



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

-----0-----  
UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI TIZI OUZOU

-----0-----  
FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION  
DEPATEMENT DE GENIE CIVIL



-----0-----  
**Mémoire**  
**En vue d'obtention du diplôme de Master Académique en Génie Civil**  
**Option Structure**  
-----0-----

**Thème :**

**Utilisation des ondes ultrasoniques pour la  
caractérisation d'un béton immergé dans  
l'eau**

**Proposé par**

**M<sup>r</sup> : MEHADDENE Rachid**

**Présenté par:**

**M<sup>elle</sup> : OUCHERIF Nouara**

**ANNEE UNIVERSITAIRE : 2011/2012**



## *Remerciements*

Tout d'abord je tiens à remercier mon encadreur M<sup>er</sup> MEHADDEN Rachid pour son encouragement, sa gentillesse et sa disponibilité  
Tout au long de mon mémoire

Surtout un grand merci à mes parents qui ont le droit de recevoir mes chaleureux remerciements pour le courage et le sacrifice qu'ils ont consentis pendant la durée de mes études en leurs souhaitant une longue vie pleine de joie et de santé.

Je saisis cette occasion pour exprimer mes vifs remerciements a toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail en particulier NEKOUCHE Amine

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

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

*Nouara*

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à :*

- *Mes très chers parents, en toute gratitude et reconnaissance  
Pour tous leurs sacrifices et leur soutien moral et financier*
- *Mes adorables frères Hocine et Lounis*
- *Mes chères sœurs Kaissa et Louiza qui m'ont soutenu et  
apporté du courage tout au long de mes études*
- *Mes amis : Aghiles, Timgad, Nacira, Hayet et toute personne  
ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail*
- *A tous ceux qui n'ont pas eu la chance d'emprunter le chemin  
de l'école*

*Nouara*

## Liste des tableaux

### Chapitre I

Tableau I.1 : Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques.....	12
--	----

### Chapitre II

Tableau II.1 : Différents types de ciments.....	33
Tableau II.2 : Classification des granulats.....	36

### Chapitre III

Tableau III.1: Quantités des constituants utilisés.....	47
Tableau III.2 : Résistances à la compression du béton obtenue à partir de la loi $\sigma = 16.7 \exp (E_d / 122500)$ .....	51
Tableau III.3 : Résistances à la compression du béton obtenue à partir du diagramme des résistances en fonction de la vitesse des ondes.....	52
Tableau III.4 : Résultats de l'essai par écrasement à la presse.....	56
Tableau III.5 . Estimation de l'erreur entre les résistances ultrasoniques et celles de compression.....	58
Tableau III.6 . Estimation de l'erreur entre les résistances ultrasoniques et sclérométriques..	59

## Liste des figures

### Chapitre I

Figure I. 1 : Image d'un scléromètre...	8
Figure I.2 : Utilisation du scléromètre .....	10
Figure I. 3 : L'abaque des résistances en fonction des vitesses des ondes..	13
Figure I. 4 : Appareil d'osculation dynamique...	13
Figure I.5 : Les types de propagation d'ondes...	14
Figure I. 6 : Ondes longitudinales.....	16
Figure I. 7 : Ondes transversales . . . . .	17
Figure I. 8 : Ondes de Rayleigh,.. . . . .	17
Figure I.9 : Ondes de Lamb.. . . . .	18
Figure I.10 : Ondes planes . . . . .	18
Figure I.11: Ondes sphériques . . . . .	19
Figure I.12 : Types d'ondes et modes de propagation .. . . .	19
Figure I.13 : Géométrie d'un faisceau d'onde ultrasonore.. . . .	23
Figure I.14 : Représentation du champ de Fraunhofer pour un élément piézo-électrique de diamètre $D_s$ ...	24
Figure I.15 : Exemple de la distribution de la vitesse ultrasonique à travers un béton hétérogène. . . . .	25
Figure I.16 : Mesure de la vitesse du son dans une zone de béton non fissurée.....	26
Figure I.17 : Mesure de la vitesse du son dans une zone fissurée.....	26

## Chapitre II

Figure II.1 : Granulat fin (sable) . . . . .	34
Figure II.2 : Gros granulat : arrondi (gauche) et concassé (droite),. . . . .	34
FigureII.3: Fuseaux préférentiels pour la granularité des sables pour béton selon la méthode de Dreux Gorisse . . . . .	40
Figure II.4 : Courbe de mélange optimum. . . . .	41

## Chapitre III

Figure III.1 : Marquage des éprouvettes.....	48
Figure III.2 : Eprouvettes dans l'eau.....	48
Figure III.3 : Equipement d'un ultrason.....	49
Figure III.4 : Disposition des sondes sur l'éprouvette d'essai.....	49
Figure III.5 : Utilisation d'un ultrason . . . . .	50
Figure III.6 : Résistances à la compression du béton à partir de la loi $\sigma = 16.7 \exp (Ed/122500)$ .....	52
Figure III.7 : Résistances à la compression du béton à partir du diagramme de résistance en fonction de la vitesse des ondes . . . . .	53
Figure III.8. Comparaison entre les résistances obtenues par ultrason en utilisant la méthode théorique et la méthode graphique... . . . .	54
Figure III.9. Une presse de compression, . . . . .	55
Figure III.10 : Eprouvette fissurée, . . . . .	55
Figure III.11 : Résistances par écrasement de l'éprouvette . . . . .	56
Figure III.12 : Comparaison entre les trois résistances trouvées . . . . .	57
Figure III.13 : Comparaison entre les résistances ultrasoniques et sclérométriques.....	59



## **Résumé**

L'auscultation par ultrason est une méthode non destructive destinée pour tester l'homogénéité du béton et sa résistance. elle consiste à mesurer la vitesse de propagation des impulsions ultrasoniques en se basant sur le temps de leur propagation dans le béton, qui s'effectue par deux méthodes :

- Graphique
- Théorique

Dans notre projet on a comparé la résistance à la compression par ces deux méthodes avec les valeurs trouvées par l'essai d'écrasement. Après expérience, on a trouvé que l'auscultation par ultrason donne des résultats qui ne sont pas aussi fiable que l'écrasement à la presse.

## **Abstract**

The auscultation by ultrasonic sound is a method without destruction destiny to test the homogeneity of the concrete and its resistance. It consists in measuring the speed of propagation of the ultrasonic impulses while being based on the time of their propagation in the concrete; we can proceed with two methods:

- Graphic
- Theoretical

In our project we have compared the resistance in compression by these methods with the values found by bruising test. After experience, we found that the auscultation by ultrasonic sound gives the results that are not as reliable as the bruising to the press.

## Table des matières

❖ Introduction générale.....	2
<b>Chapitre I :</b>	
<b>Essai non destructif</b>	
I.1.Introduction.....	6
I.2.Définition et principe des essais non destructifs.....	6
I.3.Domaine d'application des essais non destructifs.....	7
I.4.Les différents types des essais non destructifs.....	7
I.4.1.Essai au scléromètre.....	8
I.4.2.Essai à l'ultrason.....	10
I.4.2.1.Définition et généralités.....	10
I.4.2.2.Le principe d'utilisation des ultrasons.....	11
I.4.2.3.Description de l'appareil.....	13
I.4.2.4.Les différents types d'ondes ultrasonores.....	15
I.4.2.5.Phénomène de propagation.....	20
I.4.2.6. Paramètre de l'onde ultrasonique.....	21
I.4.2.7.Emmission et réception de l'onde ultrasonique.....	22
I.4.2.8.Domaine d'application d'un ultrason.....	24
I.4.2.9.Couplage acoustique entre les sondes et le béton ausculté.....	26
I.4.2.10.Facteurs ayant de l'influence sur la valeur de la vitesse du son.....	27
I.4.2.11.Avantages d'un ultrasons.....	28
I.5.Avantages et inconvénients des essais non destructifs.....	28
I.6.Conclusion.....	29
<b>Chapitre II :</b>	
<b>Présentation des bétons</b>	
II.1.Introduction.....	31
II.2.les Constituants des bétons.....	31
II.2.1.Les ciments.....	32

II.2.2. Les granulats...	33
I.2.3.Eau de gâchage .	37
I.2.4.Adjuvants...	37
I.2.4.1.Adjuvants accélérateurs de prise...	37
II.2.4.2.Adjuvants retardateurs de prise.....	37
II.2.4.3 Les entraîneurs d'air.....	37
II.2.4.4.Les fluidifiants ...	38
II.3.Lormulation du béton..	39
II.3.1.Les caractéristiques recherchées.....	39
II.3.2.Methodes de formulation des bétons.....	39
A. Méthode de DREUX-GORISS.....	40
B. Méthode de Bolomey.....	42
C. Méthode utilisée sur chantier.....	42
II.4.Classification des bétons.....	42
II.5.La résistance du béton.....	43
II.6.Rapport E/C.....	44
II.7.Principaux avantages et inconvénients des bétons.....	44
II.8.conclusion.....	45

### **Chapitre III :**

#### **Partie expérimentale**

III.1.Introduction.....	46
III.2.Confection des bétons..	46
III.2.1.Formule utilisée.....	46
III.2.2 :Préparation de la gâchée..	47
III.2.3 :Confection des éprouvettes ,	47
III.2.4.Conservation des éprouvettes...	48

III.3.Présentation des essais...	48
III.3.1.Essai par ultrason...	48
III.3.2.Essai par écrasement...	54
III.4.Comparaison des résultats trouvés par ultrason et écrasement...	57
III.5.Comparaison des résultats trouvés par ultrason et le scléromètre...	58
III.6.Conclusion...	60
❖ Conclusion générale...	62

## Introduction générale

Le béton est un matériau composite aggloméré constitué de granulats durs de diverses dimensions collés entre eux par un liant. Sous sa forme actuelle il est considéré comme le fruit de décennies d'études et d'expérimentations. A l'heure actuelle c'est le matériau de construction le plus utilisé. Même si le béton est défini très résistant, le plus grand souci de l'ingénieur est de réaliser une construction durable, économique du point de vue de la consommation d'énergie et respectueuse de son environnement depuis sa construction jusqu'à sa destruction. Le matériau de construction est déterminant car il recouvre la quasi-totalité de la construction et représente la barrière entre l'intérieur habitable et le milieu extérieur.

La construction d'un élément en béton armé se compose d'une succession d'étapes dont aucune ne doit être négligée. Après la conception de la forme et des détails et le dimensionnement de la section et des armatures, intervient le choix définitif des matériaux nécessaires (type de béton et d'aciers), les critères déterminant étant la résistance (état de ruine), la déformabilité (état de service), la durabilité (protection des armatures) et la mise en place (réseau d'armatures et ouvrabilité du béton). Suivant les spécifications, les composants du béton peuvent être choisis pour optimiser les performances selon l'un ou l'autre de ces critères. Le contrôle de la qualité lors du bétonnage et un traitement de cure approprié (protection du béton contre la dessiccation et les hautes ou basses températures pendant le durcissement) sont deux éléments primordiaux.

Enfin, une fois l'élément réalisé, l'ingénieur devra encore s'assurer à partir des essais sur le béton durci et de l'inspection sur place que les hypothèses du calcul statique (qualité des matériaux, détails constructifs) sont conformes à la réalité. Les essais de résistance mécanique et de déformabilité permettent de juger les performances du béton durci. On peut citer deux types de ces méthodes :

- A- La Méthode de destruction d'échantillon est la plus utilisée, surtout pour déterminer la résistance à la compression du béton, la traction, la flexion, le fluage.
- B- La méthode de non destruction d'échantillon est une des méthodes, qui permet l'obtention rapide de la résistance des matériaux des ouvrages (en béton) sans procéder à des prélèvements de béton durci par carottage.

Les essais destructifs nécessitent la confection des éprouvettes spéciales qui ne fournissent pas nécessairement des informations directes sur le béton de la structure réelle, alors c'est ce qui importe. Des éprouvettes muries en chantier et des carottes peuvent aider à obtenir ces informations. En revanche, l'utilisation des premières demande une planification alors que les dernières causent des dégradations, quoique locales, dans la structure.

Afin de contourner ces problèmes, une gamme d'essais in situ, appelés essais en place, a été développée. Ces essais sont traditionnellement appelés essais non destructifs, étant étendu que quelque désordres mineurs peuvent être apportés à la structure, sans toutefois modifier ni sa performance ni son apparence. Une importante caractéristique des essais non destructifs est qu'ils peuvent être refaits au même endroit, ce qui permet de suivre les changements des propriétés du béton dans le temps.

L'utilisation des essais non destructifs entraîne une plus grande sécurité et une meilleure planification de la construction, de sorte que l'on peut progresser plus rapidement et plus économiquement. De façon générale, ces essais sont classés suivant leurs utilisations pour évaluer la résistance du béton in situ ou pour déterminer d'autres caractéristiques du béton telles que la présence des vides, de défauts, de fissures et de détériorations.

On doit noter que la résistance peut seulement être évaluée, mais non mesurée, car les essais non destructifs sont pour la plus part des essais comparatifs. Il est donc utile d'établir une relation expérimentale entre la propriété mesurée par un essai donné avec la résistance d'éprouvette ou de carottes provenant du même béton. On peut ensuite utiliser cette relation pour convertir le résultat de l'essai non destructif en une valeur de résistance. Il est essentiel de bien comprendre la relation physique qui lit le résultat de l'essai non destructif et la résistance.

On utilise dans les essais non destructifs plusieurs moyens faciles à manipuler, rapides et à coût raisonnable:

- On utilise le « scléromètre ». En fait il s'agit de tester la dureté de surface d'un béton durci (d'ouvrage). Cette dureté est d'autant plus élevée que le béton est plus résistant, cela permet d'avoir un ordre de grandeur de la résistance atteinte par un béton à un âge donné.
- Essais de détection ayant pour but de s'assurer dans une certaine mesure de la régularité de la fabrication et de vérifier si les caractéristiques prescrites sont bien atteintes, mais en opérant dans les conditions moins rigoureuses que celles prescrites par l'ensemble des normes relatives aux essais de contrôle.
- L'auscultation dynamique ou l'ultrason: se fait par mesure de la vitesse du son, laquelle est d'autant plus élevée que le béton est plus dense donc plus résistant. On admet en général, que la connaissance de la vitesse du son permet de porter sur le béton une appréciation sur la résistance en compression

La caractérisation des bétons par propagation d'ondes ultrasonores est une voie usuelle pour évaluer la résistance potentielle d'un ouvrage. L'utilisation de techniques éprouvées telle que la transmission, le pulse écho ou les ondes de surfaces permettent de repérer des zones à faibles caractéristiques mécaniques, voire à détecter la présence de fissures. Toutefois il est important de noter que de nombreux paramètres expérimentaux et environnementaux peuvent influencer les mesures. Il convient d'être très prudent sur les valeurs absolues relevées. Les corrélations vitesse ultrasonore - résistance à la compression qui sont généralement utilisées ne peuvent s'appliquer qu'à des exemples donnés dans des circonstances spécifiques. . Notre étude portera sur cet essai afin d'aboutir à son utilisation, ses avantages et inconvénients

Le but de ce présent travail est de déterminer les résistances des éprouvettes confectionnées au niveau du laboratoire de béton du département de Génie civil en utilisant l'ultrason comme appareil non destructif puis comparer les résultats aux résistances trouvées par l'essai d'écrasement de ces mêmes éprouvettes à des différents âges. Notre projet est réparti comme suit :

- Une introduction générale qui présentera en général le béton et les essais qu'on lui applique ainsi le but du projet.
- Le premier chapitre est une partie comportant les généralités et les définitions des méthodes non destructives tout en démontrant leur objectif et leurs avantages.
- Comme ces essais seront effectués sur des éprouvettes en béton, le second chapitre portera sur la présentation des bétons, leurs constituants et leurs caractéristiques.
- Le troisième chapitre traduira la partie expérimentale où l'on présentera tous notre travail : confection des éprouvettes, les essais à différents âges et avec les différentes méthodes, on exposera les résultats et les commentaires.
- Enfin, on terminera par une conclusion générale.

## **I.1. Introduction**

Le béton est considéré comme le matériau le plus utilisé dans le domaine du génie civil pour sa grande résistance en compression, mais le problème rencontré c'est qu'avec le temps il vieillit, ses propriétés varient et sa résistance diminue, c'est pour cette raison qu'il faut confectionner le béton dans des conditions spécifiques pour pouvoir le contrôler à n'importe quel moment voulu.

La méthode normalisée utilisée pour évaluer la qualité du béton utilisé dans les bâtiments ou les ouvrages, comprend les essais de résistance à la compression, à la traction et à la flexion effectués sur des éprouvettes coulées au même moment. Le problème avec ces méthodes est que non seulement elles sont coûteuses mais aussi on trouve souvent des problèmes de prélèvement par rapport à l'accessibilité, la sensibilité et l'esthétique des ouvrages. Un autre problème rencontré est que les résultats ne sont pas obtenus immédiatement et que le béton des éprouvettes n'est pas toujours le même que celui de l'ouvrage.

La mesure directe de la résistance avec ces méthodes entraîne des contraintes destructives. Plusieurs méthodes non destructives d'évaluation sont mises au point. Ces mesures visent à contrôler de façon non destructive l'homogénéité d'un béton pouvant correspondre à des fissures et des vides, des zones altérées ou décomprimées, notamment à la suite d'agressions externes telles que le gel ou l'incendie à l'échelle d'un ouvrage ou d'un élément de structure et permet de déterminer la qualité des matériaux. L'utilisation de ces dernières s'avère donc indispensable lorsqu'il s'agit d'ouvrages existants et en fonctionnement et permet de suivre leurs évolutions au cours du temps. Elles sont faciles à manipuler in situ, généralement rapides, à grand rendement et à coût raisonnable.

Dans ce chapitre on définira le but, les avantages, les inconvénients et quelques différents types des essais non destructifs.

## **I.2. Définition et principe des essais non destructifs**

Le **Contrôle Non Destructif (C.N.D.)** est un ensemble de méthodes qui permet de caractériser l'état d'intégrité de structures, 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. 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 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 mesures suivantes :

- ◊ le radar géophysique et le pachomètre pour détecter les armatures d'une structure en béton armé, mesurer leur enrobage, reconstituer des plans de ferrailage d'éléments structurels (poutre, poteau, dalle...), mesurer des épaisseurs, détecter les vides...
- ◊ la mesure de Potentiel d'Électrodes pour évaluer la corrosion des armatures de structures 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'humidité par capacimètre électrique pour localiser des zones humides en surface de parements, sols, etc.

Certaines méthodes non destructives sont basées sur le fait que quelques propriétés physiques du béton peuvent être reliées à la résistance. Ces propriétés physiques comprennent la porosité, la dureté, la résistance à la pénétration des projectiles, la capacité de rebondissement et de transmission des impulsions ultrasoniques et des rayons X et gamma. La dureté superficielle déterminée par le rebondissement d'une masse peut être nettement reliée à la résistance. Cette étude s'intéresse à l'influence de la composition sur la relation entre les résistances déterminées par les essais sclérométriques et celles par les essais d'écrasement pour différents âges du béton.

### **I.3. 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 soient son âge et son état de dégradation, sans avoir à s'en rapporter uniquement aux résultats d'éprouvettes qui ne représentent pas forcément la structure exacte du béton d'ouvrage ou bien dans le cas des petites structures dont le carottage est quasiment impossible. En revanche, l'utilisation de ces méthodes se fait pour éviter la dégradation des structures causées par les méthodes destructives et afin obtenir des informations dans des domaines inaccessibles aux méthodes classiques, elles ont aussi 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.4. 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. Il existe plusieurs types dont les plus utilisés vont être cités dans ce qui suit :

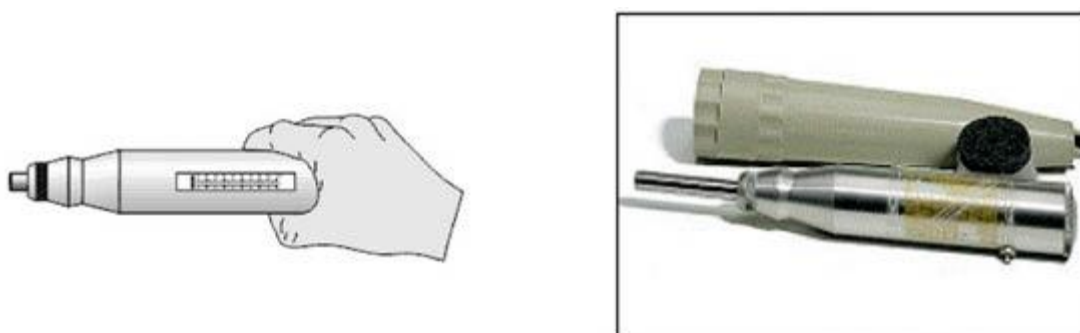
### **I.4.1. Essai au scléromètre**

#### **1. Définition et généralité:**

L'utilisation d'essais d'auscultation au scléromètre sur les matériaux de construction, en particulier sur le béton, date de plusieurs décennies. Il est considéré comme l'un des plus vieux essais non destructifs et il est encore très utilisé de nos jours. Il a été développé par ErnstSchmidht en 1948 et est connu sous le nom d'essai au marteau Schmidht ou essai au scléromètre. Le scléromètre est l'appareil le plus répandu 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. La mesure de la 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 des bétons d'un ouvrage.

Le principe de base de l'essai au scléromètre consiste à projeter un dispositif mobile (une masse) donnée contre un parement par l'intermédiaire d'un ressort. La détermination de la dureté est basée sur la mesure du recul que subit ce dispositif à la suite d'une collision entre le dispositif et la surface du béton.

La réaction résultant du choc donne l'indice sclérométrique qui est corrélé en fonction de l'inclinaison de la surface et la résistance probable du béton en fonction de la mesure du recul ne peut être déterminée qu'avec un abaque de transformation établi pour chaque type d'appareil. La méthode consiste à faire 13 mesures autour de la zone à caractériser. Les 2 mesures extrêmes sont écartées.



**FigureI.1. le scléromètre**

#### **2. Le but d'utilisation**

La mesure de la dureté au choc permet d'évaluer la résistance d'un béton de manière non destructive.

#### **3. Le principe d'utilisation**

Dans l'essai au scléromètre, une masse montée sur un ressort a une quantité fixe d'énergie qui lui est transmise par un ressort tendu à partir d'une position fixe, ce qu'on obtient en pressant la tête du marteau contre la surface du béton mis à l'essai. Lors de son relâchement, la masse rebondit depuis la tête, toujours en contact avec la surface du béton, et la distance qu'elle parcourt, exprimée en pourcentage de l'extension initiale du ressort, est appelé

l'indice de rebondissement. Cet indice est indiqué par un curseur qui se déplace le long d'une règle graduée. Quelques modèles de scléromètres impriment le relevé des résultats sur un rouleau de papier paraffiné. L'indice de rebondissement est une mesure arbitraire, car elle dépend de l'énergie emmagasinée dans le ressort et de la dimension de la masse. Le scléromètre doit être utilisé sur une surface lisse, préférablement une surface moulée. Un béton à texture ouverte ne peut donc pas être soumis à l'essai sclérométrique. Les surfaces lissées à la truelle doivent être poncées avec une pierre de carborundum. Si le béton soumis à l'essai ne fait pas partie intégrante d'un élément de grande dimension, il doit être supporté de façon rigide, car un déplacement en cours d'essai se traduit par un indice de rebondissement plus faible.

L'essai au scléromètre est sensible aux variations locales dans le béton. Par exemple la présence d'un gros granulats directement sous la tête du marteau donne un rebondissement anormalement élevé. A l'inverse d'un vide à la même position entraîne un résultat très faible. De plus, l'énergie absorbée par le béton est liée à la fois à la rigidité et à sa résistance, en sorte que c'est la combinaison de ces deux caractéristiques qui régit l'indice de rebondissement. Du fait que la rigidité du béton est influencée par le type de granulats utilisés, le résultat n'est pas uniquement lié à la résistance du béton. La tête du marteau doit toujours être positionnée de façon perpendiculaire à la surface du béton, mais la position du marteau par rapport à la verticale aura un effet sur l'indice de rebondissement en raison de la gravité qui agit sur le déplacement de la masse du marteau. L'indice de rebondissement d'un plancher est donc inférieur à celui d'un soffite (plafond plat) confectionné avec le même béton et des surfaces inclinées et verticales donnent des valeurs intermédiaires.

L'essai au scléromètre est comparatif ; il est utile pour évaluer l'homogénéité du béton dans une structure ou lors de la fabrication d'éléments semblables. L'essai peut être aussi utilisé pour vérifier si la valeur de l'indice de rebondissement atteint la valeur désirée correspondant à la résistance du béton, ce qui peut aider à décider du moment où l'on peut ôter les étais ou de celui auquel on peut mettre la structure en service.

Une autre utilisation de cet essai est de pouvoir vérifier si le développement de la résistance d'un béton donné a été affecté par le gel au jeune âge. Tout foie, selon la norme ASTM C 805-85, un béton encore gelé peut donner un indice de rebondissement très élevé

#### **4. Méthodologie**

Il existe trois étapes pour faire une mesure de dureté de surface au scléromètre :

- Vérification du bon fonctionnement de l'appareil (étalonnage)
- Établissement de la valeur de référence sur une zone saine de béton et dont la résistance est connue
- Exécution de l'essai selon le mode opératoire adopté



**Figure I.2. utilisation du scléromètre**

## **5. 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

## **6. 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 (11 mesures par point selon la norme)
- Utilisable seulement sur les surfaces lisses et sans trace ni écaillage ni porosité élevée
- Mesure superficielle

## **I.4.2 Essai à l'ultrason**

### **I.4.2.1. Définitions et généralités**

L'osculation par ultrason est une méthode non destructive destinée pour tester l'homogénéité du béton, consiste à mesurer la vitesse de propagation des impulsions ultrasoniques et permet d'effectuer des essais de résistance sur le béton coulé sur place. Cette méthode permet de mesurer le temps de propagation d'une impulsion ultrasonique traversant le béton. Les principales caractéristiques de tous les appareils disponibles sur le marché sont très semblables. Ces appareils comprennent un générateur d'impulsions et un récepteur d'impulsions. Les impulsions sont produites par des cristaux piézo-électriques à excitation par choc. Des cristaux semblables sont utilisés dans le récepteur. Le temps de propagation de l'impulsion dans le béton est mesuré par des circuits de mesure électroniques.

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 d'huile 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.

-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.

-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 parcours 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.4.2.2. Principe d'utilisation des ultrasons :**

Connu depuis longtemps, cet essai non destructif permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) la quelle est d'autant plus élevée que le béton est plus dense donc plus résistant. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance connue. L'appareil comprend des capteurs mis en contact avec le béton, un générateur d'ondes dont la fréquence est comprise entre 10 et 150 Hz, un amplificateur, un circuit de mesure du temps et un affichage digitale du temps mis par les ondes longitudinales pour traverser le béton entre les transducteurs. La vitesse d'onde,  $V$ , dans un milieu homogène, isotrope et élastique, est reliée au module d'élasticité dynamique,  $E_d$ , par l'expression suivante [11]:

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

- $V$  : vitesse du son
- $\rho$  : est la masse volumique
- $E_d$  : module d'élasticité dynamique
- $\mu$  est le coefficient de poisson qui n'est généralement pas connu par exactitude, cependant il est souvent compris entre 0.15 et 0.28 selon le manuel appartenant à l'ultrason utilisé ; dans le cas où on ne l'a pas, pour déterminer le coefficient de poisson dynamique, il est nécessaire de connaître au moins deux vitesses de propagation de types différents : ondes longitudinales et ondes transversales[1] :

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

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 [11] :

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

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

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

**Tableau I.1 : Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation des ondes ultrasonique**

**Nota** : ces valeurs sont cependant à nuancer en fonction de chaque chantier (état de surface, bullage, etc.)

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  $f_c$ . 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'autres paramètres interviennent (densité, module d'élasticité) ; pour un béton de granulat léger par exemple, de résistance  $f_c=27\text{MPa}$ , la vitesse du son n'est que de 3800m/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 et le module d'élasticité

instantané 18000MPa (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. L'abaque est comme montré sur la figure suivante :

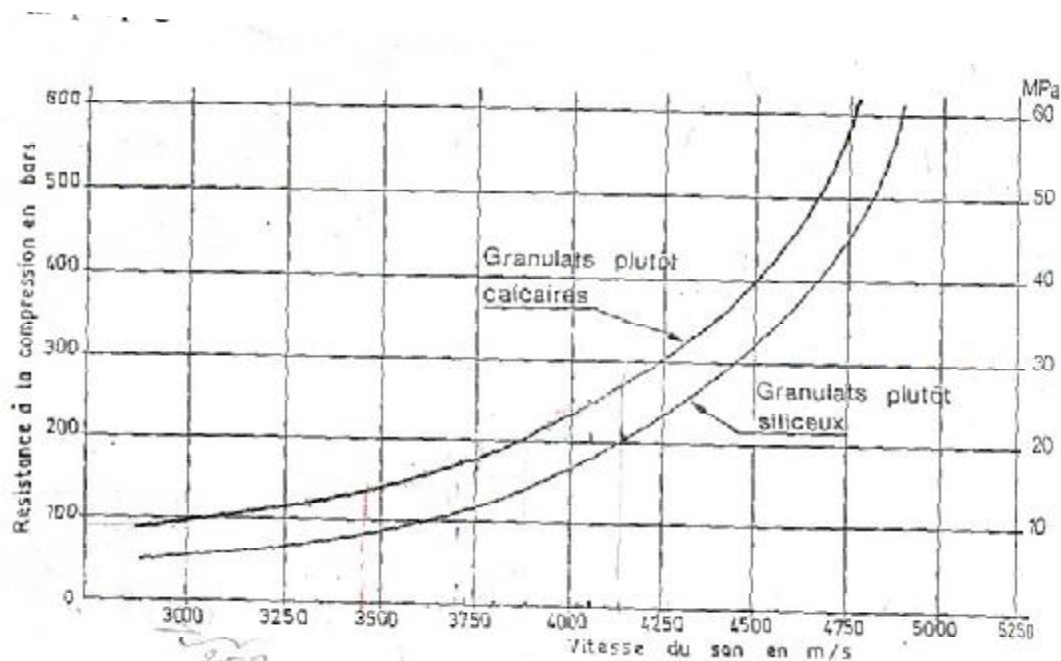


Figure I.3 .Abaque des résistances en fonction des vitesses des ondes

#### I.4.2.3. Description de l'appareil « ultrason » :

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



Figure I. 4. Appareil d'auscultation sonique

### Ø Les articles composants l'appareil:

- un testeur ultrasonique
- une tête de transmission et une tête de réception
- deux câbles de connexion
- deux piles alcalines 1.5 V type « D »

### Ø 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 route à l'aide de l'interrupteur.

L'appareil est maintenant prêt à l'essai, étant étalonné à la livraison. 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 directe ou indirecte de surface.
- Etendre une fine couche de produit couplant sur chaque transducteur.
- Placer et appuyer les transducteurs sur la surface. L'opérateur déplacera légèrement les sondes en maintenant la pression pour obtenir la valeur stable la plus faible, qui sera considérée comme valeur à retenir.
- Relever les valeurs affichées et répéter l'essai en d'autres places.

### Ø 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).

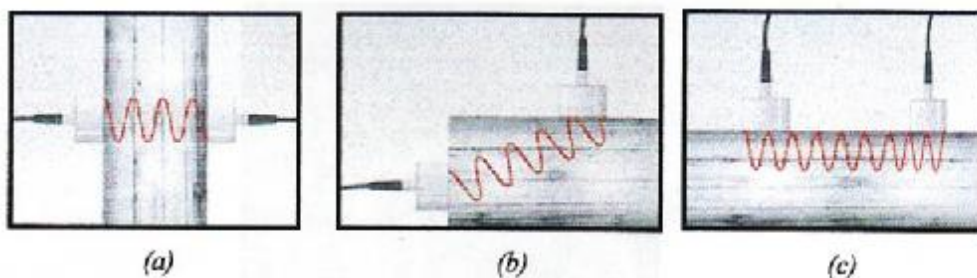


Figure I.5. Types de propagation d'ondes

**a-Transmission directe**

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

**b-Transmission semi-directe**

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

**c-Transmission indirecte**

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

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

**I.4.2.4. 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 :

**I.4.2.4.1. Les ondes longitudinales et transversales :**

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

$$l = V/f$$

avec  $f$  fréquence de la vibration.

- Les ondes longitudinales sont caractérisées par le fait que la direction de la vibration (direction du déplacement des particules ou encore polarisation de l'onde) est la même que celle de la propagation. On démontre en théorie des milieux élastiques que la vitesse de propagation de ces ondes  $V_L$  est liée aux caractéristiques élastiques du matériau, par exemple module de Young et coefficient de Poisson, par la relation [11] :

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

Avec :

$E$  (Pa) module de Young,

$\sigma$  (sans dimension) coefficient de Poisson,

$\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) masse volumique.

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

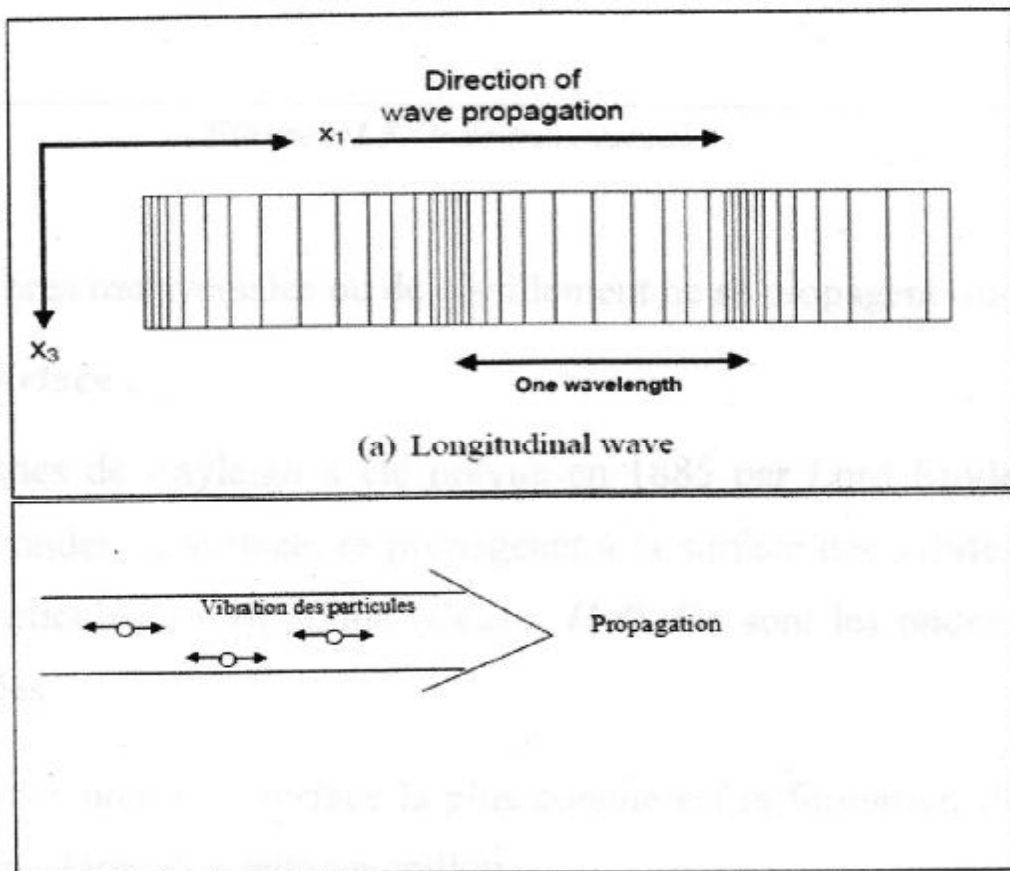
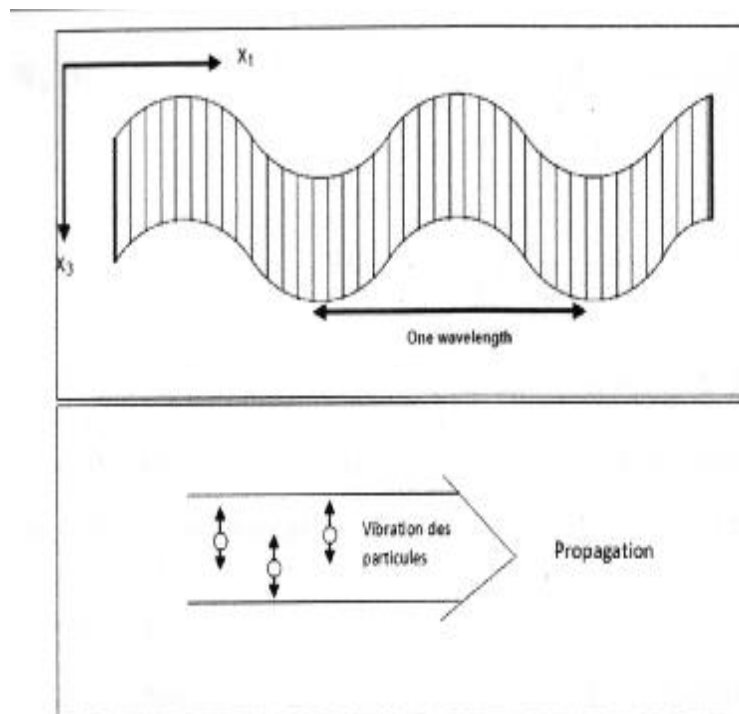


Figure I6. Ondes longitudinales

- 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 [11]:

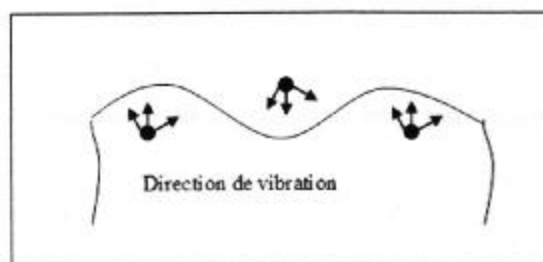
$$V_T = \left( \frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)} \right)^{1/2}$$



**Figure I.7. Ondes transversales**

#### **I.4.2.4.2. Les ondes de surfaces :**

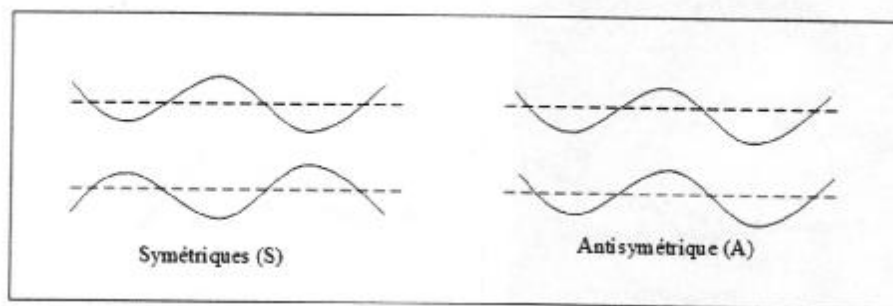
Les ondes de surfaces s'appellent aussi ondes de Rayleigh, l'existence de ces ondes a été prévue en 1885 par Lord Rayleigh. Ceux sont des ondes ultrasonores qui se propagent à la surface des matériaux. Dans le cas des matériaux épais devant la longueur d'onde, les ondes de surface, sont le résultat de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



**Figure 8. Ondes de Rayleigh**

### I.4.2.4.3. Les ondes de Lamb :

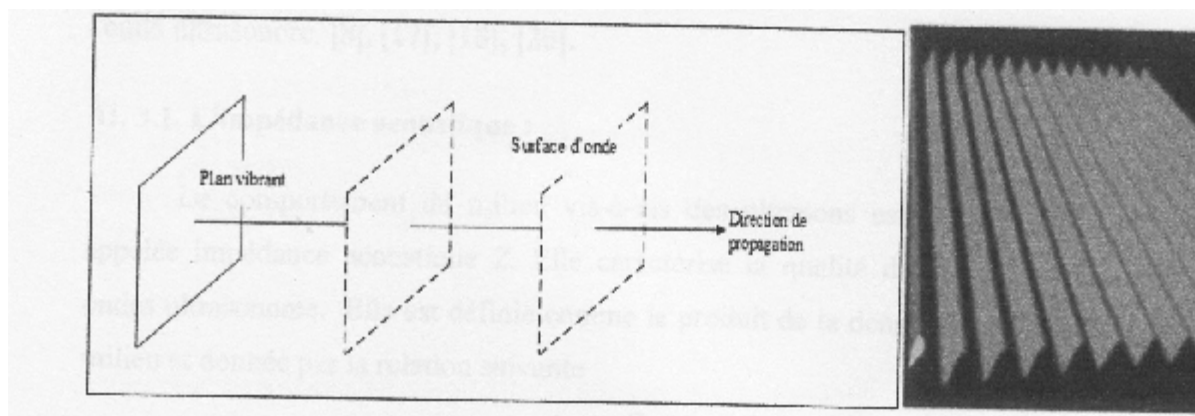
Les ondes de Lamb ou ondes de plaques correspondent à des ondes de surface qui se propagent dans des matériaux dont l'épaisseur est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde. Dans ce cas, l'onde vibratoire intéresse toute l'épaisseur de la plaque. On distingue deux grandes familles d'ondes de 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.9. Ondes de Lamb**

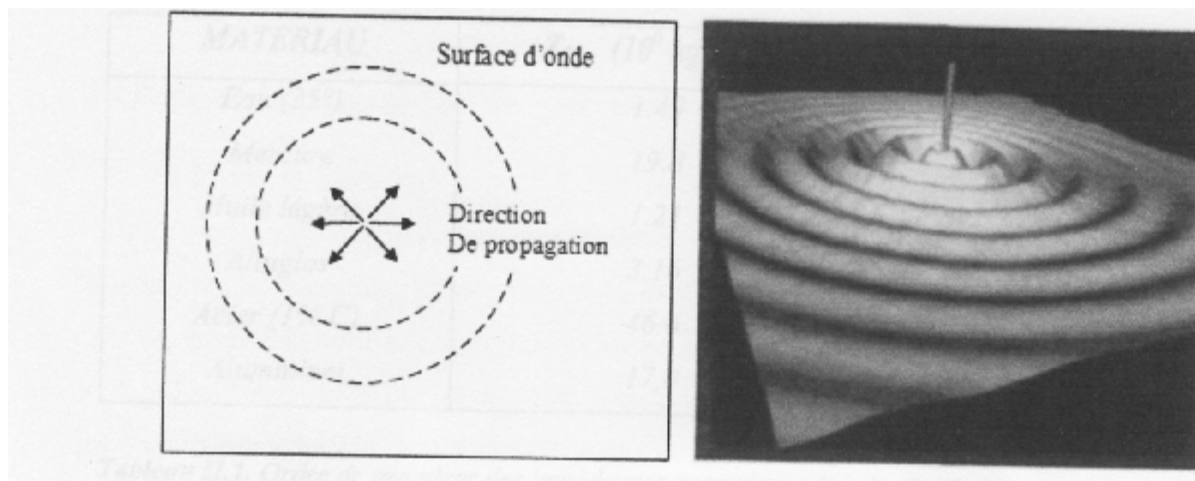
### I.4.2.4.4. Les ondes planes et ondes sphériques:

- on parle d'onde plane lorsque l'onde se propage suivant une direction unique et que les surfaces d'onde sont des plans parallèles entre eux. Une onde plane est générée par une surface plane vibrante de dimension importante. L'amplitude d'une onde plane est constante quelle que soit la distance entre le point considéré et la source.

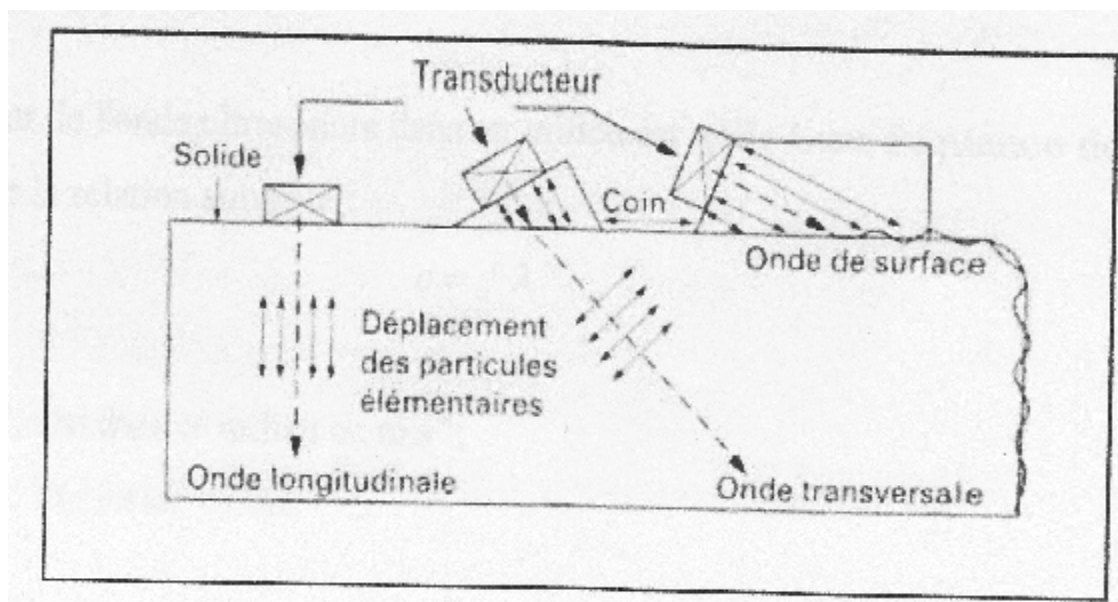


**Figure I.10. Ondes planes**

- on parle d'onde sphérique lorsque l'onde se propage suivant toutes les directions de l'espace et que les surfaces d'ondes sont des sphères concentriques.  
Une onde sphérique est générée par un point ou une sphère dont toute la surface vibre uniformément et l'amplitude de vibration décroît en fonction de la distance à la source.



**Figure I.11. Ondes sphériques**



**Figure I.12. Types d'ondes et modes de propagation**

La figure 12. regroupe les différents types et modes de propagation des ondes ultrasonores dans un solide.

### I.4.2.5. Phénomènes de propagation

En contrôle non destructif, les fréquences usuellement utilisées (1 à 20 MHz) et les dimensions des sources émettrices (palpeurs ultrasonores ayant classiquement un diamètre de 5 à 50 mm de diamètre) permettent d'assimiler des faisceaux ultrasonores à des faisceaux géométriques. Dans ce domaine de longueurs d'onde, les ultrasons se propagent essentiellement en ligne droite selon un faisceau plus ou moins étalé, constitué d'un lobe principal dans lequel la plus grande partie de l'énergie est concentrée

#### I.4.2.5.1. Propagation dans un milieu parfaitement élastique, homogène et isotrope

Un faisceau acoustique de diamètre initial  $D$  peut être considéré, en appliquant le principe d'Huygens, comme la juxtaposition d'une infinité de sources ponctuelles. Les interférences des ondes émises par ces sources créent des zones de maxima et de minima d'intensité.

#### I.4.2.5.2 Propagation dans un milieu hétérogène (poly cristallin, anisotrope)

Dans les matériaux hétérogènes, apparaissent des phénomènes d'atténuation (diminution) des ondes ultrasonores et des vitesses de propagation variables selon les directions.

Le phénomène d'atténuation est surtout lié au caractère poly cristallin du matériau. Il suit assez bien la loi exponentielle [1]:

$$I = I_0 \exp(-ax)$$

Avec :

- $a$  : coefficient d'atténuation,
- $x$  : épaisseur traversée.
- $I$  : Atténuation de l'onde
- $I_0$  : la propagation à l'état initiale

Cette atténuation résulte de plusieurs effets :

Ø l'**absorption** de l'onde par le milieu, proportionnelle à la fréquence, et qui prend en compte les pertes thermomécaniques, les phénomènes magnéto-acoustiques et l'amortissement lié aux dislocations ;

Ø la **diffusion** de l'onde qui, dans un milieu polycristallin, dépend des grains.

Le coefficient  $a$  peut donc s'écrire :

$$a = a_A + a_S$$

avec :

- $a_A$  coefficient d'absorption,
- $a_S$  coefficient de diffusion

### I.4.2.6. Paramètre de l'onde ultrasonique

Afin de présenter une onde ultrasonore, il faut définir quelques paramètres qui la caractérisent

#### **I.4.2.6.1.L'impédance acoustique :**

L'impédance acoustique  $Z$  est une constante qui exprime le comportement du milieu vis-à-vis des ultrasons et qui caractérise la qualité du matériau qui est traversé par les ondes ultrasonores. Elle est définie comme le produit de la densité et de la vitesse de l'onde dans le milieu et elle est donnée par la relation suivante :

$$Z = \rho c$$

où :

$\rho$  : est la densité du milieu en  $\text{Kg.m}^{-3}$

$C$  : est la vitesse du son dans le milieu en  $\text{m.s}^{-1}$

#### **I.4.2.6.2.La longueur de l'onde**

La longueur de l'onde ultrasonore dans un milieu est reliée à une fréquence donnée, elle est donnée par la relation suivante :

$$C = f \cdot \lambda$$

où:

- $C$  : est la vitesse du son dans le milieu en  $\text{m.s}^{-1}$
- $f$  : est la fréquence d'émission en Hz

#### **I.4.2.6.3.La pression d'intensité :**

La pression acoustique varie selon la fréquence de l'onde ultrasonore. L'énergie délivrée dans le milieu dépend de ces variations de pression qui soumettent les particules du milieu à des mouvements vibratoires.

On appelle intensité ultrasonore, l'énergie qui traverse perpendiculairement une unité de surface pendant une unité de temps. Elle est reliée à la pression acoustique par la formule suivante :

$$I = P^2 / 2\rho c$$

où:

-  $C$  : est la variation du son dans le milieu en m/s

-  $\rho$ : est la densité du milieu en  $\text{kg.m}^{-3}$

- **P** : est appelée la pression d'onde acoustique exprimée en  $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$
- **I** : est l'intensité ultrasonore en  $\text{w.m}^{-2}$

#### **I.4.2.7. Emission et réception de l'onde ultrasonore:**

L'intensité d'une onde acoustique qui se propage dans de différents milieux s'atténue le long de son parcours. Plusieurs facteurs contribuent à cette atténuation telle que l'absorption, la réfraction, la réflexion et la diffusion. L'émission d'impulsions ultrasoniques dans un solide produit deux effets : un effet thermique qui dépend de la puissance acoustique de l'onde et qui engendre une propagation de la chaleur dans un milieu et un effet mécanique qui est la transmission, la réflexion et la dispersion.

##### **I.4.2.7.1. Description du faisceau ultrasonore émis :**

On a montré par des théories diverses qu'un faisceau ultrasonore émis par une source plane, circulaire de rayon  $r$  répondant à la condition  $r > \lambda$  ( $r$  est le rayon de la source,  $\lambda$  est la longueur d'onde) comprend deux parties, une zone cylindrique et une zone distale conique ou le faisceau diverge que l'on nomme respectivement la zone de Fresnel et la zone Fraunhofer.

##### **a)Zone initiale : zone de Fresnel**

Elle est définie comme une source circulaire. Toute l'énergie est concentrée dans cette zone cylindrique dont le diamètre est égal à celui de la source sonore. On caractérise un faisceau sonore par la relation suivante (figure 13):

$$d = D_s$$

$$l = D_s^2 / 4\lambda \text{ valable lorsque } D_s > \lambda$$

où :

- **d** : est le diamètre de la zone en m
- **l** : est la longueur de la zone en m
- **D<sub>s</sub>** : est le diamètre de la source en m
- **λ** : est la longueur de l'onde ultrasonore en m

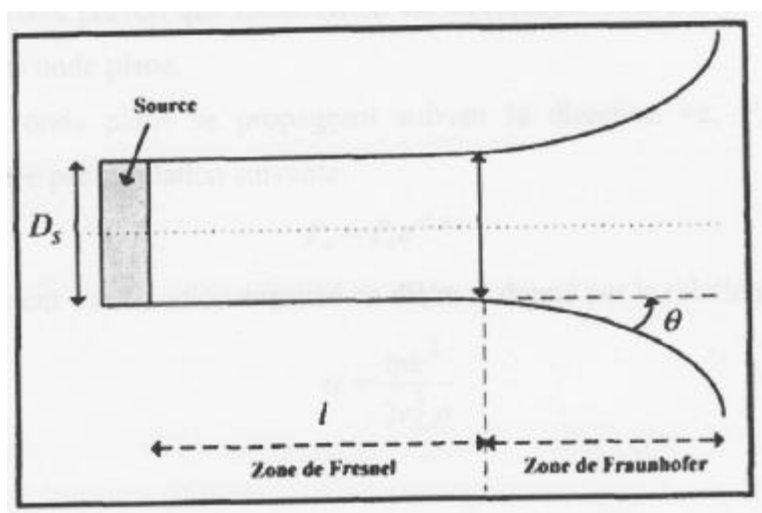
##### **b)Zone distale : zone de Fraunhofer :**

Nommée champ lointain, elle correspond à la partie du faisceau située à une distance de la zone supérieure de  $r^2/\lambda$  (où  $r$  est le rayon de la source et  $\lambda$  est la longueur d'onde). Dans cette zone, le faisceau est plus homogène que dans la zone de Fresnel, il se met à diverger d'un angle  $\theta$  par rapport à l'axe central. L'angle de divergence est proportionnel à la fréquence et au diamètre de la source, elle est exprimée par la relation suivante :

$$\sin \theta = \frac{1.22c}{df} \text{ valable pour } r > \lambda$$

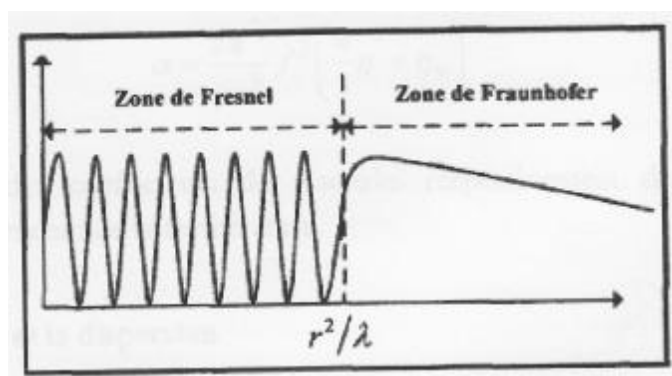
où :

- $\theta$  est l'angle de divergence en degrés
- $d$  est le diamètre de la source en m
- $c$  est la vitesse du son en  $\text{m.s}^{-1}$
- $f$  est la fréquence en Hz



**Figure I. 13 : Géométrie d'un faisceau d'onde ultrasonore**

Comme le montre la figure 13, en s'éloignant de la source ultrasonore, l'intensité de l'onde devient faible car l'énergie se répartit.



**Figure I. 14 : Représentation du champ de Fraunhofer pour un élément piézo-électrique de diamètre  $D_s$ .**

#### **I.4.2.7.2. Atténuation d'une onde ultrasonore:**

L'atténuation d'une onde ultrasonore dépend principalement de la fréquence considérée. Pour la plupart des matériaux, plus la fréquence est haute plus l'atténuation est importante. La théorie prévoit que l'atténuation est directement proportionnelle au carré de la fréquence pour une onde plane.

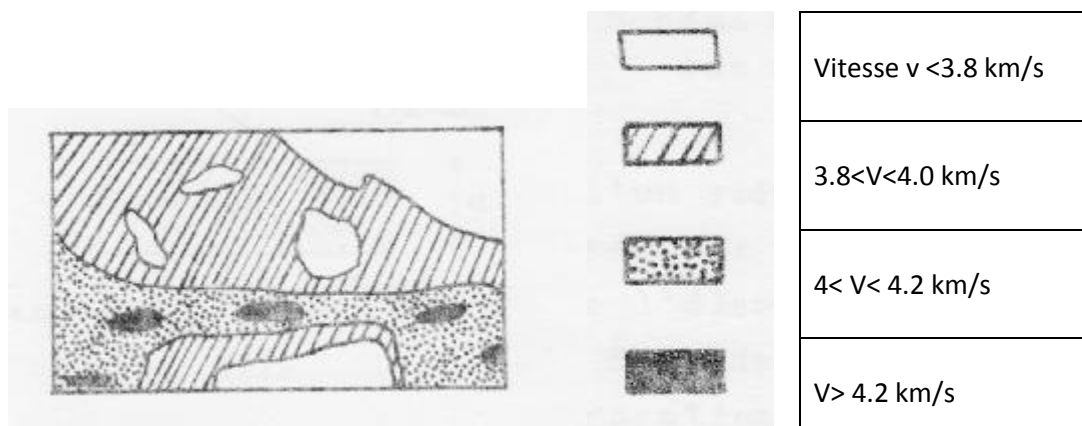
#### **I.4.2.7.3. L'absorption et la dispersion des ondes ultrasonores:**

L'absorption des ondes ultrasonores dans les solides dépend de la structure de ces derniers. Dans les milieux homogènes, l'absorption du son est due essentiellement au coefficient de viscosité et la conductivité thermique. Dans le cas des substances poly cristallines comme la glace, c'est-à-dire substances formées d'un grand nombre de petits cristaux séparés, l'absorption du son est principalement déterminée par les dimensions relatives des cristaux et de la longueur d'onde.

#### **I.4.2.8. Domaine d'application d'un ultrason**

La méthode d'auscultation par ultrason permet de :

- Ø Estimer l'homogénéité du béton et des autres matériaux : la mesure de la vitesse de l'impulsion en des points d'une grille régulière de la surface de structure d'un béton permet d'apprécier l'homogénéité de ce béton.  
La taille de la grille dépend de la taille de la structure et du taux de variabilité rencontré.  
Dans une structure large d'un béton uniforme, le test au coin d'une grille de un mètre de côté est adéquat. Mais un béton variable il faut tester sur une grille plus petite. Pour avoir une image claire des variations, il est nécessaire de faire un diagramme de contour avec les vitesses de l'impulsion obtenues. Sur la figure suivante on présente un exemple des résultats d'auscultation.



**Figure I.15. exemple de la distribution de la vitesse ultrasonique à travers un béton hétérogène**

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 des ondes.

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  $t_1$  à la mesure courante  $t_0$  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 :

$$L = \sqrt{d \left( \frac{t_1}{t_0} \right)^2 - 1}$$

Avec :

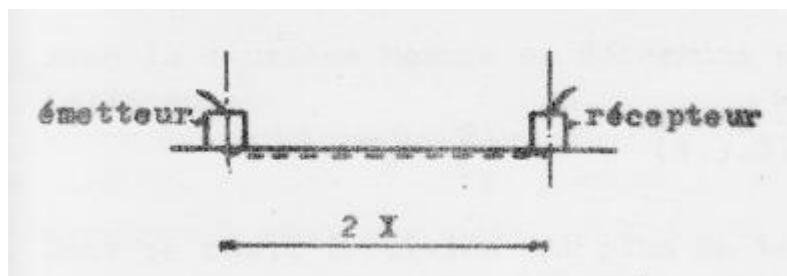
L : dimension du vide

d : distance émetteur – récepteur

$t_1$  : temps de propagation des ondes

$t_0$  : 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 à la surface de l'élément. Pour cela, on utilise la méthode d'auscultation en surface. On effectue une première mesure dans une zone de béton non fissurée.

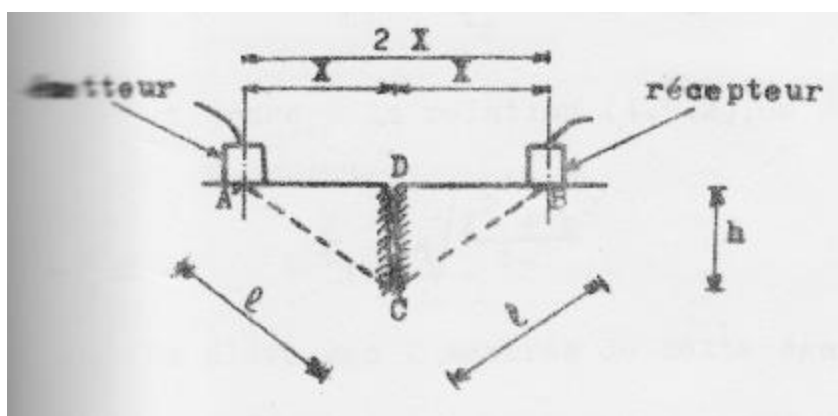


**Figure I.16. mesure de la vitesse du son dans une zone de béton non fissurée**

Après lecture du temps  $t_1$ , on détermine une vitesse de propagation du son  $v_1$  telle

que : 
$$v_1 = \frac{t_1}{2x}$$

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.17. mesure de la vitesse du son dans la zone fissurée.**

Les ondes dans ce cas-là auront parcouru les distances  $2L$ . 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  $v_2$ .

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 précédent ; car l'impulsion a contourné la fissure.

- Ø Déterminer la résistance et observer les changements dans le temps.
- Ø Déterminer les constantes élastique-dynamiques d'un matériau  $E_D$ .

#### **I.4.2.9. Couplage acoustique entre les sondes et le béton ausculté :**

En général, la surface extérieure du béton n'est pas plane. Il existe toujours des rugosités et des malformations. Par contre la surface active des sondes est plane.

Ainsi le signal d'émission n'est transmis que par les points de contact entre la sonde et le

béton. De même le signal de réception n'est pas intercepté par toute la surface active de sonde réceptrice, ce qui conduit à des erreurs sur la mesure. Alors pour assurer la bonne émission et une bonne réception du signal, on interpose une matière plastique (une matière qui épouserait tous les creux de la surface de l'élément) entre la sonde et la surface du béton ; comme matière plastique on peut utiliser de la pâte à modeler, de la graisse, de la vaseline, de la paraffine ...etc. Et c'est cela que l'on appelle le couplage acoustique.

Il est évident que le temps de passage des ultrasons à travers la matière assurant le couplage acoustique doit être pris en considération. Pour cela, il faut faire la calibration en effectuant le couplage entre les sondes et l'éprouvette de contrôle avec la même matière que celle prévue pendant les essais.

#### **I.4.2.10.Facteurs ayant de l'influence sur la valeur de la vitesse du son :**

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

- ✓ L'état de surface du béton : Il est préférable, chaque fois que c'est possible, que les sondes soient en contact avec les surfaces de béton
- ✓ Température du béton : 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 générale, la distance minimale doit être toujours 5 fois plus grande que la dimension du plus gros granulat utilisé.
- ✓ Dimension de l'élément testé : la vitesse de propagation des ondes n'est pas influencée par la taille et la forme de l'échantillon ou de l'élément testé si sa plus petite dimension latérale (dimension perpendiculaire à la trajectoire de l'impulsion) est supérieure à la longueur d'onde des vibrations.  
Si la fréquence de l'impulsion est de 50kHz, la longueur d'onde des vibrations est de 80mm (en vertu de la relation  $\lambda=v/f$ ) ; tel que :

$\lambda$ =longueur d'onde (m)

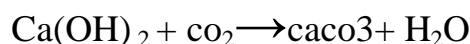
V= vitesse de propagation (m/s)

f= fréquence de vibration (KHz)

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

- ✓ Humidité du béton : elle exerce une petite mais significative influence sur la vitesse de propagation des ondes dans le béton. La vitesse augmente avec l'humidité du béton (car les pores sont remplis 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 de carbonatation provoqué par l'action de l'oxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) de l'atmosphère sur

les chaux libres,  $\text{Ca(OH)}_2$  qui existe dans le béton (dans le ciment et parfois aussi dans les granulats). De ce fait la couche extérieure de l'élément se transforme. Dans sa structure interne, il existe beaucoup de cristaux de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ). La transformation ayant lieu est la suivante :



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

Donc la couche supérieure n'est plus représentative.

Alors pour les bétons âgés, travaillant dans un milieu très riche en  $\text{CO}_2$ , il est recommandé d'éviter la méthode d'auscultation en surface.

Pour les autres méthodes (la meilleure étant la mesure en transparence), il faut que l'épaisseur de l'élément ausculté soit assez grande pour qu'on ait une valeur représentative de la vitesse des ultrasons.

#### **I.4.2.11. Avantages de cet appareil**

Malgré les limitations de cet appareil, la mesure de la vitesse de propagation des ondes sonores présente l'énorme avantage de donner des informations sur l'intérieur d'un élément de béton. L'essai est donc utilisé pour détecter la fissuration (mais pas la fissuration parallèle à l'onde), les vides, les détériorations dues au gel ou au feu et l'uniformité du béton dans des éléments semblables. L'essai peut être utilisé pour suivre les changements microstructuraux dans un élément du béton, par exemple la suite de cycles répétés de gel-dégel.

L'essai peut être aussi utilisé pour évaluer la résistance du béton à très jeune âge, à partir de trois heures et plus, ce qui peut être intéressant dans le domaine de la fabrication du béton ou de décision pour déterminer le moment adéquat des opérations de coffrage, y compris pour les bétons muris à la vapeur.

#### **I.5. Avantages et inconvénients des essais non destructifs :**

##### **a) les avantages :**

Les essais non destructifs (END) représentent des méthodes de reconnaissance couramment appliquées aux structures de bâtiments, ouvrages d'Art ou de Génie civil. Comme leur nom l'indique, il s'agit de mesures n'endommageant pas les constructions. Les avantages de ces essais par rapport aux autres peuvent être résumés comme suit :

- Méthodes non destructives
- 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, dans le cadre de contrôle d'ouvrages neufs ou en construction comme l'état d'ouvrages anciens.
- Evaluation de l'état de dégradation des matériaux, On peut obtenir des informations

dans des domaines inaccessibles aux méthodes classiques,

- il s'agit d'une technique très précieuse-qui peut sauver à la fois temps et argent dans l'évaluation des produits, le dépannage et la recherche car il permet d'économiser des matériaux, du temps et des outils d'essai, par la possibilité de faire les essais sur le matériau dans l'ouvrage même ou sur une seule éprouvette un nombre pratiquement infini de fois, due à la rapidité de l'exécution de ce type d'essais.
- Complémentaires avec les analyses d'échantillons en laboratoire.

### **b)Les inconvénients :**

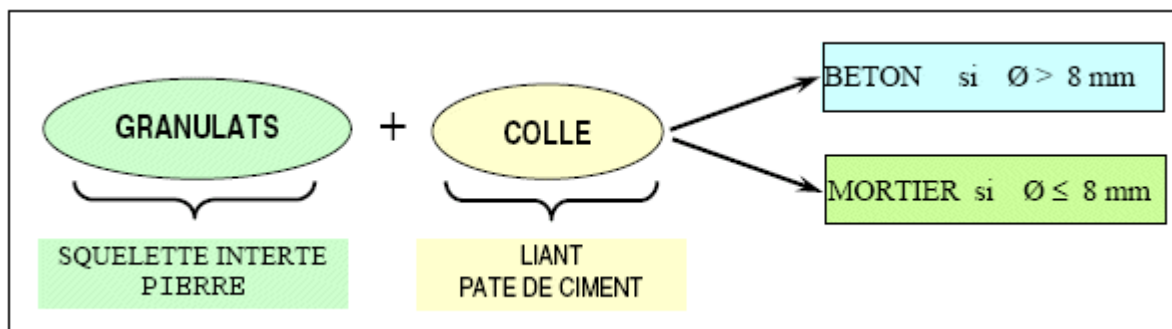
Le principal désavantage des méthodes d'essais non destructives réside dans le fait qu'au stade actuel, elles ne peuvent pas fournir au constructeur des données à 100% précises, c'est pour cela elles sont considérées comme des méthodes comparatives.

### **I.6.Conclusion**

Quoique des travaux visant à améliorer les méthodes d'essais non destructifs se poursuivent, et que les essais comme tels ne sont pas difficiles à effectuer, les données fournies par ces essais ne sont faciles à interpréter, le béton étant un matériau très complexe. Par conséquent, les essais ne sauraient remplacer les essais normalisés de résistance à la compression. Ils fournissent des données sur les ouvrages réels que des essais normaux ne sauraient fournir, et sont d'une grande valeur lors du bétonnage en hiver pour garantir la sécurité et permettre de déterminer à partir de quel moment les coffrages peuvent être enlevés. Ces essais sont aussi excellents pour permettre d'estimer la résistance relative du béton dans les différentes parties d'un même ouvrage. Lorsqu'ils sont correctement effectués, ils constituent un élément très important parmi tous les moyens qui permettent de tester et d'évaluer le béton et les ouvrages en béton.

## II.1. Introduction

Le béton est un mélange de plusieurs composants très différents chacun son importance du plus petit diamètre au plus grand, leurs caractéristiques ont une énorme influence sur celles du béton, elles différencient entre le mortier et le béton comme le montre dans la figure ci-dessous :



Les différents granulats forment le squelette granulaire du mortier ou du béton. Le ciment, l'eau et les adjuvants forment la pâte liante. Lorsqu'il n'y a pas de squelette granulaire, on parle de "pâte de ciment". La pâte est un élément unique et actif du béton enrobant les granulats. L'objectif est de remplir les vides existants entre les grains. La pâte joue le rôle de lubrifiant et de colle.

Dans ce chapitre présentera les constituants du béton, ses différents types, sa formulation et ses caractéristiques.

## II.2. Les constituants des bétons

Comme on l'a déjà mentionné le béton se compose du ciment, des granulats de plusieurs diamètres, de l'eau de gâchage et souvent d'adjuvants.

**II.2.1. Les ciments****A-Définition :**

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui, mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps.

**B-Constituants principaux :**

Les ciments courants ont pour constituant le clinker auquel il peut être ajouté suivants leur type :

- Du calcaire
- Du laitier de haut fourneau
- Des cendres volantes
- Des fines de calcaire
- De la pouzzolane naturelle
- Des schistes calcinés
- Des fumés de cilice

**C-Différents types des ciments courants :**

Il existe plusieurs sortes de désignations propres et des pourcentages respectifs des constituants qu'ils comportent les ciments en fonction de leurs constituants, autre que le gypse, sans ou non ajoutés au clinker. On peut résumer ces différents types de ciment dans le tableau suivant :

désignation	Types de ciment	Teneur en clinker	Teneur en % de l'un des constituants suivant : Laitier-pouzzolane-cendre-calcaire-schiste-fumé de silice	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 où le constituant est des fumés de silice auquel cas la proportion est limitée à 10%	-0à5%
-CPJ-CEM II/B		-65à79%	-de 21à35% avec les restrictions que ci-dessus	-0à5%
-CPZ-CEM IV/A	Ciment pouzzolanique	-65à90%	-10à35% de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumés de silice, ces dernières étant limitées à 10%	-0à5%
-CPZ-CEM IV/B		-45à64%	-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.	-0à5%
-CLC-CEM V/B		-20à39%	-31à50% de chacun des deux constituants comme ci-dessus.	-0à5%

Tableau II.1. Différents types de ciments

### D-Caractéristiques

#### a-Physiques :

- temps de prise est d'en moins 1h30
- le durcissement est rapide, ce qui permet l'obtention de résistance très élevée en quelques heures.
- la masse volumique est de 3,2 à 3,3.
- la tenue à la chaleur est bonne à 500°C avec des granulats courants, mais peut dépasser 1000°C avec les granulats spéciaux.

#### b-Chimiques :

- la tenue en soufre et en chlore sont limitées à 0,1%
- L'hydratation ne donne pas lieu à libération de chaux, d'où un bon comportement à la chaleur et vis-à-vis des milieux agressifs.

#### C-Mécaniques :

Les résistances minimales garanties sont de :

En compression : 30Mpa à 6h pour une limite inférieure nominale de 34Mpa  
50Mpa à 24h pour une limite inférieure nominale de 53Mpa

En flexion : 4,0Mpa à 6h pour une limite inférieure nominale de 4,4Mpa  
5,5Mpa à 24h pour une limite inférieure nominale de 5,8Mpa

### II.2.2-Les granulats

Les granulats appelés aussi agrégats ; sont l'ensemble des grains compris entre 0 et 125mm dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant de recyclage : Le gravier et le sable naturels sont habituellement extraits ou dragués d'une gravière, d'une rivière, d'un lac ou d'un fond marin et les granulats concassés on les produit en broyant de la roche de carrière, des blocs de rochers, des galets ou du gros gravier. Le laitier de haut fourneau broyé et refroidi à l'air sert aussi de granulats fin ou gros. On les trouve sous forme de sable, gravier ou cailloux. Comme les granulats présentent les trois quarts du volume d'un béton, leurs qualités revêtent une grande importance sur ses performances



Figure II.1. Granulat fin (sable).



Figure II.2. Gros granulat : arrondi (gauche) et concassé (droite).

### a-Classification des granulats :

Les granulats qui proviennent des dépôts appelés aussi tout-venant présentent une large plage de dimensions allant du plus petit au plus gros grain ; la distribution de la grosseur des éléments s'appelle la granulométrie. Elle est déterminée par criblage des tamis à mailles carrées dont la dimension intérieure est exprimée en millimètres. Les mailles ont les dimensions suivantes :

0.063- 0.125- 0.25- 0.5 -1 -2 -4 -8 -16 -31.5- 63 -125 ces tamis correspondent à la série de base.

Dans la classification granulaire suivante on peut trouver le terme  $d/D$  qui est réservé aux granulats dont les dimensions s'étalent de  $d$  pour les petits éléments à  $D$  les gros éléments :

Filler  $0/D$  pour  $D < 2\text{mm}$  et ayant en moins 70% de grains passant au tamis de 0.63mm

Sablon  $0/D$  pour  $D < 1\text{mm}$  et ayant en moins 70% de grains passant au tamis de 0.63mm

Sable  $0/D$  lorsque  $D$  est tel que :  $1\text{mm} < D < 6.3\text{mm}$

Graves 0/D lorsque  $D > 6.3\text{mm}$

Gravillon d/D lorsque  $d > 1\text{mm}$  et  $D \leq 125\text{mm}$

Ballast d/D lorsque  $d \geq 25\text{mm}$  et  $D \leq 50\text{mm}$ .

### **b- La forme des granulats :**

La forme des granulats ont une incidence sur la maniabilité du béton la forme la plus souhaitable se rapproche de la sphère ; une mauvaise forme (aiguille, plate) nécessite une quantité d'eau plus élevée et peut provoquer des défauts d'aspects.

La sphéricité est une grandeur relative à la granularité de la surface et de l'angularité des bords et coins d'un gravier. Elle est essentiellement contrôlée par la résistance à la rupture et la résistance à l'abrasion de la roche mère et par le degré d'usure auquel le gravier a été soumis. Dans le cas des granulats concassés, la forme des éléments dépend, non seulement de la nature de la roche d'origine, mais aussi du type de concasseur et du rapport de réduction, c'est-à-dire le rapport de la dimension du matériau introduit dans le concasseur.

On peut traduire la classification des granulats selon leur sphéricité dans le tableau suivant donné par la norme BS 812:

<b>classification</b>	<b>Description</b>	<b>exemple</b>
arrondie	Complètement usée par l'eau	Gravier de rivière ou de plage, sable de désert, de plage, ou de dune
Irrégulière	Naturellement irrégulière ou partiellement usée avec des angles arrondis	Autres graviers : silex
Plate	Matériau dont l'épaisseur est faible par rapport aux autres dimensions	Roche laminée
Angulaire	Bords très bien définis aux intersections de surfaces planes rugueuses	Roche concassées de tous types, les laitiers concassés
Allongée	Matériau habituellement angulaire dont la longueur est beaucoup plus importante que les deux autres dimensions	
Plate et allongée	Matériau qui beaucoup plus long que large et beaucoup plus large qu'épais	

**Tableau II.2-classification des granulats selon leur sphéricité**

La forme d'un granulat est définie par :

- sa longueur L.
- son épaisseur E qui est le plus petit écartement d'un couple de plans tangents parallèle.
- Sa grosseur G.

La forme des granulats est caractérisée par le coefficient d'aplatissement « A » défini par le pourcentage d'éléments tels que  $G/E > 1.58$  ; il est déterminé par un double tamisage, d'abord au travers la série de tamis à mailles carrées utilisée pour l'étude de la granulométrie, puis un second tamisage des refus retenus sur les différents tamis sur une série de grilles à fonte parallèle, le rapport entre les dimensions des tamis et des grilles étant de 1,58.

### **c- Résistance des granulats :**

Il n'est pas possible d'établir une résistance propre de chaque granulat, car il est difficile de soumettre chaque granulat à un essai de résistance au broyage. On obtient cette information par des essais indirects : résistance à l'usure d'un ensemble de granulats, effort nécessaire pour compacter ces derniers et leur performance des granulats dans le béton.

La résistance des granulats dépend de leur composition minéralogique, de leur texture et de leur structure ; si elle est inadéquate, elle limite leur utilisation puisque leurs propriétés physiques influent sur la résistance des bétons ; donc une faible résistance d'un béton peut être due à la faible résistance des constituants des grains ou, bien que les grains soient résistants, au fait qu'ils soient mal cimentés entre eux.

### **II.2.3-Eau de gâchage :**

L'eau est 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 remplit deux fonctions : d'une part elle sert à l'hydratation du ciment et d'autre part elle permet la fluidification de la pâte.

La qualité 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 côté 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.2.4-Adjuvants:**

Les adjuvants sont des produits chimiques autre que le ciment, l'eau et les granulats, incorporés au béton frais en faibles quantités permettent d'améliorer certaines de ses propriétés. Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans le béton. On peut les classer selon leur fonction dans les catégories suivantes :

#### **a-Adjuvants accélérateurs de prise :**

Leurs fonction première est d'accélérer le développement de la résistance au jeune âge du béton, ce qui correspond à la période de durcissement, mais au même temps il accélère la prise du béton. Ils sont utiles lors des bétonnages à temps froid, Ils 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 les résistances prévues pour 28 jours à des âges avancés.

#### **b-Adjuvants retardateurs de prise :**

Adjuvant qui augmente le temps de transition du mélange du béton pour passer de l'état plastique à l'état rigide ; son effet principal est de retarder la prise ou le durcissement.

Une température élevée du béton frais (30 °C) augmente souvent la vitesse de durcissement du béton, ce qui peut compliquer la mise en place et la finition. Une des façons les plus pratiques de contrecarrer cet effet, consiste à réduire la température du béton en refroidissant l'eau de gâchage ou les granulats, car les retardateurs de prise ne diminuent pas la température initiale du béton.

Ces adjuvants sont utiles pour augmenter le temps de prise du béton, mais ils sont aussi souvent utilisés pour tenter de diminuer la perte d'affaissement et augmenter la période d'ouvrabilité, en particulier lorsque la mise en place se fait à des températures élevées. Ils sont aussi utiles dans : les bétonnages pompés, les bétons pour ouvrages de masse, et enfin lors du transport sur une longue distance.

#### **c- Les entraineurs d'air :**

Ce sont des composés d'addition à base de résines, se présentent sous forme de liquides, de sels solubles ou de poudres insolubles à ajouter au moment du malaxage. Ils introduisent volontairement de l'air et agissent en stabilisant les bulles générées lors du malaxage. Ils entraînent des microbulles parfaitement réparties qui servent 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. Ils améliorent 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 ainsi 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 et ce gaz avec l'augmentation de la température provoque des surpressions sur les parois des pores et donc de la fissuration.

#### **d- Les fluidifiants :**

Appelés aussi les réducteurs d'eau servent à réduire la quantité d'eau de gâchage nécessaire pour produire un béton présentant un affaissement donné, à abaisser le rapport eau/ciment, à réduire la quantité de ciment et d'eau. Les réducteurs d'eau réduisent en général la teneur en eau d'environ 5 à 10 %. L'ajout d'un réducteur d'eau sans diminution du dosage en eau peut produire une augmentation significative de l'affaissement et une perte d'affaissement rapide entraîne une diminution de la maniabilité et du délai dont on dispose pour la mise en place du béton.

Les adjuvants réducteurs d'eau augmentent généralement la résistance car le rapport eau/ciment s'en trouve réduit. À teneur en ciment, en air et affaissement égaux, la résistance à 28 jours du béton contenant un adjuvant réducteur d'eau sera de 10 à 25 % plus élevée que dans le cas du béton qui n'en contient pas.

### **II.3. Formulation du béton :**

Le béton est un composite résultant d'un mélange de granulats, d'eau, de ciment, d'adjuvant et des constituants minéraux dont leurs proportions influent sur la qualité du béton. Le choix de ces proportions afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation.

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées et pour cela il existe de nombreuses méthodes qui aboutissent à des dosages volumétriques ou pondéraux. Elles sont dites à **granularité continue** lorsque l'analyse du mélange donne sur le graphique granulométrique, une courbe s'élevant d'une façon continue du plus petit grain du ciment jusqu'au plus gros grain du gravier et les grosseurs intermédiaires sont représentées ; et à **granularité discontinue** lorsque la courbe granulométrique correspondante présente un palier qui équivaut à un manque d'éléments intermédiaires.

#### **II.3.1. Les caractéristiques recherchées :**

En général il n'existe pas de méthode de composition du béton qui soit universellement reconnue comme étant la meilleure, mais on dira qu'une méthode de composition du béton pourra être considérée comme satisfaisante si elle permet de réaliser un béton répondant aux exigences suivantes :

- La dimension D des granulats dépend des dimensions de l'ouvrage et de la disposition du ferrailage.
- La résistance caractéristique exigée qu'on définisse à partir d'une note de calcul.
- L'ouvrabilité : c'est la mise en place du béton pour un bon enrobage.

- Agressivité du milieu ambiant

### **II.3.2.Méthodes de formulation des bétons :**

Toutes les méthodes de formulation suivent les mêmes grandes lignes qui peuvent être résumées comme suit :

- Choix du squelette granulaire (gravillons et sable) : il faut choisir les granulats de façon à ce qu'on trouve un minimum de vide dans le béton. Il faut en conséquence utiliser des granulats de toutes tailles pour que les plus petits éléments viennent combler les vides laissés par les plus gros. 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 ferrailage.
- Choix de la quantité de ciment et donc du volume des granulats ;
- Choix des adjuvants ;
- Recherche par le biais d'essais expérimentaux des dosages en adjuvants.

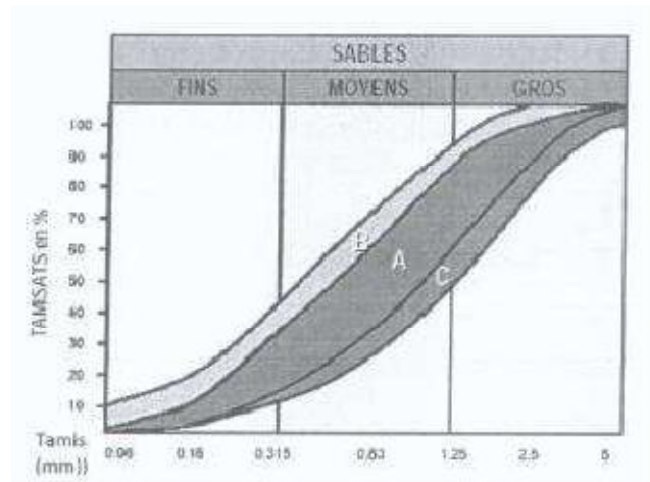
Il existe plusieurs méthodes de formulation, méthode de Bolomey, méthode d'Abrams, de Faury, de Valette, de Joisel... comme on ne peut pas toutes les citer, dans la partie qui suit on rappellera les grandes lignes des méthodes de formulation les plus utilisées.

#### **A- Méthode de Dreux-Goriss**

Cette méthode a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations ayant été testées sur chantier et ayant donné satisfaction. Son utilisation est très simple, elle ne demande que la connaissance des courbes granulométriques des granulats. Les étapes de la méthode sont récapitulées dans les paragraphes suivants.

#### **Choix des granulats**

Le choix du sable à utiliser est d'une grande importance. Par cette méthode, il est conseillé d'utiliser des sables roulés car ils conduisent aux meilleurs résultats du point de vue maniabilité. La courbe granulométrique du sable doit se situer dans le fuseau A des courbes de la Figure 3 suivante, ce qui correspond à un module de finesse (MF) compris entre 2,2 et 2,8.



**Figure II.3: Fuseaux préférentiels pour la granularité des sables pour béton selon la méthode de DreuxGorisse**

Le fuseau B correspond à un sable trop fin, MF de 1,80 à 2,20 (conduit à l'augmentation du dosage en eau).

Le fuseau A correspond au sable préférentiel, MF de 2,20 à 2,80.

Le fuseau C correspond au sable trop grossier, MF de 2,80 à 3,20.

Il est à noter qu'un:

- Un sable grossier (fuseau C) risque d'entraîner une moins bonne maniabilité et une possible ségrégation
- Un sable fin (fuseau B) nécessite une grande quantité d'eau pour humidifier le sable donc améliorer la maniabilité ce qui peut pénaliser la résistance mécanique du béton.

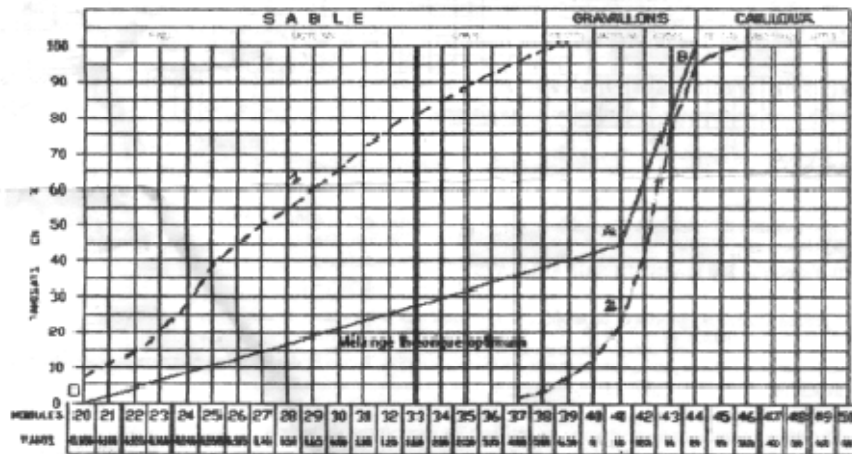
Il est toujours possible de modifier le module de finesse d'un sable par l'adjonction d'un deuxième sable de module de finesse différent. Soit MF le module de finesse visé et MF1 le module de finesse du sable (S1) dont on dispose.

Si MF1 > MF il faut trouver un sable S2 de module de finesse MF2 > MF et les combiner dans les proportions S1 et S2 indiquées ci-dessous :

$$S_1 = \frac{MF - MF_2}{MF_1 - MF_2} \quad S_2 = \frac{MF_1 - MF}{MF_1 - MF_2}$$

### Tracé de la courbe granulométrique de référence

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



**Figure II.4-Courbe de mélange optimum.**

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

### En abscisse :

Si  $D \leq 20$  mm, l'abscisse est  $D/2$ .

Si  $D \geq 20$  mm, l'abscisse est située au milieu du segment délimité par D et par le tamis de 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 :

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

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

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

$K = 6 MF - 15$  Si le sable est roulé ;

$K = 6 MF - 13$  Si le sable est concassé.

Une fois la courbe granulométrique de référence est définie, on trace les courbes granulométriques des différents granulats à utiliser. Les droites joignant le point à 95% (tamisât) d'un granulat au point à 5% du granulat suivant (et ainsi de suite) sont appelées ligne de partage. Les points d'intersections des lignes de partage successives donnent en cumulés les pourcentages correspondants aux différents granulats.

### B-Méthode de Bolomey

Par un mélange de granulats on s'efforce de tracer une courbe granulométrique de référence (Ciment compris) [DRE 98]. La courbe granulométrique cherchée doit être aussi proche que possible de la courbe de référence théorique obtenue par la formule suivante :

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

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

D : est le diamètre du plus gros grain,

A : varie de 8 à 16, sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort.

Cette méthode aboutit théoriquement plus au moins à une granularité continue.

Pour la formulation en terme de résistance mécanique la relation on utilise la relation suivante:

$$R_{cb} = R_{cc} \cdot G \cdot [C / (E + Air) - 0,5]$$

R<sub>cb</sub> : résistance à la compression du béton,

R<sub>cc</sub> : résistance caractéristique à la compression du ciment,

C : ciment,

E : quantité d'eau efficace ( $\leq 200$  litres),

Air : volume d'air (en litre),

G: coefficient granulaire.

### C- Méthode utilisée sur chantier

Sur un chantier où l'on fabrique artisanalement et souvent bien son béton l'on utilise le vieux principe : 2/3 de gros éléments et 1/3 d'éléments fins, soit 800 litres de gravillons et 400 litres de sable par mètre cube de béton pour 350 à 400 kg de ciment. La quantité d'eau de gâchage varie trop souvent au gré du savoir-faire du maçon, la nature de ciment, l'humidité du granulat passant après la consistance du béton à obtenir.

### II.4- Classification des bétons :

Le béton utilisé dans le bâtiment, ainsi que dans les travaux publics comprend plusieurs catégories.

En général le béton peut être classé en trois groupes (norme NF EN 206-1 articles 3.1.7 à 3.1.9), selon sa masse volumique  $\rho$  :

- béton normal :  $\rho$  entre 2 000 et 2 600 kg/m<sup>3</sup> ;
- béton lourd :  $\rho > 2600$  kg/m<sup>3</sup>.
- béton léger :  $\rho$  entre 800 et 2 000 kg/m<sup>3</sup> ;

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

- béton de ciment ;
- béton silicate (Chaux)
- béton de gypse (gypse) ;
- béton asphalte.

Lorsque des fibres (métalliques, synthétiques ou minérales) sont ajoutées, on distingue :

- les bétons renforcés de fibre (BRF) qui sont des bétons "classiques" qui contiennent des macro-fibres (diamètre ~1 mm) dans proportion volumique allant de 0.5% à 2% ;

- les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUHP) qui sont des bétons (BUHP) qui contiennent des microfibrés (diamètre > 50 µm ou un mélange de macro-fibrés et de microfibrés).

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

- Les bétons courants sont les plus utilisés, aussi bien dans le bâtiment qu'en travaux publics. Ils présentent une masse volumique de 2 300 kg/m<sup>3</sup> environ. Ils peuvent être armés ou non, et lorsqu'ils sont très sollicités en flexion, précontraints.
- Les bétons lourds, dont les masses volumiques peuvent atteindre 6 000 kg/m<sup>3</sup> servent, entre autres, pour la protection contre les rayons radioactifs.
- Les bétons de granulats légers, dont la résistance peut être élevée, sont employés dans le bâtiment, pour les plates-formes offshore ou les ponts.

### **II.5.La résistance du béton**

La résistance à la compression du béton est généralement considérée comme sa plus importante propriété bien que, dans de nombreux cas pratiques, d'autres caractéristiques telle la durabilité et la perméabilité peuvent en effet être plus importantes. Néanmoins, la résistance à la compression projette généralement une image globale de la qualité d'un béton puisqu'elle est directement reliée à la structure de la pâte de ciment hydraté. De plus, la résistance du béton est presque invariablement l'élément clé lors de la conception des structures en béton et lors de l'établissement des spécifications de conformité.

L'un des facteurs influençant cette caractéristique est le rapport eau/ciment (E/C).

### **II.6.Rapport eau/ciment (E/C)**

La résistance croit en même temps que le dosage en ciment C et elle décroît 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 :

$$f_{c28} = GC_E(C/E-0.5)$$

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

$C_E$  : classe vrais du ciment à 28 jours

C : dosage en ciment (en kN/m<sup>3</sup>)

E : dosage en eau totale sur matériaux secs (l/m<sup>3</sup>)

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 C.

## **II.7. Principaux avantages et inconvénients du béton :**

### **II.7.1-Avantages du béton:**

- Il est très maniable, peu coûteux, facile à fabriquer et nécessite peu d'entretien
- Des modifications et adaptations du projet sur le chantier sont faciles à effectuer.
- Il devient solide comme de la pierre. Correctement utilisé, il dure des millénaires. Il résiste bien au feu et aux actions mécaniques usuelles.
- Associé à des armatures en acier, il acquiert des propriétés nouvelles qui en font un matériau de construction aux possibilités immenses (béton armé, béton précontraint).
- Les ressources nécessaires pour sa fabrication existent dans de nombreux pays en quantités presque illimitées.
- Il exige peu d'énergie pour sa fabrication.

### **II.7.2-Inconvénients du béton:**

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

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

## **II.8.Conclusion:**

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

### **III.1.Introduction**

L'objectif de cette étude est d'évaluer le béton au cours de son vieillissement avec une méthode non destructive en utilisant un ultrason, puis comparer les résistances trouvées avec celles obtenues par un essai d'écrasement qui est considéré comme un essai destructif.

On ne peut utiliser ce contrôle sans confectionner le béton par nous-mêmes afin de connaître toutes ses caractéristiques et les conditions initiales de ce béton. Dans ce chapitre, on a décrit les méthodes d'essais utilisées, les conditions de fabrication et de conservation des éprouvettes ainsi les étapes de contrôle par un ultrason et une presse de compression.

### **III.2.Confection des bétons**

#### **III.2.1.Formule utilisée**

Il existe plusieurs méthodes de confectionner un bon béton avec de bonnes caractéristiques, mais l'obtention d'un béton performant n'est pas le but de ce projet, mais d'évaluer un béton courant utilisé sur chantier. La méthode la plus utilisée est celle d'1/3 de sable et 2/3 de gravier.

Dans notre projet on a voulu approcher le cas réel des bétons utilisés, c'est pour cette raison qu'on a choisi la même composition que celle utilisée sur chantier

#### **Proportions des constituants utilisés pour un mètre cube de béton:**

Le calcul des proportions de chaque constituant se fera en ayant comme donnée :

- ü le rapport  $E/C=0.5$
- ü un dosage en ciment ordinaire pour tous les bétons de  $350\text{kg}/\text{m}^3$

#### **Description des matériaux utilisés :**

- ü sable 0/3 concassé de carrière
- ü gravier 3/8 concassé de carrière
- ü gravier 8/15 concassé de carrière
- ü ciment CPJa une résistance nominale  $42.5\text{MPa}$
- ü eau de gâchage c'est de l'eau potable

On cherche les masses des quantités dont on a besoin en kg :

-Dans  $1\text{m}^3$  de béton on a  $C= 350 \text{ kg}$

- $E/C=0.5$

$$\Rightarrow E= 0.5 \times 350 = 175\text{kg}$$

-La masse de chaque granulat =  $[1000-(175+350)]/3=158.33\text{kg}$

Type de constituant	Quantité utilisée en kg
eau	175
ciment	350
Sable 0/3	158.33
Gravier 3/8	158.33
Gravier 8/15	158.33

**Tableau III.1. Quantités des constituants utilisés**

### **III.2.2. Préparation de la gâchée**

La préparation des matériels et des matériaux nécessaires est la première étape indispensable avant tout essai expérimental.

- Pour uniformiser les essais, nous avons décidé de travailler avec des granulats secs. Il a donc fallu laver tous les granulats puis les mettre en étuve pendant 24 heures. 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 prévus pour les éprouvettes de béton, les moules sont bien lavés puis huilés pour faciliter le décoffrage
- Préparer les pesées des matériaux à utiliser (gravillons, ciment, l'eau)
- Séparer l'eau en deux quantités (10% pour l'humidification des granulats et 90% le reste d'eau prévue pour le béton)
- Vérifier que le malaxeur est bien nettoyé et en bon état

Après cette préparation, vient l'étape du malaxage :

- Humidifier tous les matériels à utiliser ;
- Introduire le sable et le gravillon dans le malaxeur ;
- Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec pendant 30s ;
- Laisser le mélange en marche et ajouter progressivement l'eau de pré-humidification et le mélanger pendant 30s ;
- Laisser reposer pendant 1mn30s ;
- Ajouter le ciment et mélanger pendant 60s ;
- Ajouter le reste d'eau en mélangeant pendant 1mn30s.
- Remplir les moules d'éprouvettes en vibrant avec la table vibrante pendant 15 à 20 s

### **III.2.3. Confection des éprouvettes**

Comme on fait plusieurs essais à différents âges (7, 14, 21, 28, et 45 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 apparaissent sur la surface du béton.

Ces éprouvettes sont démoulées 24h après leur coulage, on mentionne directement sur leurs surfaces supérieures la date de confection.



**Figure III.1. Marquage d'éprouvette**

### **III.2.4. Conservation des éprouvettes**

Après le décoffrage et le marquage, les éprouvettes sont immédiatement immergées dans un bac rempli d'eau à température ambiante (20°C), cette conservation évite la perte d'eau et garantit le processus d'hydratation du ciment.

Les éprouvettes sont alors conservées dans l'eau jusqu'à la veille de l'essai ; on les fait sortir puis les met à l'air libre (dans le laboratoire) pour qu'elles acquièrent l'état normal d'humidité et comme on a plusieurs essais en plusieurs jours, on fait sortir seulement le nombre à caractériser, elles sont ensuite auscultées puis écrasées chaque série à son âge prévue.



**Figure III.2. Eprouvettes dans l'eau**

### III.3.Présentation des essais

#### III.3.1.Essai par ultrason

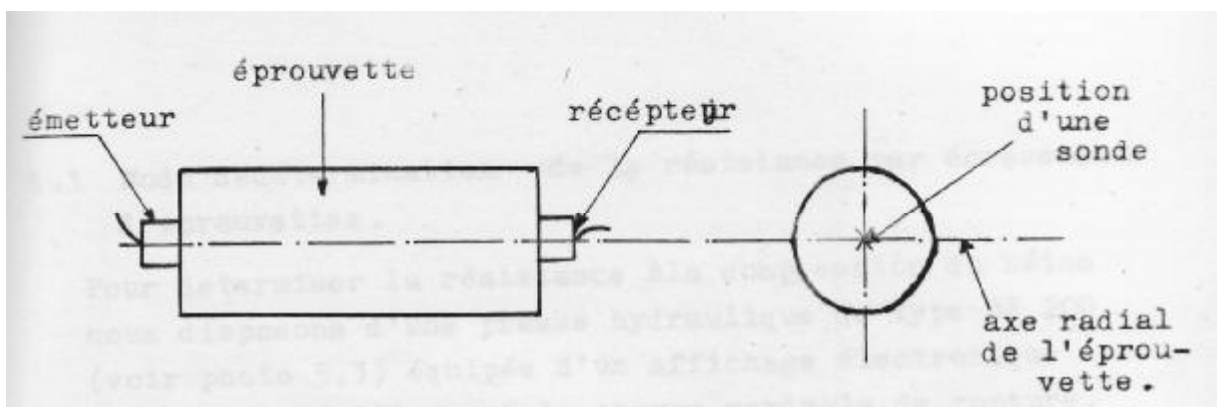
Afin de caractériser un béton, on utilise un ultrason qui est un appareil non destructif basé sur la mesure de la vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques à travers le béton.



**Figure III.3. Equipement de l'ultrason utilisé**

#### Préparation des éprouvettes

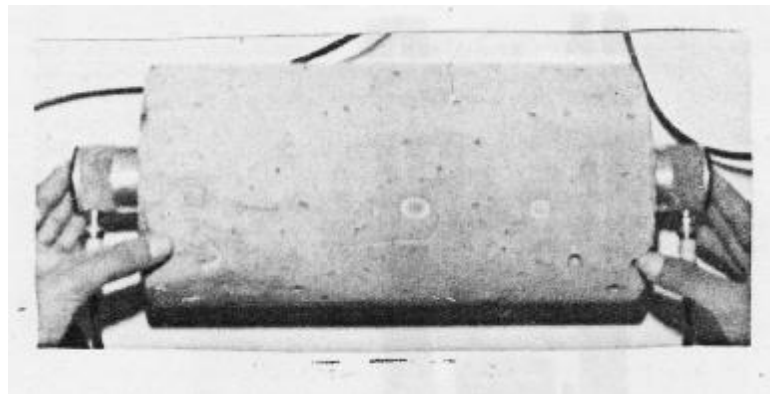
Il est nécessaire d'effectuer certaines opérations préliminaires sur les éprouvettes pour les préparer à l'auscultation ; à savoir le calibrage de l'appareil et la préparation des points de mesure. Cette dernière opération consiste à marquer les points d'essais afin de centrer les transducteurs dessus (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 la paraffine et par la suite de la graisse).



**Figure III.4. Disposition des transducteurs sur l'éprouvette d'essai**

### ▼ Description de la procédure

- Mettre les piles en place
- Placer les câbles qui relient les transducteurs et 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  $55\mu\text{s}$  (temps indiqué sur le barreau), sinon on tourne la vis de calibration jusqu'à ce qu'il le soit.
- Mettre du gel de paraffine pour qui est un meilleur contact entre les transducteurs et le béton
- Placer les transducteurs aux milieux des deux faces opposées de l'éprouvette.
- Lire le temps de passage sur l'écran.



**Figure III.5. Utilisation d'un ultrason**

Les mesures des vitesses des ultrasons 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 Controls), comprenant un transducteur de transmission et un transducteur de réception de 54KHz de fréquence. Un type de transducteur de diamètre  $D=49.5\text{mm}$ . 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 de 160mm.

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

### ▼ Calcul de la vitesse de propagation

On produit un train d'impulsion de vibration au moyen d'un émetteur appliqué sur l'une des faces de l'élément à contrôler. Après avoir franchie une longueur de parcours ( $L$ ) dans le béton, l'impulsion de vibration est convertie en un signal électrique à l'aide d'un récepteur et la base de temps électronique permet de mesurer le temps de propagation des ondes ultrasonores ( $T$ )

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

$$V=L/T$$

### ▼ 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.

Il a deux méthodes pour calculer la résistance à partir d'une vitesse trouvée par un ultrason :

1-Théoriquement en utilisant les deux lois citées précédemment au chapitre I .4 qui sont les suivantes :

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

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

Avec :

$\mu=0.15$  (béton à haute résistance) ; (résultat trouvé dans l'abaque appartenant à l'ultrason utilisé)

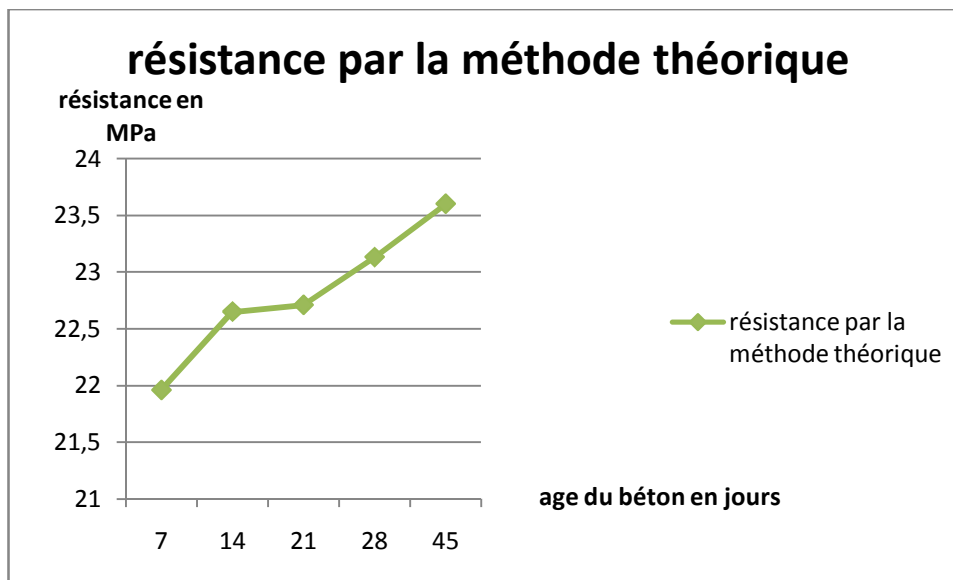
$\rho= 2500\text{kg/m}^3$

On a résumé les résultats trouvés dans le tableau suivant :

N° de l'éprouvette	Age du béton en jours	Vitesse en [m/s]	$E_d$ $\times 10^4$	Résistance en [Mpa]	Résistance moyenne en [Mpa]
1	7	3809.5	3.43	22.09	21.96
2	7	3720.9	3.27	21.80	
3	7	3778.04	3.38	22.00	
4	14	3936	3.67	22.53	22.65
5	14	4010	3.8	22.77	
6	14	3975.1	3.74	22.66	
7	21	4020.8	3.83	22.83	22.71
8	21	3854	3.52	22.26	
9	21	4086.84	3.95	23.05	
10	28	4145.1	4.07	23.28	23.13
11	28	4107.8	3.99	23.13	
12	28	4071.24	3.92	22.99	
13	45	4150.4	4.08	23.3	23.6
14	45	4255.32	4.29	23.7	
15	45	4283.8	4.34	23.8	

**Tableau III..Résistance à la compression du béton obtenue à partir de la loi  $\sigma=16.7\exp (Ed/122500)$**

Ces résultats sont traduits dans le graphe suivant :



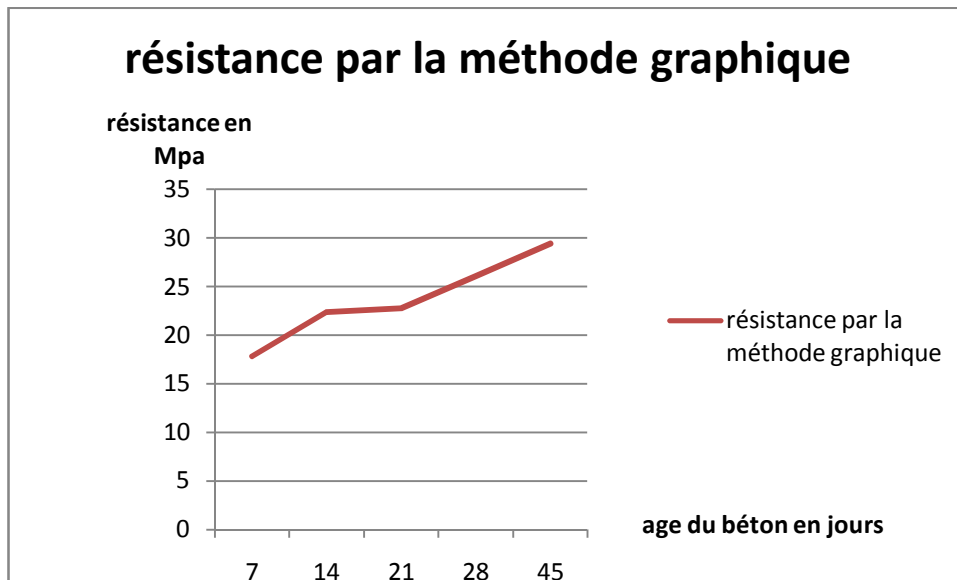
**Figure III.6. Courbe de résistance à la compression du béton trouvée à partir de la loi  $\sigma=16.7\exp (Ed/122500)$  en fonction de l'âge du béton**

2- graphiquement en utilisant le graphe montré précédemment dans le chapitre I.4 sachant que les granulats utilisés sont plutôt de nature calcaire. Les résultats trouvés sont résumés dans le tableau suivant :

N° de l'éprouvette	Age du béton	Base mesure en [m]	Temps de passage [ $\mu$ s]	Vitesse [m/s]	Résistance [Mpa]	Résistance Moyenne [Mpa]
1	7	0.32	84	3809.50	18.10	17.85
2	7	0.32	86	3720.90	17.27	
3	7	0.32	84.7	3778.04	18.18	
4	14	0.32	81.3	3936.00	21.80	22.41
5	14	0.32	79.8	4010.00	22.73	
6	14	0.32	80.5	3975.10	22.70	
7	21	0.32	79.58	4020.80	23.00	22.77
8	21	0.32	84.1	3854.00	19.90	
9	21	0.32	78.3	4086.84	25.40	
10	28	0.32	77.2	4145.10	27.30	26.08
11	28	0.32	77.9	4107.80	26.40	
12	28	0.32	78.6	4071.24	24.54	
13	45	0.32	77.1	4150.40	27.30	29.40
14	45	0.32	75.2	4255.32	30.00	
15	45	0.32	74.7	4283.80	30.90	

**Tableau III.3. Résistance à la compression du béton obtenue à partir du diagramme résistance en fonction de la vitesse des ondes.**

Le graphe suivant traduira les résultats mentionnés dans le tableau précédent

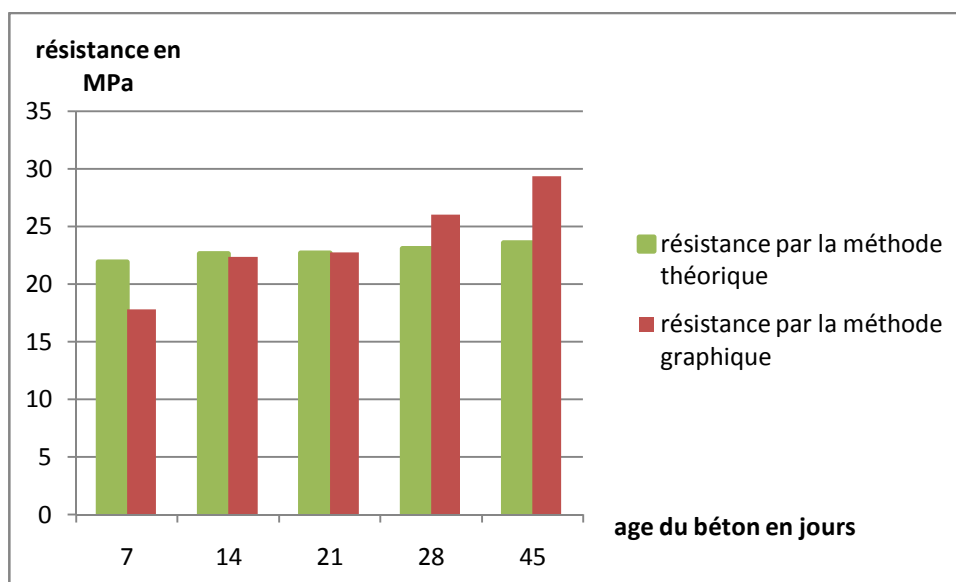


**Figure III.7. Courbe de résistance à la compression du béton obtenue à partir du diagramme de résistance en fonction de la vitesse des ondes.**

✓ **Evolution des résistances trouvées par ultrason en fonction de l'âge du béton :**

On remarque que la vitesse de propagation augmente avec l'augmentation de la résistance du béton.

On peut faire une petite comparaison entre la résistance théorique et celle graphique, on a résumé ces résistances dans l'historique suivant :



**Figure III.8. Histogramme de comparaison entre les résistances obtenues par ultrason en utilisant la méthode théorique et la méthode graphique**

L'évolution de la résistance dans les premiers jours croît d'une façon presque linéaire, cette augmentation est très significative, car la plus grande résistance est développée au jeune âge du béton

- Pour la résistance théorique, elle augmente progressivement d'une façon très lente, elle passe de 21.96MPa à 7 jours et atteint 23.6MPa à 45 jours.
- L'augmentation de la résistance graphique n'est pas aussi forte au début, elle est de 17.85MPa à 7 jours, après le 14<sup>ème</sup> jour, elle se stabilise dans l'intervalle [22.41- 26.08] MPa ; en fin elle atteint une résistance maximale de 29.40MPa au 45<sup>ème</sup> jour.
- Le phénomène de l'augmentation de la résistance avec le temps résulte du durcissement du béton.

Après comparaison faite entre les deux résistances trouvées par ultrason calculées différemment, on trouve qu'avant le 14<sup>e</sup> jour les plus grandes résistances sont celles obtenues par la méthode théorique. Après le 14<sup>e</sup> jour, celles obtenues par la méthode graphique deviennent meilleures ; comme ces dernières sont plus étalées et reflètent mieux la réalité donc on peut dire qu'elles sont plus cohérentes.

### III.3.2. Essai de compression

La résistance en compression à différents jours 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

Le but de cet essai est de déterminer la résistance à la compression des bétons à différents âges (à 7, 14, 21, 28, 45 jours)

La presse utilisée est d'une capacité maximale de 2000KN. La résistance en compression a été évaluée suivant la norme NF P18-406, les essais ont été réalisés avec une vitesse 0.5Mpa/s



**Figure III.9.une presse de compression**

Après essuyage de la paraffine appliquée auparavant sur les deux faces de l'éprouvette, elle est mise entre les deux plateaux de la presse ; on règle le contact face supérieur – plateau supérieur et la vitesse de chargement sur la cadence mètre de la presse ; puis on enregistre la valeur de la force correspondante à la rupture.



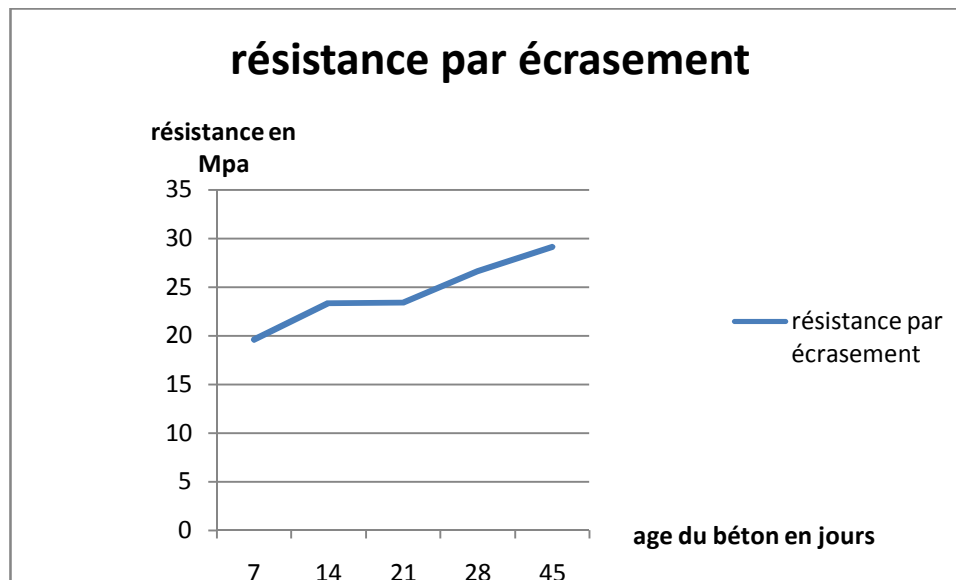
**FigureIII.10.Eprouvette fissurée**

Les résultats de cet essai sont résumés dans le tableau suivant :

N° de l'éprouvette	Age du béton En [jours]	Intensité de la charge en [kN]	Résistance en [N/mm <sup>2</sup> ]	Résistance moyenne en [ N/mm <sup>2</sup> ]
1	7	412.5	20.51	19.63
2	7	353.5	17.58	
3	7	418.0	20.79	
4	14	439.0	21.83	23.36
5	14	482.5	24.00	
6	14	487.8	24.26	
7	21	478.2	23.78	23.45
8	21	406.2	20.20	
9	21	526.4	26.18	
10	28	544.6	27.08	26.65
11	28	530.0	26.37	
12	28	532.5	26.50	
13	45	568.8	28.29	29.13
14	45	579.0	28.80	
15	45	607.7	30.22	

**Tableau III.4. Résultats de l'essai par écrasement à la presse**

On peut traduire ces résultats par un graphe récapitulatif



**Figure III.11. Résistances par écrasement de l'éprouvette**

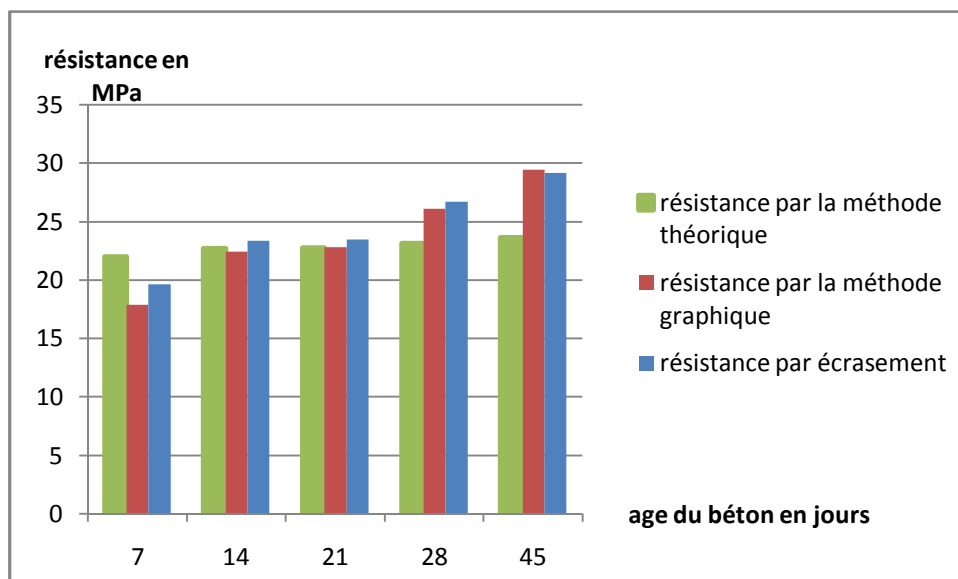
### Analyse du graphe :

Le graphe précédent est une courbe croissante décrivant la progression de la résistance du béton en fonction de son âge. On remarque que la résistance augmente au fur et à mesure que le béton vieillit de 19.63MPa à 7 jours jusqu'à 29.13MPa à 45 jours.

A 7 jours l'allure est presque linéaire, car le béton développe le maximum de résistance puis à partir de là, elle augmente avec le temps mais avec une vitesse qui est beaucoup moindre que celle d'avant.

### III.4.Comparaison entre la résistance par écrasement et la résistance par ultrason

On peut assembler toutes les résistances moyennes trouvées par l'ultrason et par écrasement dans un histogramme de résistance en fonction de l'âge du béton pour mieux voir la différence entre elles.



**Figure III.12. Histogramme de comparaison entre les trois résistances trouvées**

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 trouvé que les résistances théoriques sont plus importantes avant le 7<sup>e</sup> jour. Au-delà, elles deviennent plus faibles que celles de l'écrasement tout au long de l'évolution de l'âge du béton ; par contre avec la méthode graphique, les résistances sont légèrement plus faibles pour les 28 premiers jours, ensuite c'est le cas contraire elles deviennent plus importantes.

### § Estimation de l'erreur

Pour calculer l'erreur faite par l'ultrason par les deux méthodes de calcul, on peut utiliser la loi suivante :

$$DR = [(R_0 - R) / R_0] \times 100$$

Avec :

**DR** : erreur commise par l'ultrason

**R<sub>0</sub>** : résistance par écrasement

**R** : résistance par ultrason

Age du béton (jours)	Résistance théoriques ultrasoniques	Résistances graphiques ultrasoniques	Résistances par écrasement (R <sub>0</sub> )	Erreur pour les résistances théoriques en %	Erreur pour les résistances graphiques en %
7	21.96	17.85	19.63	10.61	9.07
14	22.65	22.41	23.36	3.04	4.07
21	22.71	22.77	23.45	3.15	2.9
28	23.13	26.08	26.65	13.20	2.13
45	23.60	29.40	29.13	18.98	0.92

**Tableau III.5 : Estimation de l'erreur entre les résistances ultrasoniques et celles de compression**

On remarque que les erreurs faites par l'ultrason théoriquement sont variables, elles évoluent en fonction de l'âge du béton, l'erreur minimum est de 3.04% et elles arrivent jusqu'à 18.98% ; alors que celles trouvées par la méthode graphique sont plus proches que celles par écrasement l'erreur est comprise entre 0.92% et 9.07% c'est-à-dire d'après nos résultats elles ne dépassent pas 10% comme marge d'erreur.

Donc on peut dire que les résistances ultrasoniques graphiques sont plus fiables comparant à celles théoriques.

### **III.5. Comparaison des résistances trouvées par un ultrason et celles trouvées par un scléromètre**

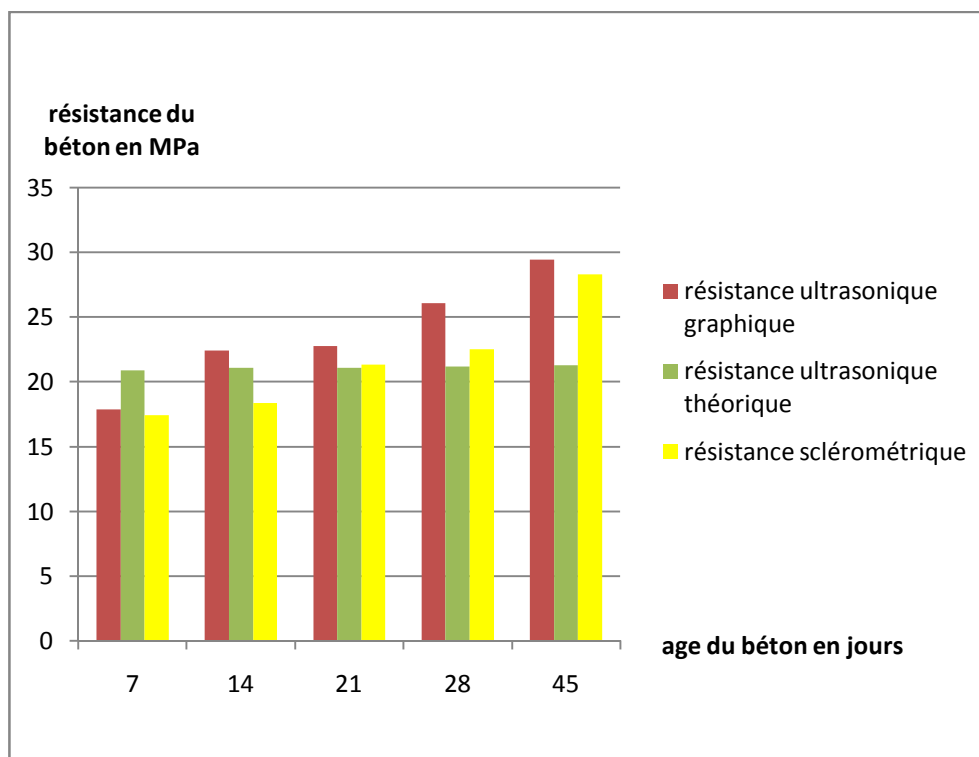
Des essais de caractérisation de ces mêmes bétons sont réalisés par un scléromètre Schmidt type N (modèle 58-CO 181/N) sur des éprouvettes à l'état sec. la détermination de ces résistances sclérométriques se fait par un abaque collé au scléromètre utilisé, on choisit la courbe des résistances en fonction de l'indice sclérométrique où l'inclinaison est de -90°

On effectue une comparaison entre les résistances sclérométriques R<sub>1</sub> et ultrasoniques en calculant la marge d'erreur. Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau suivant :

Age du béton	Résistance théoriques ultrasoniques	Résistances graphiques ultrasoniques	Résistances sclérométriques ( $R_1$ )	Erreur pour les résistances théoriques en %	Erreur pour les résistances graphiques en %
7	21.96	17.85	17.42	20.67	2.41
14	22.65	22.41	18.36	18.94	18.07
21	22.71	22.77	21.33	6.08	6.45
28	23.13	26.08	22.52	2.64	13.65
45	23.6	29.40	28.30	16.61	3.74

**Tableau III.6 : Estimation de l'erreur entre les résistances ultrasoniques et sclérométriques**

Les résultats de la comparaison trouvés sont traduits par les histogrammes suivants :



**Figure III.13. Histogramme de comparaison entre les résistances ultrasoniques et sclérométriques**

- **Remarque et interprétation**

Toutes les résistances trouvées ont la même allure de croissance en fonction du temps:

-A 7 jours la résistance la plus importante est celle trouvée par l'ultrason théoriquement puis, la résistance graphique prend le relai.

- Les résistances ultrasoniques graphiques sont plus grandes que celles trouvées par le scléromètre durant toute la période analysée. On estime la différence entre les deux par la marge d'erreur qui est comprise entre 2.41% et 18.07%.

- Les résistances ultrasoniques théoriques sont plus élevées que celles sclérométriques avant le 14<sup>ème</sup> jour. Au-delà c'est le contraire qui se passe, les résistances par le scléromètre deviennent plus importantes. La marge d'erreur est assez grande elle est comprise entre 2.64% et 20.67%.

- On peut dire que l'importance qu'a les résistances ultrasoniques par rapport à celles sclérométrique revient à une très simple raison c'est que le scléromètre fait une caractérisation superficielle dépendante de certains paramètres qui influent d'une manière sensible sur la valeur de la résistance du béton comme l'humidité l'état de la surface (qui peut être mou, normal, ou sec), alors qu'avec l'ultrason, la caractérisation est profonde, elle se fait par la méthode de mesure par transparence, et donc même si la couche superficielle subit le phénomène de carbonatation l'erreur commise sur la mesure est négligeable puisque on a testé le béton en bloc ; c'est-à-dire qu'on aura des informations sur toute l'épaisseur du béton.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, on s'est intéressé à l'influence du temps sur la caractérisation du béton avec un ultrason, et d'après les résultats trouvés au laboratoire de béton, on a constaté que la résistance du béton augmente en fonction de vitesse de propagation.

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

## Conclusion générale et recommandations

La caractérisation du béton par la mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores est la méthode non destructive la plus recommandée, elle présente beaucoup d'avantages par rapport aux autres méthodes, elle permet de repérer les zones à faible caractéristiques mécaniques et détecter la présence des fissures ainsi l'homogénéité, Elle permet aussi de suivre l'évolution de la qualité du béton dans le temps, Avec des étalonnages appropriés cette méthode permet également la détermination des constantes élasto-dynamiques.

Il faut savoir que la résistance obtenue par cet appareil est juste une approche de la vraie résistance et l'ingénieur doit trancher sur la qualité du béton selon l'ordre de grandeur des résultats et éviter une approche trop mathématique du problème.

Il existe plusieurs aléas influençant sur la corrélation entre la vitesse de propagation et la résistance à la compression.

En pratique, la plage moyenne de la vitesse des ultrasons pour un béton est de 4000 à 4300 m/s.

Les recommandations qu'on peut faire sont les suivantes :

- Opérer sur un nombre conséquent d'éprouvettes. En général, dans les laboratoires de recherche on travaille sur un nombre supérieur ou égal à 3
- Recourir systématiquement au surfacage des éprouvettes avant l'essai d'auscultation dynamique et l'écrasement.
- Pour appliquer la méthode d'auscultation dynamique (ultrason) sur un béton dont la composition et la qualité des granulats sont différents de celles du béton utilisé pendant les essais, il est recommandé de faire un étalonnage au préalable.
- Pour utiliser la méthode d'auscultation dynamique de la meilleure manière possible, il est recommandé de bien respecter les prescriptions décrites au chapitre III.
- L'auscultation dynamique tel qu'il est conçu aujourd'hui est un appareil simple et relativement peu coûteux. Il permet en un temps assez réduit d'effectuer des essais en des points divers d'un ouvrage donné.

## Références bibliographiques

- [1]-A.TOUKAL. « Influences des taux de chargement sur la caractérisation non destructives du béton par ultrason » thèse de magistère de l'université de BOUMERDES (2009/2010).
- [2]- Abdelhalim BENOUIS, Nacera KHALDI, et Yacine CHERAIT du Laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH), Université de Guelma. « Comparaison des résistances des bétons déterminées par écrasement et par scléromètre : influence de la composition ». (Reçu le 15 Novembre 2006, accepte le 22 Aout 2007 pp [305-314].
- [3]- ADAM M. Neville traduit par le CRIB. « propriétés des bétons » Par Edition Eyrolles - 2000- p806 p
- [4]- B. Clément (DLA). « Les contrôles à postériori » dans Construire des Ouvrages d'Art en Béton du centre d'étude technique et l'équipement par Cotita centre 19-20 janvier. Pp [3-15].
- [5]- Benjamin DURAND. « Pérennisation des ouvrages en génie civil dans des problématiques liées à l'eau : diagnostic, réparations et confortement » Projet de fin d'études Juin 2010 INSA DE STRASBOURG – SPECIALITE GENIE CIVIL. Pp [9 ,12]
- [6]- B.Piwakowski, P. Safinowski, A.Kosecki, Groupe Electronique Acoustique, Ecole Centrale de Lille. « Contrôle non destructif du béton par ultrason à l'aide d'un dispositif automatisé » pp [1]
- [7]- « Boualem REZKALLAH ». « Essais non destructifs des matériaux et élément en pierres naturelles ». Thèse d'ingénieur faite à l'institut national d'enseignement supérieur en génie civil de TIZI-OUZOU. Promotion 1986. Pp [16 ; 22 ; 33]
- [8]- école polytechnique fédérale de Lausanne département des matériaux, laboratoire de matériaux de construction. « Essai sur béton durci et d'un élément en béton armé ». Pp [3, 6, 7]
- [9]- « Georges DREUX et Jean FESTA ». « Nouveau guide du béton et de ses constitutions » Huitième édition -2002- p405
- [10]- Jacques DUMONT-FILLON Ingénieur de l'École Centrale de Paris Ancien Directeur Technique de l'Institut de Recherches de la Sidérurgie (IRSID). « Contrôle non destructif (CND) » pp [33,34]
- [11]- IDRES. Rabah. « Essai non destructif : application de l'auscultation dynamique pour la détermination de la résistance du béton par vitesse du son ». Thèse d'ingénieur à l'institut national d'enseignement supérieur de génie civil Tizi-Ouzou. Janvier 1987.
- [12]- « le centrent d'information sur les ciments et ses constituants ». «Le ciment et ces applications». Nouvelle édition 2001
- [13]- « Le CETE méditerranée » ». « Le contrôle non destructif des structures en béton ». 15 juin 2004 pp [4, 5, 7]

- [14]- « M. Castaings ». « Simulation du contrôle non destructif par ultrason » par Université Bordeaux 1 – Laboratoire de Mécanique Physique– France –pp [1,8]
- [15]- « Mathieu CHEKROUN ». « Caractérisation mécanique des premiers centimètres du béton avec ondes de surface » thèse de doctorat présentée à l'école centrale de Nantes le 03 décembre 2008. Pp [1-17]
- [16]-« Maurice WANIN Ingénieur civil des Mines de Nancy Ancien chef du département Mesure-Contrôle-Automatique-IRSID (USINOR) ». « Évaluation non destructive de la qualité des matériaux » Partie 1 du Techniques de l'Ingénieur M4 130 pp [15-17]
- [17]-«N.BOUDJEMIA ». « Caractéristiques mécaniques du béton auto plaçant » .Thèse d'ingénieur en génie civil à l'université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Année 2009/2010 MAT 74
- [18]-« O. NAIT-RABAH ». « Application du scléromètre Schmidt pour la détermination non destructive de la *résistance du béton dans les éléments d'une construction en béton* » thèse d'ingénieur faite à l'institut national d'enseignement supérieur de génie civil de Tizi-Ouzou de la promotion juin 1985. Pp [12 ; 19 ; 32]
- [19]-« R.Dupain et J.C.Saint-arroman ». « Granulats, sols, ciments et bétons » caractéristiques des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire par 4<sup>ème</sup> édition Casteilla. 2009. Pp [165-199]
- [20]-« R.LANCHON ». « Granulats, bétons, sols » cours de laboratoire 2. Édition Casteilla 1993. Pp [39-91]
- [21]-« S. Jean Hamilius et s. René Konen » du grand-duché de Luxembourg ministère des travaux publics. « Clauses Techniques des bétons » par– Luxembourg2010.
- [22]-« Steven H. Kosmatka, Beatrix Kirchhoff, William C. Panarese Normand F. Macleod et Richard J. McGrath ». « Dosage et contrôle des mélanges de béton ». Septième édition canadienne. Année d'édition 2005[73-162].
- [23]-« Sylvain LOPEZ-LRA/DROA ». « Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton ». Centre d'étude technique de l'équipement méditerranée – 5 février 2009. Pp [7-12].
- [24]-« V. GARNIER, J. F. CHAIX, M. ROSSAT, C. PAYAN, G. CORNELOUP ». «Caractérisation Non Destructive des bétons par propagation d'ondes ultrasonores ». 19<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique Marseille, 24-28 août 2009. LCND, Université de la Méditerranée, Aix Pce, France,p [1,4]