de la résistance par ultrason suit la même tendance que celles trouvées par écrasement malgré ces légères différences entre elles.

On a remarqué que les résistances par ultrason sont plus importantes avant le 7^{e} jour ça est dû au ciment qu'on a utilisé. Au-delà, elles deviennent plus faibles que celles de l'écrasement tout au long de l'évolution de l'âge du béton.

On a vu que les résistances du béton obtenues par écrasement qui varient de 19.2Mpa à 14 jours jusqu'à 22.32Mpa à 28 jours sont supérieures à celles obtenues par ultrason qui varient 17.52Mpa à 14 jours jusqu'à 21.33Mpa à 28 jours pour la composition N°1. La différence entre ces deux essais varient entre 4.44% à 28 jours jusqu'à 9.04% à 14 jours.

On constate la même chose pour la composition N°2 les résistances obtenues par écrasement qui varient de 16.30Mpa à 14 jours jusqu'à 20.27Mpa à 28 jours sont supérieures à celles obtenues par ultrason qui varient 15.57Mpa à 14 jours jusqu'à 18.6Mpa à 28 jours. La différence entre ces deux essais varient entre 4.48% jusqu'à 13.17%.

Alors on pourra dire que les résultats des résistances du béton par ultrason sont plus proche des résultats réels.

Partie II : comparaison avec des éprouvettes immergées dans l'eau.

Dans cette partie en va faire la même étude comparative mais cette fois avec des éprouvettes immergées dans l'eau pendant 24h.

1. **Comparaison des résultats obtenus par la composition 1/3 de sable et 2/3 de gravier avec ceux de la composition 1/2 de sable et 1/2 de gravier avec les deux essais :**

Pour mieux voir la différence entre les deux compositions, nous avons calculé la variation entre ces deux résistances. Les résultats obtenus sont présentés dans tableau suivant :

Age de béton (jours)	Rapport (sable/granulat) (S/S+G)	Résistance par Ultrason (Mpa)	Résistance par Presse (Mpa)	Variation des deux essais (%)
7	0.33	18.45	18.99	2.84
	0.5	13.06	13.26	1.51
	Variation des compositions(%)	29.21	30.17	
14	0.33	20.37	21.14	3.64
	0.5	19.72	19.93	1.05
	Variation des compositions(%)	3.19	5.7	
21	0.33	21.04	22.7	7.3
	0.5	20.13	20.21	0.3
	Variation des compositions(%)	4.32	10.97	
28	0.33	23.1	23.62	2.20
	0.5	20.4	21.52	5.20
	Variation des compositions(%)	11.68	8.93	

Tableau III.12 : Comparaison entre les résistances des deux compositions et avec deux essais différents.

- **Interprétation des résultats :**

❖ L'histogramme ci-après montre la différence entre les deux compositions en utilisant l'ultrason :

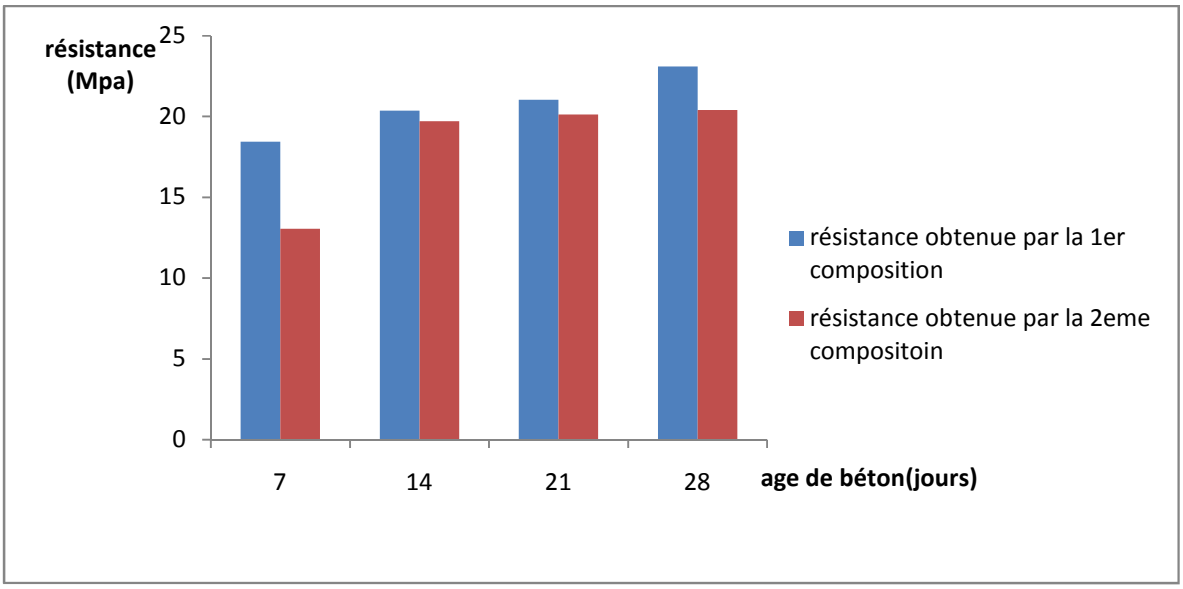


Figure III.14 : Comparaison entre les résistances des deux compositions obtenues par l'ultrason.

❖ L'histogramme ci-après montre la différence entre les deux compositions en utilisant la presse :

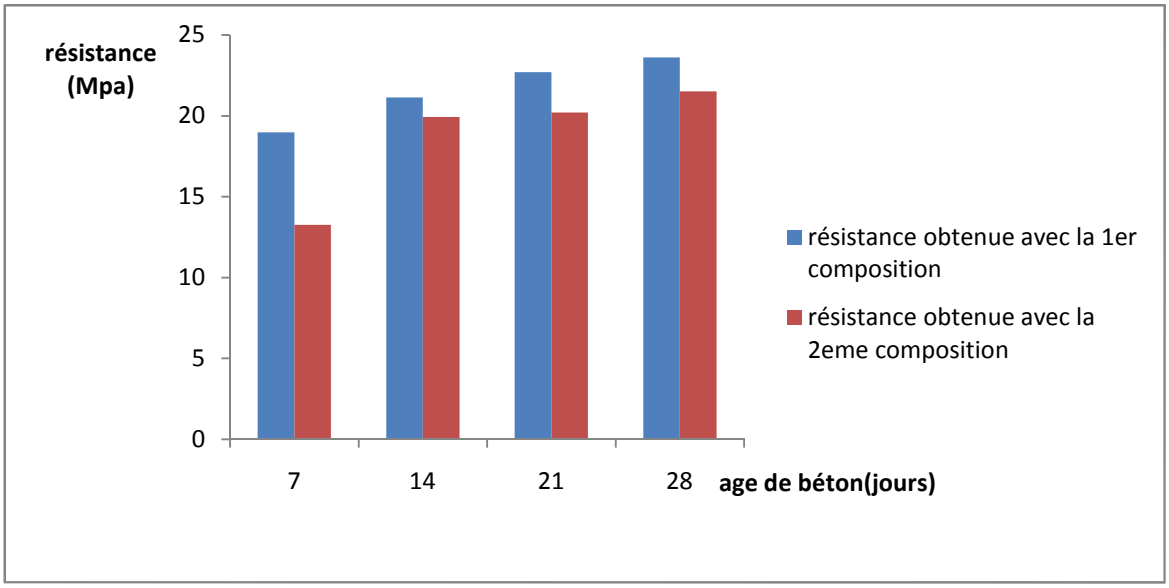


Figure III.15 : Comparaison entre les résistances des deux compositions obtenues par l'écrasement.

Le tableau 12 et les figures 14 et 15 montrent l'évolution de la résistance du béton, les deux méthodes utilisées pour les deux rapports sable/granulats, et ceci pour l'ensemble des âges. On note une certaine dispersion des résultats pour les bétons contenant moins de sable($S/(S+G) \leq 0.33$). Tandis que pour les bétons plus compacts il n'a que peu d'influence sur les deux résistances.

On remarque aussi que pour tous les âges des résistances déterminées par les deux méthodes, elles diminuent avec l'augmentation du rapport S/S+G (béton compact) .Ceci est dû à une meilleure homogénéité du matériau.

La différence entre ces compositions varie d'une valeur maximale de 29.21% à 7 jours pour les résistances déterminées par l'ultrason et de 30.17% à 7 jours pour les résistances déterminées par écrasement.

Toutefois les valeurs moyennes de variation entre ces deux compositions déterminées par ultrason sont de 3.19%,4.32%,11.68% respectivement à 14, 21, 28 jours et de 5.7%,8.93%, 10.97% respectivement à 14, 28, 21 jours pour les résistances déterminées par écrasement.

1. Comparaison des résultats obtenus par l'ultrason avec ceux de la presse :

- L'histogramme ci-après montre la différence entre les résistances obtenues avec l'ultrason et les résistances obtenues avec la presse en utilisant la composition 1/3 de sable et 2/3 de gravier :

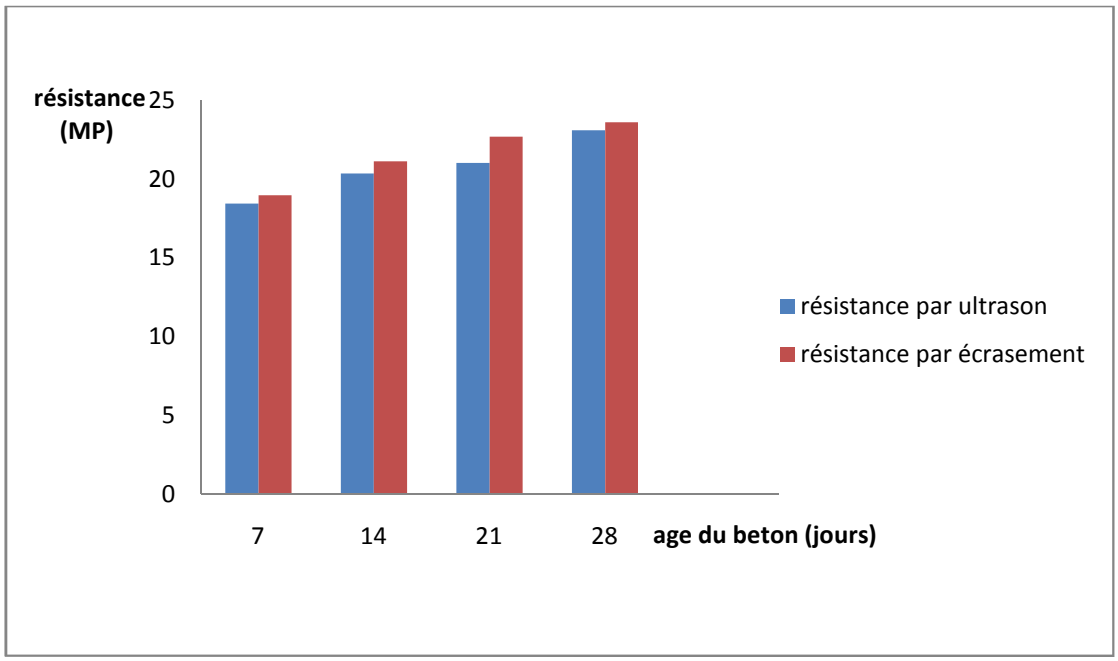


Figure III.16 : Comparaison des résistances du béton obtenues par l'ultrason et l'écrasement.

❖ L'histogramme ci-après montre la différence entre les résistances obtenues avec l'ultrason et les résistances obtenues avec la presse avec la composition 1/2 de sable et 1/2 de gravier :

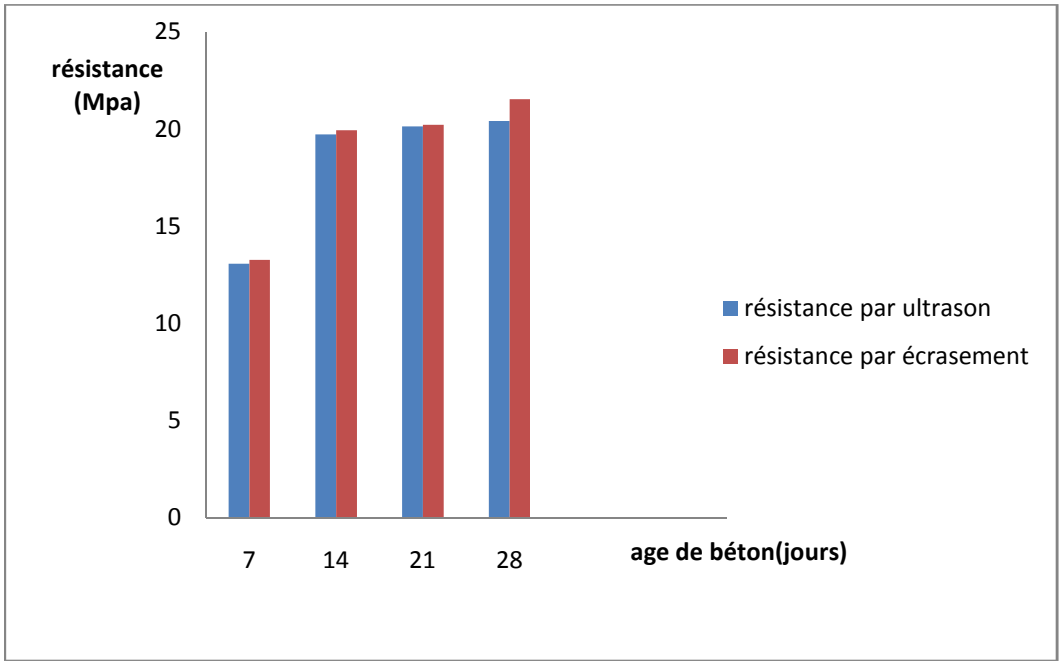


Figure III.17 : Comparaison des résistances du béton obtenues par l'ultrason et l'écrasement.

Les histogrammes précédant montrent la différence des résultats des essais destructifs et non destructifs aux différents âges. Pour l'ensemble des compositions, les résistances déterminées par écrasement sont supérieure à celle déterminées par ultrason avec une différence maximale de 7.31% à 21 jours pour la composition N°1 et de 5.20% à 28 jours pour la composition N°2.

Toutefois les valeurs moyennes de variation des résistances déterminées par les deux méthodes sont de 2.20%, 2.84%, 3.64% respectivement à 28, 7,14 jours pour la composition N°1, et de 0.3%,1.05%,1.50% respectivement à 21, 14,7jours pour la composition N°2.

- **Explication des résultats :**

D'après l'analyse des résultats, on peut dire que :

1. Le rapport des granulats est un des facteurs important qui influe sur la résistance d'un béton, car on constate que pour tous les âges du béton les résistances obtenues à l'air libre ou à l'eau, augmente avec la diminution du rapport S/(S+G) et cella en passant de valeur S/(S+G) égale 0.50 qui correspond à la composition N°2 à 0.33 qui correspond à la composition N°1 cella s'explique du fait que les quantités des constituants de la composition N°1 sont plus proches à celles calculés par la méthode DREUX-GORISSE. Elle contient, aussi plus de gravier (gros granulats) et présente une meilleure homogénéité par rapport à la composition N°2.

Donc on peut conclure que ce sont les gros granulats qui apportent la résistance au béton

1. La résistance à la compression du béton est le paramètre le plus fiable pour se renseigner sur la qualité de béton et cela est possible en effectuant soit un essai destructif qui est l'écrasement ou un essai non destructif par l'ultrason.

- La méthode d'essai par ultrason est la plus appropriée pour estimer l'homogénéité et l'intégrité d'une structure .On observe le mode de propagation des ondes ultrasonique à travers le matériau. Le but principal est de déterminé le temps de propagation des ondes entre les transducteurs émetteurs et récepteurs pour en déduire la vitesse.

On peut dire que l'importance qu'a la résistance d'écrasement par rapport à celles de l'ultrason revient à une très simple raison, est que la presse fait une caractérisation d'uniformité du chargement sur toutes la surface de l'éprouvette ce qui nous donne la résistance totale de l'éprouvette. Alors qu'avec l'ultrason la caractérisation se fait sur la surface limitée par les transducteurs, donc on peut conclure que l'utilisation de l'ultrason comme méthode de caractérisation non destructive n'est pas fiable à 100%. Elle est considérée comme une approche à la résistance réelle.

Partie III : comparaison avec des éprouvettes à l'air libre et des éprouvettes immergées dans l'eau.

Dans cette partie en va faire une étude comparative des résistances obtenues à l'air libre et celles obtenues dans l'eau. Ensuite on va comparer les variations entre les deux compositions obtenues à l'air libre et à l'eau.

1. Comparaison des résultats obtenus à l'air libre avec ceux obtenus dans l'eau en utilisant la même composition :

Dans le tableau suivant on va faire une comparaison avec la même composition des résistances obtenues à l'air libre et dans l'eau :

appareil	compositions	Ages de béton (jours)	Résistances à l'aire (Mpa)	Résistances à l'eau (Mpa)	Variation (%)
ultrason	Composition N°1	7	11.66	18.45	36.80
		14	17.52	20.37	13.99
		21	19.22	21.04	8.65
		28	21.33	23.1	7.66
presse	Composition N°2	7	7.5	18.99	60.50
		14	19.2	21.14	9.17
		21	21.13	22.7	6.91
		28	22.32	23.62	5.50

Tableau III.13: Résistance du béton obtenue à l'air libre et dans l'eau.

appareil	compositions	Ages de béton	Résistances à l'aire (Mpa)	Résistances à l'eau (Mpa)	Variation(%)
ultrason	Composition N°2	7	5	13.06	61.71
		14	15.57	19.72	21.04
		21	17.99	20.13	10.63
		28	18.6	20.4	8.82
presse	Composition N°2	7	5.4	13.26	59.27
		14	16.30	19.93	18.21
		21	18.89	20.21	6.53
		28	20.27	21.52	5.80

Tableau III.14 : Résistance obtenue à l'air libre et dans l'eau.

❖ **Interprétation des résultats :**

On remarque que les résistances obtenues des éprouvettes immergées sont supérieures à celles obtenues à l'air libre pour toutes les compositions et à l'ensemble des âges.

Pour la composition N°1 la différence entre les deux états diminue 13.99% à 14 jours jusqu'à 7.66% à 28 jours avec l'ultrason et de 9.17% à 14 jours jusqu'à 5.50% 28 jours avec la presse.

On constate la même chose pour la composition N°2 car elle diminue de 21.04% à 14 jours jusqu'à 8.82% à 28 jours pour l'ultrason, et de 18.21% à 14 jours jusqu'à 5.80% à 5.80% à 28 jours.

2. Comparaison des variations entre les deux compositions obtenues à l'air libre et celles immergées dans l'eau :

Le tableau suivant montre la différence entre les variations des compositions à l'air libre et immergées dans l'eau. Les variations sont déterminées dans la partie I (résistances obtenues à l'air libre) et la partie II (résistances obtenues dans l'eau) :

L'appareil	Age de béton (jours)	Variation entre les deux compositions à l'aire(%)	Variation entre les deux compositions à l'eau(%)	Variation(%)
L'ultrason	7	57.12	29.27	27.85
	14	11.13	3.19	7.94
	21	6.4	4.3	2.1
	28	12.79	11.68	1.11
presse	7	2.8	30.17	
	14	15.10	5.7	9.4
	21	10.60	10.97	0.33
	28	9.18	8.93	0.25

Tableau III.15 : variation entre deux compositions à l'air libre et dans l'eau.

❖ L'histogramme ci-après montre la différence entre les deux compositions à l'air libre et dans l'eau en utilisant l'ultrason :

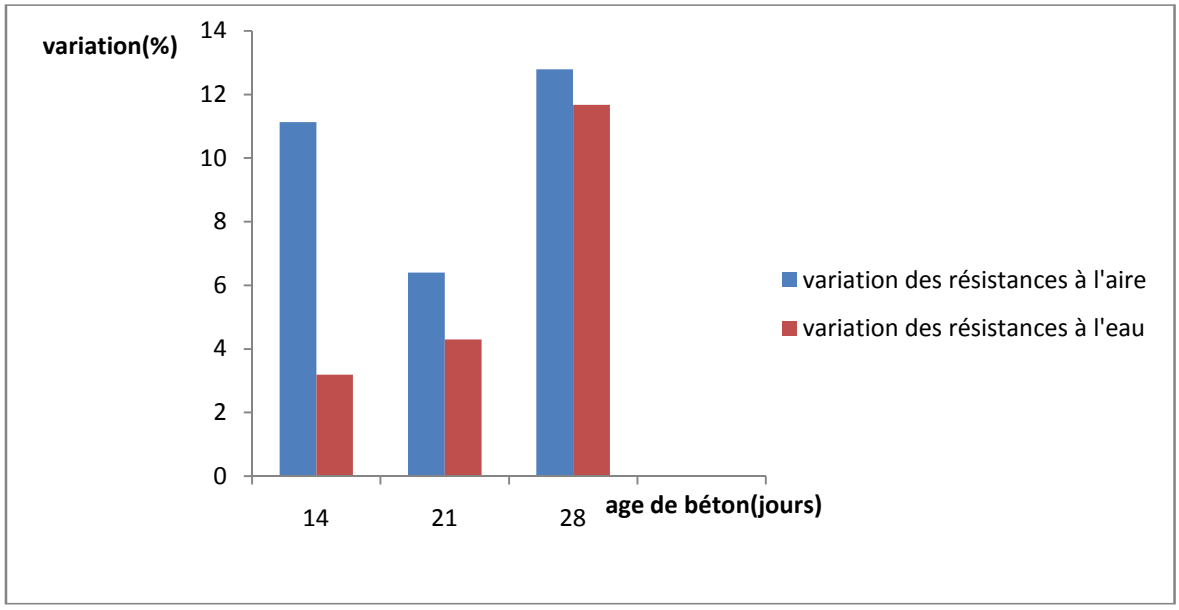


Figure III.18 ; Variation des résistances obtenues à l'air libre et dans l'eau avec l'ultrason.

❖ L'histogramme ci-après montre la différence entre les deux compositions à l'air libre et dans l'eau en utilisant la presse :

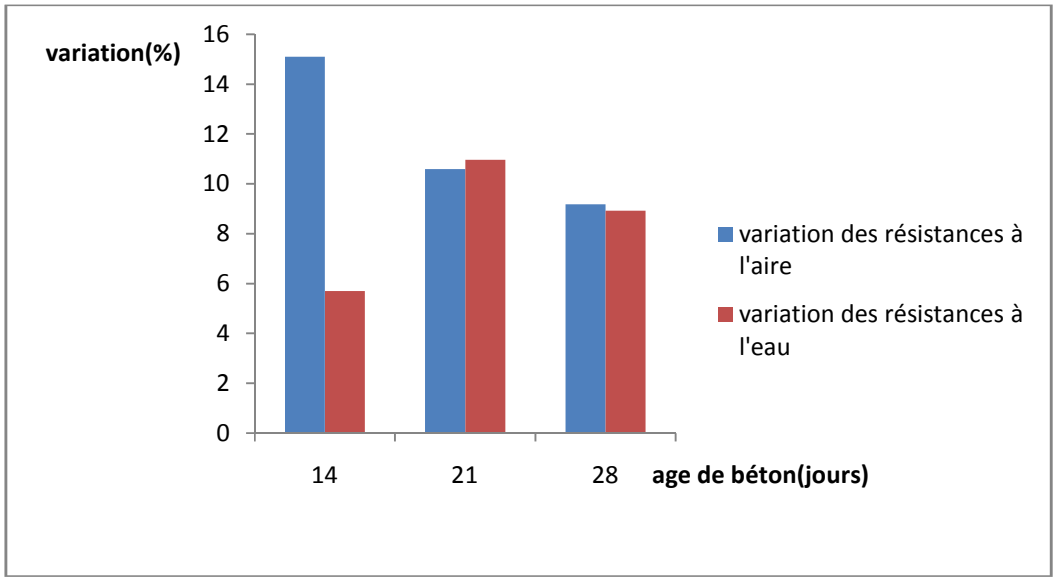


Figure III.19 ; Variation des résistances obtenues à l'aire et dans l'eau avec la presse.

D'après le tableau précédant et les histogrammes on constate qu'une différence plus important à l'air libre que dans l'eau de l'ordre de 7.94% à 14 jours jusqu'à 1.11% à 28 jour en utilisant l'ultrason. Avec la presse on constate des résultats un peu disperser cella est dû à des erreurs expérimentales, mais on peut remarquer la différence des variations est plus importante à l'air libre que dans l'eau de l'ordre de 9.4% à 14 jours de 0.25% à 28 jours.

Explication et commentaire des résultats

En immergeant les éprouvettes dans l'eau pendant 24h on observe un gain de résistance plus important au premier âge du béton. Ce gain diminue au cour du temps cela peut s'expliqué par le manque d'eau ; il y a moins d'hydratation comparé à celle mises à l'air libre. Dans les premières 24h, le béton et plus fragile et présente des forces de retrait plus importantes, ce qui provoque l'hydratation, ceci se traduit par des fissures à l'intérieure des éprouvettes.

Conclusion :

Dans ce chapitre, on s'est intéressé à l'influence de la composition des constituants sur la résistance du béton, on a constaté que les résistances obtenues par la composition 1/3 de sable et 2/3 de gravier sont meilleurs que celles trouvées par la composition 1/2 de sable et 1/2 de gravier.

Les valeurs obtenues par l'ultrason sont assez proches que celles obtenues par écrasement à la presse, donc on peut conclure que l'utilisation de l'ultrason comme méthode de caractérisation non destructive n'est pas fiable à 100%. Elle est considérée comme une approche à la résistance réelle.

Conclusion générale et perspectives :

La définition du caractère de l'homogénéité d'un béton n'est pas généralisable dans l'absolue car chacun le voit selon le (ou les) critère(s) qu'il vise. Par ailleurs, cette homogénéité va dépendre du rapport de la quantité du sable sur granulat(S/S+G), on peut ce pendant admettre que les échantillons ayant des constituants granulaires différents présenteront des caractéristiques mécaniques différentes, et sa ce confirme en observant et en analysant les résultats obtenus au laboratoire, donc on peut conclure :

- Le béton formulé par la composition 1/3 de sable et 2/3 de gravier présente des résistances relativement élevées (de l'ordre de 2 à 3 Mpa) par rapport à la composition 1/2 de sable et 1/2 de gravier, cette différence est plus importante à l'air libre qu'à l'eau, donc on peut jugé qu'il est impératif d'opter pour la composition 1/3 de sable et 2/3 de gravier sur les chantiers surtout pour les ouvrages où la résistance est indispensable .
- Il est à noter que malgré le manque que présente la composition 1/2 de sable et1/2 de gravier en terme de résistance cela l'empêche pas d'avoir un bon comportement à d'autres phénomènes (l'étanchéité, l'ouvrabilité...).
- En pratique, il existe plusieurs facteurs influençant sur la bonne manipulation en laboratoire ce qui rend la comparaison moins exacte.
- Il faut savoir que la bonne résistance est conditionnée par la bonne homogénéité des constituants.
- L'émersion des éprouvettes dans l'eau réduit d'avantage la fissuration, par conséquent, on aura une augmentation de résistance, ce procédé est analogue à l'arrosage des dalles après le coulage.
- Les risques (manque de résistance) que présente la composition1/2 de sable et1/2 de gravier sont plus importants à l'air qu'à l'eau.
- La différence qu'il y a entre les éprouvettes à l'air libre et celles émergées dans l'eau à tendance à diminuer au cours du temps, ce qui nous permet de dire que à long terme on peut avoir le même comportement.
- La méthode par ultrason permet de suivre l'évolution de la qualité du béton au cours du temps et elle donne une estimation des résultats réels.
- Opérer sur un nombre conséquent d'éprouvettes. En général, dans les laboratoires de recherche, on travaille sur un nombre supérieur ou égale à 3.
- Pour appliquer la méthode d'auscultation dynamique (ultrason) sur un béton dont la composition et la qualité des granulats sont différentes de celle utilisée pendant les essais, il est recommandé de faire un étalonnage au préalable.

Bibliographie

1- ABDELHALIM BENOUIS. ; NACERA KHALDI. et YACINE CHERAIT., Comparaison des résistances des bétons déterminées par écrasement et par scléromètre : influence du la composition, Laboratoire de génie civil et d'hydraulique, Université de Guelma, (août 2007).

2- ABDELHALIM BENOUIS. ; NACIRA KHALDI. et ZAHREDDINE NAFFA., Détermination de la résistance des bétons par les ultrasons (influence de la composition), Université de Guelma. Algérie.

3- ADAM M. NEVILLE., Propriétés des bétons, Eyrolles, Pari s, (Septembre 2000).

4- ALWARDANY R., Caractérisation non destructive des structures en béton au moyen des ondes dispersives de Rayleigh et de Lamb, thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Université de Cergy-Pontoise (Avril 2007).

5- BARON J. et OLIVIER J-P., La durabilité des bétons, presses de l'école nationale des ponts et chaussées, (1995).

6- B. CLEMENT (DLA)., Construire des ouvrages d'art en béton : Les contrôles à postériori, Association des directeurs des services techniques, Centre EST (janvier 2011).

7- BENJAMIN DURAND., Pérennisation des ouvrages en génie civil dans des problématiques liées à l'eau : diagnostic, réparation et confortement, thèse ingénieur, France (juin 2010).

8- BOUFEDAH BADISSI Ahmed., Influence de la granularité (classe granulaire 4/22.4) sur les caractéristiques des granulats et sur les propriétés du béton ordinaire, Thèse de Magistère, Université Mentouri Constantine (Janvier 2011).

9- DJAMILA AMZAL. et ABDENOUR MOSTFAOUI., Contrôle de la qualité du béton durci par les méthodes non destructives, thèse ingénieur, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, (1994). « MAT 39 ».

10- D.L. KANTRO., Influence des super plastifiants réducteurs d'eau sur les propriétés de la pâte de ciment – unslump test miniature, cement and concrete aggregate Vol 2, pp 95-102, (1980).

11- F.GABRYSIAK., matériaux, les bétons, chapitre 4.

12- GEORGES DREUX. et JEAN FESTA., Nouveau guide du béton et de ses constituants, Eyrolles, 8ème édition, Paris (mai 2002).

13- GHOMARI FOUAD., Matériaux de construction, Projet de fin d'études, Université ABOUBEKR BELKAID.

14- IDRES. Rabah., « Essai non destructif : application de l'auscultation dynamique pour la détermination des résistances du béton par vitesse du son ». Thèse d'ingéniorat à l'institut national d'enseignement supérieur de génie civil Tizi-Ouzou .Janvier 1987.

15- Jamel RHAZI. et Gérard BALLIVY., le contrôle non destructif des ouvrages de génie civil, Note technique, Institut des matériaux et systèmes intelligents, Département de génie civil, Université de SHEBROOKE (Canada), Juillet-Aout 2002.

16- MATHIEU CHEKROUN., Caractérisation mécanique des premiers centimètres du béton avec ondes de surface, thèse de doctorat, Ecole centrale de Nantes le (03 décembre 2008).

17- MERABET AREZKI. et MERABTI YAHIA., La résistance mécanique du béton et ses variations, thèse ingénieur, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, (1993) « MAT 37 »

18- NEKMOUCHE Ouarda., Caractérisation d'un béton gonflant en utilisant un scléromètre ; Thèse de Master, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou (2011-2012). « structure 10 ».

19- 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 ».

20- P. DONAS. ; R. HOLAK. et A. VAVEL., Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre, fiche technique tome 2, centre d'information sur le ciment et ses applications CIMBETON, Ecole française du béton, Paris (octobre 2006).

21- Philippe JACQUES., Béton hydraulique Contrôle de qualité du béton ; Techniques de l'Ingénieur, traité Construction C 2275, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

22- TOUKAL Abdenour., Influence de taux de sur la caractérisation non destructive du béton par ultrason, Thèse Magistère, Université M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES (2010).

23- SAADANI SABRINA., Comportement des bétons à base de granulats recyclés, thèse magister, Université Mentouri Constantine.

24- YVES CHARONNAT., Fabrication de béton hydraulique ; Techniques de l'Ingénieur, traité Construction C 2225, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.